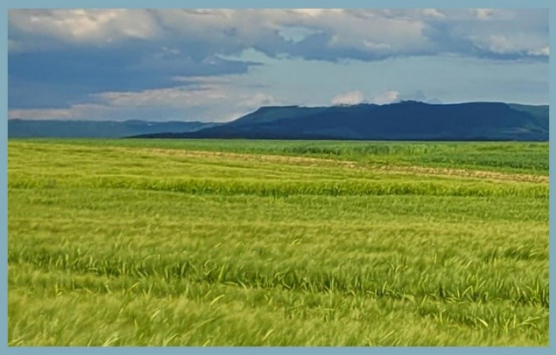
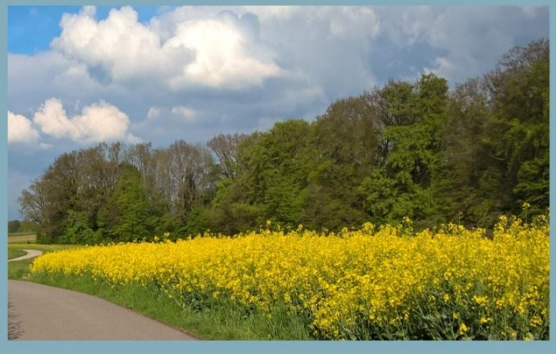
Regionaler Selbstversorgungsgrad für die Sektoren Nahrung, Energie und Rohstoffe

Kennwertbasierte Untersuchungen am Beispiel der Landkreise Bodenseekreis, Esslingen, Konstanz, Ravensburg, Sigmaringen

Sven Simon











Titelbild, Abbildung und Fotos: Sven Simon

hcu HafenCity Universität Hamburg

REGIONALER SELBSTVERSORGUNGSGRAD FÜR DIE SEKTOREN NAHRUNG, ENERGIE UND ROHSTOFFE - KENNWERTBASIERTE UNTERSUCHUNGEN AM BEISPIEL DER LANDKREISE BODENSEEKREIS, ESSLINGEN, KONSTANZ, RAVENSBURG UND SIGMARINGEN

Vorgelegt im Promotionsausschuss der
HafenCity Universität Hamburg

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

Dissertation

von
Sven Simon

aus
Nürtingen

2021

Erstgutachter:
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Dickhaut (HafenCity Universität Hamburg)

Zweitgutachter:
Prof. Dr.-Ing. Thomas Stark (Hochschule Konstanz)

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Menschen danken, die mich während der Anfertigung meiner Dissertation unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Professor Dr. Thomas Stark und Professor Dr. Wolfgang Dickhaut für die hervorragende Betreuung, die enorme Unterstützung und die ausgezeichnete Kooperation während der gesamten Arbeit, die mir diese Arbeit erst ermöglicht haben.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei all jenen Menschen und Unternehmen bedanken, die es mir als Experten aus den verschiedensten Fachgebieten mit hilfreichen Auskünften ermöglicht haben, die nötige Datenbasis für die Berechnung sektorenübergreifender Autonomiepotenziale zu erstellen.

Außerdem danke ich all jenen, die mich im Rahmen meines Studiums mit Anregungen, produktiven Gesprächen oder lieben Worten begleitet haben.

Meiner Familie und meinen Freunden danke ich für ihre Geduld und Ermutigungen während der Arbeit an dieser Dissertation.

Inhalt

Seite

Inhalt ..... **I**

Abkürzungsverzeichnis ..... **XI**

Abbildungsverzeichnis ..... **XIV**

Tabellenverzeichnis ..... **XXIII**

Abstract ..... **XLVII**

Kurzfassung ..... **XLVIII**

1 Einführung **1**

1.1 Herausforderungen und Ziele 1

1.2 Ausgangsthesen und -fragen zu Flächeneffizienz und Autonomie 4

2 Methodik **7**

2.1 Definition der Kennwerte 7

2.2 Erstellung der Datenbasis 11

2.3 Berechnung der Bedarfe 14

2.4 Berechnung der Flächeninanspruchnahme (Flächeneffizienzkennwerte) 14

2.5 Berechnung der Autonomiegrade 17

3 Auswahl und Kenndaten der Landkreise **19**

3.1.1 Auswahl der Landkreise 19

3.1.2 Bevölkerung und Bevölkerungsdichte 20

3.1.3 Flächenpotenziale 20

4 Zusammenfassung der Bedarfe **22**

4.1 Nahrungsbedarf 22

4.2 Energiebedarf 25

4.3 Rohstoffbedarf 26

4.4 Unsicherheiten der Bedarfsschätzung 28

5 Zusammenfassung der flächenbezogenen Kennwerte **29**

5.1 Zusammenfassung der Ertragspotenziale 30

5.1.1 Nahrung 30

5.1.2 Energie 32

5.1.3 Rohstoffe 34

5.1.4 Unsicherheiten Ertragskennwerte 36

5.2 Der Flächenfußabdruck der Produkte - Zusammenfassung der Flächenbedarfe je nach Koppelproduktnutzung ... 37
5.2.1 Sektor Nahrung ... 37
5.2.1.1 Flächeninanspruchnahme durch Nahrungsmittel ... 37
5.2.2 Sektor Energie ... 49
5.2.2.1 Energiebilanz ... 49
5.2.2.2 Netto-Energieerträge ... 50
5.2.2.3 Flächenkonkurrenz zur Lebensmittelproduktion und nachhaltige Flächenverfügbarkeit bis 2050 ... 53
5.2.3 Sektor Rohstoffe ... 55
5.2.3.1 Wohnungsbau ... 55
5.2.3.2 Konsumgüter ... 59
5.3 Zusammenfassung wichtiger Umweltkennwerte ... 72
5.3.1 Biodiversität ... 72
5.3.2 Schutz von Böden, Gewässern und Grundwasser ... 75
5.3.3 Wasserhaushalt ... 76
5.3.4 Zwischenfazit zur Ökologie ... 78

6 Mögliche Autonomiegrade in den Landkreisen ... 79
6.1 Angenommene Entwicklung der Verbrauchsgewohnheiten 2017 – 2035 ... 80
6.1.1 Veränderung von Ernährung und Konsum ... 80
6.1.2 Veränderung der Beheizungsstruktur der Wohnungen ... 80
6.1.3 Veränderung des Heizenergiebedarfs für das Wohnen ... 81
6.1.4 Veränderung des Treibstoffverbrauchs ... 82
6.1.5 Veränderung der Pkw-Motorisierung ... 82
6.1.6 Elektrifizierung von Bussen und Nutzfahrzeugen ... 83
6.1.7 Veränderung der Jahresfahrleistungen ... 84
6.1.8 Veränderung des Energieverbrauchs des Sektors GHD und der öffentlichen Verbraucher ... 85
6.1.9 Veränderung des Energieverbrauchs im Sektor Industrie ... 86
6.1.10 Veränderung des Endenergieverbrauchs insgesamt ... 87
6.2 Anteile an der Flächennutzung ... 88
6.2.1 Futterbau ... 89
6.2.2 Streuobst ... 90
6.2.3 Obstanlagen ... 90
6.2.4 Energiepflanzen ... 91
6.2.5 Rohstoffpflanzen ... 92
6.2.6 Agroforst ... 94
6.2.7 Grünland ... 94
6.3 Beschreibung des Bestands und Definition der Szenarien ... 95

6.3.1 Der Status Quo ... 95
6.3.2 Szenarien mit der Priorität Nahrungsversorgung ... 96
6.3.2.1 Steigerung der Nutzungseffizienz ... 97
6.3.2.2 Veränderung der Flächenbelegung ... 97
6.3.2.3 Vergleich der Ernährungsweisen ... 97
6.3.2.4 Vergleich von Systemen/Technologien zur Steigerung der Flächeneffizienz ... 98
6.3.3 Szenarien mit der Priorität Energie ... 100
6.3.4 Szenarien mit der Priorität Rohstofferzeugung ... 103
6.3.5 Vergleich der Landkreise ... 105
6.4 Ergebnisse der Autonomiepotenzialberechnungen ... 106
6.4.1 Potenzielle Nahrungsautonomie ... 106
6.4.1.1 Flächenbedarf der Ernährung ... 106
6.4.1.2 Kalorien- und flächenbezogene Nahrungsautonomie-potenziale am Beispiel des Landkreises Konstanz ... 112
6.4.2 Potenzielle Energieautonomie ... 134
6.4.2.1 Energiebedarf des Landkreises Konstanz ... 134
6.4.2.2 Flächenbedarf der Energieversorgung im Landkreis Konstanz ... 135
6.4.2.3 Energiebedarfsbezogenes Autonomiepotenzial im Kreis Konstanz ... 138
6.4.2.4 Flächenbezogene Energieautonomiepotenziale im Kreis Konstanz ... 145
6.4.2.5 Bedeutung des Energiesektors für das flächenbezogene Gesamtautonomiepotenzial ... 148
6.4.2.6 Zusammenfassung und Diskussion ... 149
6.4.3 Potenzielle Rohstoffautonomie ... 152
6.4.3.1 Produktbezogene Rohstoffautonomiepotenziale ... 152
6.4.3.2 Flächenbezogene Rohstoffautonomie ... 159
6.4.4 Ökologische Kennwerte ... 164
6.4.4.1 Potenzielle Insektenweidefläche ... 164
6.4.4.2 Bodenschutz durch Mehrjährigkeit ... 174
6.4.4.3 Wasserhaushalt: Transpiration der Energie- und Rohstoffpflanzen ... 175
6.4.4.4 Düngemittelbedarf von Energie- und Rohstoffpflanzen ... 176
6.4.4.5 Anwendungen chemischer Pflanzenschutzmittel ... 177
6.4.4.6 Mögliche Veränderungen der Umweltkennwerte 2017 bis 2035 (Szenario) ... 179
6.4.5 Vergleich der Landkreise im Status Quo und im „Szenario 2035“ ... 182
6.4.5.1 Eigenschaften der Landkreise ... 182
6.4.5.2 Autonomiepotenziale der Landkreise im Vergleich ... 187

6.4.5.3 Produktbezogene Autonomiepotenziale der Landkreise in den Sektoren Nahrung, Energie und Rohstoffe 187
6.4.5.4 Flächenbezogene Autonomiepotenziale 196
6.4.5.5 Transportaufwand 2017 und 2035 205
6.4.5.6 Auswirkungen urbaner Nahrungsproduktion auf die flächenbezogenen Autonomiegrade 206
6.4.5.7 Auswirkungen von Anpassungen der Flächennutzung am Beispiel des Grünlandes 207
6.4.5.8 Auswirkungen eines Verzichts auf Energiepflanzen zugunsten der Rohstoffproduktion 208
6.4.5.9 Auswirkungen von Power-to-X-Technologien auf die Autonomiepotenziale 211
6.4.5.10 Flächenbedarf pro Einwohner 2017 und 2035 212
6.4.5.11 Optimierungspotenziale des Szenarios 2035 216

7 Diskussion der Ergebnisse 223
7.1 Mögliche Autonomiegrade 223
7.2 Möglichkeit der ökologischen Selbstversorgung 225
7.3 Flächeneffizienz als Entscheidungskriterium 226
7.4 Maßnahmen zur Effizienzsteigerung 228
7.5 Urbane Landwirtschaft 230
7.6 Stoffliche Nutzung oder Energiegewinnung? 230
7.7 Flächennutzungskonkurrenzen 232
7.8 Ökologie 233
7.9 Unsicherheiten 235
7.10 Datenlücken und Forschungsbedarf 236

8 Zusammenfassung 240

9 Fazit 247

Anhang I: Dokumentation der Datenermittlung 250

10 Nahrung 250
10.1 Bedarf an Nahrungsmitteln 250
10.2 Verbrauch und Verzehr 252
10.3 Ernährungsweisen 257
10.4 Verluste und Verschwendung 263
10.5 Landwirtschaftliche Produktion und Flächenbedarfe 268
10.5.1 Pflanzliche Nahrungsmittel 269
10.5.1.1 Getreide und Hackfrüchte 269
10.5.1.2 Ölfrüchte und Eiweißpflanzen 277
10.5.1.3 Gemüse und Salate 298

10.5.1.4 Obst ... 308
10.5.1.5 Nüsse ... 318
10.5.1.6 Wein ... 321
10.5.1.7 Arznei-, Gewürz- und Aromapflanzen ... 321
10.5.2 Tierische Lebensmittel ... 322
10.5.2.1 Flächenverfügbarkeit ... 322
10.5.2.2 Ökologische Vor- und Nachteile der Grünlandnutzung ... 323
10.5.2.3 Milchvieh- und Rinderhaltung ... 328
10.5.2.4 Schweinehaltung ... 377
10.5.2.5 Geflügelhaltung ... 387
10.5.3 Agroforstsysteme ... 401
10.5.3.1 Erträge der Baumpflanzung ... 402
10.6 Urbane Landwirtschaft ... 408
10.6.1 Arten der Urbanen Landwirtschaft ... 408
10.6.1.1 Offene Systeme ... 408
10.6.1.2 Geschlossene Systeme ... 408
10.6.2 Flächenpotenziale ... 409
10.6.2.1 Städtische Freiflächenpotenziale ... 409
10.6.2.2 Dachflächenpotenziale ... 410
10.6.2.3 Flächenpotenziale für Vertikale Landwirtschaft ... 411
10.6.3 Ertragspotenziale ... 412
10.6.3.1 Offene Produktionssysteme ... 412
10.6.3.2 Geschlossene Produktionssysteme ... 414
10.6.4 Bilanzierung Aquaponik ... 416
10.6.4.1 Fischfutterbedarf der Aquaponik ... 417
10.6.4.2 Zusammensetzung der Futtermittel ... 417
10.6.4.3 Anbauflächenbedarf der Fischfutterproduktion ... 419
10.6.4.4 Flächenbedarf zur Produktion von Fischfleisch ... 420
10.6.4.5 Energiebedarf der Fischfutterproduktion ... 422
10.6.4.6 Energiebedarf von Gewächshäusern ... 430
10.6.4.7 Flächenbedarf der Energieversorgung von Gewächshäusern ... 430
10.6.4.8 Energiebedarf Aquaponik ... 432
10.6.5 Bilanzierung Vertical Farming ... 434
10.6.5.1 Flächenbedarf Vertical Farming ... 434
10.6.6 Urbane Landwirtschaft und herkömmliche Landwirtschaft im Vergleich 436
10.6.6.1 Herkömmliche Landwirtschaft ... 436
10.6.6.2 Aquaponik ... 438
10.6.6.3 Vertical Farming ... 441

10.6.6.4 Dachfarm mit reiner Gemüseproduktion 442
10.6.6.5 Flächeneffizienz und Ackerflächenbedarf urbaner Landwirtschaft im Vergleich 443
10.7 Unsicherheiten und Datenlücken 446

11 Rohstoffe 450
11.1 Rohstoffproduktion 450
11.1.1 Forstwirtschaft 450
11.1.1.1 Grundlagen und Rahmenbedingungen 450
11.1.1.2 Forstwirtschaftliche Rohstoffe 457
11.1.1.3 Forstwirtschaftliche Ertragspotenziale nach Art der Rohstoffe 462
11.1.2 Landwirtschaft 464
11.1.2.1 Rahmenbedingungen 464
11.1.2.2 Grünland 465
11.1.2.3 Ackerbau 465
11.1.2.4 Kurzumtriebsplantagen (KUP) 466
11.1.3 Urbane Produktion 468
11.1.3.1 Algen 468
11.2 Rohstoffbedarf und Ertragspotenziale nach Produktgruppen 470
11.2.1 Baustoffe 470
11.2.1.1 Baustoffe aus Holz 470
11.2.1.2 Alternative Baustoffe 504
11.2.2 Dämmstoffe 511
11.2.2.1 Verbrauch 511
11.2.2.2 Bedarf 512
11.2.2.3 Rohstoffe 512
11.2.2.4 Herstellung 513
11.2.2.5 Koppelprodukte 515
11.2.2.6 Nutzungskonkurrenzen 517
11.2.2.7 Erträge von Rohstoffpflanzen der Dämmstoffproduktion 517
11.2.2.8 Ertragspotenziale im Vergleich 521
11.2.2.9 Flächenbedarf pro Kubikmeter Dämmstoff 522
11.2.2.10 Flächeninanspruchnahme nach Bedarf 527
11.2.2.11 Ökologische Kennwerte von Dämmstoffen 528
11.2.3 Möbel 531
11.2.3.1 Verbrauch 531
11.2.3.2 Stoffstrom und Materialeffizienz der Möbelindustrie 532
11.2.3.3 Koppelprodukte 533
11.2.3.4 Nutzungskonkurrenzen 533

11.2.3.5 Ertragspotenziale 534
11.2.3.6 Auswirkungen der Koppelproduktnutzung und der gewählten Verwendung auf die Flächeneffizienz 539
11.2.3.7 Bedarf und Flächeninanspruchnahme 541
11.2.4 Fahrzeuge 547
11.2.4.1 Pkw 547
11.2.4.2 Fahrräder 548
11.2.5 Textilien 550
11.2.5.1 Verbrauch 550
11.2.5.2 Rohstoffe 552
11.2.5.3 Herstellung 553
11.2.5.4 Koppelprodukte 555
11.2.5.5 Nutzungskonkurrenzen 556
11.2.5.6 Hektarerträge 556
11.2.5.7 Ertragspotenziale und Flächenbedarf im Vergleich 559
11.2.5.8 Bedarf und Flächeninanspruchnahme 564
11.2.6 Papier 567
11.2.6.1 Verbrauch 567
11.2.6.2 Rohstoffe 567
11.2.6.3 Herstellung 568
11.2.6.4 Produktion und Rohstoffverbrauch 569
11.2.6.5 Hektarerträge 570
11.2.6.6 Koppelprodukte 572
11.2.6.7 Ertragspotenziale und Flächeninanspruchnahme im Vergleich 574
11.2.6.8 Flächeninanspruchnahme nach Bedarf 576
11.2.7 Kunststoffe 578
11.2.7.1 Verbrauch 578
11.2.7.2 Rohstoffe 579
11.2.7.3 Produktion und Rohstoffverbrauch 580
11.2.7.4 Hektarerträge 580
11.2.7.5 Koppelprodukte von Biokunststoffen 588
11.2.7.6 Ertragspotenziale im Vergleich 588
11.2.7.7 Recycling und Kaskadennutzung von Biokunststoffen 592
11.2.7.8 Flächeninanspruchnahme 593
11.2.8 Oleochemie 594
11.2.8.1 Verbrauch 595
11.2.8.2 Rohstoffe 596
11.2.8.3 Verwendungen 597

11.2.8.4 Koppelprodukte ... 597
11.2.8.5 Hektarerträge ... 597
11.2.8.6 Flächeninanspruchnahme ... 601
11.2.9 Ethanol ... 602
11.2.9.1 Verbrauch ... 602
11.2.9.2 Rohstoffe ... 602
11.2.9.3 Koppelprodukte ... 603
11.2.9.4 Hektarerträge ... 604
11.2.9.5 Ertragspotenziale im Vergleich ... 605
11.2.9.6 Flächeninanspruchnahme ... 608
11.3 Unsicherheiten und Datenlücken ... 608

12 Energie ... 611
12.1 Energiebedarf ... 611
12.1.1 Endenergiebedarf nach Sektoren und Energieträgern ... 611
12.1.2 Datenbasis in den Landkreisen ... 613
12.1.3 Bedarfskennwerte Verkehr und Wohnen ... 614
12.1.3.1 Treibstoffverbrauch von Verkehrsmitteln ... 614
12.1.3.2 Energieverbrauch des Wohnens ... 616
12.2 Flächenpotenziale erneuerbarer Energien ... 617
12.2.1 Windenergie ... 617
12.2.2 Solarenergie ... 617
12.2.2.1 Energiebilanz der Solarenergie ... 617
12.2.2.2 Photovoltaik im Siedlungsbereich ... 618
12.2.2.3 Photovoltaik auf Freiflächen ... 620
12.2.2.4 Agrophotovoltaik ... 622
12.2.2.5 Ertragspotenzial Solarthermie ... 624
12.2.3 Agrothermiesysteme (Photovoltaik und Erdwärme) ... 624
12.2.4 Bioenergie ... 627
12.2.4.1 Flächenkonkurrenz zur Lebensmittelproduktion ... 628
12.2.4.2 Erträge und Energiebilanzen landwirtschaftlicher Energiepflanzen ... 634
12.2.4.3 Forstwirtschaftlich erzeugte Energieträger ... 653
12.3 Unsicherheiten und Datenlücken ... 655

13 Umweltaspekte ... 657
13.1 Umweltauswirkungen von Windenergie- und Solaranlagen ... 658
13.1.1 Windenergieanlagen ... 658
13.1.2 Photovoltaikanlagen ... 659
13.2 Umweltauswirkungen von Energie- und Rohstoffpflanzen ... 660

13.2.1 Vielfalt der Kulturpflanzen ... 662
13.2.2 Lebensraumqualität ... 663
13.2.3 Insektenweide ... 664
13.2.3.1 Insektenweidepotenzial ... 664
13.2.3.2 Exkurs: Fasernessel und Ökologie ... 667
13.2.3.3 Mögliche Pollen- und Honigerträge ... 668
13.2.4 Schadstoffeintrag ... 669
13.2.5 Düngemittelaufwand ... 673
13.2.6 Störungen ... 676
13.2.7 Erosionsschutz ... 679
13.2.8 Wasserhaushalt ... 683
13.2.8.1 Einflüsse des Energie- und Rohstoffpflanzenanbaus ... 683
13.2.8.2 Wasserbedarf von Energiepflanzen ... 686
13.2.8.3 Wassereffizienz von Energiepflanzen ... 690
13.2.8.4 Wasserbedarf von Rohstoffpflanzen ... 692
13.2.8.5 Zusammenfassung ... 693
13.2.9 Treibhausgasemissionen ... 694
13.2.9.1 Relevanz und Datengrundlage ... 694
13.2.9.2 Anbaubedingte Treibhausgasemissionen ... 695
13.2.9.3 CO_2-Minderung durch Kohlenstoffanreicherung im Boden ... 699
13.2.9.4 Unsicherheiten und Forschungsbedarf ... 701
13.2.9.5 Treibhausgasbilanz biogener Energieträger ... 702
13.2.9.6 CO_2-Absorptionspotenzial von Rohstoffpflanzen ... 711
13.2.9.7 Treibhausgasemissionen durch importbedingte Landnutzungsänderungen ... 712
13.3 Unsicherheiten und Datenlücken ... 713

14 Basisdaten der Landkreise ... 714
14.1 Bevölkerung ... 714
14.2 Stromverbrauch der Privathaushalte ... 714
14.3 Pkw-Neuzulassungen ... 715
14.4 Jahresfahrleistungen ... 716
14.5 Wohnfläche ... 716
14.6 Abfallaufkommen ... 717
14.7 Freiflächen ... 718
14.8 Flächenverbrauch ... 719
14.9 Baumbestand ... 719
14.10 Obstanlagennutzung ... 720
14.11 Viehbestände ... 721

14.12 Solarpotenzial der Gebäude 721
14.13 Windenergie 722
14.14 Erzeugungskapazität flächenunabhängiger Energien 722
14.15 Energieverbrauch der Industrie 723
14.16 Energieverbrauch GHD und öffentliche Liegenschaften 723
14.17 Beheizungsstruktur 724
14.18 Endenergiebedarf 725

Anhang II. Weitere Berechnungsgrundlagen 727

14.19 Nahrung / Ernährung 727
14.19.1 Bevölkerungsstruktur in Deutschland und Baden-Württemberg nach Altersgruppen 727
14.19.2 PAL-Wert 727
14.19.3 Getreideerträge in Afrika 730
14.19.4 Baumobstanbau 731
14.19.5 Milch und Milchprodukte 732
14.19.6 Futterbau 734
14.19.7 Schweinemast 735
14.20 Landwirtschaft 736
14.20.1 Energiebedarf der Landwirtschaft 736
14.20.2 Flächeneffizienzberechnungen 740
14.20.3 Aufkommen an Gülle und Mist 746
14.20.4 Durchschnittserträge von Energie- und Rohstoffpflanzen weltweit 746
14.21 Rohstoffproduktion 748
14.21.1 Holzbau 748
14.21.2 Dämmstoffe 753
14.21.3 Möbel 754
14.21.4 Möbelnutzungsdauer 756
14.21.5 Faserproduktion 756
14.22 Energieverbrauch und Energieerzeugung 757
14.22.1 Treibstoffverbrauch von Kfz 757
14.22.2 Wärmepumpen 758
14.22.3 Energiepflanzen und Wasserhaushalt 759
14.22.4 CO_2-Emissionsfaktoren nach Energieträgern 760
14.23 Beschreibung der Szenarien 761
14.23.1 Szenarien mit der Priorität Ernährung 761

Quellenverzeichnis 763

Abkürzungsverzeichnis

AF	Agroforst
AGES	Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit
APV	Agrophotovoltaik
AqP	Aquaponik
atro	absolut trocken
Ber.	Eigene Berechnung
BHS	Beheizungsstruktur (Gebäude)
BHZP	Bundeshybridzuchtprogramm
CO_2-Äq.	CO_2-Äquivalent(e)
DGE	Deutsche Gesellschaft für Ernährung
DPV	Dachflächenphotovoltaik
dt	Dezitonne
Ea	Einwohner und Jahr
EA	Energieanlage
ECM	Energiekorrigierte Milch (Energy Corrected Milk)
EE	Erneuerbare Energie(n)
EFH	Einfamilienhaus
Efm	Erntefestmeter
EM	Eimasse
EP	Energiepflanze(n)
EROI	Energy Return on Investment
EW	Einwohner
FF	Futterfläche
FM	Frischmasse
FPV	Freiflächenphotovoltaik
GDS	Gebäudedämmstandard
GF	Grundfläche
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistung
GJ	Gigajoule
GVE	Großvieheinheiten
GWh	Gigawattstunde
GWP	Treibhauspotenzial (Global Warming Potential)
ha	Hektar
HF	Haltungsform
iLUC	indirect Land Use Change
JFL	Jahresfahrleistung
k. A.	Keine Angabe(n)

kcal	Kilokalorien
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KF	Kraftfutter
KFR	Kraftfutterreduziert
KP	Koppelprodukt(e)
KUP	Kurzumtriebsplantagen
kWh	Kilowattstunde
l	Liter
LG	Lebendgewicht
LKR	Landkreis
LNF	Landwirtschaftliche Nutzfläche
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge
m³	Kubikmeter
Mcal	Megakalorien (1.000 kcal)
MFH	Mehrfamilienhaus
MJ	Megajoule
MJ ME	Megajoule Metabolische Energie
MWh	Megawattstunde
Nl/kg oTM	Norm-Liter pro kg organische Trockenmasse
Nm^3/t FM	Norm-Kubikmeter pro Tonne Frischmasse
NZ	Nachzucht
⌀	Durchschnitt
oTM	Organische Trockenmasse
PAL	Physical Activity Level
PEMK	Produktionseinheit Mutterkuh
P-F-V	Pflanzen-Fisch-Verhältnis
Pkm	Personenkilometer
Pkw	Personenkraftwagen
PP	Prozentpunkte
PV	Photovoltaik
PVA	Photovoltaikanlage(n)
RF	Restfeuchte
SG	Schlachtgewicht
SH	Stallhaltung
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
t	Tonne
THG	Treibhausgas
TJ	Terajoule
tkm	Tonnenkilometer

TM	Trockenmasse
TM-Gehalt	Trockenmassegehalt
TS	Trockensubtanz
TS-Verbrauch	Treibstoffverbrauch
UDF	Urbane Dachfarm
Vfm	Vorratsfestmeter
WEA	Windenergieanlage
WH	Weidehaltung
ZF	Zwischenfrucht
ZNH	Zweinutzungshuhn

Abbildungsverzeichnis

Seite

Abbildung 1: Methodik der Autonomieberechnung 17

Abbildung 2: Übersichtskarte zur Lage der fünf Landkreise in Baden-Württemberg 19

Abbildung 3: Flächenpotenziale der Landkreise nach Art der Flächen (Hektar pro Einwohner) 21

Abbildung 4: Kalorienbedarf pro Einwohner und Tag nach Ernährungsweise und Nahrungsmittel-kategorie (ohne Verluste und Verschwendung) 23

Abbildung 5: Durchschnittliche Flächeninanspruchnahme der Nahrungsproduktion nach Nahrungsmittelgruppen..... 40

Abbildung 6: Flächeneffizienz der Nahrungserzeugung 48

Abbildung 7: Gesamterträge verschiedener Rohstoffpflanzen der Textilfaserproduktion (t/ha) 60

Abbildung 8: Flächenbedarf der Zellstoffproduktion in Abhängigkeit von der Koppelproduktnutzung..... 63

Abbildung 9: Flächeninanspruchnahme von Biopolymeren unter Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte 64

Abbildung 10: Erträge von Rohstoffpflanzen der Ölproduktion (t/ha) 66

Abbildung 11: Flächeninanspruchnahme der Ölproduktion unter Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte 67

Abbildung 12: Mittlere Flächeninanspruchnahme des Konsumgüterverbrauchs nach Nutzung der Koppelprodukte (m²/Ea) 69

Abbildung 13: Mittlere Flächeninanspruchnahme des Konsumgüterverbrauchs im Status Quo bei Herstellung aus nachwachsenden Rohstoffen nach Wirtschaftsweise (unter Berücksichtigung von Koppelprodukten)..... 71

Abbildung 14: Anzahl der erheblichen Störungen beim Anbau von Energie- und Rohstoffpflanzen pro Jahr (ohne Düngung und Pflanzenschutzmaßnahmen) 74

Abbildung 15: Durchschnittliche Anwendungshäufigkeit von Pflanzenschutzmitteln und Wachstums-reglern im konventionellen Anbau von Energie- und Rohstoffpflanzen im Vergleich 75

Abbildung 16: Theoretischer Flächenbedarf für Ernährung pro Person nach Ernährungs- und Wirtschaftsweise in Süddeutschland bei weitestgehend inländischer Produktion 108

Abbildung 17: Flächeninanspruchnahme der fünf Landkreise für Ernährung pro Einwohner nach Ernährungs- und Wirtschaftsweise bei internationalem Warenaustausch 110

Abbildung 18: Kalorienbezogene Autonomiegrade bei konventioneller Erzeugung nach Ernährungsweise und Ackerflächennutzung im Kreis Konstanz... 114

Abbildung 19: Kalorienbezogene Autonomiegrade bei ökologischer Erzeugung nach Ernährungsweise und Ackerflächennutzung im Kreis Konstanz 115

Abbildung 20: Flächenbezogene Nahrungsautonomiepotenziale im Kreis Konstanz bei konventioneller Erzeugung 122

Abbildung 21: Flächenbezogene Nahrungsautonomiepotenziale im Kreis Konstanz bei ökologischer Erzeugung 122

Abbildung 22: Kalorien- und flächenbezogene Autonomiepotenziale des Landkreises Konstanz bei ökologischer Produktion im Vergleich 123

Abbildung 23: Transportgewicht von Nahrungs- und Futtertransporten im Kreis Konstanz bei konventioneller Wirtschaftsweise nach Ernährungsweise und Technologie (kg/Ea) 130

Abbildung 24: Transportgewicht von Nahrungs- und Futtertransporten im Kreis Konstanz bei ökologischer Wirtschaftsweise nach Ernährungsweise und Technologie (kg/Ea) 131

Abbildung 25: Nahrungsimport- und Nahrungsexportmengen nach Ernährungs- und Wirtschaftsweise 132

Abbildung 26: Potenzieller Nahrungstransportaufwand der Landkreise im Vergleich .. 133

Abbildung 27: Energiemix des Landkreises Konstanz 2017 134

Abbildung 28: Flächenbedarf einer regenerativen Energieversorgung bei heutigem Verbrauch und ökologischer Wirtschaftsweise nach Energieträgern und Verbrauchern 135

Abbildung 29: Flächenbedarf einer vollständig regenerativen Energieversorgung pro Einwohner 137

Abbildung 30: Flächenbedarf einer regenerativen und ökologischen Energie-versorgung bei heutigem Verbrauch und im Szenario E30 nach Energieträgern und Verbrauchern..... 138

Abbildung 31: Endenergiebezogene Autonomiegrade im Szenario E12 nach Energiesektoren 140

Abbildung 32: Endenergiebezogene Autonomiegrade im Szenario E26 nach Energieträgern bei Nutzung der 1. Energiepflanzengeneration 142

Abbildung 33: Endenergiebezogene Autonomiegrade im Szenario E26 nach Energieträgern bei Nutzung der 2. Energiepflanzengeneration 142

Abbildung 34: Endenergiebezogene Autonomiegrade im Szenario E26 nach Energiesektoren bei Nutzung der 1. Energiepflanzengeneration 143

Abbildung 35: Endenergiebezogene Autonomiegrade im Szenario E26 nach Energiesektoren bei Nutzung der 2. Energiepflanzengeneration 143

Abbildung 36: Endenergiebezogene Autonomiegrade im Szenario E30 nach Energiesektoren 144

Abbildung 37: Übersicht der produktbezogenen Energieautonomiepotenziale im Kreis Konstanz in den Szenarien E01 bis E30..... 144

Abbildung 38: Flächenbezogene Energieautonomiepotenziale im Kreis Konstanz in den Szenarien E01 bis E30 148

Abbildung 39: Bedeutung der Energie für das flächenbezogene Autonomiepotenzial insgesamt..... 149

Abbildung 40: Potenzielle Energieautonomie - Energiebedarfs- und Flächenbedarfsbezug im Vergleich..... 151

Abbildung 41: Produktbezogene Rohstoffautonomiepotenziale im Status Quo 153

Abbildung 42: Produktbezogene Rohstoffautonomie des Landkreises Konstanz nach Konsumverhalten in den Szenarien R01 bis R08 153

Abbildung 43: Potenzielle produktbezogene Rohstoffautonomie bei unverändertem Konsum nach Ackerflächennutzung 154

Abbildung 44: Auswirkungen von Rohstoffpflanzen auf die produktbezogenen Nahrungs- und Energieautonomiegrade..... 155

Abbildung 45: Produktbezogene Rohstoffautonomiepotenziale des Landkreises Konstanz im Status Quo und im Szenario 2035..... 156

Abbildung 46: Produktbezogene Rohstoff-Gesamtautonomie des Landkreises Konstanz im Status Quo und in verschiedenen Szenarien 158

Abbildung 47: Flächenbezogene Rohstoffautonomiegrade nach Konsumverhalten 159

Abbildung 48: Flächenbedarf einer ausschließlich regenerativen Rohstoffbereitstellung nach Konsumverhalten..... 160

Abbildung 49: Potenzielle flächenbezogene Rohstoffautonomie nach Ackerflächennutzung..... 161

Abbildung 50: Flächenbezogene Gesamtautonomiegrade der Szenarien mit der Priorität Rohstoffproduktion 162

Abbildung 51: Flächenbezogene Nahrungsautonomie in den Rohstoffszenarien 163

Abbildung 52: Flächenbezogene Energieautonomiegrade der Szenarien mit Priorität Rohstoffproduktion. 164

Abbildung 53: Anteil der Nektarpflanzen an der Ackerfläche nach Ernährungsweise und Energiepflanzennutzung 166

Abbildung 54: Anteil der Nektarpflanzen an der Ackerfläche nach Energie- und Rohstoffpflanzen-nutzung..... 168

Abbildung 55: Wahrscheinlicher Blühkalender bei Entwicklung des Status Quo 169

Abbildung 56: Blühkalender im Szenario E01 (100% Energiepflanzen der 1. Generation) 170

Abbildung 57: Blühkalender im Szenario E03 (100% Energiepflanzen der 2. Generation) 170

Abbildung 58: Blühkalender im Szenario R01 (100% Rohstoffpflanzen) 171

Abbildung 59: Wahrscheinlicher Blühkalender nach Umstellung auf Energiepflanzen der zweiten Generation bei Fortbestand der Sektorenanteile des Status Quo 172

Abbildung 60: Wahrscheinlicher Blühkalender nach Änderung der Ernährungsgewohnheiten und Anpassung der Produktionsflächen bei gleichzeitiger Umstellung auf Energiepflanzen der zweiten Generation (Szenario 2035). 173

Abbildung 61: Anteile mehrjähriger Pflanzen unter Energie- und Rohstoffpflanzen nach Szenario 174

Abbildung 62: Transpiration der Energie- und Rohstoffpflanzen nach Szenario pro Hektar (m³/ha) 175

Abbildung 63: Transpiration von Energiepflanzen im Landkreis Konstanz (1.000 m/a) 176

Abbildung 64: Düngemittelbedarf pro Hektar Energie- und Rohstoffpflanzenanbaufläche 177

Abbildung 65: Anwendungen von Pflanzenschutzmitteln und Wachstumsreglern im konventionellen Anbau von Energie- und Rohstoffpflanzen pro Hektar und Jahr 178

Abbildung 66: Mögliche Veränderung der Transpiration der Energie- und Rohstoffpflanzen 2017 – 2035 179

Abbildung 67: Mögliche Entwicklung des Anteils mehrjähriger Kulturen an der Ackerfläche 2017 – 2035 180

Abbildung 68: Mögliche Entwicklung der Störungen durch den Energie- und Rohstoffpflanzenanbau 2017 - 2035 180

Abbildung 69: Mögliche Entwicklung des Düngemittelbedarfs im Energie- und Rohstoffpflanzen- anbau 2017 - 2035 180

Abbildung 70: Mögliche Entwicklung der Anwendungen von Pflanzenschutzmitteln im Energie- und Rohstoffpflanzenanbau 2017 - 2035 181

Abbildung 71: Bevölkerungsdichte - Einwohner pro Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche 183

Abbildung 72: Wohnfläche pro Einwohner 183

Abbildung 73: Jahresfahrleistungen im Straßenverkehr pro Einwohner 184

Abbildung 74: Mögliche Entwicklung des Endenergieverbrauchs der Landkreise 2017 bis 2035 im Vergleich 184

Abbildung 75: Nutzbare Freiflächen im Außenbereich pro Einwohner 2017 185

Abbildung 76: Eignungsfläche für Dachflächen-Photovoltaik pro Einwohner 186

Abbildung 77: Produktbezogene Autonomiepotenziale der Landkreise in den Sektoren Nahrung, Energie und Rohstoffe 187

Abbildung 78: Kalorienbezogene Nahrungsautonomiepotenziale der Landkreise im Status Quo und im Szenario 2035 189

Abbildung 79: Autonomiepotenziale der Landkreise bei Milchprodukten im Szenario 2035 189

Abbildung 80: Produktbezogene Autonomiepotenziale bei wichtigen Lebensmittelgruppen und Futtermitteln 2017 und 2035 190

Abbildung 81: Potenzielle Fleischproduktion im Status Quo und im Szenario 2035 190

Abbildung 82: Produktbezogene Energieautonomiepotenziale der Landkreise 2017 und im Szenario 2035 191

Abbildung 83: Autonomiepotenziale bei wichtigen Energieträgern im Szenario 2035 .. 192

Abbildung 84: Energiebedarfsbezogene Autonomiegrade der fünf Landkreise im Status Quo und im Szenario 2035 nach Energiesektoren 193

Abbildung 85: Produktbezogene Gesamtautonomiepotenziale der Landkreise im Status Quo und im Szenario 2035 195

Abbildung 86: Autonomiepotenziale der Landkreise bei nationalem Güteraustausch im Status Quo und im Szenario 2035 197

Abbildung 87: Flächenbezogene Nahrungsautonomiepotenziale bei globalem Warenaustausch 198

Abbildung 88: Flächenbezogene Energieautonomie der Landkreise 2017 (Status Quo) und im Szenario 2035 199

Abbildung 89: Steigerung der flächenbezogenen Energieautonomie im Szenario 2035 199

Abbildung 90: Produkt- und flächenbezogene Energieautonomiepotenziale 2035 im Vergleich 200

Abbildung 91: Flächenbezogene Rohstoffautonomie der Landkreise bei nationalem Güteraustausch 201

Abbildung 92: Flächenbezogene Rohstoffautonomie der Landkreise bei globalem Güteraustausch 201

Abbildung 93: Flächenbezogene Rohstoffautonomie in den Produktsegmenten im Szenario 2035 202

Abbildung 94: Flächenbezogene Gesamtautonomiepotenziale der Landkreise im Status Quo und im Szenario 2035 bei inländischem Güteraustausch ... 203

Abbildung 95: Flächenbezogene Gesamtautonomiepotenziale der Landkreise im Status Quo und im Szenario 2035 bei internationalem Güteraustausch 204

Abbildung 96: Transportaufwand infolge des Importbedarfs und der Exportpotenziale 205

Abbildung 97: Insektenweidefläche im Jahresverlauf nach Energie- und Rohstoffpflanzennutzung ... 209

Abbildung 98: Pflanzenschutzanwendungen pro Hektar Energie- und Rohstoffpflanzenfläche nach Energiepflanzennutzung im Szenario 2035 ... 209

Abbildung 99: Erosionsschutz durch mehrjährige Kulturpflanzen im Szenario 2035 nach Energiepflanzennutzung ... 210

Abbildung 100: Produktionsflächenbedarf der Landkreise pro Einwohner bei inländischem Handel ... 212

Abbildung 101: Flächenbedarf der fünf Landkreise im Szenario 2035 nach Wirtschaftsweise und Sektoren (Hektar pro Einwohner) ... 213

Abbildung 102: Flächenbedarf der fünf Landkreise im Status Quo und im Szenario 2035 bei globalem Güteraustausch (ha/Ea) ... 215

Abbildung 103: Auswirkungen von Urban Farming auf produktbezogene Autonomiegrade der fünf Landkreise im Szenario 2035 ... 216

Abbildung 104: Auswirkungen von Urban Farming auf flächenbezogene Autonomiegrade der fünf Landkreise im Szenario 2035 ... 217

Abbildung 105: Auswirkungen von Agrophotovoltaik auf produktbezogene Autonomiegrade der fünf Landkreise im Szenario 2035 ... 218

Abbildung 106: Auswirkungen von Agrophotovoltaik auf flächenbezogene Autonomiegrade der fünf Landkreise im Szenario 2035 ... 218

Abbildung 107: Lokale Energieerzeugung und verbleibender Importbedarf der fünf Landkreise im Szenario 2035 ... 219

Abbildung 108: Autonomiegrade der fünf Landkreise bei Energieträgern im Szenario 2035 ... 219

Abbildung 109: Lokale Energieerzeugung und verbleibender Importbedarf im insgesamt optimierten Szenario 2035 ... 220

Abbildung 110: Produktbezogene Autonomiegrade bei Energieträgern im insgesamt optimierten Szenario 2035 ... 220

Abbildung 111: Produktbezogene Autonomiegrade bei Energieträgern im Szenario 2035 bei optimierter Produktion ... 221

Abbildung 112: Produkt- und flächenbezogene Autonomiegrade im optimierten Szenario 2035 in den Sektoren Nahrung, Energie und Rohstoffe sowie insgesamt. ... 222

Abbildung 113: Anteile der Lebensmittelgruppen an Kalorienverbrauch und Kalorienverzehr nach Ernährungsweise ... 263

Abbildung 114: Flächeninanspruchnahmen der Kornproduktion wichtiger Öl- und Eiweißpflanzen nach Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte (m²/1.000 kcal) 296

Abbildung 115: Erträge von Apfelstreuobstwiesen nach Alter und Ertragslage 314

Abbildung 116: Gesamterträge aller Produkte im Streuobstbau (t/ha)..... 317

Abbildung 117: Voraussichtliche Entwicklung der Brutto-Energiegewinnung in konventionellen Agroforstsystemen (MWh/ha)..... 404

Abbildung 118: Inländische Rohholzverwendung 2012 454

Abbildung 119: Inländische Rohholzverwendung: Veränderung 2006 - 2012..... 455

Abbildung 120: Flächeninanspruchnahme durch die Bauholzproduktion nach Baumartengruppe und Nutzungspfad (m²/m³) 480

Abbildung 121: Baufertigstellungen von Wohngebäuden nach überwiegend verwendetem Baustoff..... 481

Abbildung 122: Baufertigstellungen in Baden-Württemberg: Wohnungen pro Gebäude 483

Abbildung 123: Baufertigstellungen in Baden-Württemberg: Wohnfläche pro Wohnung 483

Abbildung 124: Anteile der Haushaltsgrößen am Zuwachs der Privathaushalte 2013-2016 484

Abbildung 125: Neue Haushalte 2013-2016: Anteile der Haushaltstypen an Bewohnern 484

Abbildung 126: Flächenbedarf für Buchenholz und Dämmstoff pro Quadratmeter Wohnfläche 503

Abbildung 127: Anteile verschiedener Rohstoffe am Gesamtmarkt für Dämmstoffe 2011 512

Abbildung 128: Gesamterträge wichtiger Dämmstoffpflanzen mit Koppelprodukten nach Nutzpflanze und Nutzungspfad bei konventionellem Anbau (t/ha) 521

Abbildung 129: Flächenbedarf pro Kubikmeter Dämmstoff ohne Koppelproduktnutzung..... 522

Abbildung 130: Flächengutschriften für Dämmstoffe nach Koppelprodukten..... 524

Abbildung 131: Flächeninanspruchnahme von Dämmstoffen nach Koppelproduktnutzung 525

Abbildung 132: Geschätzter Flächenbedarf pro Kubikmeter Dämmstoff unter Berücksichtigung von Koppelprodukten und Energieaufwand 527

Abbildung 133: Jährliche Ausgaben für Möbel in Deutschland pro Person..... 531

Abbildung 134: Möbelerträge und mögliche Koppelprodukterträge aus Eiche, Buche und Fichte nach Nutzungspfaden (t/ha)..... 536

Abbildung 135: Flächeninanspruchnahme der Holzmöbelproduktion – Eiche, Buche, Fichte 538

Abbildung 136: Flächeninanspruchnahme der Holzmöbelproduktion – Tanne, Douglasie, Kiefer, Lärche 538

Abbildung 137: Durchschnittliche Effizienzsteigerung durch Koppelproduktnutzung nach Art der Koppelprodukte 541

Abbildung 138: Flächenbedarf typischer Holzmöbel nach Nutzungsbereichen 543

Abbildung 139: Flächenbedarf eines Zwei-Personen-Haushaltes für Holzmöbel bei hoher Flächeneffizienz nach Nutzungsdauer 546

Abbildung 140: Weltweite Entwicklung von Bevölkerung, Faserverbrauch und Faserproduktion 551

Abbildung 141: Weltweite Produktion von Fasern nach Faserart im Jahr 2015 553

Abbildung 142: Textilfaserertrag wichtiger Rohstoffpflanzen ohne Koppelprodukte (t/ha) 559

Abbildung 143: Gesamterträge verschiedener Rohstoffpflanzen der Textilfaserproduktion (t/ha) 560

Abbildung 144: Textilfasererträge nach Berücksichtigung von Koppelprodukten bei energetischer Nutzung der Schäben (m²/kg) 562

Abbildung 145: Flächenbedarf der Textilfaserproduktion unter Berücksichtigung von Koppelprodukten im Vergleich 566

Abbildung 146: Anteile der Energieträger am Energieverbrauch der Papierindustrie 570

Abbildung 147: Erträge von Rohstoffpflanzen der Zellstoffproduktion (t/ha) 573

Abbildung 148: Energiepotenzial von Koppelprodukten der Zellstoffproduktion (kWh/ha) 574

Abbildung 149: Flächenbedarf der Zellstoffproduktion in Abhängigkeit von der Koppelproduktnutzung 576

Abbildung 150: Flächeninanspruchnahme der Stärkeproduktion nach Rohstoffpflanze und Koppelproduktnutzung (m²/kg) 586

Abbildung 151: Hektarerträge wichtiger Biopolymere in Deutschland nach Rohstoffpflanze 589

Abbildung 152: Gesamterträge von Rohstoffpflanzen der Kunststoffproduktion (t/ha) ... 590

Abbildung 153: Flächeninanspruchnahme von Biopolymeren unter Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte (m²/kg) 591

Abbildung 154: Flächeninanspruchnahme von Biopolymeren nach Koppelprodukt- und Kaskadennutzung 593

Abbildung 155: Hektarerträge wichtiger Ölpflanzen mit Koppelprodukten 598

Abbildung 156: Ölerträge von Ölpflanzen nach Koppelproduktnutzung 600

Abbildung 157: Ethanolertrag wichtiger Ethanolpflanzen nach Nutzungsvariante (Liter/ha) 605

Abbildung 158: Erträge von Ethanolpflanzen inklusive Koppelprodukte (nach Nutzungsvariante) 606

Abbildung 159: Flächeninanspruchnahme der Ethanolproduktion je nach Rohstoffpflanze und Koppelproduktnutzung (m²/kg) 608

Abbildung 160: Endenergieverbrauch in Baden-Württemberg pro Einwohner 1990 und 2017 (kWh) 613

Abbildung 161: Energieertrag als Nebenprodukt der stofflichen Holznutzung nach Baumart und Nutzungspfad 654

Abbildung 162: Durchschnittliche Anzahl der Anwendungen von Pflanzenschutzmitteln im Energiepflanzenanbau pro Jahr über die Nutzungsdauer 671

Abbildung 163: Durchschnittliche Anwendungshäufigkeit von Pflanzenschutzmitteln und Wachstumsreglern im konventionellen Anbau von Energie- und Rohstoffpflanzen im Vergleich 673

Abbildung 164: Düngerbedarf von Energiepflanzen im konventionellen Anbau 674

Abbildung 165: Anzahl der erheblichen Störungen beim Anbau von Energie- und Rohstoffpflanzen pro Jahr (ohne Düngung und Pflanzenschutz-maßnahmen) 677

Abbildung 166: Bewertung des Erosionsschutzpotenzials von Energie- und Rohstoffpflanzen 680

Abbildung 167: Treibhausgasemissionen ausgewählter Energiepflanzen bei Anbau, Transport und Verarbeitung pro Hektar nach Verwendung (kg CO_2-Äq./ha) 707

Abbildung 168: Treibhausgasemissionen ausgewählter Energiepflanzen bei Anbau, Transport und Verarbeitung pro Kilowattstunde nach Verwendung (kg CO_2-Äq./kWh) 707

Abbildung 169: Klimabilanz ausgewählter Energiepflanzen pro Hektar nach Nutzung (kg CO_2-Äq./ha) 709

Abbildung 170: CO_2-Minderungspotenzial ausgewählter Energiepflanzen pro Hektar insgesamt (kg CO_2-Äq./ha) 710

Abbildung 171: CO_2-Minderungspotenzial ausgewählter Energiepflanzen pro Kilowattstunde Bruttoenergieertrag (kg CO_2-Äq./kWh) 710

Tabellenverzeichnis

Seite

Tabelle 1: Übersicht der jeweils wichtigsten Produktkategorien in den Sektoren Nahrung, Energie und Rohstoffe ... 9

Tabelle 2: Übersicht der definierten Umweltkennwerte ... 10

Tabelle 3: Referenzpflanzen und ihre Hauptprodukte (Erträge unter Berücksichtigung von Koppelprodukten) ... 15

Tabelle 4: Fläche und Bevölkerungsdichte der Landkreise ... 20

Tabelle 5: Flächenpotenziale der Landkreise (m²/Einwohner) ... 20

Tabelle 6: Modulflächenpotenziale der Landkreise für Solarenergienutzung auf Dachflächen (m²/Einwohner) ... 21

Tabelle 7: Kalorienbedarf pro Einwohner nach Ernährungsweisen und Nahrungsmittelgruppen (kcal Verzehr pro Einwohner und Tag) ... 23

Tabelle 8: Angenomener Lebensmittelverbrauch nach Ernährungsweisen im Vergleich (kg/a) ... 24

Tabelle 9: Energiebedarf pro Einwohner im Jahr 2017 ... 25

Tabelle 10: Rohstoffbedarf der fünf Landkreise für die Baustoffbereitstellung bei heutigem Konsumniveau und Umstieg auf nachwachsende Rohstoffe ... 26

Tabelle 11: Jährlicher Verbrauch von nachwachsenden Rohstoffen für Konsumgüter bei gleichbleibendem Konsum und weitgehender Umstellung auf nachwachsende Rohstoffe ... 27

Tabelle 12: Ertragspotenziale der Nahrungsproduktion nach Wirtschaftsweise und Flächenbelegung ... 30

Tabelle 13: Durchschnittliche Kalorienerträge nach Wirtschaftsweise und Produktgruppe (kcal/ha) * ... 31

Tabelle 14: Ertragspotenziale der Nahrungsproduktion weltweit und in Deutschland im Vergleich (Erhebungszeitraum 2014-2017) ... 32

Tabelle 15: Durchschnittliche Erträge der Nutzung erneuerbarer Energien nach Flächennutzung und Wirtschaftsweise ... 33

Tabelle 16: Ertragspotenziale der Bioenergie weltweit und in Deutschland im Vergleich ... 34

Tabelle 17: Ertragspotenziale der Rohstoffproduktion nach Wirtschaftsweise und Produktgruppe ... 35

Tabelle 18: Rohstoffertragspotenziale weltweit und in Deutschland im Vergleich (t/ha) ... 35

Tabelle 19: Flächenbedarf tierischer Produkte in Süddeutschland je 1.000 kcal nach Wirtschaftsweise ohne Koppelprodukte (m²/1.000 kcal) 39

Tabelle 20: Flächeninanspruchnahme durch tierische Produkte in Süddeutschland je 1.000 kcal nach Wirtschaftsweise bei energetischer Nutzung der Koppelprodukte (m²/1.000 kcal) 39

Tabelle 21: Flächeninanspruchnahme durch pflanzliche Nahrungsmittel in Süddeutschland je 1.000 kcal bei energetischer Nutzung der Koppelprodukte nach Wirtschaftsweise (m²/1.000 kcal) 41

Tabelle 22: Erntefaktoren ausgewählter erneuerbarer Energiequellen 49

Tabelle 23: Durchschnittliche Netto-Energieerträge ausgewählter Energiequellen in Süddeutschland 50

Tabelle 24: Netto-Flächeninanspruchnahme ausgewählter erneuerbarer Energien (m²/MWh) 52

Tabelle 25: Geschätzte Rohstoffausbeuten der Holzproduktion nach Baumartengruppe (t atro/ha) 56

Tabelle 26: Buchenbauholzerträge und mögliche Koppelprodukte nach Nutzungspfad in Tonnen/ha 56

Tabelle 27: Bauholzerträge von Buchen ohne Koppelprodukte nach Nutzungspfad in Kubikmetern/ha 57

Tabelle 28: Flächeninanspruchnahme pro Kubikmeter Buchenbauholz nach Nutzungspfaden und Berücksichtigung von Koppelprodukten (m²/m³) 57

Tabelle 29: Durchschnittlicher Forstflächenbedarf eines Holzhauses pro Quadratmeter Wohnfläche nach überwiegend verwendetem Baustoff (m²/m²) 57

Tabelle 30: Durchschnittlicher Forstflächenbedarf eines Holzhauses pro Quadratmeter Wohnfläche und Nutzungsjahr nach überwiegend verwendetem Baustoff (m²/m²*a) 58

Tabelle 31: Mittlere Flächeninanspruchnahme durch handelsübliche Dämmstoffe* pro Quadratmeter Wohnfläche absolut und pro Jahr über eine Nutzungsdauer von 40 Jahren 58

Tabelle 32: Forstflächeninanspruchnahme durch Wärmedämmung pro Quadratmeter Wohnfläche bei Dämmung mit Fichtenholzfaser in Abhängigkeit von Bauweise und Energiestandard 59

Tabelle 33: Flächengutschriften für Koppelprodukte der Faserproduktion bei stofflicher Nutzung der Schäben (m²/ha) 61

Tabelle 34: Flächeninanspruchnahme der Textilfaserproduktion nach Berücksichtigung von Koppelprodukten bei stofflicher Nutzung der Schäben (m²/kg) 62

Tabelle 35: Flächeninanspruchnahme von Polymeren aus Reststoffen der Speisekartoffelverarbeitung (m²/kg) 65

Tabelle 36: Fahrzeugbau - Flächenbedarf von Pkw-Fahrzeugteilen 65

Tabelle 37: Fahrradbau - Flächenbedarf von Holz- und Bambusbauteilen 65

Tabelle 38: Geschätzter Bedarf an pflanzlichen Ölen für ausgewählte stoffliche Verwendungen..... 66

Tabelle 39: Erträge wichtiger Ethanolpflanzen in Deutschland 68

Tabelle 40: Verbrauch und mittlere Flächeninanspruchnahme wichtiger Konsumgüter im Status Quo bei Produktion aus nachwachsenden Rohstoffen und Nutzung der Koppelprodukte 70

Tabelle 41: Blühkalender für landwirtschaftliche Energiepflanzen der 1. Generation..... 73

Tabelle 42: Blühkalender für landwirtschaftliche Energiepflanzen der 2. Generation..... 74

Tabelle 43: Durchschnittlicher Düngemittelbedarf der Energiepflanzengenerationen im konventionellen Anbau (kg/ha*a)..... 76

Tabelle 44: Vergleich der durchschnittlichen Transpiration von Energiepflanzen erster und zweiter Generation im konventionellen Anbau (ohne Topinambur) 77

Tabelle 45: Transpiration von Energiepflanzen pro Hektar und pro Kilowattstunde im Vergleich..... 77

Tabelle 46: Beheizungsstruktur 2017 und im Szenario 2035..... 80

Tabelle 47: Entwicklung des Treibstoffverbrauchs von Kraftfahrzeugen nach Motorisierung 2017-2035..... 82

Tabelle 48: Unterstellte Veränderung der Motorisierung im Pkw-Verkehr 2017-2035.... 83

Tabelle 49: Anteile der Fahrzwecke im motorisierten Individualverkehr..... 85

Tabelle 50: Angenommene Veränderung der Fahrleistungen im Pkw-Verkehr 2017-2035 (km/Ea)..... 85

Tabelle 51: Angenommener Energieverbrauch des Sektors GHD im Szenario 2035..... 86

Tabelle 52: V eränderung des Energieverbrauchs der Industrie in den Landkreisen bis 2035..... 86

Tabelle 53: Veränderung des Endenergieverbrauchs in den Landkreisen bis 2035 insgesamt..... 87

Tabelle 54: Anteile der Kulturpflanzen an der ackerbaulichen Nahrungsmittelproduktionsfläche*..... 88

Tabelle 55: Anteile der Kulturpflanzen an der Ackerfutterfläche 89

Tabelle 56: Anteile der Kulturpflanzen an der Streuobstfläche 90

Tabelle 57: Anteile der Kulturpflanzen an der Obstanlagenfläche 2035..... 90

Tabelle 58: Anteile der Kulturpflanzen an der Energiepflanzenfläche bei Nutzung von Energiepflanzen der 1. Generation..... 91

Tabelle 59: Anteile der Kulturpflanzen nach Hauptnutzung an der Energiepflanzenfläche bei Nutzung von Energiepflanzen der 2. Generation 91

Tabelle 60: Anteile der Kulturpflanzen und ihrer Verwendungsarten an der Rohstoffpflanzenfläche 92

Tabelle 61: Anteile der Verwendungen an der Reinbestandsfläche der jeweiligen Baumartengruppe in der Forstwirtschaft 93

Tabelle 62: Angenommene Kulturpflanzen auf Agroforstflächen und ihre Verwendung . 94

Tabelle 63: Anteile der Nutzungen an der nicht für die interne Milchversorgung benötigten Grünlandfläche 94

Tabelle 64: Beschreibung des Status Quo..... 96

Tabelle 65: Kurzbeschreibung der Szenarien N01 bis N10 mit der Priorität Ernährung zur Berechnung von Auswirkungen unterschiedlicher Ernährungsweisen ... 98

Tabelle 66: Kurzbeschreibung der Szenarien N10 bis N17 mit der Priorität Ernährung zur Berechnung von Auswirkungen unterschiedlicher Produktionssysteme..... 99

Tabelle 67: Szenarien mit der Priorität Energieversorgung und Maßnahmen zur Steigerung der Energieerzeugung 101

Tabelle 68: Szenarien mit der Priorität Energieversorgung und Maßnahmen zur Energieeinsparung..... 102

Tabelle 69: Szenarien mit der Priorität Energieversorgung und Maßnahmen zu Energieeinsparung und Energieerzeugung 103

Tabelle 70: Szenarien mit der Priorität Rohstofferzeugung..... 104

Tabelle 71: Annahmen für die Berechnung der Autonomiepotenziale in den Jahren 2017 und 2035 105

Tabelle 72: Auswirkungen verschiedener Produktionsmethoden auf die flächenbezogenen Autonomiegrade bei der Ernährungsweise Eco-Mix (Veränderung in Prozentpunkten) 121

Tabelle 73: Auswirkungen von Urbanen Dachfarmen (UDF) mit einer Anlagenfläche von 2,0 m²/EW auf die Autonomiepotenziale im Kreis Konstanz bei inländischem Güteraustausch nach Sektoren 125

Tabelle 74: Auswirkungen von Urbanen Dachfarmen (UDF) mit einer Anlagenfläche von 2,0 m²/EW auf die Autonomiepotenziale im Kreis Konstanz bei internationalem Güteraustausch nach Sektoren..... 126

Tabelle 75: Auswirkungen von Aquaponik mit einer Anlagenfläche von 2,0 m²/EW auf die Autonomiepotenziale im Kreis Konstanz bei inländischem Güteraustausch nach Sektoren..... 127

Tabelle 76: Auswirkungen von Aquaponik mit einer Anlagenfläche von 2,0 m²/EW auf die Autonomiepotenziale im Kreis Konstanz bei internationalem Güteraustausch nach Sektoren..... 127

Tabelle 77: Beschreibung der Szenarien zu möglichen ernährungsbedingten Ackerflächennutzungen 166

Tabelle 78: Rohstoffautonomiepotenziale* der fünf Landkreise in wichtigen Produktgruppen im Vergleich zum Landesdurchschnitt im Status Quo und im Szenario 2035 (Prozent) 194

Tabelle 79: Rohstoffautonomiepotenziale der einzelnen Landkreise nach wichtigen Produktgruppen im Szenario 2035 (Prozent) 194

Tabelle 80: Auswirkungen verschiedener Systeme der urbanen Nahrungsproduktion auf die flächenbezogenen Autonomiegrade bei globalem Güteraustausch 206

Tabelle 81: Einfluss der Grünlandnutzung auf die flächenbezogenen Autonomiegrade 207

Tabelle 82: Auswirkungen von Energie- und Rohstoffpflanzen auf die Autonomiepotenziale 208

Tabelle 83: Auswirkungen von Power-to-X-Technologien im Verkehr auf die Autonomiepotenziale 211

Tabelle 84: Kalorienbedarf in Deutschland nach Altersgruppe und Geschlecht bei PAL-Wert 1,6 (kcal/Tag)..... 250

Tabelle 85: Geschätzter Kalorienbedarf pro Person in Baden-Württemberg und ausgewählten Landkreisen des Landes im Jahr 2016 (kcal/Tag) 251

Tabelle 86: Verzehr wichtiger Lebensmittelgruppen in Deutschland (kg pro Person und Jahr) 255

Tabelle 87: Lebensmittelverzehr und geschätzte Verluste..... 256

Tabelle 88: Mittlerer Kaloriengehalt wichtiger Lebensmittelgruppen 258

Tabelle 89: Verbrauch und Verzehr nach Ernährungsweise (kg/Ea)..... 259

Tabelle 90: Jährlicher Kalorienverbrauch nach Ernährungsweise ohne alkoholische Getränke (kcal/Ea) 261

Tabelle 91: Anteil tierischer und pflanzlicher Lebensmittel am Kalorienverbrauch nach Ernährungsweise 262

Tabelle 92: Jährliche Lebensmittelabfälle nach Bereichen der Nahrungsmittelkette 266

Tabelle 93: Putzabfälle und nicht essbare Anteile beliebter Gemüsesorten..... 268

Tabelle 94: Hektarerträge Getreide und Hackfrüchte, konventionell und ökologisch (t/ha; Angaben bei üblichen Wassergehalten)..... 270

Tabelle 95: Getreidekorn- und Hackfruchterträge ökologischer Landwirtschaft im Vergleich..... 271

Tabelle 96: Kalorienertrag von Getreide und Hackfrüchten (kcal/ha)..... 272

Tabelle 97: Flächenbedarf pro 1.000 kcal und ernährbare Personen pro Hektar 273

Tabelle 98: Mittleres Strohaufkommen und mittleres Korn-Stroh-Verhältnis in Deutschland 274

Tabelle 99: Kartoffelkraut- und Rübenblattaufkommen (t/ha) 274

Tabelle 100: Energiepotenziale und Flächengutschriften von Stroh, Kartoffelkraut und Rübenblättern 275

Tabelle 101: Flächengutschriften für Koppelprodukte von Getreide und Hackfrüchten bei energetischer Nutzung (m²/ha) 275

Tabelle 102: Flächenbedarf von Getreide und Hackfrüchten unter Berücksichtigung von Koppelprodukten (kcal/ha) 276

Tabelle 103: Steigerung der Flächeneffizienz durch Koppelprodukte 277

Tabelle 104: Walnusserträge pro Baum nach Alter 285

Tabelle 105: Hektarerträge von Ölfrüchten und Eiweißpflanzen (t/ha) 287

Tabelle 106: Zusammenfassung - Durchschnittliche Erträge von Ölfrüchten und Eiweißpflanzen im konventionellen und ökologischen Landbau (t/ha) 288

Tabelle 107: Kalorienerträge von Ölfrüchten und Eiweißpflanzen 288

Tabelle 108: Speiseölausbeuten und Hektarerträge im konventionellen und im ökologischen Anbau 290

Tabelle 109: Kaloriengehalt von Pflanzenölen und Kalorienerträge pro Hektar, konventionell und ökologisch 290

Tabelle 110: Hektarerträge von Ölpflanzen im konventionellen Anbau (t/ha) 291

Tabelle 111: Hektarerträge von Ölpflanzen im ökologischen Anbau (t/ha) 291

Tabelle 112: Flächengutschriften der Speisölproduktion im konventionellen Anbau (m²/ha) 292

Tabelle 113: Flächengutschriften der Speisölproduktion im ökologischen Anbau (m²/ha) 292

Tabelle 114: Flächeninanspruchnahme der Pflanzenölproduktion nach Kulturpflanze, Wirtschaftsweise und Koppelproduktnutzung (m²/kg Öl) 293

Tabelle 115: Flächengutschriften für Koppelprodukte der Kornproduktion von Ölpflanzen im konventionellen Anbau (m²/ha) 294

Tabelle 116: Flächengutschriften für Koppelprodukte der Kornproduktion von Ölpflanzen im ökologischen Anbau (m²/ha) 294

Tabelle 117: Hektarerträge von Eiweißpflanzen (t/ha) 295

Tabelle 118: Flächengutschriften für Koppelprodukte von Eiweißpflanzen (m²/ha) 295

Tabelle 119: Flächeninanspruchnahme durch Öl- und Eiweißpflanzen für die Kalorienproduktion (m²/1.000 kcal) 297

Tabelle 120: Mittlere Hektarerträge des Gemüse- und Salatanbaus nach Wirtschaftsweise (t/ha) 299

Tabelle 121: Ertragspotenzial des ökologischen Gemüseanbaus im Vergleich zum konventionellen Anbau 300

Tabelle 122: Kalorienerträge im konventionellen Gemüseanbau (kcal/ha) * 302

Tabelle 123: Spargelanbauflächen in Deutschland 2009 - 2017 (Hektar) 303

Tabelle 124: Flächenanteile und Anteile an Kalorienproduktion der Gemüsearten 2009-2011 304

Tabelle 125: Kalorienerträge im ökologischen Gemüseanbau (kcal/ha) 306

Tabelle 126: Ertragspotenzial eines flächeneffizienten ökologischen Gemüse-Mixes (Beispiel) 307

Tabelle 127: Flächeninanspruchnahme des Gemüseanbaus im Freiland nach Pflanzenkombination (m²/1.000 kcal) 308

Tabelle 128: Ertragspotenziale im Obstbau, konventionell und ökologisch 309

Tabelle 129: Ertragspotenziale im konventionellen und ökologischen Obstbau (t/ha) 309

Tabelle 130: Kaloriengehalt wichtiger Obstfrüchte 310

Tabelle 131: Kalorienerträge von Obstplantagen konventionell und ökologisch (kcal/ha) 310

Tabelle 132: Flächeninanspruchnahme durch Obstplantagen je Kilogramm Obst ohne Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte (m²/kg) 311

Tabelle 133: Flächeninanspruchnahme durch Obstplantagen je Kilogramm Obst unter Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte in Deutschland und Baden-Württemberg (m²/kg) 312

Tabelle 134: Flächeninanspruchnahme durch Obstplantagen je 1.000 kcal ohne Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte in Deutschland und Baden-Württemberg (m²/1.000 kcal) 312

Tabelle 135: Flächeninanspruchnahme durch Obstplantagen je 1.000 kcal unter Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte in Deutschland und Baden-Württemberg (m²/1.000 kcal) 313

Tabelle 136: Jährliche Obsterträge von Streuobstwiesen (t/ha) 314

Tabelle 137: Hektarerträge von Streuobstwiesen 316

Tabelle 138: Flächengutschriften (m²/ha) und daraus folgende Hektarbedarfe von Streuobstwiesen (m²/kg) nach Kulturpflanze 317

Tabelle 139: Flächeneffizienz von Streuobstwiesen im Vergleich zu ökologisch bewirtschafteten Obstanlagen nach Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte 318

Tabelle 140: Ertragskennwerte des Nussanbaus 319

Tabelle 141: Flächengutschriften für Koppelprodukte des Nussanbaus 320

Tabelle 142: Gewichtsbezogene Flächeninanspruchnahme der Nusskernproduktion (m²/kg) 320

Tabelle 143: Kalorienbezogene Flächeninanspruchnahme der Nussproduktion (m²/1.000 kcal) 320

Tabelle 144: Verfügbarkeit von Ackerland und Grünland in Deutschland 2005 bis 2016 (ha) 322

Tabelle 145: THG-Senkenfunktion und THG-Emissionen unterschiedlicher Ökosystemtypen (Haaren et al., 2016) 324

Tabelle 146: Grundsätzliche Unterschiede zwischen Ackerland und Grasland mit Relevanz für die Umweltwirkungen (Nemecek et al., 2017). 327

Tabelle 147: Milcherträge pro Hektar in Süddeutschland (Bayern) insgesamt (kg ECM/ha) 329

Tabelle 148: Durchschnittliche Flächenkennwerte der Milchviehbetriebe in Bayern (2012-2016) 329

Tabelle 149: Einfluss der Milch- und Grobfutterleistung auf die Flächeneffizienz 329

Tabelle 150: Milchleistung einer Leistungsherde und einer Raufutterherde im Vergleich 331

Tabelle 151: Milchleistung nach Kraftfuttereinsatz (kg Milch pro Kuh) 332

Tabelle 152: Flächenbedarf für die Produktion von einem kg ECM im Durchschnitt von drei Versuchsjahren. Systemvergleich Milchproduktion Hohenrain (2008-2010). 332

Tabelle 153: Milchleistungen in der grünlandbasierten Milchviehhaltung 334

Tabelle 154: Flächenleistung ökologisch bewirtschafteter Kuhweiden in unterschiedlichen Regionen 2011 (Leisen & Mersch, 2013) 335

Tabelle 155: Für den menschlichen Verbrauch verfügbarer Milchertrag der grünlandbasierten Viehhaltung 336

Tabelle 156: Fleischerträge der grünlandbasierten Milchviehhaltung in Niederungen 338

Tabelle 157: Kalorienertrag und Flächenanteil der Fleischproduktion in der grünlandbasierten Milchviehhaltung pro Hektar 339

Tabelle 158: Flächenaufwand für Milch aus der grünlandbasierten Milchviehhaltung pro 1.000 kcal (m²) 340

Tabelle 159: Flächenbedarf von Rindfleisch aus der grünlandbasierten Viehhaltung pro Kilogramm (m²) 340

Tabelle 160: Flächenaufwand für Rindfleisch aus der Milchviehhaltung pro 1.000 kcal (m²) 341

Tabelle 161: Ertragspotenzial von Agrophotovoltaik in der grünlandbasierten Milchviehhaltung 343

Tabelle 162: Flächenproduktivität der Milchproduktion nach Wirtschaftsweise und Haltungsform 346

Tabelle 163: Futterflächenbedarf pro kg Milch (m²) und Futterflächenanteile von Acker und Grünland (Prozent) nach Abzug der Fleischproduktion 347

Tabelle 164: Flächenbedarf der Milch- und Fleischproduktion pro 1.000 kcal in der Milchviehhaltung (m²)..... 348

Tabelle 165: Flächenbedarf und Fleischerträge grünlandbasierter Rindermast 349

Tabelle 166: Kalorienertrag der kraftfutterreduzierten Milchviehhaltung insgesamt (kcal/ha) und ihr Flächenbedarf pro 1.000 kcal (m²) 349

Tabelle 167: Verbrauch von Milchprodukten pro Person (kg/Ea) 351

Tabelle 168: Mögliche Hektarerträge einer kombinierten Produktion von Käse und Süßmolkenkäse am Beispiel des Molkenkäses Ziger/Sérac (Ertragsniveau ökologischer Landwirtschaft)..... 354

Tabelle 169: Milchbedarf der Herstellung von Milchprodukten pro Kilogramm und pro Person (kg) 356

Tabelle 170: Schätzung des Vollmilcheinsatzes und der daraus hergestellten Produkte sowie ihrer potenziellen Nebenprodukte pro Person auf Basis des Milchproduktverbrauchs in Deutschland 2011 – 2015 (kg)..... 357

Tabelle 171: Futterflächenbedarf von Frischmilchprodukten (Milch, Joghurt usw.) ohne das Koppelprodukt Rindfleisch 359

Tabelle 172: Futterflächenbedarf der Sahne- und Magermilchproduktion ohne Rindfleisch 359

Tabelle 173: Futterflächenbedarf der Sahneproduktion bei Verfütterung der Magermilch ohne Rindfleischproduktion..... 360

Tabelle 174: Futterflächenbedarf der Butterherstellung inklusive Nebenprodukte ohne Rindfleisch - ökologisch 361

Tabelle 175: Futterflächenbedarf Butterherstellung inklusive Nebenprodukte ohne Rindfleisch - konventionell 362

Tabelle 176: Futterflächenbedarf von teilentrahmter Milch und Butter in der ökologischen Landwirtschaft 362

Tabelle 177: Futterflächenbedarf von Frischmilchprodukten und Butter in der ökologischen Landwirtschaft unter Berücksichtigung des Nebenproduktes Rindfleisch 363

Tabelle 178: Kennwerte der Schnittkäseproduktion bei Nutzung der Molke als Lebensmittel – ohne Rindfleisch 364

Tabelle 179: Kennwerte der Schnittkäseproduktion bei Nutzung der Molke als Futtermittel - ohne Rindfleisch 364

Tabelle 180: Kennwerte der Schnittkäseproduktion bei Nutzung der Molke als Lebensmittel – inklusive Rindfleisch 365

Tabelle 181: Kennwerte der Schnittkäseproduktion bei Nutzung der Molke als Futtermittel – inklusive Rindfleisch 365

Tabelle 182: Futterflächenbedarf nach Käsesortengruppe pro Kilogramm und pro Einwohner bei Nutzung der Molke als Lebensmittel 366

Tabelle 183: Futterflächenbedarf nach Käsesortengruppe pro Kilogramm und pro Einwohner bei Nutzung der Molke als Futtermittel 366

Tabelle 184: Futterflächenbedarf von Milcherzeugnissen nach Wirtschaftsweise (m²/kg) 368

Tabelle 185: Futterflächenbedarf der Erzeugung von Milchprodukten in Deutschland pro Kilogramm und pro Einwohner im Zeittraum 2011-2015 * 369

Tabelle 186: Anteile der Produktgruppen an Verbrauch und Futterflächenbedarf 370

Tabelle 187: Flächenbedarf der ökologischen Milchversorgung nach Angaben zur Flächenleistung in der Literatur 371

Tabelle 188: Angaben zum Flächenbedarf der Milchversorgung in der Vergleichsliteratur 371

Tabelle 189: Energie-Input, Energie-Output und Erntefaktoren des ökologischen Futterbaus ohne Koppelprodukte 372

Tabelle 190: Zusammensetzung verschiedener Futterrationen für Milchkühe 373

Tabelle 191: Energieeffizienz von Futterbau und Futterverwertung in der ökologischen Milchviehhaltung 374

Tabelle 192: Geschätzter Kaloriengehalt von Schweinefleisch nach Schweinerasse und Wirtschaftsweise 379

Tabelle 193: Zusammensetzung der Futtermischungen 380

Tabelle 194: Fütterungsvarianten Schweinemast 381

Tabelle 195: Futteraufwand der Schweinemast pro Kilogramm Schlachtgewicht (kg/kg SG) 382

Tabelle 196: Futteraufwand der Schweinemast pro Kilogramm Muskelfleisch ohne Berücksichtigung von Nebenprodukten (kg/kg Fleisch) 382

Tabelle 197: Hektarertrag der Schweinemast mit Hybridmastschweinen (kg; kcal); Flächenbedarf je Kilogramm und je 1.000 kcal (m²) nach Fütterungsvariante und Wirtschaftsweise ohne Koppelprodukte. 383

Tabelle 198: Flächenbedarf der Schweinemast mit Hybridmastschweinen je Kilogramm und je 1.000 kcal (m²) nach Fütterungsvariante und Wirtschaftsweise unter Berücksichtigung von Koppelprodukten. 383

Tabelle 199: Hektarertrag der Schweinemast mit Angler Sattelschweinen (kg; kcal); Flächenbedarf je Kilogramm und je 1.000 kcal (m²) nach Fütterungsvariante und Wirtschaftsweise ohne Koppelprodukte. 384

Tabelle 200: Flächenbedarf der Schweinemast mit Angler Sattelschweinen je Kilogramm und je 1.000 kcal (m²) nach Fütterungsvariante und Wirtschaftsweise unter Berücksichtigung von Koppelprodukten. 384

Tabelle 201: Energieaufwand der konventionellen Schweinehaltung im Futterbau 385

Tabelle 202: Energieaufwand der ökologischen Schweinehaltung im Futterbau 386

Tabelle 203: Geschätzter Energiebedarf der Schweinehaltung nach Wirtschaftsweise (kWh/kg SG) 387

Tabelle 204: Futtermittelbedarf Masthähnchen (kg/kg SG) 389

Tabelle 205: Futterflächenbedarf der Masthähnchenzucht nach Wirtschaftsweise und Berücksichtigung von Koppelprodukten (m²/kg SG) 390

Tabelle 206: Fleischertrag der Hähnchenmast pro Hektar LNF nach Wirtschaftsweise (kg/ha) 390

Tabelle 207: Flächeninanspruchnahme der Hähnchenmast je 1.000 kcal nach Wirtschaftsweise und Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte (m²/1.000 kcal) 391

Tabelle 208: Mastleistungskennzahlen männlicher Zweinutzungshühner in der konventionellen Landwirtschaft (Urselmans, et al., 2015) 392

Tabelle 209: Fleischerträge der Zweinutzungshähnchenmast (kg SG/ha) 392

Tabelle 210: Flächenbedarf der Fleischproduktion mit Zweinutzungshühnern je Kilogramm Schlachtgewicht und je 1.000 kcal nach Wirtschafts-weise und Koppelproduktnutzung (m²) 393

Tabelle 211: Energieaufwand der konventionellen Hühnermast im Futterbau 393

Tabelle 212: Energieaufwand der ökologischen Hühnermast im Futterbau 394

Tabelle 213: Verhältnis von Energie-Input zu Energie-Output 394

Tabelle 214: Kennwerte Eiproduktion der Legehennenhaltung nach Wirtschaftsweise .. 395

Tabelle 215: Kennwerte Fleischproduktion der Legehennenhaltung nach Wirtschaftsweise 395

Tabelle 216: Zusammensetzung des gewählten Legehennen-Alleinfutters 396

Tabelle 217: Hektarerträge der Legehennenhaltung nach Wirtschaftsweise (kg und kcal) ohne Koppelprodukte aus dem Futterbau 396

Tabelle 218: Futterflächenbedarf der Legehennenhaltung je Produkt und je 1.000 kcal nach Wirtschaftsweise ohne Koppelprodukte aus dem Futterbau 397

Tabelle 219: Futterflächeninanspruchnahme der Legehennenhaltung je Produkt und je 1.000 kcal nach Wirtschaftsweise unter Berücksichtigung von Koppelprodukten aus dem Futterbau 397

Tabelle 220: Legeleistung und Futterverwertung von Zweinutzungshühnern..... 398

Tabelle 221: Unterstellte Schlachtausbeute der Legehennennutzung mit Zweinutzungshühnern..... 398

Tabelle 222: Hektarerträge der Eierproduktion mit Zweinutzungshühnern..... 399

Tabelle 223: Flächenbedarf der Eierproduktion mit Zweinutzungshühnern je Kilogramm Produkt und je 1.000 kcal ohne Koppelprodukte aus dem Futterbau (m²) . 399

Tabelle 224: Flächenbedarf der Eierproduktion mit Zweinutzungshühnern je Kilogramm Produkt und je 1.000 kcal unter Berücksichtigung von Koppelprodukten aus dem Futterbau (m²) 399

Tabelle 225: Energieaufwand der Hybrid-Legehennenhaltung für den Futterbau (kWh/kg EM) 400

Tabelle 226: Verhältnis von Energie-Input zu Energie-Output in der Hybrid-Legehennenhaltung 400

Tabelle 227: Walnusserträge in Agroforstsystemen..... 402

Tabelle 228: Kalorienertrag eines Agroforstsystems mit Gerste und Walnuss bei konventioneller Wirtschaftsweise 403

Tabelle 229: Kalorienertrag eines Agroforstsystems mit Gerste und Walnuss bei ökologischer Wirtschaftsweise 404

Tabelle 230: Ertragspotenzial eines Agroforstsystems bei konventioneller Bewirtschaftung 405

Tabelle 231: Ertragspotenzial eines Agroforstsystems bei ökologischer Bewirtschaftung 405

Tabelle 232: Flächengutschriften für energetisch und stofflich nutzbare Koppel-produkte in zwei verschiedenen Agroforstsystemen nach Wirtschaftsweise 406

Tabelle 233: Flächeninanspruchnahme der Nahrungsmittelproduktion in zwei verschiedenen Agroforstsystemen nach Wirtschaftsweise (m²/1.000 kcal)..... 406

Tabelle 234: Wohn- und Gewerbegebietsflächen pro Einwohner im Vergleich*..... 411

Tabelle 235: Flächen und Erträge der verschiedenen Produktionssysteme im Urban Farming 415

Tabelle 236: Hektarerträge der verschiedenen Produktionssysteme im Urban Farming (t/ha Anlagenfläche) 416

Tabelle 237: Futtermittelbedarf je Kilogramm Fischfleisch..... 417

Tabelle 238: Zusammensetzung der Fischfuttermischungen..... 419

Tabelle 239: Flächenbedarf pro Tonne Fischfutter bei konventionellem Anbau 420

Tabelle 240: Flächenbedarf pro Tonne Fischfutter bei ökologischem Anbau 420

Tabelle 241: Flächenbedarf pro Kilogramm Fischfleisch bei konventionellem Anbau 421

Tabelle 242: Flächenbedarf pro Kilogramm Fischfleisch bei ökologischem Anbau 421

Tabelle 243: Anbauflächenbedarf der Aquaponik-Systeme für Fischfutter pro Hektar Anlagenfläche 422

Tabelle 244: Energieaufwand der Fischfuttermittelproduktion (MJ/t) 427

Tabelle 245: Energieaufwand Futterherstellung Variante 1, mit peruanischem Fischmehl, ökologischer Landbau (kWh/t) 428

Tabelle 246: Energieaufwand Futterherstellung Variante 2, Fischmehl aus ganzem Fisch, ökologischer Landbau (kWh/t)..... 429

Tabelle 247: Energieaufwand Futterherstellung Variante 1 mit peruanischem Fischmehl, konventioneller Landbau 430

Tabelle 248: Energieaufwand Futterherstellung Variante 2, Fischmehl aus ganzem Fisch, konventioneller Landbau 430

Tabelle 249: Energiebedarf von Gewächshäusern 430

Tabelle 250: Angenommene Wirkungsgrade von Speichertechnologien 431

Tabelle 251: Flächenbedarf der Energiegewinnung zur Beheizung von Gewächshäusern (m² Energieerzeugungsfläche/m² Gewächshausfläche) 432

Tabelle 252: Energiebedarf verschiedener Aquaponikanlagen..... 433

Tabelle 253: Kennwerte eines Vertical Farming Projekts..... 434

Tabelle 254: Flächeneffizienz von Gemüse- und Fleischproduktion in herkömmlicher Landwirtschaft..... 437

Tabelle 255: Flächeneffizienz von Gemüse- und Fleischproduktion in herkömmlicher Landwirtschaft bei reduziertem Flächenbedarf für regenerative Energiegewinnung 438

Tabelle 256: Flächeneffizienz der Aquaponik bei durchschnittlichem Pflanzen-Fisch-Verhältnis bei regenerativer Energieversorgung 440

Tabelle 257: Flächeneffizienz der Aquaponik bei verändertem Pflanzen-Fisch-Verhältnis (P-F-Verhältnis)..... 441

Tabelle 258: Dachfarm und Vertikale Farm im Vergleich..... 443

Tabelle 259: Flächeneffizienz der urbanen Landwirtschaft im Vergleich (100% = Konventioneller Landbau mit einem Futterflächenanteil von 66 Prozent) .. 444

Tabelle 260: Ackerflächenbedarfe verschiedener Produktionssysteme im Vergleich..... 445

Tabelle 261: Datenübereinstimmung bei Angaben zu Erträgen wichtiger pflanzlicher Nahrungsmittel 447

Tabelle 262: Durchschnittliche Datenübereinstimmung bei Angaben zu pflanzlichen Nahrungsmittelerträgen nach Nahrungsmittelgruppen 448

Tabelle 263: Baumbestand in Deutschland 451

Tabelle 264: Holzzuwachs nach Baumart in Vorratsfestmetern (Vfm) und Erntefestmetern (Efm) 452

Tabelle 265: Nutzung des Holzzuwachses in Deutschland 2002-2012 454

Tabelle 266: Raumdichte von Holz nach Kollmann (1982), IPCC (2003) und Knigge & Schulz (1966) 456

Tabelle 267: Sollfeuchte von Holz am Verwendungsort 457

Tabelle 268: Raumgewicht von waldfrischem und lufttrockenem Holz 457

Tabelle 269: Stammholz- und Astholzanteile von Nadel- und Laubbäumen 459

Tabelle 270: Durchschnittliche Koeffizienten aus Baden-Württemberg für die B erechnung des Rindenanteils (nach FVA) 460

Tabelle 271: Rindenanteile und geschätztes Rindenaufkommen pro Hektar 461

Tabelle 272: Geschätztes Restholzaufkommen pro Hektar 462

Tabelle 273: Durchschnittliche Ertragspotenziale der Forstwirtschaft in Deutschland in Festmetern 463

Tabelle 274: Durchschnittliche Ertragspotenziale der Forstwirtschaft in Deutschland in Tonnen (Trockenmasse) 464

Tabelle 275: Biomasse- und Energieerträge der Algenproduktion 468

Tabelle 276: Holzausbeuten in Sägewerken 472

Tabelle 277: Geschätzte Rohstoffausbeuten der Holzproduktion nach Baumarten-gruppe (t atro/ha) 473

Tabelle 278: Buchenbauholzerträge und mögliche Koppelprodukte nach Nutzungspfad in Tonnen pro Hektar (t/ha) 474

Tabelle 279: Bauholzerträge von Buchen ohne Koppelprodukte nach Nutzungspfad in Kubikmetern pro Hektar (m^3/ha) 474

Tabelle 280: Flächengutschriften für Baubuchenholz durch Koppelprodukt-nutzung (m^2/ha) 475

Tabelle 281: Tatsächliche Bauholzerträge und theoretische Netto-Bauholzerträge von Buchen unter Berücksichtigung von Koppelprodukten in Kubikmetern pro Hektar (m^3/ha) 476

Tabelle 282: Flächeninanspruchnahme pro Kubikmeter Buchenbauholz nach Nutzungspfaden und Berücksichtigung von Koppelprodukten (m^2/m^3) 476

Tabelle 283: Baufichtenholzerträge und mögliche Koppelprodukte nach Nutzungspfaden 477

Tabelle 284: Flächengutschriften für Baufichtenholz durch Koppelproduktnutzung (m²/ha) 478

Tabelle 285: Erträge und Flächeninanspruchnahme von Fichtenbauholz nach Nutzungspfaden 478

Tabelle 286: Flächeninanspruchnahme durch Bauholz verschiedener Baumarten nach Berücksichtigung von Koppelprodukten im Vergleich (m²/m³) 479

Tabelle 287: Gebäudetypologie und Bauweise der Beispielgebäude 485

Tabelle 288: Wohnraumangebot und Baumaterial der Beispielgebäude 486

Tabelle 289: Holzbedarf der Beispielgebäude (Fichte) 488

Tabelle 290: Waldflächenbedarf der Beispielgebäude für Fichtenholzproduktion 489

Tabelle 291: Waldflächenbedarf der Beispielgebäude für Buchenholzproduktion 490

Tabelle 292: Dämmstoffbedarf der Beispielgebäude 491

Tabelle 293: Weichholfaserdämmstoffertrag pro Hektar ohne Koppelprodukte 491

Tabelle 294: Waldflächenbedarf der Beispielgebäude für Dämmstoffproduktion (Nutzungsdauer = 40 Jahre) 492

Tabelle 295: Waldflächenbedarf der Beispielgebäude pro Person und Jahr 493

Tabelle 296: Waldflächenbedarf für Holz & Fichtenholzweichfaserdämmung pro Quadratmeter Wohnfläche 494

Tabelle 297: Waldflächenbedarf Standardwohnbau nach der pro Person genutzten Wohnfläche (Buchenholz) 494

Tabelle 298: Gebäudebeispiele Modulwohnbau, Kennzahlen 495

Tabelle 299: Waldflächenbedarf Modulwohnbau aus Fichtenholz 496

Tabelle 300: Wohnflächen verschiedener Wohnungstypen 497

Tabelle 301: Waldflächenbedarf Fichtenholz-Wohngebäude für fünf Sechspersonen-Wohngemeinschaften mit Büros 498

Tabelle 302: Waldflächenbedarf Buchenholz-Wohngebäude für fünf Sechspersonen-Wohngemeinschaften mit Büros 498

Tabelle 303: Holz- und Flächenbedarf im Modulwohnbau pro Person nach Haushaltstyp bei Buchenholzverwendung 499

Tabelle 304: Hoho Wien, Gebäudekennzahlen 500

Tabelle 305: Holz- und Waldflächenbedarf des HoHo Wien 500

Tabelle 306: CO_2-Absorption von Fichten und Buchen 501

Tabelle 307: Holzbedarf für Bauholz (ohne Dämmung) pro Quadratmeter Wohnfläche 501

Tabelle 308: CO_2-Absorption von Bauholz und Dämmstoff pro Quadratmeter Wohnfläche (t/m²) 502

Tabelle 309: Wand- und Fensterflächen eines Beispielreihenhauses 506

Tabelle 310: Flächenbedarf von Hanfsteinhäusern bei Strohnutzung im Vergleich (Flächenangabe in Hektar) 507

Tabelle 311: Flächenbedarf von Hanfsteinhäusern bei Kombinationsnutzung im Vergleich (Flächenangabe in Hektar) 507

Tabelle 312: Hektarertrag Terrassendielen aus Wiesengras 509

Tabelle 313: Flächenbedarf der Produktion von Terrassendielen (m²/m²) 509

Tabelle 314: Flächenkennwerte der Bambusparkett- und Bambusterrassendielenbodenproduktion 510

Tabelle 315: Mögliche Koppelprodukte der Dämmstoffproduktion 516

Tabelle 316: Primärenergiebedarf bei der Herstellung eines Kubikmeters Dämmstoff 529

Tabelle 317: Blütezeiten von Dämmstoffpflanzen 531

Tabelle 318: Materialeffizienz in der Möbelindustrie 532

Tabelle 319: Mittlere Aufkommen an Holz und Rinde bei der Möbelproduktion nach Baumart, Rohstoffart und Ort des Aufkommens (t atro) 534

Tabelle 320: Mögliche Möbel- und Koppelprodukterträge der Fichtenholznutzung (t/ha) 535

Tabelle 321: Mögliche Möbel- und Koppelprodukterträge der Buchenholznutzung (t/ha) 535

Tabelle 322: Flächengutschriften der Fichtenholzmöbelproduktion nach Koppelprodukten (m²/ha) 537

Tabelle 323: Flächengutschriften der Buchenholzmöbelproduktion nach Koppelprodukten (m²/ha) 537

Tabelle 324: Übersicht des Flächenbedarfs der Möbelproduktion nach Baumart und Nutzungsvariante (m²/kg) 540

Tabelle 325: Flächenbedarf für Holzmöbel eines Zwei-Personen-Haushaltes (50 Prozent Buche, 50 Prozent Fichte) 542

Tabelle 326: Nutzungsdauer von Möbeln in Deutschland 544

Tabelle 327: Geschätzte Nutzungsdauer und Holzbedarf einer durchschnittlichen Wohnungseinrichtung 544

Tabelle 328: Flächenbedarf von Holzmöbeln nach Nutzungsdauer im Vergleich 546

Tabelle 329: Flächeninanspruchnahme der Rohstoffbereitstellung pro Pkw 2018 548

Tabelle 330: Fahrradbau - Flächenbedarf von Holz- und Bambusbauteilen 549

Tabelle 331: Entwicklung der jährlichen Produktion von Textilfasern weltweit zwischen 1900 und 2015 550

Tabelle 332: Flächengutschriften für Koppelprodukte der Faserproduktion bei energetischer Nutzung der Schäben 561

Tabelle 333: Flächengutschriften für Koppelprodukte der Faserproduktion bei stofflicher Nutzung der Schäben 562

Tabelle 334: Flächeninanspruchnahme der Textilfaserproduktion nach Berücksichtigung von Koppelprodukten bei stofflicher Nutzung der Schäben (m²/kg) 563

Tabelle 335: Faserverbrauch pro Einwohner im Jahr 2030 nach Szenario 564

Tabelle 336: Angenommene Flächenanteile der Faserpflanzen im Jahr 2030 nach Szenario 565

Tabelle 337: Flächenbedarf der Faserproduktion im Jahr 2030 pro Kilogramm nach Szenario und Koppelproduktnutzung (m²/kg) 566

Tabelle 338: Flächenbedarf der Faserproduktion in Deutschland insgesamt nach Szenario und Koppelproduktnutzung (Hektar)..... 566

Tabelle 339: Deutschlands Anteil am globalen Papierverbrauch 567

Tabelle 340: Kennzahlen der deutschen Papierindustrie..... 569

Tabelle 341: Zellstofferträge und Zellstoffausbeuten 571

Tabelle 342: Flächengutschriften für Koppelprodukte von Zellstoffen aus landwirtschaftlichen Rohstoffpflanzen 575

Tabelle 343: Flächengutschriften für Koppelprodukte von Zellstoffen aus forstwirtschaftlichen Rohstoffpflanzen 575

Tabelle 344: Produktionsmengen nach Kunststoffarten in 2015 578

Tabelle 345: Menge der verarbeiteten Kunststoffwerkstoffe in Deutschland nach relevanten Branchen 2015 579

Tabelle 346: Erträge wichtiger Rohstoffpflanzen der Biokunststoffproduktion weltweit und in Deutschland..... 581

Tabelle 347: Rohstoffverarbeitung und Produktion der Stärkeindustrie 2011 - 2015 582

Tabelle 348: Stärkeausbeuten nach Rohstoffpflanze 2011-2015..... 582

Tabelle 349: Hektarerträge von Rohstoffpflanzen der Stärkeproduktion 583

Tabelle 350: Energiegehalt von Futtermitteln aus Reststoffen der Stärkeproduktion 584

Tabelle 351: Energieausbeuten und Energieerträge aus Restpflanzen und Reststoffen der Stärkeproduktion 584

Tabelle 352: Flächengutschriften für Koppelprodukte der Stärkeproduktion nach Rohstoffpflanzen (m²/ha) 586

Tabelle 353: Hektarerträge und Ausbeuten der Zuckerrübenproduktion in Deutschland 587

Tabelle 354: Flächengutschriften für Koppelprodukte der Zuckerproduktion aus Zuckerrübe 588

Tabelle 355: Flächeninanspruchnahme durch Zuckerproduktion aus Zuckerrüben nach Koppelproduktnutzung 588

Tabelle 356: Angaben zu Ausbeuten der wichtigsten Rohstoffe der Kunststoffproduktion im Vergleich 589

Tabelle 357: Flächengutschriften für Biokunststoffe ohne Kaskadennutzung 590

Tabelle 358: Flächeninanspruchnahme von Polymeren aus Reststoffen der Speisekartoffel- verarbeitung (m²/kg) 591

Tabelle 359: Heizwerte von Biokunststoffen und daraus folgende Flächengutschriften . 592

Tabelle 360: Geschätzter Bedarf an pflanzlichen Ölen für ausgewählte stoffliche Verwendungen 596

Tabelle 361: Flächengutschriften für Koppelprodukte der Pflanzenölproduktion (m²/ha) 598

Tabelle 362: Erträge wichtiger Ethanolpflanzen 604

Tabelle 363: Energieerträge von Ethanolpflanzen pro Hektar (kWh/ha) 606

Tabelle 364: Flächengutschriften für Koppelprodukte der Ethanolproduktion (m²/ha) 607

Tabelle 365: Einschätzung der Datenqualität im Sektor Rohstoffe 609

Tabelle 366: Endenergieverbrauch in Deutschland 2011 – 2017 pro Einwohner nach Sektoren (kWh) 611

Tabelle 367: Endenergieverbrauch in Deutschland 2011 - 2017 pro Einwohner nach Energieträgern (kWh) 612

Tabelle 368: Endenergieverbrauch in Baden-Württemberg nach Energieträgern pro Einwohner 2011 - 2017 und im Vergleichsjahr 1990 (kWh) 613

Tabelle 369: Energieverbrauch von Personenkraftwagen auf 100 km (kWh) 615

Tabelle 370: Energieverbrauch pro Personenkilometer nach Verkehrsmittel (kWh/Pkm) 615

Tabelle 371: Endenergieverbrauch der deutschen Haushalte im Jahr 2018 pro Haushalt und pro Quadratmeter Wohnfläche 616

Tabelle 372: Stromverbrauch je Haushalt nach Haushaltsgrößenklassen 2009 (ohne Heizstromverbrauch) 617

Tabelle 373: Potenzielle Energieerträge aus Photovoltaik nach Stadtraumtyp (MWh/ha) ... 618

Tabelle 374: Photovoltaikpotenzial auf Dachflächen in den Kreisen Bodenseekreis, Esslingen, Konstanz, Ravensburg und Sigmaringen ... 619

Tabelle 375: PV-Freiflächenpotenziale in Nordrhein-Westfalen (m²/Ea) ... 621

Tabelle 376: Hochrechnungsfaktoren für Brach- und Freiflächen sowie Parkplätze nach LANUV, 2013 ... 621

Tabelle 377: Ackerbauliche Erträge im Agrophotovoltaiksystem 2017/2018 im Vergleich zu den Referenzflächen ... 622

Tabelle 378: Flächenbedarf eines Agrothermiesystems ... 625

Tabelle 379: Geschätzte weltweite Kalorienbereitstellung durch den Anbau wichtiger pflanzlicher Nahrungsmittel im Jahr 2017 (Auswahl) ... 629

Tabelle 380: Anbaufläche, Ertrag und Flächeneffizienz wichtiger pflanzlicher Nahrungsmittel weltweit im Jahr 2017 ... 630

Tabelle 381: Getreideerträge in Afrika 2017 und unterstellte Erträge im Szenario A für das Jahr 2035 ... 631

Tabelle 382: Getreideerträge in Afrika 2017 und unterstellte Erträge im Szenario B für das Jahr 2035 ... 632

Tabelle 383: Energiepflanzen I – Energiebilanzen von Energiepflanzen nach erzeugtem Energieträger ohne Konversion und Berücksichtigung von Nebenprodukten ... 636

Tabelle 384: Energiepflanzen II – Geschätzte Energiebilanzen weiterer Energiepflanzen nach erzeugtem Energieträger ohne Konversion und Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte ... 638

Tabelle 385: Geschätzte Energiebilanz von Topinambur ohne Konversion ... 641

Tabelle 386: Geschätzte Energiebilanzen der ein- und mehrjährigen Topinamburnutzung ohne Konversion im Vergleich ... 642

Tabelle 387: Energiebilanz für Sida bei thermischer Nutzung ohne Konversion ... 643

Tabelle 388: Energiebilanz der Biogasproduktion in Biogasanlagen (500 kW_{el}) auf Basis von Silomais pro Hektar nach KTBL, 2012/2018 und WBA, 2007 ... 647

Tabelle 389: Energiebilanz der Biogasproduktion in Biogasanlagen (500 kW_{el}) auf Basis der Durchwachsenen Silphie pro Hektar ... 647

Tabelle 390: Energiebilanz von Winterraps nach verwendeten Produkten, Cradle to Gate ... 649

Tabelle 391: Energiebilanz von Miscanthus nach Endprodukt, Cradle to Gate ... 650

Tabelle 392: Energiebilanz von Sida bei thermischer Nutzung nach Endprodukt, Cradle to Gate ... 650

Tabelle 393: Energiebilanz von Weidenholz aus KUP nach Verarbeitung 651

Tabelle 394: Haupt- und Koppelprodukte der Bauholzproduktion aus Fichte und Buche bei energetischer Nutzung der Holzabfälle (t atro/ha)..... 653

Tabelle 395: Einschätzung der Datengrundlage 655

Tabelle 396: Flächenbezogene Indikatoren der ökologischen Bilanzierung des Energie- und Rohstoffpflanzenanbaus 658

Tabelle 397: Ausgewählte Umweltindikatoren des Energie- und Rohstoffpflanzen-anbaus und von ihnen betroffene Schutzgüter 662

Tabelle 398: Anteile wichtiger Fruchtarten am Ackerland in Deutschland und in Baden-Württemberg im Jahr 2016 663

Tabelle 399: Blühkalender für landwirtschaftliche Energiepflanzen der 1. Generation ... 665

Tabelle 400: Blühkalender für landwirtschaftliche Energiepflanzen der 2. Generation ... 666

Tabelle 401: Blühkalender für landwirtschaftliche Rohstoffpflanzen 667

Tabelle 402: Pollen- und Honigertragspotenzial von blühenden Energiepflanzen und Zwischenfrüchten 668

Tabelle 403: Durchschnittliche Zahl der Anwendungen von Pflanzenschutzmitteln im Energiepflanzenanbau pro Jahr über die gesamte Nutzungsdauer 670

Tabelle 404: Durchschnittliche Zahl der Anwendungen von Pflanzenschutzmitteln im Rohstoffpflanzenanbau pro Jahr über die gesamte Nutzungsdauer 672

Tabelle 405: Düngerbedarf wichtiger Energiepflanzen im konventionellen Anbau (kg/ha*a) 675

Tabelle 406: Düngebedarf wichtiger Rohstoffpflanzen im konventionellen Anbau (kg/ha*a) 676

Tabelle 407: Anzahl der erheblichen Störungen beim Anbau von Energiepflanzen pro Jahr (ohne Düngung und Pflanzenschutzmaßnahmen) 678

Tabelle 408: Anzahl der erheblichen Störungen beim Anbau von Rohstoffpflanzen pro Jahr (ohne Düngung und Pflanzenschutzmaßnahmen) 679

Tabelle 409: Bewertung des Erosionsschutzpotenzials von Energiepflanzen der 1. Generation 681

Tabelle 410: Bewertung des Erosionsschutzpotenzials von Energiepflanzen der 2. Generation 682

Tabelle 411: Bewertung des Erosionsschutzpotenzials von Rohstoffpflanzen 683

Tabelle 412: Transpirationskoeffizienten (Mittelwert und Spanne) von Energie und Rohstoffpflanzen (l H2O/kg TM) 687

Tabelle 413: Durchschnittliche Transpiration von Energiepflanzen je Kilogramm TM und je Hektarertrag nach Verwendung..... 688

Tabelle 414: Vergleich der durchschnittlichen Transpiration von Energiepflanzen erster und zweiter Generation im konventionellen Anbau 689

Tabelle 415: Vergleich der durchschnittlichen Transpiration von Energiepflanzen erster und zweiter Generation im konventionellen Anbau unter Verzicht auf Topinambur 689

Tabelle 416: Durchschnittliche Transpiration pro Kilowattstunde Netto-Energieertrag ... 691

Tabelle 417: Wasserbedarf von Energiepflanzen pro Kilowattstunde im Vergleich 692

Tabelle 418: Wasserbedarf von Rohstoffpflanzen 693

Tabelle 419: Anbaubedingte Treibhausgasemissionen unterschiedlicher Bioenergieträger im Oberrheintal (Hölscher et al. 2007) 695

Tabelle 420: Anbaubedingte CO_2-Emissionen wichtiger Treibstoffe 697

Tabelle 421: Anbaubedingte CO_2-Emissionen wichtiger Brennstoffe für die thermische Nutzung 698

Tabelle 422: Anbaubedingte CO_2-Emissionen wichtiger Biogaspflanzen 699

Tabelle 423: Mögliche Kohlenstoffanreicherung in Ackerböden durch ausgewählte mehrjährige Energiepflanzen und damit mögliche CO_2-Minderung 701

Tabelle 424: Anbaubedingte Änderung der Humusvorräte für ausgewählte einjährige Energiepflanzen nach dynamischer HE-Methode und nach VDLUFA (Willms, et al., 2019) 701

Tabelle 425: Emissionen der Bereitstellung verschiedener ausgewählter Energieträger pro Kilowattstunde und pro Hektar 706

Tabelle 426: Potenzielle Emissionsminderung ohne Methanschlupf und Kohlenstoffeinlagerung 708

Tabelle 427: CO_2-Absorptionspotenzial von Miscanthus bei dauerhafter stofflicher Nutzung 711

Tabelle 428: Einschätzung der Datenbasis zu flächenbezogenen Umweltkennwerten .. 713

Tabelle 429: Bevölkerung der Landkreise 714

Tabelle 430: Private Wohnhaushalte nach Haushaltsgröße 2017 715

Tabelle 431: Geschätzter Stromverbrauch der Privathaushalte pro Einwohner 715

Tabelle 432: Pkw-Neuzulassungen in den Landkreisen 2017 716

Tabelle 433: Jahresfahrleistungen in den Landkreisen 2017 insgesamt (Mio. km) 716

Tabelle 434: Jahresfahrleistungen in den Landkreisen 2017 pro Einwohner (km/Einwohner) 716

Tabelle 435: Wohnflächenentwicklung in den Landkreisen 2011 – 2035 717

Tabelle 436: Bioabfallaufkommen in den Landkreisen 2017 718

Tabelle 437: Freiflächen in den Landkreisen 2017 718

Tabelle 438: Flächenverbrauch in den Landkreisen 2000 – 2018 719

Tabelle 439: Anteile der Baumarten am Baumbestand in den Landkreisen 720

Tabelle 440: Anteile der Obstarten an der Obstanlagenfläche 720

Tabelle 441: Viehbestände der Landkreise 2016 721

Tabelle 442: Solarpotenzial auf Dachflächen 2017 721

Tabelle 443: Bestand und Potenzial der Windenergie in den Landkreisen 722

Tabelle 444: Erzeugungskapazität flächenunabhängiger erneuerbarer Energien 2015 . 723

Tabelle 445: Energieverbrauch der Industrie in den Landkreisen 2017 723

Tabelle 446: Energieverbrauch von Gewerbe, Handel, Dienstleistung und öffentlichen Einrichtungen 724

Tabelle 447: Endenergiebedarf in den Landkreisen 2017 insgesamt in MWh/Ea 726

Tabelle 448: Bevölkerung in Deutschland 2017 nach Altersgruppen und Geschlecht.... 727

Tabelle 449: Bevölkerung in Baden-Württemberg nach Altersgruppen und Geschlecht 727

Tabelle 450: PAL-Wert nach Aktivität/Lebensweise 728

Tabelle 451: Richtwerte für die Energiezufuhr in kcal/Tag nach DGE 729

Tabelle 452: Getreideerträge in Afrika 2017 und unterstelltes Ertragspotenzial 2050 nach Ländern 730

Tabelle 453: Baumobstanbau in Baden-Württemberg (Anbauflächen und Erträge) 731

Tabelle 454: Betriebliche Kennwerte der verglichenen Milchviehhaltungssysteme 732

Tabelle 455: Angenommener Fettgehalt nach Käsesortengruppe 732

Tabelle 456: Durchschnittlicher Kaloriengehalt der Käsesortengruppen 733

Tabelle 457: Milcherzeugung und Anlieferung inländischer Milcherzeuger 2005-2015 .. 733

Tabelle 458: Energieaufwand im Futterbau pro Hektar nach Futtermittel 734

Tabelle 459: Futtermischungen für die Ferkelzucht 735

Tabelle 460: Futtermischungen für die Schweinemast 735

Tabelle 461: Kumulierter Energieaufwand (KEA) des konventionellen Gemüsebaus nach KTBL, 2018 (kWh/ha) 736

Tabelle 462: Kumulierter Energieaufwand des konventionellen Futterbaus nach KTBL, 2018 737

Tabelle 463: Kumulierter Energieaufwand des ökologischen Gemüsebaus nach KTBL, 2018 738

Tabelle 464: Kumulierter Energieaufwand des ökologischen Futterbaus nach KTBL, 2018 739

Tabelle 465: Flächeneffizienz herkömmlicher Landwirtschaft, Teil 1 740

Tabelle 466: Flächeneffizienz herkömmlicher Landwirtschaft, Teil 2 741

Tabelle 467: Flächeneffizienzberechnung Urban Farming, Teil 1 742

Tabelle 468: Flächeneffizienzberechnung Urban Farming, Teil 2 743

Tabelle 469: Flächeneffizienzberechnung Urban Farming, Teil 3 744

Tabelle 470: Flächeneffizienzberechnung Urban Farming, Teil 4 745

Tabelle 471: A ufkommen an Gülle und Mist in der Viehhaltung 746

Tabelle 472: Rohstoff- und Energiepotenziale weltweit und in Deutschland (Zusammenfassung) 746

Tabelle 473: Globale Durchschnittserträge von Energie- und Rohstoffpflanzen (t/ha) ... 747

Tabelle 474: Flächenkennwerte Buche 748

Tabelle 475: Flächenkennwerte Fichte 749

Tabelle 476: Flächenkennwerte Douglasie 750

Tabelle 477: Flächenkennwerte Lärche 751

Tabelle 478: Flächenbedarf der Buchenholzproduktion bei Modulbauweise - nach Wohnungsart 752

Tabelle 479: Flächengutschriften für Koppelprodukte von Dämmstoffen, Teil 1 753

Tabelle 480: Flächengutschriften für Koppelprodukte von Dämmstoffen, Teil 2 753

Tabelle 481: Gewicht von Holzmöbeln, Beispiele 754

Tabelle 482: Flächengutschriften der Möbelproduktion nach Koppelprodukten: Eiche, Tanne (m²/ha) 755

Tabelle 483: Flächengutschriften der Möbelproduktion nach Koppelprodukten: Douglasie (m²/ha) 755

Tabelle 484: Flächengutschriften der Möbelproduktion nach Koppelprodukten: Kiefer, Lärche (m²/ha) 755

Tabelle 485: Berechnungsgrundlage der Szenarien – Fasererträge nach Pflanzenart und Nutzungsvariante 756

Tabelle 486: Stromverbrauch sparsamer Elektrofahrzeuge 757

Tabelle 487: Treibstoffverbrauch von Erdgas-Autos 757

Tabelle 488: Treibstoffverbrauch von Lastkraftwagen (l/100km) 758

Tabelle 489: Wärmepumpen - Geschätzte Bestandsentwicklung in den Landkreisen Bodenseekreis, Esslingen, Konstanz, Ravensburg und Sigmaringen 2012 – 2017 758

Tabelle 490: Angaben zu Transpirationskoeffizienten von Energie- und Rohstoffpflanzen in der Literatur (l H_2O/kg TM) 759

Tabelle 491: CO_2-Emissionsfaktoren nach Energieträgern 760

Tabelle 492: Definition der Szenarien N01 - N04 761

Tabelle 493: Definition der Szenarien N05 - N08 761

Tabelle 494: Definition der Szenarien N09 - N12 762

Tabelle 495: Definition der Szenarien N13 - N17 762

Abstract

The transition to renewable raw materials and energies is ecologically just as useful as the implementation of organic agriculture. However, with an otherwise unchanged status quo, these changes are accompanied by a significant increase in the land usage and requirement. Therefore, on the basis of area-related parameters for the sectors food, energy and raw materials, it was examined if it is possible to completely change the supply while achieving the simultaneously necessary reduction of the global land footprint of Germany to a sustainable level. The data base created allows the allocation of the required land area and also the specific land utilization to each product which was created on the basis of the regarded raw materials and energy carriers. Since this includes numerous joint products, a wide variety of consumer baskets and complex supply systems can be compared intersectorally. The simulations performed using the example of five counties in Baden-Württemberg showed that high autonomy levels of at least 100% can be achieved even in the densely populated southern part of Germany, if the potentials of renewable energies and renewable raw materials are used efficiently. However, the following conditions must be met:

- A significant increase in energy efficiency
- An extensive electrification of the energy sector
- A major dietary change
- Minimisation of food waste
- The almost complete use of the potentials of building integrated photovoltaics.
- Ecologically friendly large-area photovoltaic parks or agrophotovoltaic systems
- Perennial second-generation energy crops
- The efficient and almost complete use of joint products
- Longer useful life of consumer goods
- An optimized circular economy.

In this case, the use of renewable raw materials and energies can lead to significant benefits for the protection of species, soils and waters. However, high product-related autonomy degrees are much easier to achieve than high area-related autonomy degrees. Therefore, one must always consider both parameters in order to assess the autonomy of a region. My simulations also show that the area efficiency alone is not a sufficient criterion for comparing the benefits of different technologies and supply systems. In particular, land contention leads to situations, where those supply systems which have the highest land-use efficiency of all systems are not necessarily those, that enable the highest degrees of autonomy and the smallest global land footprint. For example, the production of pulp, textiles and grassland-based livestock can paradoxically increase the area requirements while simultaneously reducing the land-import requirements. Therefore, even a vegan diet cannot lead to the highest degrees of autonomy despite a relatively high land-use efficiency. Land-use-efficient technologies such as agrophotovoltaics and urban rooftop farms also only increase the overall degree of autonomy if they are combined with extensive electrification of the energy sector and high energy efficiency. In addition, the simulations showed that the pursuit of maximum self-sufficiency can have a negative effect on the overall autonomy and the global land footprint.

Kurzfassung

Aus ökologischen Gründen ist der Umstieg auf nachwachsende Rohstoffe und erneuerbare Energien ebenso sinnvoll wie die Einführung einer ökologischen Landwirtschaft. Diese Veränderungen gehen in einem ansonsten unveränderten Status Quo jedoch mit einer deutlichen Erhöhung des Flächenbedarfs einher. Deshalb wurde auf Basis flächenbezogener Kennwerte für die Sektoren Nahrung, Energie und Rohstoffe untersucht, ob es möglich ist, die Versorgung vollständig umzustellen, und gleichzeitig den globalen Landfußabdruck Deutschlands auf das notwendige nachhaltige Maß zu reduzieren. Die erstellte Datenbasis erlaubt es, jedem Produkt, das auf Basis der betrachteten Rohstoffe und Energieträger erzeugt wurde, einen Flächenbedarf und seine spezifische Flächeninanspruchnahme zuzuweisen. Da dies zahlreiche Koppelprodukte einschließt, können so sektorenübergreifend unterschiedlichste Warenkörbe und komplexe Versorgungsysteme verglichen werden. Die auf dieser Basis durchgeführten Simulationen am Beispiel von fünf Landkreisen in Baden-Württemberg zeigten, dass auch im dicht besiedelten Süden Deutschlands hohe Autonomiegrade von mindestens 100 Prozent erzielt werden können, wenn die Potenziale erneuerbarer Energien und nachwachsender Rohstoffe effizient genutzt werden. Dafür sind jedoch folgende Voraussetzungen zu erfüllen:

- Eine deutliche Steigerung der Energieeffizienz
- Eine weitgehende Elektrifizierung des Energiesektors
- Eine weitgehende Ernährungsumstellung
- Die Minimierung der Lebensmittelverschwendung
- Die nahezu vollständige Nutzung der Dachflächenphotovoltaikpotenziale
- Großflächige naturverträgliche Freiflächen- oder Agrophotovoltaikanlagen
- Mehrjährige Energiepflanzen der zweiten Generation
- Die effiziente und nahezu vollständige Nutzung von Koppelprodukten
- Längere Nutzungsdauern von Konsumgütern
- Eine optimierte Kreislaufwirtschaft.

In diesem Fall kann die Nutzung nachwachsender Rohstoffe und erneuerbarer Energien zu einem besseren Schutz von Arten, Böden und Gewässern führen. Allerdings lassen sich hohe produktbezogene Autonomiegrade wesentlich einfacher erreichen als hohe flächenbezogene Autonomiegrade. Es müssen daher immer beide Kennwerte betrachtet werden, um die Autonomie einer Region zu beurteilen. Meine Simulationen zeigen zudem, dass Flächeneffizienz kein hinreichendes Kriterium für den Vergleich des Nutzens unterschiedlicher Technologien und Versorgungssysteme ist. Insbesondere Flächenkonkurrenzen führen dazu, dass nicht unbedingt jene Versorgungssysteme, welche die höchste Flächeneffizienz aller Systeme aufweisen, auch die höchsten Autonomiegrade und den kleinsten globalen Landfußabdruck ermöglichen. So können z. B. die Produktion von Zellstoffen und Textilien aus Holz und die grünlandbasierte Viehhaltung paradoxerweise gleichzeitig den Flächenbedarf erhöhen und den Flächenimportbedarf senken. Daher kann auch eine vegane Ernährung trotz einer relativ hohen Flächeneffizienz nicht zu den höchsten Autonomiegraden führen. Auch flächeneffiziente Technologien wie Agrophotovoltaik und urbane Dachfarmen erhöhen den Gesamtautonomiegrad nur, wenn sie mit einer weitgehenden Elektrifizierung des Energiesektors und einer hohen Energieeffizienz verbunden werden. Auch zeigte sich, dass sich das Streben nach höchstmöglicher Autarkie negativ auf die Gesamtautonomie und den Landfußabdruck auswirken kann.

1 Einführung

1.1 Herausforderungen und Ziele

Um den Klimawandel und den globalen Temperaturanstieg möglichst auf 1,5° Celsius zu begrenzen, hat die Bundesregierung beschlossen, die Energieversorgung bis zum Jahr 2050 schrittweise auf erneuerbare Energien umzustellen. Gleichzeitig strebt Deutschland auch im Gesamten einen Wandel „zu einer zunehmend auf nachwachsenden Ressourcen beruhenden, rohstoffeffizienten Wirtschaft“ an (BMEL, 2014 S. 20). Erneuerbare Energien und nachwachsende Rohstoffe, sind in jedoch hohem Maße flächenabhängig. Der daraus folgende zusätzliche Bedarf Deutschlands an geeigneten Produktionsflächen kann bei unveränderten Konsumgewohnheiten von den inländischen Flächen nicht gedeckt werden. Im Jahr 2010 betrug allein die für den Inlandsverbrauch von Ernährungsgütern benötigte Netto-Importfläche bereits 5,5 Millionen Hektar[1]. Gegenüber dem Jahr 2000 hat die Netto-Importfläche für Ernährungsgüter damit um 44,6 Prozent (1,68 Mio. Hektar) zugenommen. Der flächenbezogene Selbstversorgungsgrad Deutschlands bei Ernährungsgütern lag damit im Jahr 2010 nur noch bei 73 Prozent (Statistisches Bundesamt, 2013 S. 6). Berücksichtigt man zudem den Verbrauch von Energie und Rohstoffen, beansprucht ein Einwohner Deutschlands im Durchschnitt 1,7-mal so viel Land und 2,5-mal so viele Rohstoffe wie im weltweiten Durchschnitt pro Person genutzt werden (Tukker, et al., 2014 S. 43). Bereits im Jahr 2004 hat Deutschland nach Lugschitz et al. rund 103 Millionen Hektar in Anspruch genommen. Der Netto-Flächenimport Deutschlands betrug dabei mit 76,87 Mio. Hektar fast das Dreifache der im Inland vorhandenen land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen (Lugschitz, et al., 2011 S. 22). Die weitere Erhöhung des Flächenbedarfs durch eine fortschreitende Umstellung auf regenerative Energien und nachwachsende Rohstoffe würde folglich direkt zulasten anderer Länder gehen. Eine solche Zunahme der Belastung anderer Länder durch Deutschland sollte angesichts der bereits hohen Flächeninanspruchnahme Deutschlands und der globalen Flächenverknappung vermieden werden. Im Jahr 2050 rechnet die Bundesregierung mit einer Weltbevölkerung von mehr als neun Milliarden Menschen die „mehr Nahrung brauchen und mit wachsendem Wohlstand auch höhere Ansprüche entwickeln, etwa auf mehr Fleisch und Milchprodukte“ (BMEL, 2018b S. 5). Nach Einschätzung der Bundesregierung müsste die Agrarproduktion bis 2050 um rund zwei Drittel gesteigert werden, um diese Ansprüche befriedigen zu können (BMEL, 2018b S. 5). Ob eine solche Steigerung der Produktivität angesichts des Klimawandels und seiner Folgen nachhaltig ermöglicht werden kann, ist ungewiss. Zum einen fördern die Rodung

[1] Für den Inlandsverbrauch von Ernährungsgütern wurde im Jahr 2010 eine Fläche von 20,1 Millionen Hektar benötigt. Die Importfläche betrug 18,2 Mio. Hektar, die Exportfläche 12,7 Mio. Hektar. (Vgl. (Statistisches Bundesamt, 2013 S. 7)

von Wäldern und der Umbruch von Grünland zur Gewinnung von Ackerflächen den Klimawandel. Zum anderen wird sich der weltweite Temperaturanstieg negativ auf die globalen Durchschnittserträge der wichtigsten Feldfrüchte (Weizen, Reis, Mais, Soja) auswirken (Zhao, et al., 2017). Zudem gehen weltweit jährlich rund zwölf Millionen Hektar Agrarfläche durch Flächenverbrauch, Übernutzung oder Erosion verloren (BMEL, 2018b S. 5). „Setzt sich dieser Trend unvermindert fort, würden die Ernten in den nächsten 25 Jahren um bis zu zwölf Prozent sinken“ (BMEL, 2018b S. 5).

Daher stellt sich die Frage, ob und wie eine Umstellung auf regenerative Energien und Rohstoffe mit dem Ziel der Bundesregierung vereinbar ist, eine sichere Versorgung der Bevölkerung in Deutschland mit Lebensmitteln hoher Qualität zu erreichen und darüber hinaus, den „im Rahmen der Möglichkeiten“ angestrebten Beitrag zur Sicherung der Welternährung zu leisten (BMEL, 2014 S. 20). Dabei ist bisher nicht eindeutig geklärt, welche Spannweite der Rahmen der Möglichkeiten umfasst.

Neben den dargestellten Herausforderungen, die sich für die Ernährungswirtschaft ergeben, hat die Umstellung auf erneuerbare Energien und nachwachsende Rohstoffe auch Auswirkungen auf die ökologischen Schutzgüter. Wenn der steigende Bedarf an biogenen Rohstoffen zu einer Ausweitung von Monokulturen, dem Umbruch von Grünland oder der Rodung von naturnahen Wäldern führt, stellt dies eine Gefährdung von Artenvielfalt, Klima, Böden und Gewässern dar. Auch Wasserwirtschaft und Trinkwasserversorgung können durch einen erhöhten landwirtschaftlichen Wasserverbrauch, einen schnelleren Regenwasserabfluss oder den Eintrag von Nitrat oder Pflanzenschutzmitteln beeinträchtigt werden. „Wegen der zusätzlichen gravierenden ökologischen Folgen sowie unerwünschter Verlagerungseffekte“ forderte der Sachverständigenrat für Umweltfragen SRU im Jahr 2013, dass „die Beendigung der Förderung von Anbau-Biomasse unbedingt erwogen werden“ sollte (SRU Sachverständigenrat für Umweltfragen, 2013 S. 9).

Zwar sahen sowohl die Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (2010) als auch der SRU (2007) neben den Risiken auch gewisse Chancen, durch eine nachhaltige Nutzung der Bioenergie positive (Synergie-)Effekte für den Naturschutz zu erzielen und z. B. die Sortenvielfalt der Landwirtschaft zu erhöhen oder den Einsatz von Düngemitteln und Pestiziden zu reduzieren. Diese positiven Effekte wurden jedoch v. a. aus wirtschaftlichen Gründen als eher unwahrscheinlich erachtet (LUBW, 2010, S. 5; SRU, 2007, S. 61). Ein Verzicht auf die energetische Nutzung von Anbaubiomasse müsste allerdings durch einen verstärkten Ausbau von Photovoltaik- und Windenergieanlagen sowie durch die vermehrte Nutzung biogener Abfälle und Reststoffe kompensiert werden. Die technischen Potenziale von Photovoltaik (212 TWh/a), Windenergie (390 TWh/a) und Bioenergie ohne Energiepflanzen (249 TWh/a) werden zusammen auf 851 Terawattstunden pro Jahr geschätzt (EuPD Resaerch, 2008; Fraunhofer

IWES/BWE, 2011; BMVBS, 2010). Das entspricht fast genau einem Drittel des deutschen Endenergieverbrauchs, der im Jahr 2017 bei rund 2.560 TWh lag. Das wirtschaftlich und sozial verträglich nutzbare Potenzial dürfte deutlich geringer sein, insbesondere im Falle der Windenergie.

Bei der Umstellung auf eine nachhaltige, auf regenerativen Energien und erdölfreien Rohstoffen beruhenden Wirtschaft besteht die Herausforderung daher vor allem darin, in der Flächennutzung ein ausgewogenes, also möglichst konkurrenzfreies Verhältnis zwischen den Sektoren Nahrung, Energie und Rohstoffe herzustellen und zugleich Schädigungen der Ökosysteme und der ökologischen Schutzgüter zu vermeiden. Die der vorliegenden Ausarbeitung zugrundeliegende Ausgangsthese lautet, dass für das Erreichen dieses Ziels Wechselwirkungen zwischen den Sektoren stärker berücksichtigt werden müssen, die sich nur mithilfe von Autonomiepotenzialberechnungen simulieren lassen, die alle drei Sektoren und die wichtigsten ökologischen Effekte ihrer Flächennutzungen gleichzeitig erfassen, da die Sektoren nicht parallel nebeneinander wirtschaften, sondern einen zunehmend regen Austausch pflegen. Solche Simulationen können nicht nur komplexe Flächennutzungssysteme abbilden, sondern auch Synergieeffekte zwischen den Sektoren erfassen und darüber hinaus die Wirkkraft von Einzelmaßnahmen überprüfen – sowohl hinsichtlich ihrer Produktivität als auch ihrer Wirkung auf ökologische Schutzgüter. Dies betrifft sowohl Maßnahmen auf der Seite der Produktion als auch auf der der Verbraucher. Letztere bestimmen schließlich in hohem Maße, welche Systeme der Flächennutzung zur Anwendung kommen und haben somit direkten Einfluss auf die Flächennutzung, aber auch auf das Aufkommen von Koppelprodukten. Die wechselseitige Abstimmung von Produktion und Verbrauch aufeinander, die auch die effiziente Nutzung von Koppelprodukten miteinschließt, kann ein Mittel sein, Verluste zu minimieren und die Flächeneffizienz zu erhöhen.

Mithilfe von Simulationen, die die Wechselwirkungen all dieser Maßnahmen berücksichtigen können, lässt sich sichtbar machen, wie weit sich die Lücke zwischen den heutigen Verbrauchsgewohnheiten und den begrenzten Flächenpotenzialen schließen lässt. Dies kann beispielsweise dabei helfen die Frage zu beantworten, ob Veränderungen der Ernährungsweise, der Umstieg auf nachwachsende Rohstoffe oder eine Reduktion des Konsumgüterverbrauchs den gewünschten Effekt erzielen oder gar notwendig sind. Ohne eine Berücksichtigung der Wechselwirkung zwischen den Sektoren besteht ein gewisses Risiko, die Wirksamkeit von Einzelmaßnahmen falsch einzuschätzen, weil Maßnahmen innerhalb eines Sektors durchaus einen großen positiven Effekt haben können, der aber durch ihre Auswirkungen auf die anderen Sektoren weitgehend kompensiert werden kann.

Voraussetzung für solche Simulationen ist die Verfügbarkeit flächenbezogener Kennwerte zu den wichtigsten Landnutzungsarten, die auch die Koppelprodukte nach unterschiedlichen Nutzungspfaden umfassen und die Flächeneffizienz ähnlicher Produkte vergleichbar machen.

Ziel der vorliegenden Ausarbeitung war es, durch die Ermittlung vergleichbarer flächenbezogener Kennwerte zur Weiterentwicklung der Datengrundlage beizutragen, eine Methodik zur Berechnung sektorenübergreifender Autonomiepotenziale zu entwickeln und die Wirkung von verschiedener Maßnahmen auf die Autonomiepotenziale von fünf Beispiellandkreisen zu simulieren. Als maßgebliche Indikatoren der Untersuchungen wurden die Flächeneffizienz von Flächennutzungen und die Autonomiepotenziale einer Region gewählt.

1.2 Ausgangsthesen und -fragen zu Flächeneffizienz und Autonomie

Fläche ist ein entscheidender und begrenzender Produktionsfaktor für die Erzeugung von Nahrung, nachwachsenden Rohstoffen und erneuerbaren Energien. Da mit einer erheblichen weltweiten Flächenverknappung bis zum Jahr 2050 gerechnet wird und Deutschland bei den heutigen Produktionsweisen und Konsumgewohnheiten nur Selbstversorgungsgrade von 88 Prozent im Sektor Nahrung (Statistisches Bundesamt, 2013) und ca. 30 bis 40 Prozent im Sektor Energie [2] (Agentur für Erneuerbaren Energien, o. J.) erreichen kann, geht es in der Diskussion über die Auswahl und Kombination von erneuerbaren Energien und Rohstoffen, wie zuvor dargestellt, vor allem um die Gewährleistung der Ernährungssicherheit, die Vermeidung vermeidbarer Flächenkonkurrenzen und unerwünschter Schädigungen von Ökosystemen und Schutzgütern. Sollen aus ökologischen Gründen weitere Landnutzungsänderungen, wie etwa Regenwaldrodungen vermieden werden, muss der Flächenbedarf pro Person, der oft auch als Landfußabdruck bezeichnet wird, reduziert werden, um mit einer nicht vergrößerbaren Produktionsfläche eine wachsende Weltbevölkerung zu versorgen und gleichzeitig den Wohlstand zu vergrößern. Ein großer Flächenbedarf, der die pro Person verfügbaren Flächen überschreitet, gilt daher als Indikator für eine nicht nachhaltige Entwicklung. Eine hohe Flächeneffizienz gilt dagegen grundsätzlich als erstrebenswert. Eine geringere Flächeneffizienz wird dagegen zunehmend häufig zum Ausschlusskriterium erklärt, wenn etwa ein gänzlicher Verzicht auf Anbaubiomasse gefordert wird oder der Konsum von Rindfleisch und Milchprodukten reduziert werden soll. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass eine geringere Flächeninanspruchnahme pro Produkteinheit gewissermaßen automatisch dazu beiträgt, den globalen Landfußabdruck Deutschlands zu minimieren. Agrophotovoltaik und eine möglichst weitgehend pflanzenbasierte Ernährung gelten, im Gegensatz zu Anbaubiomasse oder Rindfleisch, aufgrund ihrer hohen Flächeneffizienz als besonders geeignet, den globalen Fußabdruck einer Lebensweise zu verkleinern. Letztendlich wirken sich jedoch viele Maßnahmen zur Erhöhung der Flächeneffizienz auf mehrere Sektoren aus und haben unterschiedliche Effekte auf die ökologischen

[2] Das technische Potenzial von Bioenergie, Windenergie, Photovoltaik, Wasserkraft und Geothermie in Deutschland wird auf ca. 1.053 TWh pro Jahr geschätzt, was etwa 42 Prozent des deutschen Endenergieverbrauchs entspricht. Davon entfallen rund 400 TWh auf Bioenergie, 390 TWh auf Windenergie, 212 TWh auf Photovoltaik, 26 TWh auf tiefe Geothermie, 25 TWh auf Wasserkraft (AEE, 2020)

Schutzgüter. So steigert Agrophotovoltaik die Flächeneffizienz zwar deutlich, doch tut auch sie dies, ähnlich wie Anbaubiomasse, zulasten der Nahrungsproduktion. Anders als die erheblich gesteigerte Flächeneffizienz, werden die Auswirkungen von Agrophotovoltaikanlagen auf die Gesamtautonomiegrade oder den globalen Landfußabdruck bisher kaum diskutiert. Mit der vorliegenden Arbeit soll dagegen ein Beitrag dazu geleistet werden, nicht nur die Auswirkungen einzelner Maßnahmen auf einzelne Sektoren zu betrachten, sondern die Folgen sektorenübergreifend sichtbar und diskutabel zu machen. Als ein möglicherweise geeignetes Instrument diese Auswirkungen zu überprüfen erscheint die Berechnung von produkt- und flächenbezogene Autonomiegrade, wie sie z. B. anhand der Daten des Statistischen Bundesamtes für die Versorgung mit Ernährungsgütern (vgl. Statistisches Bundesamt, 2013) möglich sind. Auskunft über den globalen Fußabdruck können sie jedoch nur geben, wenn sie sektorenübergreifend erfolgen und Wechselwirkungen und Synergieeffekte zwischen den Sektoren berücksichtigen und ihre Effekte abbilden können. Bisher mangelt es jedoch an ausreichenden Daten für die Verknüpfung der Sektoren, wie z. B. zu den Potenzialen von Koppelprodukten und ihren Verwendungsmöglichkeiten. Ausgehend von dieser These wurde mit dieser Ausarbeitung folgenden Fragen nachgegangen:

Fragen:

- Welche Autonomiegrade können die fünf strukturell unterschiedlichen Beispiellandkreise erreichen, wenn sie die von der Landesregierung angestrebte Energieeinsparung erreichen und, soweit es möglich ist, auf regenerative Rohstoffe umsteigen?
- Können die Landkreise höhere Autonomiegrade erreichen, wenn sie sich dabei miteinander abstimmen?
- Lässt sich eine Reduktion des Gesamtflächenbedarfs erzielen, wenn die Versorgung mit Nahrung, Energie und Rohstoffen mittels eines integrativen Versorgungskonzeptes gezielt aufeinander abgestimmt erfolgt?
- Bietet eine aufeinander abgestimmte Nutzung der regionalen Potenziale von Siedlungs-, Wald- und Landwirtschaftsflächen eine Möglichkeit, die Flächeneffizienz zu steigern und den globalen Landfußabdruck zu reduzieren?
- Welche Kennwerte werden für die Erstellung eines solchen Konzeptes benötigt, um verschiedenste Kombinationen vergleichen zu können und gleichzeitig Planern und politischen Entscheidungsträgern eine nachvollziehbare und überprüfbare Entscheidungsgrundlage an die Hand zu geben, mit der sie verschiedene Szenarien bewerten und Synergiepotenziale sichtbar machen können, um die für ihre Region optimale Kombination zu finden?
- Lassen sich die Auswirkungen, die Veränderungen innerhalb eines Sektors auf die anderen Sektoren, die Gesamtautonomiepotenziale und die ökologischen Schutzgüter haben, mittels differenzierter Flächenkennwerte direkt sichtbar machen?

- Ist die Flächeneffizienz bei der Wahl von Energieträgern und nachwachsenden Rohstoffen ein hinreichendes Auswahlkriterium, sofern die ökologische Verträglichkeit gewährleistet ist?
- Welche Auswirkungen auf die Autonomiepotenziale hat die Umstellung auf eine ökologische Wirtschaftsweise?
- Welche Bedeutung hat die Ernährungsweise für die Gesamtautonomiepotenziale?
- Sind hohe Gesamtautonomiegrade gleichbedeutend mit einem geringeren globalen Landfußabdruck?
- Ist die kritisch diskutierte Belegung von landwirtschaftlichen Flächen mit Anbaubiomasse und Freiflächenphotovoltaik problematisch und vermeidbar oder für einen hohen Gesamtautonomiegrad notwendig?
- Welche Chancen und Konfliktpotenziale bestehen beim Umstieg auf neue Energie- und Rohstoffpflanzen mit Blick auf Artenschutz, Gewässerschutz und Bodenschutz und welche Möglichkeit besteht heute oder in Zukunft, diese Aspekte in flächenbezogenen Kennwerten zu erfassen?
- Ist sogar eine umweltverträglichere Versorgung mit Nahrung, Energie und Rohstoffen möglich, wenn neue Rohstoffpflanzen und Energiepflanzen der zweiten Generation, dabei maßvoll und zielgerichtet integriert werden, statt auf die Energiepflanzennutzung zu verzichten?
- Ist die stoffliche Nutzung von Anbaubiomasse der energetischen Nutzung vorzuziehen und wie würde sich ein Verzicht auf Energiepflanzen auf die sektorenübergreifenden Selbstversorgungspotenziale der Landkreise auswirken?
- Wo liegen die Unsicherheiten bei der Bestimmung der Selbstversorgungspotenziale und bei der Realisierung der möglichen Maßnahmen, wie verlässlich ist die heutige Datenbasis und zu welchen Kennwerten können heute noch keine verlässlichen Aussagen gemacht werden?

2 Methodik

Die Berechnung der heutigen und möglichen Autonomiepotenziale in den definierten Szenarien, deren Ergebnisse in Kapitel 7 dargestellt sind, erfolgte mittels einer umfassenden Tabellenkalkulation. Für eine Berechnung von sektorenübergreifenden Autonomiepotenzialen ist eine umfassende Datengrundlage erforderlich, die sowohl die Gesamterträge aller wichtigen Flächennutzungsarten abbildet als auch eine Einschätzung der Netto-Flächeninanspruchnahme erlaubt. Darüber hinaus ist eine möglichst genaue Kenntnis des Bedarfs an Nahrung, Energie und Rohstoffen erforderlich, der sich einerseits aus den Konsumgewohnheiten der Bevölkerung und andererseits aus der Verarbeitung der Rohstoffe ergibt. Im Folgenden werden die für die Berechnung erforderlichen Kennwerte definiert und erklärt sowie die Methodik beschrieben, nach der die Bedarfe der drei Sektoren, die produktspezifischen Flächeninanspruchnahmen und Flächeneffizienzkennwerte sowie die Autonomiegrade berechnet wurden.

2.1 Definition der Kennwerte

Autonomiepotenzial

Unter dem Autonomiepotenzial versteht man die Möglichkeit, sich bis zu einem gewissen Grad selbst mit bestimmten Gütern versorgen zu können. Ein hoher Autonomiegrad kann mit einem regen Außenhandel und hohen Importanteilen einzelner Güter einhergehen und ist daher nicht mit einer hohen Autarkie zu verwechseln, bei der die Versorgung auch weitgehend ohne Importe gewährleistet werden kann. Die potenziellen Autonomiegrade in den Sektoren Nahrung, Energie und Rohstoffe stellen jeweils das Verhältnis zwischen den lokalen Produktionspotenzialen und dem Gesamtverbrauch innerhalb derselben Region dar. Der potenzielle Autarkiegrad stellt dagegen das Verhältnis zwischen dem lokal verbrauchten Anteil der lokalen Produktion und dem Gesamtverbrauch innerhalb derselben Region dar. Autarkiegrad und Autonomiegrad können daher deutlich voneinander abweichen.

$$\text{Autarkiegrad} = \frac{\text{Lokaler Verbrauch lokal erzeugter Güter}}{\text{Lokaler Gesamtverbrauch}}$$

$$\text{Autonomiegrad} = \frac{\text{Lokale Gesamtproduktion}}{\text{Lokaler Gesamtverbrauch}}$$

Autonomiegrade werden in Prozent angegeben. Dabei wird in produktbezogene und flächenbezogene Autonomiegrade unterschieden. Produktbezogene Autonomiegrade beziehen sich im Nahrungssektor auf die Nahrungskalorien und im Energiesektor auf die bereitgestellte Endenergie (Kilowattstunden). Im Rohstoffsektor bezieht sich der produktbezogene Autonomiegrad in der Regel auf das Gewicht der Verbrauchsgüter (Kilogramm). Ausnahmen bilden

die Produktgruppen Bauholz und Dämmstoffe, bei denen neben dem Gewicht das Volumen (Kubikmeter) als zweite Bezugsgröße genutzt wird. Flächenbezogene Autonomiegrade beziehen sich dagegen auf die zur Deckung des Bedarfs benötigten Produktionsflächen.

Ertragskennwerte

Die Basis für die Abschätzungen der Produktionspotenziale, die in einem auf regenerativen und nachhaltigen Quellen basierenden Versorgungssystem in den Sektoren Nahrung, Energie und Rohstoffe erreicht werden können, bilden stets flächenbezogene Ertragskennwerte, die eine Berechnung möglicher Jahresproduktionsmengen einer Region oder eines Landkreises erlauben. Diese flächenbezogenen Ertragskennwerte beziehen sich stets auf einen Hektar Produktionsfläche, um eine größtmögliche Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Effizienzkennwerte

Die Ertragskennwerte werden ergänzt durch Kennwerte für Flächeneffizienz, die auch die jeweiligen Koppelprodukte berücksichtigen. Diese ermöglichen es, neben dem Brutto-Flächenbedarf auch die Netto-Flächeninanspruchnahme zu berechnen, die sich für einen bestimmten Warenkorb ergibt und eine wichtige Grundlage für die Berechnung von Autonomiegraden darstellt. Die Flächeneffizienzkennwerte können zudem als Orientierungswerte bei der Planung einer flächeneffizienten Flächennutzung verwendet werden, da sie z. B. den Vergleich sehr unterschiedlicher Pflanzen und ihrer unterschiedlichen Produkte erlauben. Nützlich sind diese insbesondere in all jenen Fällen, in denen auf einer Fläche mehr als ein Produkt erzeugt wird und die Flächeneffizienz eines einzelnen dieser Produkte daher nicht direkt offensichtlich ist. Mit Hilfe der Effizienzkennwerte, können die für den jeweiligen Bedarf einer Region am besten geeigneten Energie- oder Rohstoffquellen schneller identifiziert werden und z. B. flächeneffiziente Energie- oder Rohstoffpflanzenkombinationen zielgerichteter zusammengestellt werden. So können etwa lokal vorhandene Pflanzenölmühlen, Blockheizkraftwerke, Nahwärmenetze oder Textilunternehmen unterschiedliche Schwerpunktsetzungen bei der Rohstofferzeugung begründen. Nahrungsmittel, Energieträger oder Rohstoffe können daher sowohl Hauptprodukte als auch Koppelprodukte anderer Produkte sein – je nach Schwerpunktsetzung. Aus diesem Grund wurden die wichtigsten Lebensmittel- und Rohstoffgruppen jeweils separat als Hautprodukte betrachtet, um ihre Flächeneffizienzkennwerte zu ermitteln. Dabei erfolgte zunächst die Berechnung der jeweiligen Flächengutschriften für die jeweiligen Koppelprodukte. Beispielsweise kommen als Hauptprodukt des Nutzhanfanbaus wahlweise das Korn, das Stroh oder die Langfasern infrage, die sich aus dem Stroh gewinnen lassen. Die Erzeugnisse aus den übrigen Pflanzenteilen sind jeweils als Koppelprodukte zu betrachten. Die wichtigsten Produktkategorien nach Sektoren sind:

Tabelle 1: Übersicht der jeweils wichtigsten Produktkategorien in den Sektoren Nahrung, Energie und Rohstoffe

Sektor Nahrung	Sektor Energie	Sektor Rohstoffe
Getreide & Hackfrüchte	Strom	Baustoff Holz
Ölfrüchte & Eiweißpflanzen	Festbrennstoffe	Dämmstoffe
Gemüse & Salate	Biogas	Möbel
Obst	Pflanzenöl	Textilfasern
Nüsse	Bioethanol	Papier
Milch & Milchprodukte		Kunststoffe
Fleisch		Produkte der Oleochemie
Eier		Ethanol

Bei den Flächeneffizienzkennwerten handelt es sich um die Netto-Flächeninanspruchnahme durch ein bestimmtes Produkt unter Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte. Die Kennwerte für Flächeneffizienz in den jeweiligen Sektoren sind:

- **Nahrung:**
  - Quadratmeter pro Kilogramm (m²/kg) oder
  - Quadratmeter pro 1.000 Kilokalorien (m²/1.000 kcal/)
- **Rohstoffe**:
  - Quadratmeter pro Kilogramm (m²/kg) oder
  - Quadratmeter pro Kubikmeter (m²/m³)
- **Energie:**
  - Quadratmeter pro Kilowattstunde (m²/kWh)

Brutto-Flächenbedarf

Beim Brutto-Flächenbedarf handelt es sich um die Fläche, die benötigt wird, um ein bestimmtes Produkt oder einen Warenkorb bereitstellen zu können. Dabei werden keine Gutschriften berücksichtigt, die aus der Nutzung möglicher Koppelprodukte folgen können.

Netto-Flächeninanspruchnahme

Die Netto-Flächeninanspruchnahme erhält man nach Abzug möglicher Flächengutschriften vom Brutto-Flächenbedarf. Solche Flächengutschriften können nur angerechnet werden, wenn mögliche Koppelprodukte auch tatsächlich genutzt werden. Die Netto-Flächeninanspruchnahme kann daher auch bei gleichen Ertragspotenzialen je nach Nutzungsgrad der Koppelprodukte variieren.

Verbrauchskennwerte

Der Verbrauch bzw. Bedarf wird sowohl durch biologische und physikalische Faktoren (z. B. den Kalorienbedarf eines Menschen oder das Klima und den damit verbundenen Energiebedarf der Gebäudebeheizung) als auch durch das Wohlstandsniveau und die Ernährungs- und

Konsumgewohnheiten der Bevölkerung bestimmt, die zum Teil modischen Trends folgen. Auf der Seite des Verbrauchs ist, ebenfalls aus Gründen größtmöglicher Vergleichbarkeit, immer der Durchschnittswert pro Einwohner (E) und Jahr (a) maßgebend:

- Nahrung in Kilogramm (kg/Ea) bzw. Kilokalorien (kcal/Ea)
- Energie in Kilowattstunden (kWh/Ea)
- Rohstoffe in Kilogramm (kg/Ea) oder Kubikmetern (m^3/Ea)

Ökologische Kennwerte

Ökologische Kennwerte sind nur zu einem Teil flächenbezogen erfassbar. Im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung wurde die Betrachtung auf die folgenden flächenbezogenen Kennwerte beschränkt, die der Fachliteratur direkt entnommen werden konnten und zumindest einige wichtige Wirkungen des Einsatzes von Energie- und Rohstoffpflanzen auf die Umwelt abbilden. Zu jedem Kennwert sind jeweils die Schutzgüter angegeben, für die dieser Kennwert besonders relevant ist.

Tabelle 2: Übersicht der definierten Umweltkennwerte

Kennwert	Betroffene Schutzgüter
Anteil des ökologischen Landbaus (Prozent)	Diverse
Anbaufläche Insektenweide (Hektar)	Biodiversität
Anbaufläche Nektarpflanzen (Hektar)	Biodiversität
Blühpflanzenanteil an Ackerfläche (Prozent)	Biodiversität
Nektarpflanzenanteil an Ackerfläche (Prozent)	Biodiversität
Anteil mehrjähriger Pflanzen (Prozent)	Böden, Gewässer, Biodiversität
Düngemittelbedarf der Energiepflanzen (kg/ha*a)	Biodiversität, Gewässer, Grundwasser
Zahl der Pflanzenschutzanwendungen auf der Pflanzen-Anbaufläche (n/ha*a)	Böden, Biodiversität, Gewässer, Grundwasser
Transpiration durch Energiepflanzen pro Jahr und Hektar Energiepflanzen-Anbaufläche (l H_2O/ha)	Gewässer, Grundwasser
Energiebedarf des Ackerbaus pro Hektar (kWh/ha)	Klima
Energiegewinnung des Ackerbaus pro Hektar (kWh/ha)	Klima

Die für die Berechnung der Kennwerte benötigten Daten wurden der Online-Datenbank des KTBL und der Fachliteratur entnommen.

Begriffsdefinition: Koppelprodukte und Koppelrohstoffe.

Als Koppelprodukte oder Kuppelprodukte werden Erzeugnisse bezeichnet, die bei der Produktion bestimmter Hauptprodukte zwangsläufig oder beabsichtigt als Nebenprodukte anfallen (bauforumstahl e.V., 2021). Rohstoffe, die als Koppelprodukt bestimmter Produkte anfallen, werden im Folgenden als Koppelrohstoffe und die auf ihnen basierenden Produkte ebenfalls als Koppelprodukte bezeichnet, da ihre Produktion ohne die Produktion des ursprünglichen Hauptproduktes und seiner Nebenprodukte nicht möglich wäre.

Entlang jedes Nutzungspfades wird immer nur ein Produkt als Hauptprodukt bezeichnet. Folglich werden auch Textilfasern, Dämmstoffe oder andere Produkte, die beabsichtigte Erzeugnisse eines Nutzungspfades sind, ebenfalls als Koppelprodukte bezeichnet, wenn sie auf Rohstoffen basieren, die als Nebenprodukte anderer Hauptprodukte anfallen und an deren Produktion gekoppelt sind – auch, um sie von jenen Fasern, Dämmstoffen oder Kunststoffen zu unterscheiden, die als Hauptprodukte erzeugt werden. Daher hängt es nicht etwa vom Anteil an der Produktionsmenge ab, ob ein z.B. Dämmstoff aus Pflanzenfasern als Haupt- oder als Koppelprodukt bezeichnet wird, sondern allein vom Nutzungspfad und seinem jeweiligen Hauptprodukt.

Eine weitere Unterscheidung der Produkte in Koppelprodukte, die direkt als Koppelprodukte anfallen oder erst indirekt nach einer weiteren Verarbeitung der Nebenprodukte, erscheint wenig sinnvoll, da sie für die Flächennutzungseffizienz allesamt von Bedeutung und wichtige Bestandteile desselben Nutzungspfades sind.

Es ist jedoch wahrscheinlich, dass bezüglich dieser Verwendung der Bezeichnungen weiterer Diskussionsbedarf besteht.

2.2 Erstellung der Datenbasis

Als Datengrundlage der Erhebungen wurden vorrangig die Daten verwendet, die in Deutschland von den Statistischen Ämtern auf Landes- und Bundesebene sowie von den zuständigen Ministerien, Ämtern, Landesanstalten, dem Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), der Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (FNR) und der Agentur für Erneuerbare Energien (AEE) veröffentlicht werden. Ergänzt werden diese durch Daten aus der Fachliteratur sowie Daten von Forschungsinstituten und von Unternehmen, die auf dem jeweiligen Gebiet praktisch tätig sind. Lagen keine veröffentlichten Daten vor, wurden diese direkt bei den jeweiligen Einrichtungen, Unternehmen und Experten erfragt.

In der Regel erfolgte die Erfassung in Gewichtseinheiten (Tonnen oder Kilogramm) pro Hektar, Bei Nahrungsmitteln und Energieträgern wurde zusätzlich der Energieertrag in Kilokalorien bzw. Kilowattstunden erfasst.

Um eine möglichst hohe Datenqualität zu erreichen, wurden, sofern möglich, Daten aus mehreren verschiedenen Quellen miteinander abgeglichen. Es ist festzustellen, dass sich die Datenbasis in Umfang und Vollständigkeit von Sektor zu Sektor deutlich unterscheidet. So ist zum Sektor Nahrung eine relativ große Datenbasis verfügbar, die vergleichsweise wenig Lücken aufweist. Allerdings gilt dies vor allem für die konventionelle Wirtschaftsweise.

Die Datenbasis zu den Ertragspotenzialen der ökologischen Landwirtschaft ist im Vergleich dazu wesentlich weniger umfangreich und die Abweichungen der Daten von Quelle zu Quelle sind größer. Ein großer Teil der Daten zum ökologischen Landbau stammt aus Studien, die nur eine kleinere Zahl von Betrieben betrachten. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass die Zahl der ökologisch wirtschaftenden Betriebe insgesamt wesentlich geringer ist und somit auch eine geringere Datenbasis verfügbar ist. Zudem werden die Erträge der ökologischen Landwirtschaft in den Datenbanken der statistischen Landesämter auch nicht gesondert erfasst. Ein weiterer zu berücksichtigender Aspekt ist, dass im ökologischen Landbau auch der zeitliche Erfahrungshorizont vieler Landwirte geringer ist als im konventionellen Landbau, weil viele Betriebe erst vor kurzer Zeit auf ökologische Wirtschaftsweise umgestellt haben. Da unterschiedliche Standorte unterschiedliche Anforderungen stellen, ist Erfahrung im Landbau ein bedeutender Faktor und es ist daher anzunehmen, dass mit der Zahl der Betriebe und der Erfahrungsjahre auch die Hektarerträge im Ökolandbau noch über das heutige Ertragsniveau ansteigen werden. Institute, wie das Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL), erzielen mit ihrer Expertise und über Jahrzehnte gewachsenen Erfahrung jedenfalls noch erkennbar höhere Erträge als im Durchschnitt der übrigen Erhebungen erzielt wurden.

Etwas größere Lücken weist noch die Datenbasis zum Sektor Energie auf. Dies gilt insbesondere für Energiepflanzen der zweiten Generation und Algen, die in Deutschland bisher nur selten bzw. noch gar nicht kommerziell genutzt werden. So mangelt es in vielen Fällen noch an Daten zu Energieaufwand und Humusbilanz. Zudem werden viele Energiepflanzen der zweiten Generation bisher lediglich in Anbauversuchen an vergleichsweise wenigen Standorten getestet. Auch hier gilt jedoch, dass mit der Erfahrung weitere Ertragssteigerungen in Zukunft nicht auszuschließen sind. Mit Blick auf die Umweltkennwerte des Energiepflanzenanbaus sind ebenfalls noch größere Datenlücken vorhanden, wie etwa zum Einfluss von Energiepflanzen der zweiten Generation auf Artenvielfalt und Wasserhaushalt. In der Regel werden in Studien zu den ökologischen Aspekten bisher vor allem Energiepflanzen der ersten Generation betrachtet, die sich jedoch als einjährige Kulturen in ihren Energie- und Umweltbilanzen teils deutlich von den überwiegend mehrjährigen Energiepflanzen der zweiten Generation unterscheiden.

Die größte Heterogenität weist die Datenbasis zum Sektor Rohstoffe auf. Eine sehr umfangreiche Datensammlung bietet bisher lediglich die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) in ihren zahlreichen Veröffentlichungen. Generell hat die Zahl der wissenschaftlichen

Veröffentlichungen in jüngerer Vergangenheit deutlich zugenommen. Da in diesem Sektor jedoch eine erhebliche Zahl von Nischenprodukten und Neuentwicklungen zu berücksichtigen war, konnten die benötigten Daten in vielen Fällen nur von den herstellenden Unternehmen direkt bezogen werden. Vergleichswerte sind in diesem Bereich daher noch deutlich seltener verfügbar. Die befragten Hersteller verfügen jedoch mehrheitlich über langjährige Erfahrung auf ihrem Gebiet.

Zu vielen Produktsegmenten konnte lediglich auf bundesweite Durchschnittswerte zurückgegriffen werden. Bei anderen Segmenten musste der Verbrauch eigens geschätzt werden, wie etwa der mögliche zukünftige Holzbedarf des Bausektors oder der Möbelproduktion. Eine Differenzierung nach privaten und gewerblichen Verbrauchern war dabei nicht möglich, wäre aber insbesondere mit Blick auf die Produktsegmente Baustoffe und Möbel durchaus sinnvoll. Der angegebene Bedarf an Baustoffen und Möbeln bezieht sich aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit im gewerblichen Bereich nur auf den Wohnbau. Während der Möbelbedarf im privaten Bereich sicher deutlich über dem gewerblichen Bedarf liegen dürfte, könnte sich der Baustoffbedarf im gewerblichen Hochbau (nur Gebäude) in einer ähnlichen Größenordnung bewegen wie im privaten Wohnungsbau. Dies legen zumindest Zahlen zur jährlich fertiggestellten Nutzfläche im Nichtwohnbau nahe.

2.3 Berechnung der Bedarfe

Für die Berechnung der Bedarfe wurden soweit möglich spezifische Daten der Landkreise zu Konsumverhalten und Lebensweise verwendet, wie beispielsweise die pro Person genutzte Wohnfläche, die Bautätigkeit oder die Fahrleistungen der Kfz im Straßenverkehr. Da die verfügbaren Daten hauptsächlich für den Energieverbrauch relevant sind und lediglich die Bautätigkeit im Wohnbau eine konkretere Schätzung des spezifischen Baustoffbedarfs eines Landkreises erlaubt, wurden die übrigen Bedarfe in den Sektoren Nahrung und Rohstoffe anhand der jeweiligen Bevölkerungszahlen und bundesweiter Durchschnittswerte hochgerechnet. Sofern möglich, wurde dabei die spezifische Bevölkerungs- und Haushaltsstruktur der verschiedenen Landkreise berücksichtigt. So erfolgte beispielsweise eine Anpassung des Kalorienbedarfs anhand der jeweiligen Altersstruktur der Bevölkerung. Der Baustoffbedarf, der sich aus einer weitgehenden Umstellung auf nachwachsende Rohstoffe ergibt, wurde über die Bautätigkeit und den Baustoffbedarf pro Quadratmeter Wohnfläche geschätzt. In den Szenarien wurden die Bautätigkeit an die prognostizierte Bevölkerungsentwicklung angepasst. Angenommen wurden bei einer Trendfortsetzung vereinfachend 50 m² neue Wohnfläche für jede hinzukommende Person. Die angenommene Reduktion des Bedarfs bis zum Jahr 2035 wurde im Nahrungssektor von aktuellen Ernährungsempfehlungen und Studien zur Nahrungsmittelverschwendung abgeleitet, die Reduktion des Verbrauchs im Energiesektor von den Beschlüssen der Landesregierung BW 2014 und des Pariser Klimaabkommens aus dem Jahr 2015. Die Reduktion des Konsumgüterverbrauchs ohne Baustoffe auf ein Drittel des heutigen Verbrauchs wurde von den aktuellen Schätzungen des ökologischen Fußabdrucks abgeleitet, denen zufolge heute in Deutschland dreimal so viele Rohstoffe verbraucht werden, wie nachhaltig verfügbar wären. Da eine solche Reduktion der Wohnfläche pro Person um zwei Drittel auch im Neubau äußerst unwahrscheinlich ist, wurde im Neubau vereinfachend von einer Reduktion auf 40 m² pro Person ausgegangen.

2.4 Berechnung der Flächeninanspruchnahme (Flächeneffizienzkennwerte)

Flächeninanspruchnahme unter Berücksichtigung von Koppelprodukten

Bei einer Berechnung der Flächeninanspruchnahme unter Berücksichtigung der Koppelprodukte müssen nicht nur Kennwerte wie Gewicht oder Volumen in die Bewertung miteinfließen, sondern auch der flächenbezogene Wert eines Koppelproduktes. Das bedeutet, dass berücksichtigt werden muss, wie viel Fläche mindestens in Anspruch genommen werden müsste, um das Koppelprodukt durch ein anderes Hauptprodukt gleicher Verwendbarkeit zu ersetzen. Als Vergleichswert dient der Hauptproduktertrag der ertragreichsten Nutzpflanze - wiederum unter Berücksichtigung ihrer jeweiligen Koppelprodukte.

Dieser Wert der vermiedenen Flächeninanspruchnahme kann dem jeweiligen Hauptprodukt der untersuchten Nutzpflanze gutgeschrieben werden. Möglich wäre auch eine Gutschrift der durchschnittlich für den Ersatz benötigten Flächen. Gegen den Vergleich mit dem Durchschnittswert aller für ein Produktsegment relevanten Nutzpflanzen spricht jedoch, dass dieser Wert je nach Zielsetzung[3] variiert und nicht klar definiert werden kann. Ein zu niedrig angesetzter Durchschnittswert kann wiederum zu einer Überschätzung der Flächenpotenziale führen. Dieses Risiko wird durch die Berechnung des Mindestflächenbedarfs reduziert. Einschränkend muss hier jedoch festgestellt werden, dass es sich bei den in Tabelle 3 dargestellten Referenzpflanzen jeweils um konventionell angebaute Nutzpflanzen handelt. Dies ist vor allem darin begründet, dass Rohstoff- und Energiepflanzen bisher fast ausschließlich konventionell angebaut werden und somit nur in wenigen Fällen Daten zu den Erträgen im ökologischen Anbau vorliegen. Sofern vergleichbare Daten zum ökologischen Anbau vorlagen, sind diese in den Ergebnistabellen jeweils im Vergleich zum konventionellen Anbau angegeben.

Tabelle 3: Referenzpflanzen und ihre Hauptprodukte (Erträge unter Berücksichtigung von Koppelprodukten)

Produkt/Rohstoff	Referenzpflanze	Produkteinheit	Netto-Ertrag [1)]	Netto-Flächenbedarf je Produkteinheit (m²)
Bauholz	Fichte	Kubikmeter (m³/ha)	8,3	1.204,82
Dämmstoff	Hanf	Kubikmeter (m³/ha)	274	36,50
Fasern	Hanf - ZF	Tonne (t/ha)	9,8	1.020,41
Zellstoff	Miscanthus	Tonne (t/ha)	9,2	1.086,96
Energie	Miscanthus	Kilowattstunde (kWh/ha)	78.000	0,13
Schäben/Späne	KUP (Paulownia)	Tonne (t/ha)	10,00	1.000,00
Pflanzenöl	Raps	Tonne (t/ha)	3,5	2.857,14
Alkohol	Zuckerrübe	Tonne (t/ha)	13,2	757,58
Getreide	Weizen inkl. Stroh	Tonne (t/ha)	9,5	1.052,63
Honig	Kartoffel [2)]	1.000 kcal/ha	35.000	0,29
Futtermittel [3)]	Körnermais	MJ ME/ha	111.670	0,09

1) Theoretischer Ertrag der als Berechnungsgrundlage dient. Ermittelt wird der Netto-Ertrag durch Abzug der Flächenanteile der jeweiligen Koppelprodukte bzw. durch Abzug des kumulierten Energieaufwandes.
2) Kartoffel als ertragreichstes Grundnahrungsmittel.
3) Berücksichtigt wurden nur ackerbaulich produzierte Futtermittel für Schwein, Huhn und Fisch. Für die Futtermittelproduktion von Rindern und Kühen ist vor allem Grünlandnutzung vorgesehen.

[3] Zielsetzungen der Bioenergiebereitstellung können sein, vorrangig Festbrennstoffe, Flüssigbrennstoffe oder Biogas zu erzeugen. Andere Zielsetzungen können sein, möglichst viel Biodiversität zu erreichen, große Insektenweideflächen herzustellen, den Wasserbedarf optimal anzupassen, den Arbeitsaufwand zu minimieren, den Düngemitteleinsatz zu reduzieren oder Pflanzenschutzmittel zu vermeiden.

Nicht berücksichtigt werden konnte bei der Bilanzierung des Flächenbedarfs stofflich genutzter Rohstoffe die für Anbau und Verarbeitung benötigte Energie. Zum Energieaufwand des Anbaus liegen dafür bisher zu wenige Daten vor. Zudem machen bisher nur wenige Hersteller Angaben zum Primärenergieaufwand ihrer Produkte. Eine vergleichsweise gute Datengrundlage besteht hier vor allem im Falle der Baustoff- sowie der Papierproduktion. In vielen Fällen werden die bei der stofflichen Verarbeitung anfallenden Reststoffe als Energiequelle für die Verarbeitung genutzt. Zur Bedeutung des Energieaufwandes für die Flächeneffizienz besteht somit weiterer Forschungsbedarf.

Aufgrund der beschriebenen, hier angewendeten Methodik variieren die Flächengutschriften für denselben Rohstoff je nach Verwendung und Referenzpflanze. So fallen z. B. die Flächengutschriften für Stroh unterschiedlich aus, je nachdem, ob das Stroh als Dämmstoff, Zellstoffquelle, Festbrennstoff oder als Rohstoff für die Ethanolproduktion verwendet wird. Die Referenzpflanzen sind in diesen Fällen Hanf (Dämmstoff), Miscanthus (Zellstoff, Festbrennstoff) oder Zuckerrübe (Ethanol).

Konventionell erzeugtes Weizenstroh mit einem Ertrag von 7,9 t/ha führt als Dämmstoff verwendet bei einem gleichzeitigen Kornertrag von 7,9 t/ha zu einer Flächengutschrift von 2.920 m². Als Festbrennstoff beträgt die Gutschrift 4.051 m². Als Rohstoff für die Ethanolherstellung können lediglich 2.229 m² gutgeschrieben werden. Für die Zellstoffgewinnung ergibt sich wiederum eine Gutschrift von bis zu 3.570 m².

2.5 Berechnung der Autonomiegrade

Die Berechnung der Autonomiegrade der Landkreise sowie der möglichen Importbedarfe und Exportpotenziale erfolgt auf Basis der zuvor ermittelten Ertragskennwerte und der jeweiligen Bedarfskennwerte mittels einer Tabellenkalkulation, in die sämtliche Kennwerte eingepflegt wurden, die für die Berechnung der Autonomiegrade erforderlich sind. Die verschiedenen Maßnahmenoptionen sind darin so miteinander verknüpft, dass die Autonomiepotenziale für die drei Sektoren Nahrung, Energie und Rohstoffe sowie für ihre jeweiligen Produktgruppen stets parallel berechnet werden. Dabei werden die Bedarfe, die sich aus Ernährungsweise, Energieverbrauch, Konsumverhalten, Rohstoffverarbeitung und Nutzungseffizienz ergeben, zur lokalen Produktion ins Verhältnis gesetzt. Die hinterlegte Datenbank, die mit den im Folgenden dargestellten Kennwerten viele mögliche Nutzugspfade umfasst, ermöglicht eine detailgenaue Festlegung von Maßnahmen auf Seite der Produktion. Da hierbei eine Vielzahl von Koppelprodukten berücksichtigt werden kann, die mit der Auswahl jeweils einem der Sektoren direkt zugewiesen werden, können mögliche Wechselwirkungen und Synergieeffekte zwischen den drei Sektoren unmittelbar berechnet und sichtbar gemacht werden. Unter Zuhilfenahme der ermittelten Effizienzkennwerte können auf dieser Basis geeignete Maßnahmenkombinationen für das gewählte Untersuchungsgebiet bestimmt werden. Flächenbezogene, mit den Maßnahmen verknüpfte Umweltkennwerte erlauben zudem eine sofortige Einschätzung wichtiger Umweltwirkungen, die mit der gewählten Maßnahmenkombination einhergehen.

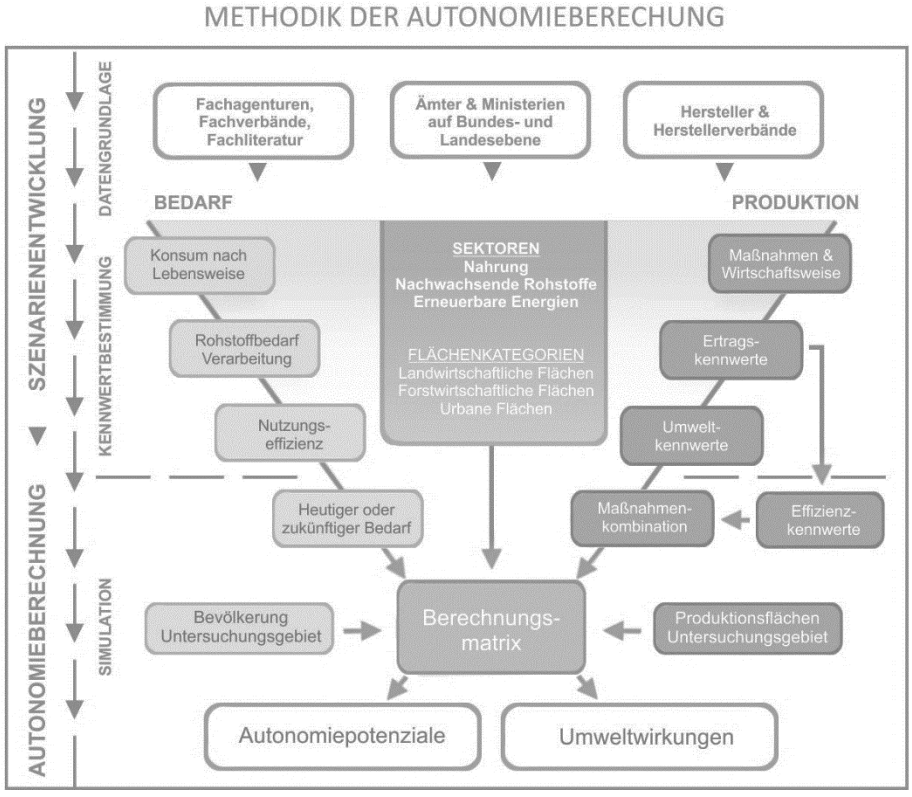


Abbildung 1: Methodik der Autonomieberechnung

Für die Berechnung der Autonomiepotenziale wurden aus ökologischen und sozialen Gründen verschiedene Vorgaben definiert: Bei der Grünlandnutzung wird der Grundsatz „Food First“ berücksichtigt. Nach der Wahl von Wirtschafts- und Ernährungsweise sowie der Festlegung der geplanten Flächennutzung werden auf Basis der sich aus der Flächennutzung ergebenden Futtermittel automatisch ein möglicher Viehbestand, das mögliche Mist- und Gülleaufkommen sowie das sich daraus ergebende Biogaspotenzial berechnet. Der mögliche Viehbestand ist somit an die lokal vorhandenen Futterflächen und Ertragspotenziale geknüpft. Dabei wird allerdings ein Außenhandel mit Futtermitteln einkalkuliert, um Futtermittelverluste zu vermeiden und auch Futtermittel zu nutzen, die als Koppelprodukte anderer Produkte anfallen. Bei der Milchvieh- und Rinderhaltung gilt für die Szenarien aus ökologischen und sozialen Gründen der Grundsatz „Feed no Food“ [4], weshalb in sämtlichen Szenarien ausschließlich von grünlandbasierten Haltungsformen ausgegangen wurde. Wird für das verfügbare Grünland bei der Eingabe keine anderweitige Nutzung festgelegt, wird es automatisch als potenzielle Futterfläche für Milchvieh- und Rinderhaltung definiert. Dabei hat die Milchviehhaltung Vorrang vor der Rindermast, da sie die deutlich höhere Flächeneffizienz aufweist. Die Option Rindermast wird erst aktiv, wenn der Bedarf an Grünland für die Milchviehhaltung gedeckt ist und darüber hinaus weitere Flächen vorhanden sind, die nicht für die Milchviehhaltung benötigt werden. Aufgrund dieser Vorgaben können Effekte, die Veränderungen innerhalb eines Sektors auf die anderen Sektoren haben, direkt berechnet und abgebildet werden.

Erfasst wird zudem das über die jeweiligen Untersuchungsgebietsgrenzen zu transportierende Gewicht, sowohl für den Importbedarf als auch für das Exportpotenzial. Aus diesem wird wiederum der zu erwartende Flächenimport errechnet, der je nach Autonomiegrad erforderlich wird.

Aufgrund der großen Unterschiede zwischen den deutschen und den globalen Durchschnittserträgen wurden sowohl mögliche Autonomiegrade berechnet, die sich aus einem ausschließlich inländischem Handel ergeben, als auch solche, die sich im Falle eines internationalen Güteraustauschs ergeben. Die Berechnung der nötigen Flächenimporte und der möglichen Flächenexporte, die sich je nach Außenhandelspartnerschaft aus den erreichten produktbezogenen Autonomiegraden ergeben, erfolgt unmittelbar auf Basis der jeweiligen Durchschnittserträge der Außenhandelspartner. So können produkt- und flächenbezogene Autonomiegrade immer direkt miteinander verglichen werden.

[4] Milchvieh und Rinder ausschließlich grünlandbasiert zu halten, bietet sowohl mit Blick auf die globale Ernährungssicherheit (vgl. Abschnitt 5.2.2.3 oder Anhang, Abschnitt 12.2.4.1.1), das Tierwohl und die Ökologie erhebliche Vorteile. Vor- und Nachteile sind im Anhang in Abschnitt 10.5.2.2 dargestellt. Die Potenziale grünlandbasierter Viehhaltung sind im Anhang in Abschnitt 10.5.2.3 ausgeführt.

3 Auswahl und Kenndaten der Landkreise

3.1.1 Auswahl der Landkreise

Für die Berechnung möglicher Autonomiepotenziale wurden fünf Landkreise in Baden-Württemberg ausgewählt, die sich in mehreren Punkten unterscheiden und dennoch gemeinsam dem Landesdurchschnitt von Baden-Württemberg nahekommen sollten. Um eine möglichst große Spanne abzubilden, wurden der am dichtesten besiedelte Landkreis Baden-Württembergs (Esslingen) und der Landkreis mit der zweitniedrigsten Einwohnerdichte (Sigmaringen) gewählt, der pro Quadratkilometer nur acht Einwohner mehr aufweist als der Landkreis mit der geringsten Einwohnerdichte. Weitere Auswahlkriterien neben der Bevölkerungsdichte waren eine ausreichende Datengrundlage, eine räumliche Nähe zueinander sowie unterschiedliche Strukturen der landwirtschaftlichen Nutzflächen. Zudem sollten die Siedlungsflächen für Wohnen und Gewerbe sowie das Dachflächenphotovoltaikpotenzial in der Summe der Landkreise dem Landesdurchschnitt von Baden-Württemberg nahekommen. Diese Kriterien werden weitestgehend durch die Kombination der Landkreise Bodenseekreis, Esslingen, Konstanz, Ravensburg und Sigmaringen erfüllt, die sich mit Ausnahme des am dichtesten besiedelten Kreises Esslingen im Südosten des Landes Baden-Württemberg befinden und direkte Nachbarn sind (vgl. Abbildung 2). Ihre Kenndaten sind im Folgenden im Vergleich dargestellt.



Abbildung 2: Übersichtskarte zur Lage der fünf Landkreise in Baden-Württemberg

3.1.2 Bevölkerung und Bevölkerungsdichte

Die Bevölkerungsdichte der Landkreise Bodenseekreis, Esslingen, Konstanz, Ravensburg und Sigmaringen liegt in einer Spanne zwischen 1,1 und 8,3 Einwohner pro Hektar (vgl. Tabelle 4). Gemeinsam weisen sie mit 3,4 EW/ha eine um 11 Prozent höhere Einwohnerdichte als das Land Baden-Württemberg auf. Dichter besiedelt als der Landkreis Esslingen sind in Baden-Württemberg nur die Stadtkreise. Pro Einwohner stehen den fünf Landkreisen rund 95 Prozent der land- und forstwirtschaftlichen Fläche zur Verfügung, die im Landesdurchschnitt verfügbar sind (vgl. Abbildung 3).

Tabelle 4: Fläche und Bevölkerungsdichte der Landkreise

Landkreis	Fläche (ha)	Einwohner	Bevölkerungs-dichte (EW/km²)
Bodenseekreis	66.479	214.655	323
Esslingen	64.128	532.447	830
Konstanz	81.798	284.015	347
Ravensburg	163.210	283.264	174
Sigmaringen	120.423	130.192	108
SUMME	**496.038**	**1.444.573**	**343**

3.1.3 Flächenpotenziale

In den fünf Landkreisen stehen pro Person 2.500 m² landwirtschaftliche Nutzfläche zur Verfügung, die Spanne reicht von 720 m²/EW im Kreis Esslingen bis 7.740 m²/EW im Kreis Sigmaringen. Ihre Zusammensetzung variiert von Landkreis zu Landkreis (vgl. Tabelle 6 und Abbildung 3).

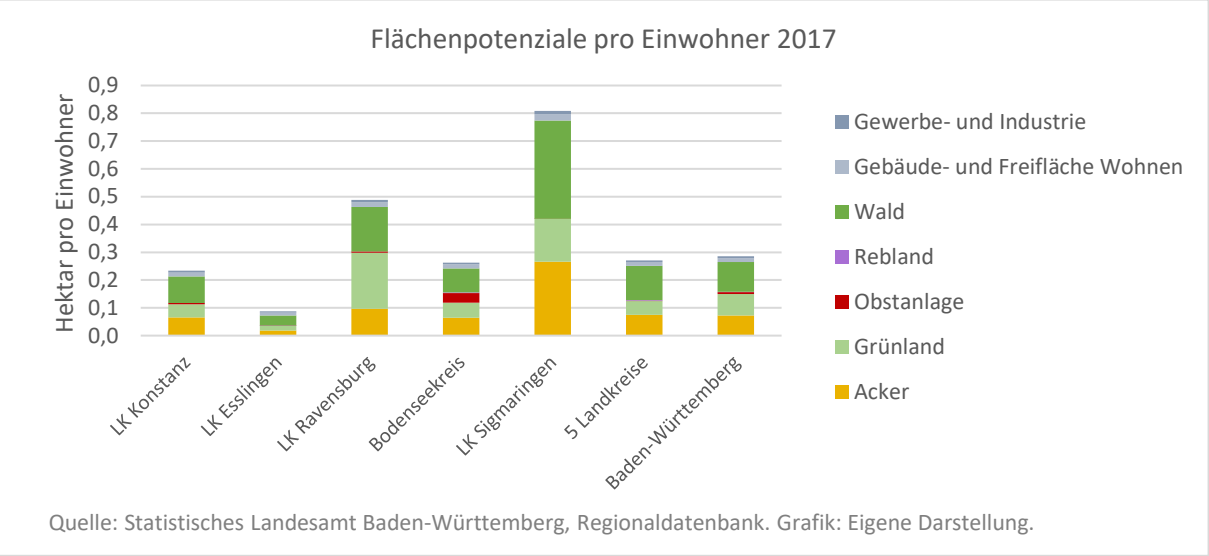
Tabelle 5: Flächenpotenziale der Landkreise (m²/Einwohner)

	LK Konstanz	LK Esslingen	LK Ravens-burg	Boden-seekreis	LK Sigma-ringen	5 Land-kreise	Baden-Würt-temberg
Acker	657	188	967	639	2.660	744	723
Grünland	477	178	2.011	544	1.540	495	773
Obstanlagen	36	4	54	350	2	19	71
Rebland	2	2	0	25	0	23	5
Wald	964	349	1.601	860	3.542	1.227	1.079
GF Wohnen*	136	108	169	146	224	141	139
Gewerbe/Industrie	60	45	76	61	118	63	66

* GF = Gebäude- und Freiflächen
Quellen: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg; LUBW, 2019

Während die Landkreise Esslingen und Sigmaringen die beiden Enden der untersuchten Bandbreite darstellen, befindet sich der Landkreis Ravensburg in der Mitte zwischen diesen

beiden Kreisen. Die Kreise Bodenseekreis und Konstanz, die bei den Flächenpotenzialen zwischen den Kreisen Esslingen und Ravensburg liegen, ähneln sich mit Blick auf die pro Person verfügbaren land- und forstwirtschaftlichen Flächen. Der Bodenseekreis weist im Vergleich zum Kreis Konstanz jedoch eine deutlich größere Obstanlagenfläche auf.



Quelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Regionaldatenbank. Grafik: Eigene Darstellung.

Abbildung 3: Flächenpotenziale der Landkreise nach Art der Flächen (Hektar pro Einwohner)

Neben den landwirtschaftlichen Nutzflächen sind im Siedlungsbereich vor allem Dachflächen geeignet, um Energie zu gewinnen oder Nahrung zu erzeugen. Für die fünf betrachteten Landkreise liegen Daten aus dem Energieatlas Baden-Württemberg zur potenziellen Modulfläche für die Solarenergienutzung auf Gebäudedächern vor. Das Modulflächenpotenzial liegt im Durchschnitt der fünf Landkreise bei 24 m² pro Einwohner, die Spanne reicht von 20 m²/EW im Kreis Konstanz bis 36 m²/EW im Kreis Sigmaringen (LUBW, 2019a). Mit einem Potenzial von 24 m²/EW kommen die fünf Landkreise dem Landesdurchschnitt von Baden-Württemberg nahe, welcher ca. 25 m²/EW beträgt.

Liegen für ein Gebiet noch keine Potenzialerhebungen vor, können Flächenpotenziale für die Solarenergienutzung auf Gebäudehüllen über die Flächen der vorhandenen Stadtraumtypen geschätzt werden (vgl. Anhang Abschnitt 12.2.2.2.1). Besonders große Solarpotenziale bieten in der Regel Gewerbegebiete (BMVBS & BBR, 2009 S. 10). Dort kann pro Hektar etwa die Hälfte des Ertrags von Freiflächensolaranlagen erreicht werden.

Tabelle 6: Modulflächenpotenziale der Landkreise für Solarenergienutzung auf Dachflächen (m²/Einwohner)

	LK Konstanz	LK Esslingen	LK Ravens-burg	Boden-seekreis	LK Sigma-ringen	5 Land-kreise	Baden-Würt-temberg
DF-Modulfläche	20	20	30	22	36	24	25

Quelle: Eigene Berechnung nach LUBW, 2019a, und Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2019d.

4 Zusammenfassung der Bedarfe

Der Sektor Nahrung hat gegenüber den Sektoren Energie und Rohstoffe stets einen vorrangigen Status. Die größte Herausforderung im Sektor Nahrung ist neben der langfristigen Sicherung einer ausreichenden Versorgung mit gesunden und vielfältigen Nahrungsmitteln die gerechte Verteilung der produzierten Nahrungsmittel. Weltweit stehen rund 1,4 Milliarden Hektar Ackerland zur Verfügung. Mit einem Anwachsen der Weltbevölkerung von rund 7 Milliarden auf 9 oder 10 Milliarden sinkt damit die weltweit verfügbare Ackerfläche von 0,2 Hektar auf weniger als 0,15 Hektar pro Person. Flächenverbrauch, Degradation und Klimawandel werden zudem zu Ertragseinbußen führen. Aktuell liegt die Flächeninanspruchnahme Deutschlands um etwa 53 Prozent über der künftig verfügbaren Fläche (vgl. Statistisches Bundesamt, 2019g). Dabei ist zu berücksichtigen, dass Deutschland im Vergleich zum weltweiten Durchschnitt höhere Ertragspotenziale pro Hektar aufweist. Für eine nachhaltige Versorgung mit Nahrung muss der Flächenbedarf der Ernährung daher um mehr als ein Drittel reduziert werden. Bei einer gleichzeitigen Umstellung auf ökologische Wirtschaftsweise ist dies eine noch größere Herausforderung. Untersucht wurde daher neben den Potenzialen der klassischen Landwirtschaft auch das Potenzial der urbanen Nahrungsproduktion, Beiträge zu der nötigen Flächenbedarfsreduktion zu leisten (Zusammenfassung in Abschnitt 5.2.1.1.2, ausführliche Darstellung im Anhang in Abschnitt 10.6). Die ausführliche Dokumentation der Datenbasis sowie die Berechnung der Bedarfe in den drei Sektoren ist im Anhang in den Abschnitten 10.1 bis 10.4 sowie in den Abschnitten 11.2 und 12.1 dargestellt.

4.1 Nahrungsbedarf

Der angenommene Kalorienbedarf für den Verzehr beträgt ca. 2.240 kcal pro Einwohner und Tag und wird je nach Ernährungsweise zu unterschiedlichen Anteilen mit tierischen und pflanzlichen Produkten gedeckt. Dieser Wert wurde anhand der aktuellen Altersstruktur der Bevölkerung in den Landkreisen und der jeweiligen PAL-Werte der verschiedenen Bevölkerungsgruppen geschätzt (vgl. Anhang Abschnitt 10.1). Er ist im Vergleich zu anderen Veröffentlichungen relativ hoch angesetzt[5] und reduziert somit das Risiko, den Bedarf zu unterschätzen. Da sich auch gewisse Verluste bei Transport, Lagerung und Verarbeitung nicht ganz vermeiden lassen, wurde zudem ein Puffer von 10 Prozent des Verzehrs aufgeschlagen. Dies entspricht etwa den nicht vermeidbaren Verlusten, die in Studien zu Nahrungsmittelverlusten angegeben werden (vgl. Anhang, Abschnitt 10.4). Somit ergibt sich ein zu deckender Bedarf von ca. 2.464 kcal pro Einwohner und Tag. Der aktuelle Kalorienverbrauch (Status Quo) beträgt in Deutschland aufgrund hoher Verluste und einer gewissen Überernährung ca. 3.250 kcal pro

[5] Häufig wird ein Bedarf von ca. 2.000 kcal pro Person und Tag angegeben.

Einwohner und liegt damit um 32 Prozent über dem berechneten Bedarf. Der Anteil von Verlusten und Verschwendung wird auf mindestens 25 Prozent des aktuellen Kalorienverbrauchs geschätzt (vgl. Anhang, Abschnitt 10.4). Der tägliche Kalorienbedarf pro Einwohner ist in Tabelle 7 nach Ernährungsweise dargestellt. Bei der Ernährungsweise Eco-Mix handelt es sich um einen Mittelwert zwischen den Orientierungswerten für eine gesunde Mischkost nach AGES und den Orientierungswerten des VEBU für eine vegetarische Ernährung.

Tabelle 7: Kalorienbedarf pro Einwohner nach Ernährungsweisen und Nahrungsmittelgruppen (kcal Verzehr pro Einwohner und Tag)

Nahrungsmittel-gruppe	Status Quo*	DGE	AGES	Eco-Mix	Vegeta-risch	Vegan
Fleisch & Fisch	325	163	138	69	0	0
Milchprodukte	259	350	297	228	159	0
Eier	28	41	36	26	15	0
Pflanzliche Produkte	1.627	1.686	1.769	1.918	2.066	2.240
Insgesamt	2.240	2.240	2.240	2.240	2.240	2.240

* Der tatsächliche Verzehr liegt oberhalb des eigentlichen Bedarfs.
Quelle: Eigene Berechnung nach BMEL, 2017; MRI, 2008; VEBU, 2017a; VEBU, 2017b; AGES, 2017; DGE, 2018a; BVDF, 2018; MRI, 2008; Heuer, 2018;

Abbildung 4 veranschaulicht die Anteile tierischer und pflanzlicher Produkte an der jeweiligen Kalorienaufnahme nach Ernährungsweise grafisch. Die Reihenfolge richtet sich nach dem Anteil von Fleisch und Fisch am Kalorienverzehr. Dieser beträgt laut Ernährungsempfehlungen maximal die Hälfte des heutigen Durchschnittswertes. Die ausführliche Dokumentation der Datenbasis sowie die Berechnung des heutigen Verbrauchs und der möglichen Bedarfe nach Ernährungsweise befindet sich im Anhang in den Abschnitten 10.1, 10.2 und 10.3.

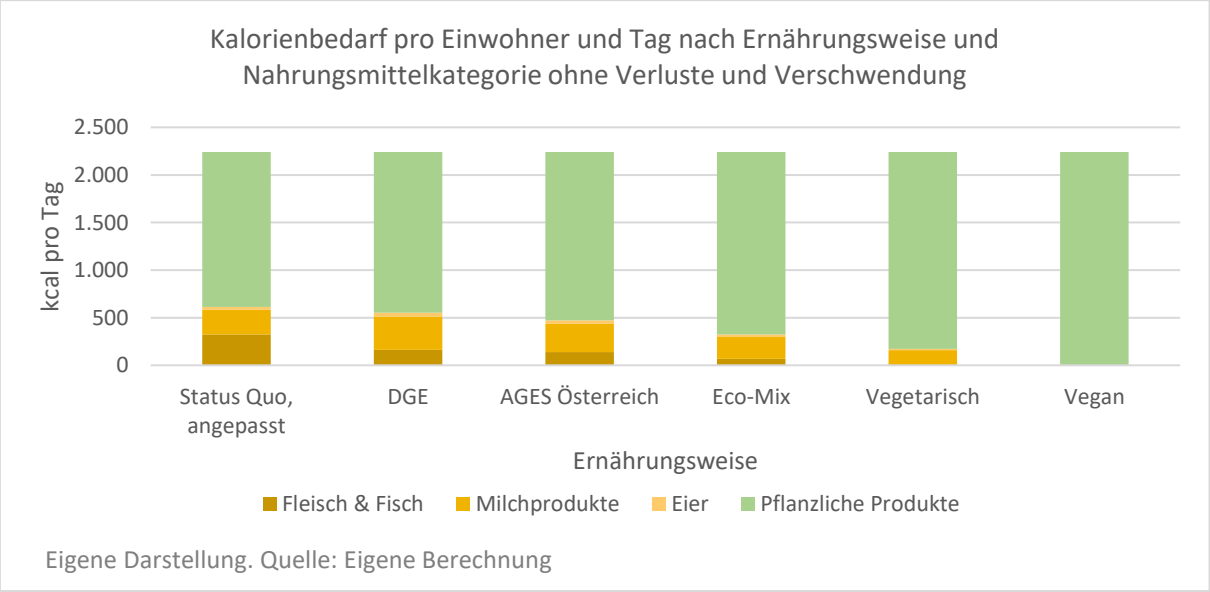


Abbildung 4: Kalorienbedarf pro Einwohner und Tag nach Ernährungsweise und Nahrungsmittelkategorie (ohne Verluste und Verschwendung)

In Tabelle 8 ist der angenommene Lebensmittelverbauch nach den heutigen Verbrauchsgewohnheiten im Vergleich zu den alternativen Ernährungsweisen dargestellt. Die zum Verzehr angegebenen Mengen pro Person und Jahr entsprechen laut Kalorientabellen dem beschriebenen Kalorienbedarf von rund 2.240 kcal pro Person und Tag.

Tabelle 8: Angenomener Lebensmittelverbrauch nach Ernährungsweisen im Vergleich (kg/a)

	Verbrauch 2015 (BMEL, 2017)	**Verzehr 2015** (BMEL/ MRI)	**Verzehr vegetar.** n. VEBU	**Verzehr vegan** n. VEBU	**Verzehr Misch-kost n. AGES**, 2017	**Verzehr Misch-kost n. DGE**, 2018	**Eco-Mix**
Fleisch, gesamt	89,7	52,6 [1)]			19,1	25,8	9,5
Fleisch, weiß	20,1	11,8			14,2	**12,9	7,1
Fleisch, rot	69,6	40,8			4,9	**12,9	2,4
Fisch	*13,5	7,1			7,6	6,6	3,8
Milch	54,0	53,1	46,2		14,2	35,9	30,2
Joghurt, Quark, etc.	40,9	29,7			62,1	49,4	31,0
Käse	24,5	15,3	9,2		17,7	22,0	13,5
Butter	6,0	4,9				4,5	
Eier	14,5	6,9	3,4		8,2	9,3	5,8
Gemüse	97,1	83,9	221,9	140,8	266,1	140,4	244,0
Obst	102,7	92,7	110,9	105,6	106,5	100,2	108,7
Saft		*0,0					
Getreide	23,3	21,0	57,3	68,6	60,3	22,0	58,8
Brot, Backwaren	92,8	72,1	19,2	40,5	21,3	80,1	20,3
Reis, roh	5,1	4,6 [3)]	30,3	28,2	19,9	11,0	25,1
Kartoffeln	68,6	25,2	103,5	88,0	95,8	90,2	99,7
Hülsenfrüchte	1,1	1,0	38,8	42,2	21,9	19,9	30,4
Tofu			19,2	35,2			9,6
Nüsse & Samen	3,7	1,9	16,9	15,8	8,9	10,0	12,9
Pflanzl. Öle/Fette	14,6	13,1 [4)]	5,5	5,3	5,3	9,5	5,4
Honig	1,1	1,0 [3)]					
Marmelade							
Zucker	34,0	25,4 [2)]					
Meeresalgen				1,1			
SUMME	**687,9**	**511,7**	**682,6**	**570,0**	**734,9**	**636,8**	**708,8**

Eco-Mix = Mittelwert zwischen den Ernährungsweisen Mischkost nach AGES und Vegetarisch nach VEBU

* Fanggewicht

** Der Verzehr von Saft und Nektar wird von MRI (2008) mit rund 92 kg pro Jahr angegeben. Der Kaloriengehalt von Saft, Nektar und Limonaden geht vor allem auf den Zuckergehalt zurück, der jedoch in der Kategorie Zucker erfasst ist. Um eine Doppelwertung zu vermeiden, wurden hier keine Werte für den Getränkekonsum angegeben.

*** Da keine differenzierten Angaben zum Verzehr von rotem und weißem Fleisch gemacht werden, wurden jeweils Anteile von 50 Prozent angenommen.

Quellen: BMEL, 2017; MRI, 2008; VEBU, 2017a; VEBU, 2017b; AGES, 2017; DGE, 2018a
Ergänzende Quellen: (1) BVDF, 2018; BMEL, 2017; MRI, 2008; (2) Heuer, 2018; (3) Schätzwert (90% des Verbrauchs), da keine Angaben vorhanden; (4) Schätzwert, da die Verzehrsangabe deutlich mehr als 50 Prozent vom Verbrauch abweicht und nicht plausibel erscheint.

4.2 Energiebedarf

Der Energiebedarf der Landkreise lässt sich anhand der Fahrleistung der Kraftfahrzeuge, des Energieverbrauchs der Industrie sowie mithilfe von Durchschnittswerten für den Bedarf an Strom und Wärme in den Sektoren Wohnen und GHD schätzen. Sofern ältere Erhebungen vorlagen, die im Rahmen von Klimaschutzkonzepten und Energiewendeberichten durchgeführt wurden, wurden die Ergebnisse anhand ihrer Daten auf ihre Plausibilität geprüft.

Der ermittelte Energieverbrauch betrug in den fünf Landkreisen im Jahr 2017 (Status Quo) durchschnittlich 24,2 MWh pro Einwohner. Den höchsten Verbrauch weist mit 27,7 MWh/EW der Kreis Ravensburg auf, den niedrigsten Verbrauch der Kreis Esslingen mit 23,0 MWh/EW. Durchschnittlich entfällt die Hälfte des Endenergiebedarfs der fünf Landkreise auf thermisch genutzte Energieträger ohne Strom. Der Stromverbrauch hat im Durchschnitt der Landkreise einen Anteil von 22 Prozent am Endenergieverbrauch, auf den Treibstoffverbrauch entfallen 28 Prozent. Die Schätzung und ihre Datengrundlagen sind im Anhang in Abschnitt 12.1 ausführlich dargestellt.

Tabelle 9: Energiebedarf pro Einwohner im Jahr 2017

Endenergie	Bodensee-kreis	Esslingen	Konstanz	Ravens-burg	Sigmarin-gen	Durch-schnitt
Strom	5,4	5,3	5,3	5,4	5,6	5,4
Wärme	12,2	11,6	14,1	14,1	12,5	12,8
Treibstoffe	6,4	6,1	5,8	8,1	7,0	6,6
Insgesamt	24,0	23,0	25,2	27,7	25,0	24,7

Quelle: Eigene Berechnung (vgl. Anhang Abschnitt 12.1)

Möglichkeiten, den Bedarf zu senken, bestehen vor allem in der Gebäudesanierung und dem Umstieg auf effizientere Technologien, wie z. B. auf Wärmepumpen für die Beheizung von Gebäuden oder Elektromotoren für den Antrieb von Kraftfahrzeugen. Durch die Sanierung der Gebäudehüllen könnte so der durchschnittliche Endenergiebedarf der Gebäudebeheizung von ca. 134 kWh/m² (co2online gemeinnützige GmbH, 2011/2014 a) auf ca. 50 bis 60 kWh/m² gesenkt werden (dena, 2016 S. 3), was einem Nutzenergiebedarf von 43 bis 60 kWh/m² entsprechen würde. Ältere Gebäude, deren Nutzenergiebedarf trotz Sanierung nicht so weit gesenkt werden kann, müssen dabei durch Gebäude mit höherer Sanierungseignung sowie Neu- und Ersatzbauten ausgeglichen werden, die Passivhaus- oder Plusenergiehausstandard erreichen. Im nächsten Schritt könnte der Endenergiebedarf durch den Einsatz von Wärmepumpen bei einer durchschnittlichen Arbeitszahl von 3,0 auf 17 – 20 kWh/m² gesenkt werden, was einer Reduktion des Endenergiebedarfs um ca. 86 Prozent entspräche.

Der Endenergiebedarf von Pkw könnte durch den Umstieg von Verbrennungsmotoren auf Elektromotoren von ca. 73 kWh auf unter 20 kWh pro 100 km Fahrleistung gesenkt werden.

Dies entspricht einer Bedarfsreduktion um mehr als 73 Prozent. Insgesamt erscheint eine Reduktion des Bedarfs um 55 Prozent von 24,7 auf 11,1 MWh pro Einwohner realistisch. (Vgl. Abschnitt 6)

4.3 Rohstoffbedarf

Der Verbrauch an nachwachsenden Rohstoffen durch eine weitgehend auf biogene Rohstoffe umgestellte Produktion lässt sich nicht genau abschätzen, da er von vielen Faktoren beeinflusst wird, wie etwa von Konsumgewohnheiten, Modetrends, Kaufkraftentwicklungen und Recyclingquoten, aber auch von technischen Entwicklungen und bevorzugten Konstruktionsweisen im Bausektor und in der Möbelindustrie. So ist z. B. davon auszugehen, dass Metalle und Kunststoffe auch weiterhin einen erheblichen Anteil an der Möbelproduktion haben werden. Auch im Bausektor wird keine vollständige Umstellung auf nachwachsende Rohstoffe möglich sein. Zudem kann die Entwicklung zu einer Kreislaufwirtschaft den Bedarf an „frischen“ Rohstoffen künftig deutlich senken.

Geht man vom heutigen Konsum an Wohnfläche und Konsumgütern aus, würden der Bausektor ohne gewerbliche Bauten und die Konsumgüterproduktion bei einer weitgehend biobasierten Produktion schätzungsweise ca. 430 bis 540 kg biogene Rohstoffe pro Person und Jahr erfordern. Daran haben Kunststoffe mit 147 kg den größten Anteil, gefolgt vom Möbelkonsum mit rund 83 kg/Ea und dem Papierverbrauch mit rund 71 kg/Ea.

Der Baustoffbedarf für den Neubau, Ersatz und Bestanderhalt von Wohngebäuden würde geschätzt zwischen 60 und 210 kg nachwachsende Rohstoffe pro Einwohner und Jahr binden. Für den Zeitraum von 2020 bis 2035 wurde ein Wohnflächenneubau von 50 m² pro Neubürger angenommen. Da künftig mit einem geringeren Bevölkerungszuwachs und mehr auf Nachhaltigkeit ausgerichteten Wohnkonzepten gerechnet wird, dürfte der Baustoffbedarf im Neubau sinken, während er im Bestandserhalt steigen dürfte. Dementsprechend dürfte vor allem der Dämmstoffbedarf für Neubau und Sanierung, der aktuell zwischen 15 – 80 kg/Ea (je nach Art- und Dichte der Dämmstoffe) umfasst, bei einer Erhöhung der Sanierungsquote zunehmen.

Tabelle 10: Rohstoffbedarf der fünf Landkreise für die Baustoffbereitstellung bei heutigem Konsumniveau und Umstieg auf nachwachsende Rohstoffe

Produktgruppe oder Produkt	Einheit	Bedarf
Baustoffe		
Holzbedarf pro m² Neubauwohnfläche [1)]	m³/m² Wohnfläche	0,559
Holzbedarf Neubau 2020 - 2035 [1)]	m³/Einwohner*a	0,039
Holz für Ersatz und Bestandserhalt [2)]	m³/Einwohner*a	0,016
Dämmstoffe [1)]	m³/Einwohner*a	0,441

Quelle: (1) Eigene Berechnung, vgl. Anhang Abschnitt 11.2.1 (2) Eigene Grobschätzung, einschließlich Ersatz von Bestandsgebäuden

Der geschätzte Verbrauch an nachwachsenden Rohstoffen, der sich nach einer vollständigen „Rohstoffwende“ aus dem heutigen Verbrauch (Status Quo) sonstiger Konsumgüter ergeben würde, ist in Tabelle 11 dargestellt.

Die ausführliche Darstellung des Rohstoffbedarfs nach Produktgruppen befindet sich im Anhang in Abschnitt 11.2 (Rohstoffbedarf und Ertragspotenziale nach Produktgruppen).

Tabelle 11: Jährlicher Verbrauch von nachwachsenden Rohstoffen für Konsumgüter bei gleichbleibendem Konsum und weitgehender Umstellung auf nachwachsende Rohstoffe

Produktgruppe oder Produkt	Einheit	Bedarf
Möbel		
Holz (12 Jahre Nutzungsdauer)	kg/Einwohner	83,0
Textilfasern		
Fasern für Kleidung	kg/Einwohner	13,5
Fasern für sonstige Textilien	kg/Einwohner	12,5
Automobilbau*		
Fasern Innenausstattung	kg/Einwohner	0,9
Fasern Karosserie	kg/Einwohner	1,9
Spanplatten	kg/Einwohner	0,4
Papier		
Zellstoff	kg/Einwohner	56,3
Holzstoff	kg/Einwohner	14,9
Kunststoffe	kg/Einwohner	147,0
Stärke	kg/Einwohner	9,9
Alkohole (Ethanol etc.)	kg/Einwohner	0,17
Öle Insgesamt	kg/Einwohner	19,4
Tenside (Verbrauch Privathaushalte)	kg/Einwohner	2,27
Tenside, gewerblich/ industriell	kg/Einwohner	0,05
Sonstige einwertige gesättigte Alkohole	kg/Einwohner	1,70
Öl für Farben und Lacke	kg/Einwohner	0,89
Schmierstoffe etc.	kg/Einwohner	12,2
Kosmetik (Pflanzliche Öle)	kg/Einwohner	0,34
Seifen zur Körperpflege	kg/Einwohner	1,91
Insgesamt	**kg/Einwohner**	**ca. 430,0**

* Durchschnittliche Pkw-Neuzulassungen in den fünf betrachteten Landkreisen: 0,043 Stück pro Einwohner und Jahr
Quellen: siehe Anhang, Kapitel 11.2

4.4 Unsicherheiten der Bedarfsschätzung

Obwohl es zu den Verbrauchs- und Bedarfswerten, die für die Berechnung von Autonomiepotenzialen benötigt werden, in vielen Fällen nur einzelne oder wenige Datenquellen gibt, bestehen mit Blick auf die ausgewählten Produktsegmente kaum größere Datenlücken. Dennoch besteht vor allem im Sektor Rohstoffe noch ein erhebliches Verbesserungspotenzial. So mangelt es mit Blick auf die Produktgruppen Baustoffe und Möbel vor allem an Daten zum Rohstoffverbrauch durch den Bau und die Ausstattung (Möblierung etc.) von Nichtwohngebäuden. In der Produktgruppe Möbel mangelt es zudem an Daten zum Textilfaserverbrauch der Möbelproduktion. Weitere Datenlücken bestehen in den Produktgruppen Fahrzeuge (Karosseriebau und Innenausbau) und im Bereich der Oleochemie. Um auch für diese Produktgruppen genauere und vor allem differenziertere Berechnungen durchzuführen, muss die Datenverfügbarkeit wesentlich verbessert werden. Beispielsweise wird im Segment Farben und Lacke Verbesserungsbedarf mit Blick auf die Datengrundlage zum Rohstoffbedarf je Produkteinheit gesehen. Dies gilt insbesondere für importierte nachwachsende Rohstoffe. Der größte Nachholbedarf besteht im Produktsegment Köperpflege und Kosmetik, in dem insgesamt keine ausreichende Datengrundlage für eine Schätzung heutiger und künftiger Bedarfe vorhanden ist.

Die größte Unsicherheit besteht mit Blick auf die Potenziale, den zukünftigen Bedarf an Rohstoffen für die stoffliche Nutzung im Vergleich zum heutigen Status Quo zu reduzieren. Unsicher ist dabei vor allem, auf welches Maß der Rohstoffbedarf ohne Veränderungen des Konsumverhaltens (Suffizienz) allein mit Mitteln der technischen Effizienz reduziert werden kann. Dies gilt nicht zuletzt mit Blick auf die Potenziale einer Kreislaufwirtschaft mit möglichst geringem Bedarf an „frischen“ Rohstoffen (z. B. Cradle to Cradle). Ihre Kenntnis wäre eine wichtige Voraussetzung für eine noch genauere Schätzung zukünftiger Rohstoffautonomiepotenziale einer nachhaltigen Wirtschaftsweise.

5 Zusammenfassung der flächenbezogenen Kennwerte

Neben den Bedarfskennwerten bilden flächenbezogene Ertrags- und Effizienzkennwerte die entscheidende Datengrundlage für die Berechnung von Autonomiepotenzialen. Da keine geeignete und ausreichende Zusammenstellung dieser Kennwerte vorlag, die eine Verknüpfung der Sektoren Nahrung, Energie und Rohstoffe ermöglicht hätte, wurde eine umfassende Datenbasis erstellt, die die inländischen Ertragspotenziale und die wichtigsten Nutzungspfade der energetischen und stofflichen Nutzung umfasst. Zudem wurden nach der beschriebenen Methodik Effizienzkennwerte für alle berücksichtigten Produkte ermittelt. Da die Dokumentation dieser Datengrundlage und ihrer Herleitung sehr umfangreich ist, wurde die umfassende Dokumentation der vorliegenden Ausarbeitung als Anhang beigefügt. Bei den auf den folgenden Seiten dargestellten Ergebnissen handelt sich um eine Zusammenfassung der Ergebnisse, die im Anhang in den Abschnitten 10 bis 13 ausführlich und einschließlich aller dabei berücksichtigten Grundlagendaten dokumentiert und erläutert sind.

Mit Blick auf die Nachhaltigkeit von Energie- und Rohstoffwende werden im Folgenden neben den für die Autonomiepotenzialberechnungen relevanten Kennwerten auch wichtige Umweltkennwerte dargestellt, die einen unmittelbaren Flächenbezug aufweisen und im Rahmen der Autonomiepotenzialberechnung berechnet werden können.

Der Bedarf an Nahrung, Rohstoffen und Energie ist abhängig von einer Vielzahl von Faktoren, wie beispielsweise dem Alter und der Lebensweise der Bevölkerung, dem allgemeinen Wohlstandsniveau, den Konsumgewohnheiten, dem Anteil der Kreislaufwirtschaft, der Besiedlungsdichte und den klimatischen Bedingungen der betrachteten Region. Ebenso unterschiedlich wie die Bedarfe können auch die Ertragspotenziale pro Hektar ausfallen. Die hier dargestellten Bedarfe und Kennwerte gelten für Süddeutschland. Da die Abweichungen vom gesamtdeutschen Durchschnitt jedoch in den meisten Fällen eher gering ausfallen, weisen die Ergebnisse zumindest in ihren Grundzügen eine gute Repräsentativität für die Situation in Deutschland auf. Unterschiede zeigen sich im Vergleich zum gesamtdeutschen Durchschnitt aufgrund eines geringeren Anteils energieintensiver Industrie vor allem beim Endenergieverbrauch. Eine Übertragung der Ergebnisse auf andere Länder innerhalb Europas ist dagegen nicht ohne weiteres möglich, da schon die direkten Nachbarländer Deutschlands deutlich abweichende Ertragspotenziale aufweisen.

5.1 Zusammenfassung der Ertragspotenziale

5.1.1 Nahrung

Im Mittel können in der konventionellen Landwirtschaft Nahrungsmittel mit ca. 11 Mio. kcal pro Hektar erzeugt werden. Die ökologische Landwirtschaft erreicht im Mittel zwei Drittel der konventionellen Erträge (vgl. Tabelle 13). Bei der Fleischproduktion ist die Differenz zur konventionellen Wirtschaftsweise größer als im Gesamtdurchschnitt aller Nahrungsmittel, im Falle der grünlandbasierten Milchviehhaltung ist sie geringer (vgl. Anhang, Abschnitt 10.5.2.3). Im Gewächshaus kann mit Gemüse ein Ertrag von ca. 74 Mio. kcal pro Hektar Gewächshausfläche erreicht werden. Die Flächeneffizienz der Aquaponik ist aufgrund des Futterflächenbedarfs nicht höher als die der herkömmlichen Landwirtschaft (vgl. Tabelle 12). Die Flächeneffizienz von Gewächshäusern und Aquaponikanlagen reduziert sich zudem aufgrund eines hohen Energiebedarfs deutlich, wenn dieser mit erneuerbaren Energien gedeckt werden muss.

Tabelle 12: Ertragspotenziale der Nahrungsproduktion nach Wirtschaftsweise und Flächenbelegung

Flächennutzung	Kalorien kcal/ha*a		Korn/Frucht in t/ha*a		Stroh/Holz/Kraut/Heu in t/ha*a	
	⦸ konv.	⦸ ökol.	⦸ konv.	⦸ ökol.	⦸ konv.	⦸ ökol.
Getreide ⦸	20.772.362	11.863.321	6,3	3,6	6,3	3,6
Kartoffeln	29.417.178	16.602.913	42,0	23,7	2,5	1,4
Zuckerrüben	30.790.419	22.961.786	71,6	53,4	6,3	4,7
Ölfrüchte ⦸	10.043.098	8.171.320	2,2	1,7	4,8	4,1
Eiweißfrüchte ⦸	7.364.996	5.704.557	2,7	2,0	1,3	1,0
Gemüse ⦸	7.806.845	5.557.575	30,7	21,7	-	-
Obstanlage ⦸	8.959.217	6.431.000	16,5	11,9	5,0	5,0
Streuobst ⦸	k. A.	3.562.090	k. A.	6,7	1,0+6,0	1,0+6,0
Nussplantage ⦸	9.289.200	9.289.200	1,5	1,5	1,7	1,7
Wein (Weinmostproduktion) ⦸	7.200.000	5.040.000	9,0	6,3	-	-
Fleisch, ackerlandbasiert ⦸	5.676.000	2.420.000	2,6	1,1	7,2	4,3
Fleisch, grünlandbasiert ⦸	1.187.000	739.635	0,6	0,4	-	-
Tilapia	1.411.200	900.000	1,8	1,1	6,6	3,9
Hühnereier/Fleisch ⦸	4.435.395	2.793.298	2,6+0,2	1,6+0,1	8,6	5,9
Milch/Fleisch, grünlandbasiert ⦸	6.424.090	5.110.499	9,2+0,2	7,2+0,2	-	-
Agroforst mit Getreide & Walnuss	18.761.337	11.455.923	5,2+0,3	3,0+0,3	5,2+0,7	3,0+0,7
Agroforst mit Körnermais & Walnuss	10.484.897	6.997.648	8,1+0,3	4,9+0,3	8,6+0,7	5,2+0,7
Agroforst mit Kartoffeln & Walnuss	25.850.086	15.342.389	34,4+0,3	19,4+0,3	2,1+0,7	1,1+0,7
Dachfarm (Gewächshaus) ***	74.401.130	74.401.130	286,0	286,0	-	-
Aquaponik ohne FF ***	35.966.391	35.966.391	209,0	91,0	-	-
Aquaponik inkl. FF ***	3.530.904	2.309.800	13,3+1,7	8,7+1,1	6,2	3,8

FF=Futterfläche. *** Ohne Flächen der Energiegewinnung.
Tabelle: Eigene Zusammenstellung. Quelle: Eigene Berechnung nach diversen Quellen, vgl. Anhang Abschnitt 10.5

Die tatsächliche Fleischproduktion kann sowohl in den vorliegenden Autonomieberechnungen als auch in der Praxis über den allein auf Basis der Futterflächen berechneten Hektarerträgen liegen, da auch Futtermittel für die Fleischproduktion genutzt werden, die als Koppelprodukte bei der Produktion von pflanzlicher Nahrung, Energieträgern und Rohstoffen anfallen.

Mit pflanzlichen Produkten können im konventionellen Landbau im Durchschnitt rund 14,1 Mio. kcal/ha und im ökologischen Landbau rund 9,3 Mio. kcal/ha erzeugt werden. Dabei ist der Anbau pflanzlicher Nahrungsmittel etwa doppelt so ertragreich wie die grünlandbasierte Milchviehhaltung und um den Faktor drei bis vier ertragreicher als die Fleischproduktion mittels Schweine- oder Rindermast. Vergleichsweise gering sind die Hektarerträge in der Tilapiazucht, wenn rein pflanzliche Futtermittel verwendet werden. Bei ökologischer Wirtschaftsweise schneidet die grünlandbasierte Milchviehhaltung im Vergleich zu Pflanzen- und Fleischproduktion deutlich besser ab als bei konventioneller Wirtschaftsweise.

Tabelle 13: Durchschnittliche Kalorienerträge nach Wirtschaftsweise und Produktgruppe (kcal/ha) *

	konventionell	ökologisch
Pflanzliche Produkte	14.071.296	9.311.665
Milch (grünlandbasiert)	6.424.090	5.110.499
Hühnereier/-Fleisch	4.435.395	2.793.298
Fleisch	4.748.902	2.229.585
Fisch (Tilapia)	1.411.200	900.000
Insgesamt	**10.628.219**	**7.112.667**

* Die Zuweisung der Flächenanteile der einzelnen Produkte orientiert sich an ihren Anteilen am Nahrungsmittelverbrauch. So hat z. B. Schweinefleisch bisher den größten Anteil am Fleischkonsum.
Tabelle: Eigene Zusammenstellung. Quelle: Eigene Berechnung n. div. Quellen, vgl. Anhang Abschnitt 10.5

Im internationalen Vergleich liegen die deutschen Ertragspotenziale der Nahrungsproduktion deutlich über dem Durchschnitt. Bei Getreide (52 Prozent), Raps (54 Prozent) und Kartoffeln (47 Prozent) wird weltweit nur rund die Hälfte der deutschen Hektarerträge erreicht, bei Gemüse (56 Prozent) ist die Differenz nur etwas geringer. Bei Obst variiert die Differenz je nach Obstart: Während die globalen Erdbeerenerträge deutlich über den deutschen Erträgen liegen, bleiben aber auch die meisten Obstarten weltweit unter dem deutschen Durchschnitt. So werden mit Kirschen weltweit 87 Prozent der deutschen Erträge erzielt, mit Birnen 81 Prozent, mit Äpfeln 55 Prozent und mit Pflaumen nur 40 Prozent. Vergleichsweise gering sind dagegen z. B. die Unterschiede bei Walnuss, Sojabohne und Zuckerrübe. Letztere können daher auch ohne größere Auswirkungen auf den Flächenbedarf importiert werden. Hohe Importanteile bei Getreide, Kartoffeln, Gemüse und Äpfeln wirken sich dagegen deutlich auf den Flächenbedarf aus. Die Differenzen zwischen den deutschen und den globalen Durchschnittserträgen wirken sich auf die potenziellen flächenbezogenen Autonomiegrade aus.

Tabelle 14: Ertragspotenziale der Nahrungsproduktion weltweit und in Deutschland im Vergleich (Erhebungszeitraum 2014-2017)

Nahrungsmittel	Ertragspotenzial Deutschland (t/ha) [1)]	Ertragspotenzial global (t/ha) [1)]	Globales Ertrags-potenzial im Vergleich [2)]
Weizen	7,8	3,4	43%
Gerste	7,0	3,0	42%
Roggen	5,7	3,0	52%
Hafer	4,7	2,5	53%
Triticale	6,2	3,8	61%
Körnermais	9,7	5,7	59%
Kartoffeln	43,7	20,4	47%
Zuckerrüben	71,6	59,5	83%
Raps	3,8	2,1	54%
Silomais	43,2	25,3	59%
Sonnenblumenkerne	2,7	1,8	65%
Sojabohnen	3,2	2,7	84%
Leinsamen	1,8	1,0	57%
Linsen	1,0	1,2	118%
Lupinen	3,3	1,4	43%
Gemüse	25,0	14,2	57%
Äpfel	29,6	16,4	55%
Birnen	20,0	16,2	81%
Pflaumen	11,2	4,5	40%
Kirschen	6,3	5,5	87%
Erdbeeren	9,0	21,5	238%
Johannisbeeren	12,5	5,4	43%
Haselnuss	1,0	0,6	56%
Walnuss	1,6	1,6	97%

Quellen: (1) FAOSTAT, 2020 (2) Eigene Berechnung

5.1.2 Energie

Die Erträge erneuerbarer Energien liegen in Süddeutschland zwischen 10 und knapp 720 MWh/ha*a. Süddeutsche Buchenwälder liefern bei energetischer Nutzung ca. 20 MWh/ha. Landwirtschaftlich kultivierte Energiepflanzen liefern im konventionellen Anbau ca. 45 MWh/ha, im ökologischen Anbau ermöglichen nur Energiepflanzen der zweiten Generation Erträge von mehr als 40 MWh/ha im Durchschnitt der verschiedenen Pflanzen (vgl. Tabelle 15). Die Windenergie liefert etwa die zehnfache Energiemenge dessen und ist mit dem Anbau von Nahrungs- oder Energiepflanzen kombinierbar, sodass insgesamt Energieerträge von 460 MWh/ha*a möglich sind. Die höchsten Energieerträge liefern mit bis zu 720 MWh/ha* Freiflächensolaranlagen. Dank bifazialer Module können aufgeständerte Agrophotovoltaikanlagen sogar die gleichen Energieerträge liefern, die herkömmliche Freiflächenanlagen mit geringeren Modulabständen erreichen.

Tabelle 15: Durchschnittliche Erträge der Nutzung erneuerbarer Energien nach Flächennutzung und Wirtschaftsweise

Flächennutzung	Energieertrag in MWh/ha*a		Korn-/Fruchtertrag in t/ha*a		Nahrungskalorienertrag in kcal/ha*a	
	⌀ konv.	⌀ ökol.	⌀ konv.	⌀ ökol.	⌀ konv.	⌀ ökol.
Energiepflanzen 1. Generation	46	27	-	-	5.300	3.900
Energiepflanzen 2. Generation	44	42	-	-	397.800	397.800
Holz	20	20	-	-	-	-
Windenergie und Getreide	417	417	6,2	3,5	20.356.900	11.606.200
Freiflächen-PV, Schafweide ext.	710	710	-	-	320.000	210.000
Agro-PV mit Getreide *	574	574	5,4	3,1	17.864.200	10.202.500
Agro-PV mit Kartoffeln *	574	574	36,1	20,4	25.298.800	14.278.500
Agro-PV mit BFM, Getreide *	717	717	5,4	3,1	17.864.200	10.202.500
Agro-PV mit BFM, Kartoffeln *	717	717	36,1	20,4	25.298.800	14.278.500
Agro-PV mit BFM, Milch *	717	717	7,8	6,1	5.460.500	4.273.400
Agrothermie, Getreide, Milch. **	148	148	5,8/0,6	3,3/0,5	19.618.500	11.271.100

PV = Photovoltaik, BFM = Bifaziale Module
* Erträge von neuen ertragreichen Photovoltaikanlagen in Süddeutschland. Milchviehhaltung grünlandbasiert.
** Inkl. der für die Stromgewinnung benötigten Agrophotovoltaikanlage in Kombination mit grünlandbasierter Milchviehhaltung
Tabelle: Eigene Zusammenstellung. Quelle: Eigene Berechnung nach diversen Quellen, vgl. Anhang Abschnitt 12.2

Allerdings reduzieren Agro-PV-Systeme die pflanzlichen Erträge um bis zu 20 Prozent (Fraunhofer ISE, 2017; IWR, 2019). Auf Grünland sind die absoluten Einbußen bei den Kalorienerträgen daher geringer als unter Agrophotovoltaikanlagen auf ertragreichem Ackerland. (Vgl. Anhang, Abschnitt 12.2.2.4)

Neben den flächengebundenen Energiepotenzialen verfügen die Landkreise über weitgehend oder gänzlich flächenunabhängige Energiepotenziale wie Wasserkraft und Erdwärme. Hinzu kommen Reststoffe und Abfälle, die beispielsweise in der Viehhaltung anfallen. Das Energiepotenzial der Mist- und Gülleaufkommen wurde auf Basis der Viehbestände berechnet, die sich aus den je nach Szenario aufgewendeten Futterflächen ergeben. Das Aufkommen an Mist und Gülle wurde auf Basis der Werte berechnet, die in Tabelle 471 dargestellt sind. Im Szenario 2035 ergab sich damit im Mittel der fünf betrachteten Landkreise ein nachhaltiges Endenergiepotenzial von bis zu 220 kWh pro Einwohner und Jahr. Dabei reicht die Spanne von 105 kWh/Ea im Kreis Esslingen bis 460 kWh/Ea im Kreis Sigmaringen. Die technischen Potenziale der Windenergie sind von Landkreis zu Landkreis ebenfalls sehr verschieden, weshalb für sie hier kein Mittelwert angegeben werden kann. Die Windenergiepotenziale der Landkreise sind, soweit bekannt, in Tabelle 443 dargestellt, die Potenziale flächenunabhängiger Energiequellen in Tabelle 444. Es wurde davon ausgegangen, dass sich die Potenziale von Wasserkraft und Klärgas nicht wesentlich verändern werden. Geothermiepotenziale konnten nicht berücksichtigt werden, da hierzu keine ausreichende Datengrundlage existiert.

Für die Berechnung der Autonomiepotenziale bei globalem Güteraustausch und des davon ableitbaren globalen Landfußabdrucks wurden die globalen Durchschnittserträge des Biomasseanbaus geschätzt. Die Schätzung der globalen Hektarerträge basiert überwiegend auf Daten der FAO, die durch Daten aus wissenschaftlichen Studien ergänzt wurden.

Tabelle 16: Ertragspotenziale der Bioenergie weltweit und in Deutschland im Vergleich

Produktgruppe	Einheit	Welt	Deutschland [5)]	Welt/BRD [7)]
Energieträger				
Öl*	t/ha	[4)] 0,8	1,1	77%
Ethanol	t/ha	[4)] 3,3	4,0	84%
Festbrennstoff Holz	m³/ha	[1) 2)] 3,2	4,9	65%
Festbrennstoff Miscanthus	t/ha	[3)] 8,8	[9)] 18,0	49%
Energiegehalt der Energieträger				
Öl	MWh/ha	[4)] 9	12	77%
Ethanol	MWh/ha	[4)] 23	28	84%
Biogas	MWh/ha	[4)] 26	46	58%
Festbrennstoff Holz**	MWh/ha	[1) 2)] 13	20	65%
Festbrennstoff Miscanthus	MWh/ha	[3) 6)] 42	[6)] 85	49%

* Ohne Palmöl. ** Bei thermischer Nutzung des gesamten Hektarertrags ohne stoffliche Nutzung.
Quellen: (1) FAO, 2018b, S. 50; (2) FSC Schweiz, 2018; (3) Shepherd, et al., 2020 (4) Eigene Berechnung n. FAOSTAT; (5) Eigene Berechnung n. diversen Quellen wie zuvor in Kapitel 12.2.4 dargestellt (6) KTBL, 2012; (7) Eigene Berechnung und FAOSTAT, 2020

Zu den meisten Energiepflanzen der zweiten Generation, insbesondere zu den Potenzialen der Sida, der Durchwachsenen Silphie und der meisten schnellwachsenden Gräser, sind bisher jedoch noch keine globalen Durchschnittswerte verfügbar. Das globale Ertragspotenzial von Miscanthus wurde von Shepherd et. al. übernommen. Shepherd et. al. weisen jedoch auf eine mit Unsicherheiten behaftete Datengrundlage hin (Shepherd, et al., 2020).

5.1.3 Rohstoffe

Mittlere Ertragspotenziale von Rohstoffpflanzen sind nicht ohne Weiteres zusammenzufassen, da sie in vielen Fällen sehr unterschiedliche Koppelprodukte liefern. Zudem sind die Hektarerträge aus verschiedenen Gründen nur bedingt geeignet, um allein als Grundlage für eine Schätzung der Autonomiepotenziale genutzt zu werden. Häufig sprechen z. B. ökologische oder soziale Gründe dafür, sich nicht ausschließlich für die ertragreichsten Pflanzen zu entscheiden, sondern für eine größere Pflanzenvielfalt. Die Kombination muss unter Umständen im Einzelfall angepasst werden.

In Tabelle 17 sind die Ertragspotenziale von Rohstoffpflanzen nach Produktgruppen (Bauholz, Dämmstoffe, Möbel, Textilfasern, Zellstoff, Kunststoffe, Öl und Ethanol) zusammengefasst. Dargestellt sind entweder die Erträge der dominierenden Pflanzen (z. B. Buche und Fichte) oder die durchschnittlichen Erträge der wichtigsten Pflanzen innerhalb der jeweiligen Rohstoffpflanzengruppe, die vergleichbare Koppelprodukte liefern. Die Darstellung ist nicht mit dem

Anspruch auf Vollständigkeit verbunden, sondern soll vor allem der Orientierung dienen. Detaillierte Angaben zu den Ertragspotenzialen sind im Anhang in Abschnitt 11 (Rohstoffe) gemacht.

Tabelle 17: Ertragspotenziale der Rohstoffproduktion nach Wirtschaftsweise und Produktgruppe

Hauptprodukt / Wichtigstes Koppelprodukt	Genutzte Flächenart	Ertrag Hauptprodukt			Ertrag Koppelprodukt		
		Einheit	⌀ konv.	⌀ ökol.	Einheit	⌀ konv.	⌀ ökol.
Buchenbauholz/Viskose	Forst	m³/ha	4,90	4,90	t/ha	0,14	0,14
Fichtenbauholz/Zellstoff	Forst	m³/ha	5,80	5,80	t/ha	0,28	0,28
Dämmstoffe/Schäben	Acker	m³/ha	140,70	135,40	t/ha	1,90	1,50
Möbel/Brennstoff	Forst	t/ha	2,20	2,20	MWh/ha	14,00	14,00
Textilfasern/Dämmstoff	Acker	t/ha	1,50	1,40	m³/ha	24,60	22,30
Textilfasern/Brennstoff	Acker	t/ha	0,70	0,70	MWh/ha	13,00	13,00
Viskose/Möbel	Forst	t/ha	0,70	0,70	t/ha	1,60	1,60
Zellstoff/Energie	Acker	t/ha	5,60	5,60	MWh/ha	2,00	2,00
Kunststoff/Futtermittel ⌀	Acker	t/ha	2,70	1,60	t/ha	6,20	3,60
Pflanzenöl/Stroh	Acker	t/ha	1,10	0,80	t/ha	6,20	5,10
Ethanol/Futtermittel	Acker	t/ha	4,00	2,30	t TM/ha	3,40	2,00

Eigene Zusammenstellung. Quelle: Eigene Berechnungen nach diversen Quellen

Für die Berechnung der Autonomiepotenziale bei internationalem Güteraustausch und des davon ableitbaren globalen Landfußabdrucks wurden die in Tabelle 18 dargestellten globalen Durchschnittswerte zugrunde gelegt. Die Schätzung basiert auf Daten der FAO zu den globalen Ertragspotenzialen wichtiger Rohstoffpflanzen. Diese sind in Tabelle 473 (s. Anhang) zusammengefasst.

Tabelle 18: Rohstoffertragspotenziale weltweit und in Deutschland im Vergleich (t/ha)

Produktgruppe	Einheit	Welt	Deutschland [8]	Welt/BRD [9]
Bauholz	m³/ha	[1) 2)] 3,2	4,9	65%
Dämmstoff	m³/ha	[6)] 85,9	141,0	61%
Fasern für Textilien	t/ha	[3)] 0,8	1,2	61%
Zellstoff für Papier aus Holz	t/ha	[5)] 1,5	2,3	65%
Zellstoff für Papier aus Gräsern/Hanf	t/ha	[3) 4)] 3,6	5,6	65%
Kunststoffe	t/ha	[7)] 1,4	2,7	51%
Öl*	t/ha	[6)] 0,8	1,1	77%
Ethanol	t/ha	[6)] 3,3	4,0	84%

* Ohne Palmöl.
Quellen: (1) (FAO, 2018b S. 50); (2) (FSC Schweiz, 2018); (3) FAO, 2020, FAOSTAT; (4) (Shepherd, et al., 2020) (5) Eigene Berechnung nach: FAO, 2018, FSC, 2018; Paavilainen und Torgilsson, 1994 zit. n. Pahkala, Paavilainen & Mela, 1997 (6) Eigene Berechnung n. FAOSTAT (7) Eigene Berechnung n. FAOSTAT und IfBB Hannover, 2017; (8) Eigene Berechnung n. diversen Quellen wie zuvor dargestellt; (9) Eigene Berechnung n. diversen Quellen, wie zuvor dargestellt.

5.1.4 Unsicherheiten Ertragskennwerte

Unsicherheiten, welche die ermittelten Ertragskennwerte betreffen, werden als insgesamt gering eingeschätzt. Zu einigen Kennwerten liegen bisher zwar nur geringe Erfahrungswerte vor, doch haben die betroffenen Kennwerte nur geringe Bedeutung für die Autonomiepotenziale und den globalen Landfußabdruck. Die mit ihnen verbundenen Unsicherheiten sind dementsprechend gering. Die große Mehrzahl der verwendeten Kennwerte basiert auf langjährigen und mehrfach bestätigten Erhebungen.

Die größten Unsicherheiten, welche die verwendeten Ertragskennwerte und die berechneten Autonomiepotenziale betreffen, bestehen sicherlich mit Blick auf die Auswirkungen des Klimawandels. Sie betreffen sämtliche Flächennutzungen, die in den drei Sektoren zur Anwendung kommen. Wie sich die Ertragspotenziale dadurch im Laufe der Zeit verändern werden, lässt sich bisher kaum absehen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass erhebliche Schwankungen der Jahreserträge infolge von Dürren, Hitzewellen oder Überschwemmungen häufiger werden und sich in ihrer Ausprägung sicherlich verstärken. Allerdings besteht auch die Möglichkeit, dass die negativen Auswirkungen des Klimawandels auf die Ertragspotenziale zumindest teilweise ausgeglichen werden können, da sich nicht nur die ökologische Landwirtschaft, sondern auch viele Technologien noch in der Einführungs- oder Etablierungsphase befinden. Es ist daher nicht unwahrscheinlich, dass ihre Entwicklungspotenziale noch nicht ausgeschöpft sind. Zu nennen sind hier beispielsweise mögliche Ertragssteigerungen der Photovoltaik durch die Nutzung bifazialer Module. Größere Effizienzsteigerungen werden aber auch im Bereich der Rohstoffnutzung für möglich gehalten.

Die Datengrundlage innerhalb des Rohstoffsektors erscheint ausreichend, wird insgesamt aber noch als verbesserungswürdig eingeschätzt.

5.2 Der Flächenfußabdruck der Produkte - Zusammenfassung der Flächenbedarfe je nach Koppelproduktnutzung

Mit Blick auf den Flächenfußabdruck eines Produktes ist, wie bereits dargestellt, zwischen dem (Brutto)-Flächenbedarf eines Produktes und der (Netto-)Flächeninanspruchnahme durch ein Produkt zu unterscheiden. Der Flächenbedarf entspricht der land- oder forstwirtschaftlichen Fläche, die benötigt wird, um ein Produkt als Hauptprodukt zu erzeugen. In der Regel fallen bei der Produktion pflanzlicher Biomasse jedoch verschiedene Rohstoffe für unterschiedliche Produkte an. Das Aufkommen dieser zusätzlichen Rohstoffe (Koppelrohstoffe) ist an die Erzeugung des vorrangig erzeugten Rohstoffes gekoppelt. Produkte, die auf diesen Koppelrohstoffen basieren, werden daher im Folgenden als Koppelprodukte bezeichnet. Fallen bei der Erzeugung eines Hauptproduktes keine Koppelrohstoffe an, die für die Herstellung von Koppelprodukten geeignet sind, entspricht die Netto-Flächeninanspruchnahme dem Brutto-Flächenbedarf eines Produktes. Dies ist auch der Fall, wenn Nebenrohstoffe anfallen, aber ungenutzt bleiben. Mögliche Flächengutschriften, die sich aus der Nutzung möglicher Koppelprodukte ergeben, reduzieren die Flächeninanspruchnahme durch ein Hauptprodukt unter den Flächenbedarf dieses Hauptproduktes. Bei der Berechnung der Flächeninanspruchnahme durch einzelne Koppelprodukte wurde stets angenommen, dass alle anfallenden Nebenerzeugnisse tatsächlich genutzt werden. Die Berechnung erfolgte nach der beschriebenen Methodik (vgl. Abschnitt 2.4)

5.2.1 Sektor Nahrung

5.2.1.1 Flächeninanspruchnahme durch Nahrungsmittel

5.2.1.1.1 Klassische Landwirtschaft

Der Flächenbedarf der Ernährung wird im Wesentlichen beeinflusst durch die Ernährungsweise, die Herkunft der konsumierten Produkte, die Wirtschaftsweise der Produktion, die Art der Viehhaltung, die Höhe der unvermeidbaren Verluste, das Ausmaß der Verschwendung und die Nutzung der Koppelprodukte. Aktuell weist der Nahrungsmittelverbrauch in Deutschland relativ hohe Anteile von tierischen Produkten, Importwaren und vermeidbaren Verlusten auf. So ergibt sich nach Erhebungen des Statistischen Bundesamtes eine durchschnittliche Flächenbelegung durch Ernährungsgüter für den deutschen Konsum von rund 0,23 Hektar pro Einwohner (Statistisches Bundesamt, 2019g), obwohl der größte Teil der Nahrungsmittel nach wie vor konventionell erzeugt wird. Durch die Reduktion der Nahrungsmittelverluste und eine Umstellung auf eine weitgehend vegetarische Ernährungsweise könnte der Flächenbedarf der Ernährung in Deutschland bei konventioneller Wirtschaftsweise auf 0,09 Hektar pro Person

gesenkt werden.[6] Der Effekt der Maßnahmen wird dadurch verstärkt, dass ein reduzierter Flächenbedarf die möglichen Anteile lokaler Produktion erhöht, sodass sich die im internationalen Vergleich überdurchschnittlichen Ertragspotenziale Süddeutschlands deutlicher auf den Flächenbedarf auswirken können. Verlagert sich die Produktion von Produkten dagegen aufgrund von Verschwendung oder eines übermäßigen Fleischkonsums ins Ausland, steigt der Flächenbedarf des Warenkorbes aufgrund der Ertragsunterschiede in den meisten Fällen überproportional an. Im Falle einer gleichzeitigen Umstellung auf eine ökologische Wirtschaftsweise lässt sich der Flächenbedarf durch die genannten Maßnahmen noch auf etwas mehr als 0,12 Hektar senken. Somit übersteigt der Bedarf der ökologischen Alternative den Bedarf der konventionellen Landwirtschaft um rund 35 Prozent. Die relativ geringe Differenz ist vor allem auf den hohen Anteil von pflanzlichen Erzeugnissen und Milchprodukten an der vegetarischen Ernährungsweise zurückzuführen. Im Durchschnitt der 74 verglichenen Möglichkeiten, pflanzliche Lebensmittel zu erzeugen, erreicht die ökologische Wirtschaftsweise 70 Prozent der Erträge, die im konventionellen System erreicht werden (vgl. Anhang, Abschnitt 10.5). Deutlich größer ist die Differenz bei Fleischprodukten, weshalb der Flächenbedarf der Ernährung bei ökologischer Wirtschaftsweise mit einem steigenden Fleischanteil schneller steigt, als dies bei konventioneller Wirtschaftsweise der Fall ist. Bei der Fleischproduktion erreicht die ökologische Landwirtschaft durchschnittlich die Hälfte der konventionellen Erträge, wobei die Spanne von 37 Prozent Hähnchenmast bis 62 Prozent bei grünlandbasierter Rindermast reicht. Die im Vergleich zur pflanzlichen Produktion größere Differenz zwischen ökologischer und konventioneller Produktion in der Viehhaltung ist darauf zurückzuführen, dass die Futtermittel überwiegend auf Getreide basieren und den Tieren in der ökologischen Landwirtschaft mehr Auslauf geboten wird. Die Flächeneffizienz tierischer Produkte zeigt daher eine große Bandbreite auf. Der durchschnittliche Flächenbedarf tierischer Produkte pro 1.000 kcal liegt in Süddeutschland konventionell zwischen 1,4 und 9,1 m² und ökologisch zwischen 1,8 und 15,2 m² (vgl. Anhang, Abschnitt 10.5.2 Tierische Lebensmittel). Pauschale Aussagen im Vergleich zu pflanzlichen Produkten können daher nicht getroffen werden, zumal die Spanne bei pflanzlichen ebenfalls groß ist. Konventionell reicht sie von 0,3 bis 12,5 m²/1.000 kcal und ökologisch von 0,4 bis 14,0 m²/1.000 kcal. Unter den tierischen Produkten ist Fleisch von ökologisch gehaltenen Zweinutzungshühnern mit dem größten Flächenbedarf verbunden, unter den pflanzlichen Produkten weist Spargel mit Abstand die geringste Flächeneffizienz auf. Grünlandbasierte ökologische Milchviehhaltung weist mit einem Flächenbedarf von 1,8 m²/1.000 im Vergleich sogar

[6] Auch bei einer weitgehend vegetarischen Ernährung der Bevölkerung wird Fleisch als „Nebenprodukt“ der Milchvieh- und Legehennenhaltung erzeugt. Eine rein vegetarische Ernährung wäre daher mit der Entsorgung/Verschwendung von Fleisch verbunden. Teilweise vermieden werden könnte dies allenfalls durch eine synthetische Milchproduktion. Eine Haltung der Nutztiere über die Nutzungsphase hinaus erscheint mit Blick auf die betriebswirtschaftlichen Folgen für die Betriebe und die begrenzten Futterflächen nicht sehr realistisch.

eine höhere Flächeneffizienz auf, als 38 pflanzliche Nahrungsmittel aus ökologischer Produktion. Rindfleisch aus der Milchviehhaltung ist daher die Fleischart, die mit Abstand die geringste Fläche in Anspruch nimmt. Mit etwas größerem Flächenbedarf folgt Legehennenfleisch vor Schweinefleisch. Tilapiafilet fällt aufgrund des geringeren Kaloriengehalts im kalorienbezogenen Vergleich deutlich zurück.

Tabelle 19: Flächenbedarf tierischer Produkte in Süddeutschland je 1.000 kcal nach Wirtschaftsweise ohne Koppelprodukte (m²/1.000 kcal)

Produkte	Nutztier, Haltung,	m²/1.000 kcal, ökologisch	m²/1.000 kcal, konventionell
Milch/Fleisch	Milchvieh, grünlandbasierte Stallhaltung	1,80	1,40
Milch/Fleisch	Milchvieh, Weidehaltung	2,20	1,90
Eier	Legehennen, Stallhaltung*	3,60	2,30
Eier	Zweinutzungshuhn, Stallhaltung*	3,90	2,50
Fleisch	Hybrid-Mastschwein, Stallhaltung*	5,30	2,80
Fleisch	Angler Sattelschwein, Stallhaltung*	6,30	3,30
Fleisch	Masthähnchen, Stallhaltung*	8,40	3,10
Fischfilet	Tilapia, Aquaponik	11,10	7,10
Fleisch	Rind, grünlandbasierte Haltung	11,40	9,10
Fleisch	Zweinutzungshuhn, Stallhaltung*	15,20	5,50

* Die hier berücksichtigte ökologische Stallhaltung bezieht sich stets auf eine Stallhaltung mit Auslauf.
Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis diverser Quellen, vgl. Anhang, Abschnitt 10.5.2 Tierische Lebensmittel

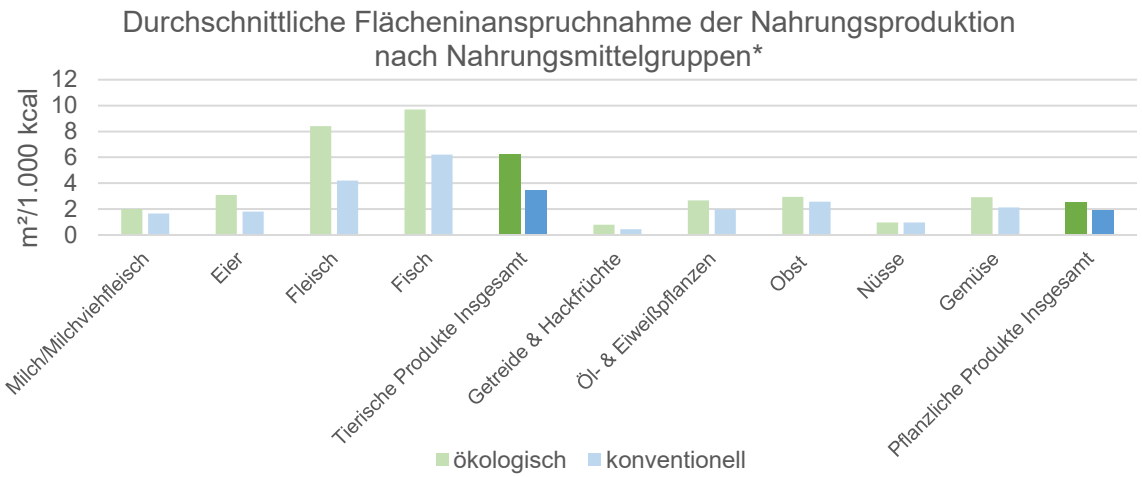
Die Nutzung von Koppelprodukten kann den Flächenbedarf aller tierischen Produkte reduzieren. In Tabelle 20 ist die Flächeninanspruchnahme je 1.000 kcal dargestellt, die sich bei einer energetischen Nutzung von Koppelprodukten der Futtermittel ergibt.

Tabelle 20: Flächeninanspruchnahme durch tierische Produkte in Süddeutschland je 1.000 kcal nach Wirtschaftsweise bei energetischer Nutzung der Koppelprodukte (m²/1.000 kcal)

Produkte	Nutztier, Haltung,	m²/1.000 kcal, ökologisch	m²/1.000 kcal, konventionell
Milch/Fleisch	Milchvieh, grünlandbasierte Stallhaltung	1,80	1,40
Milch/Fleisch	Milchvieh, Weidehaltung	2,20	1,90
Eier	Legehennen, Stallhaltung*	3,00	1,70
Eier	Zweinutzungshuhn, Stallhaltung*	3,20	1,90
Fleisch	Hybrid-Mastschwein, Stallhaltung*	4,80	2,60
Fleisch	Angler Sattelschwein, Stallhaltung*	5,60	2,70
Fleisch	Masthähnchen, Stallhaltung*	7,20	2,40
Fischfilet	Tilapia, Aquaponik	9,70	6,20
Fleisch	Rind, grünlandbasierte Haltung	11,40	9,10
Fleisch	Zweinutzungshuhn, Stallhaltung*	13,10	4,20

* Die hier berücksichtigte ökologische Stallhaltung bezieht sich stets auf eine Stallhaltung mit Auslauf.
Quelle: Eigene Berechnung

Geht man davon aus, dass bis zu 43 Prozent des Strohaufkommens stofflich oder energetisch genutzt werden können (Thrän, et al., 2016 S. 294), reduziert die Berücksichtigung der energetischen Nutzung die Flächeninanspruchnahme bei konventioneller Wirtschaftsweise auf ca. 81 (74 – 93) Prozent und bei ökologischer Wirtschaftsweise auf 86 (83 – 91 Prozent) des Ausgangswertes[7]. Verglichen mit pflanzlichen Nahrungsmitteln nehmen tierische Nahrungsmittel pro 1.000 kcal bei konventioneller Produktion im Durchschnitt knapp die 1,8-fache Fläche und bei ökologischer Produktion knapp die zweieinhalbfache Fläche in Anspruch (vgl. Abbildung 5). Diese Aussage zu den Durchschnittswerten lässt sich jedoch nicht verallgemeinern. Milchprodukte, Fleisch aus der Milchviehhaltung und Eier bewegen sich beispielsweise auf dem Niveau vieler Obst- und Gemüsesorten. Linsen, Lupinen und verschiedene Gemüsesorten nehmen wiederum ebenso viel Fläche in Anspruch, wie Eier oder Schweinefleisch. Besonders wenig Fläche beanspruchen Getreide, Hackfrüchte und Nüsse. Spargel hat mit rund einem Fünftel den größten Anteil an der Gemüseanbaufläche, nimmt aber je 1.000 kcal insgesamt mehr Fläche in Anspruch als Tilapia und die meisten Fleischarten.



* Alle Produkte wurden innerhalb ihrer Nahrungsmittelgruppe gleich gewichtet. Die Gewichtung entspricht nicht den Anteilen am Konsum oder den landwirtschaftlichen Nutzflächen.
Grafik: Eigene Darstellung. Quelle: Eigene Berechung nach diversen Quellen, vgl. Darstellung im Anhang

Abbildung 5: Durchschnittliche Flächeninanspruchnahme der Nahrungsproduktion nach Nahrungsmittelgruppen

In Tabelle 21 ist die Flächeninanspruchnahme durch pflanzliche Nahrungsmittel in Süddeutschland je 1.000 kcal nach Wirtschaftsweise bei energetischer Nutzung der Koppelprodukte dargestellt. Die Sortierung erfolgte nach Produktgruppen und Flächenbedarfen im Ökolandbau.

[7] Eine energetische Nutzung von Mist und Gülle reduziert den Flächenbedarf der Fleischproduktion weiter, und kann im Durchschnitt des gesamten Viehbestandes zu Gutschriften von 1 bis 7 Prozent führen. Da bei einer Berücksichtigung dieser Energieerträge jedoch viele Variablen berücksichtigt werden müssen und jeweils ein hoher Anteil der Freilandhaltung angenommen wurde, wurden diese Energieerträge aus Gründen der Vereinfachung nicht in die Berechnung einbezogen. Gutschriften für Leder aus der Milchvieh und Rinderhaltung wurden ebenfalls nicht berücksichtigt.

Tabelle 21: Flächeninanspruchnahme durch pflanzliche Nahrungsmittel in Süddeutschland je 1.000 kcal bei energetischer Nutzung der Koppelprodukte nach Wirtschaftsweise (m²/1.000 kcal)

Fruchtart	m²/1.000 kcal, ökologisch	m²/1.000 kcal, konventionell
Getreide & Hackfrüchte		
Zuckerrüben	0,41	0,30
Winterweizen	0,58	0,31
Kartoffeln	0,59	0,33
Dinkel	0,66	0,33
Triticale	0,74	0,40
Wintergerste	0,75	0,39
Roggen	0,95	0,54
Hafer	0,96	0,55
Sommergerste	0,97	0,51
Körnermais	1,38	0,76
Öl- & Eiweißpflanzen		
Sonnenblumen (Korn)	0,64	0,65
Soja (Korn)	0,86	0,76
Winterraps (Korn)	0,95	0,54
Öllein (Korn)	1,72	1,34
Hanf (Korn)	2,93	2,93
Lupine	3,68	2,59
Ölkürbis (Korn)	5,21	4,08
Linsen	5,37	2,95
Obst		
Äpfel, Plantage	0,66	0,48
Birnen, Plantage	0,91	0,64
Birnen, Streuobst	0,92	0,92
Äpfel, Streuobst	1,11	1,11
Mirabellen/Renekloden, Plantage	1,62	1,15
Pflaumen/Zwetschgen, Plantage	1,97	1,45
Süßkirschen, Plantage	2,78	2,04
Mirabellen/Renekloden, Streuobst	2,89	2,89
Sauerkirschen, Plantage	3,77	2,65
Pflaumen/Zwetschgen, Streuobst	4,03	4,03
Aprimira', Streuobst	4,47	4,47
Süßkirschen, Streuobst	4,68	4,68
Erdbeeren	5,35	3,49
Sauerkirschen, Streuobst	5,97	5,97
Nüsse		
Walnuss, Plantage	0,78	0,78
Haselnuss, Plantage	0,99	0,99
Walnuss, Streuobst	1,12	1,12

Gemüse & Salate		
Möhren Industrieware	0,40	0,37
Möhren Frischware	0,58	0,48
Weißkohl	0,73	0,51
Speisezwiebeln	0,83	0,58
Bundzwiebeln	0,83	0,63
Rotkohl	0,85	0,58
Rote Bete	0,88	0,73
Dicke Bohnen	1,05	1,35
Porree (Lauch)	1,30	0,83
Kohlrabi	1,42	1,20
Zuckermais	1,47	0,67
Wirsing	1,72	1,22
Knollensellerie	1,78	1,10
Zucchini	1,80	1,15
Staudensellerie	1,82	1,44
Blumenkohl	2,01	1,41
Grünkohl	2,27	1,94
Einlegegurken	2,46	0,88
Brokkoli	2,54	1,78
Endiviensalat	2,57	1,54
Rettich	2,70	1,92
Speisekürbisse	2,79	2,24
Radicchio	2,89	2,98
Rosenkohl	2,91	1,37
Spinat	3,03	2,72
Chinakohl	3,04	1,60
Radies	3,09	2,37
Kopfsalat	3,40	2,40
Frischerbsen (o. Hülsen)	3,43	2,17
Lollosalat	3,43	2,51
Eichblattsalat	3,46	2,69
Rhabarber	3,80	2,54
Eissalat	4,20	2,53
Schälgurken	4,47	2,19
Buschbohnen	4,73	3,45
Römischer Salat	4,88	3,69
Rucolasalat	4,92	2,97
Feldsalat	9,68	7,84
Spargel (Gesamtfläche)	13,97	12,54

Quelle: Eigene Berechnungen nach diversen Quellen, vgl. Anhang, Abschnitt 10.5 Landwirtschaftliche Produktion und Flächenbedarfe

Bei den Koppelprodukten der Nahrungsmittelproduktion handelt es sich hauptsächlich um Stroh aus dem Anbau von Getreide, Holz und Heu von Streuobstwiesen, Holz aus Agroforstsystemen, Rübenblätter, Kraut aus dem Anbau von Kartoffeln und Gemüse sowie um verschiedene Reststoffe aus der Verarbeitung (Treber, Trester, Vinasse u. v. m.). Holz, Stroh und Heu können sowohl energetisch als auch stofflich genutzt werden, Stroh und Heu werden zudem als Futtermittel und Einstreu genutzt. Auch viele der sonstigen Reststoffe eignen sich als Futtermittel, zudem können sie nahezu ausnahmslos energetisch genutzt werden. Somit stehen in den meisten Fällen verschiedene Nutzungsoptionen zur Wahl, sodass auch in nahezu all diesen Fällen Nutzungskonkurrenzen zwischen den Sektoren entstehen können.

5.2.1.1.2 Urbane Landwirtschaft

Das weltweite Bevölkerungswachstum führt allein schon zu einer erheblichen Verknappung der landwirtschaftlichen Produktionsflächen. Hinzu kommen die fortschreitende Urbanisierung und der steigende Wohlstand, die einen wachsenden Flächenverbrauch pro Person und somit eine weitere Verknappung der landwirtschaftlich nutzbaren Flächen mit sich bringen. Neben der Flächenverknappung nimmt auch die Verfügbarkeit von Wasser für die Bewässerung ab, wo Dürrephasen und Starkregenfälle sich abwechseln, Regenfälle ganz ausbleiben oder der Zufluss aus den schmelzenden Gletschern in die Flüsse versiegt. Aus diesen Gründen gewinnt die Urbane Landwirtschaft, auch Urban Farming genannt, immer mehr an Bedeutung. Mit ihr wird die Hoffnung verbunden, der Flächenverknappung entgegenzuwirken und gleichzeitig Wasserverbrauch, Düngemittelbedarf und Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft reduzieren zu können.

Der Begriff Urbane Landwirtschaft ist in neuerer Zeit von Frank Lohrberg geprägt worden [8], die Idee geht aber auf Überlegungen von Leberecht Migge zurück, der sich in den 1920er Jahren mit städtischer Nahrungsproduktion beschäftigt hat.[9] Im Folgenden wird der Begriff entsprechend der Definition der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen verwendet:

„Urbane Landwirtschaft umfasst professionelle landwirtschaftliche und gartenbauliche Aktivitäten in und am Rande von städtischen Verdichtungsräumen. (Welt-)marktorientierte Landwirtschaft ist in urbanen Räumen ebenso vertreten wie die charakteristische Kombination von einer auf den städtischen Raum ausgerichteten spezialisierten und diversifizierten Erzeugung landwirtschaftlicher Produkte mit einer Vielzahl landwirtschaftsnaher Dienstleistungen. Städte

[8] Frank Lohrberg (2001): Stadtnahe Landwirtschaft in der Stadt- und Freiraumplanung = Ideengeschichte, Kategorisierung von Konzepten und Hinweise für die künftige Planung Stuttgart, Fakultät Architektur und Stadtplanung, Institut für Landschaftsplanung und Ökologie.

[9] Migge, Leberecht (1929): Grünpolitik der Stadt Frankfurt am Main. In: Der Städtebau. Heft 2, 1929, S. 37–46

und ihre Agglomerationsbereiche erfordern eine besonders angepasste Multifunktionalität der Landwirtschaft.“ (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen 2011)[10]

In der Regel handelt es sich bei ertragreichen urbanen Produktionssystemen um Gewächshäuser auf Gebäudedächern, gebäudeintegrierte Gewächshäuser oder eigens für die Nahrungsproduktion errichtete Gebäude mit mehreren Stockwerken, die in der Regel beheizt und in einigen Fällen auch beleuchtet werden müssen, was in der Regel mit einem hohen Energieaufwand pro Quadratmeter Produktionsfläche verbunden ist. Wie auch der Flächenbedarf der Futtermittelproduktion im Falle einer integrierten Fischzucht kann der Flächenbedarf der Energiegewinnung die Einsparungen beim Anbauflächenbedarf der Gemüseproduktion zu erheblichen Teilen kompensieren. Daher können der tatsächliche Flächenbedarf und möglicherweise positive Effekte auf die Autonomiepotenziale nur realistisch eingeschätzt werden, wenn der Flächenbedarf der Energie- und Futtermittelerzeugung urbaner Landwirtschaft in die Betrachtung einbezogen werden.

Durch Literaturrecherche und Befragung von Anlagenherstellern und Betreibern wurden deshalb die Hektarerträge (Output) der bekannten Produktionssysteme ermittelt. Anschließend wurden die Flächenbedarfe der wichtigsten zugeführten Produktionsmittel abgeschätzt. Dies sind vor allem Energie, Fischfuttermittel und die zur Herstellung der Futtermittel aufgewendete Energie (Input), die den jeweiligen Hektarerträgen zugeordnet werden können. Auf diese Weise erhält man in der Summe die jeweilige durch die Produktionssysteme insgesamt in Anspruch genommene Fläche. Anschließend wurde diese ins Verhältnis zu der Kalorienmenge gesetzt, die letztlich für den menschlichen Verzehr bereitgestellt wird (Output), um anhand des so berechneten Kalorienertrags pro Hektar eine Aussage zur Flächeneffizienz der unterschiedlichen Systeme treffen zu können. Nicht berücksichtigt werden konnte die Energie, die für die Herstellung der Gewächshäuser und vertikalen Farmen aufgewendet werden muss (Graue Energie der Gebäudeerstellung). Die Berechnung der einzelnen Flächenbedarfskennwerte auf Basis der verfügbaren Bedarfs- und Ertragskennwerte ist im Anhang ausführlich dargestellt. (Vgl. Anhang Abschnitt 10.6 Urbane Landwirtschaft)

Ergebnisse[11]

Insgesamt zeigt sich, dass eine höhere Flächeneffizienz der urbanen Landwirtschaft im Vergleich zur herkömmlichen Landwirtschaft vor allem durch einen deutlich höheren Energieaufwand erreicht wird. Der Vorteil bezüglich der Flächeneffizienz besteht daher nur bei einer Nutzung von Energiequellen mit geringer Flächenrelevanz (z. B. Erdöl, Erdgas, Geothermie, Ab-

[10] Zit. n. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, 2013

[11] Die Ausführliche Darstellung der Recherche- und Berechnungsergebnisse erfolgt im Anhang, Abschnitt 10.6 Urbane Landwirtschaft

wärme) oder hohen Flächenerträgen (Solarthermie) und entfällt in der Regel, wenn der Flächenbedarf der genutzten erneuerbaren Energien pro MWh auf oder über dem Flächenbedarf heutiger Freiflächenphotovoltaikanlagen liegt.

Mit aquaponischen Dachfarmen üblicher Energieeffizienz wird die Flächeneffizienz der klassischen Landwirtschaft daher nicht erreicht, wenn die Energie aus einer flächenrelevanten Energiequelle wie Photovoltaikfreiflächenanlagen gewonnen und mittels Power-to-Gas gespeichert werden muss. Nur wenn die Gewächshäuser Niedrigenergiestandard erreichen (<150 kWh/m³, vgl. Abschnitt 10.6.4.6 Energiebedarf von Gewächshäusern) und unter den PV-Modulen ebenfalls Landwirtschaft betrieben werden kann, ist die Flächeneffizienz aquaponischer Dachfarmen ähnlich hoch, wie in der klassischen Landwirtschaft. (vgl. Anhang, Abschnitt 10.6.6)

Neben dem Energieaufwand ist, genauso wie in der klassischen Landwirtschaft, der Anteil tierischer Nahrungsmittel entscheidend für die Flächeneffizienz der urbanen Landwirtschaft. Fische, wie Tilapia, bieten im Vergleich zu Schweinen keinen Vorteil bei der Futterverwertung. Beide benötigen mit 3 bis 4 kg ähnliche Futtermengen für die Produktion von einem Kilogramm Fleisch, der Kaloriengehalt des Tilapiafleisches je Kilogramm ist jedoch deutlich geringer als bei Schweinefleisch. Zudem ist zu bedenken, dass Schweine auch dazu in der Lage wären, sowohl für den menschlichen Verzehr weniger gut geeignete Futtermittel von Grünflächen (Gras, Wurzeln, Eicheln, Bucheckern, Würmer, Schnecken, Engerlinge, Insekten) als auch Speisereste und Küchenabfälle zu verwerten, wie es in der Vergangenheit über Jahrhunderte üblich war. Die Flächenkonkurrenz zwischen der Schweinezucht und der Produktion pflanzlicher Nahrungsmittel könnte so weiter reduziert werden. Die Nutzung von Fischresten und Insekten ist in der Fischzucht zwar auch möglich, erfolgt in aquaponischen Fischzuchtanlagen jedoch meist erst nach einer Verarbeitung zu Tiermehl und ist daher erheblich (energie-)aufwendiger. Betrachtet man aber ausschließlich die heute üblichen Produktionsweisen, so ist die Flächeneffizienz der urbanen Landwirtschaft bei einem hohen Mengenanteil der Fischproduktion im Vergleich zu einer stärker auf pflanzliche Nahrungsmittel ausgerichteten Landwirtschaft ähnlich gering, wie die der klassischen Landwirtschaft mit gleichem Fleischproduktionsanteil. Insgesamt lässt sich daher feststellen, dass eine pauschale Aussage über die Flächeneffizienz urbaner Landwirtschaft im Vergleich zur herkömmlichen Landwirtschaft nicht angemessen ist.

Entscheidend für die Flächeneffizienz sind der Fisch- oder Fleischanteil an der Gesamtproduktion, der Energiebedarf und die verfügbaren Energiequellen.

Der Futteranbauflächenbedarf pro Hektar Anlagenfläche liegt bei den untersuchten Systemen zwischen 1,3 und 30,6 Hektar bei konventioneller Wirtschaftsweise sowie zwischen 2,0 und 47,9 Hektar bei ökologischer Wirtschaftsweise. Der Mittelwert für eine ausreichende Futtermittelversorgung mittels konventionellen Anbaus liegt bei 14,7 Hektar Futterfläche pro Hektar

Aquaponikanlage, bei einer Versorgung mittels ökologischen Landbaus liegt der Mittelwert bei rund 23,0 Hektar Futterfläche pro Hektar Aquaponikanlagenfläche (ha FF/ha AF).

Der Energiebedarf von Gewächshäusern liegt in der Regel bei 300 bis 400 kWh/m² (KTBL, 2014; Steiner, 2017). Niedrigenergiegewächshäuser benötigen dagegen nur rund 140 kWh/m² (Kempkes & Hanse, 2016). Die Fläche, die benötigt wird, um ein Gewächshaus mittels Photovoltaik und Power-to-Gas-Speichersystem zu beheizen, liegt in Abhängigkeit vom Energiestandard der Gewächshäuser zwischen 4,7 und 13,3 Hektar PV-Anlage pro Hektar Gewächshausfläche (vgl. 10.6.4.7). Die Kombination mit Agrophotovoltaik kann die Flächeneffizienz gegenüber der Kombination mit reinen Freiflächensolaranlagen deutlich verbessern. Beide Energieanlagenarten sind jedoch mit erheblichen Beeinträchtigungen des Landschaftsbildes verbunden.

Aquaponikanlagen mit hohem Energiebedarf nehmen aber auch in Kombination mit Agro-Photovoltaik etwa um 25 bis 55 Prozent mehr Fläche in Anspruch als die konventionelle Landwirtschaft. Allerdings können Aquaponikanlagen mit Niedrigenergiestandard, lokaler Futterproduktion und einem Verhältnis zwischen Pflanzen- und Fischproduktion von 14 zu 1 insgesamt eine Flächeneffizienz erreichen, die der Effizienz der konventionellen Landwirtschaft sehr ähnlich ist. Damit ist sie auch bei ökologischer Wirtschaftsweise so flächeneffizient wie die konventionelle Landwirtschaft und flächeneffizienter als der klassische ökologische Landbau. (Vgl. Abbildung 6 und Tabelle 470) Wichtig ist dabei aber vor allem die Möglichkeit, den Flächenbedarf von den Ackerflächen auf weniger wertvolle Flächen zu verlagern. Hinzu kommt ein effizienter Umgang mit Wasser und Nährstoffen. Allerdings ist eine ausreichende Verfügbarkeit von Flächen für die Energieproduktion entscheidend.

Die größten Vorteile der Aquaponik gegenüber herkömmlicher Nahrungsproduktion sind daher:

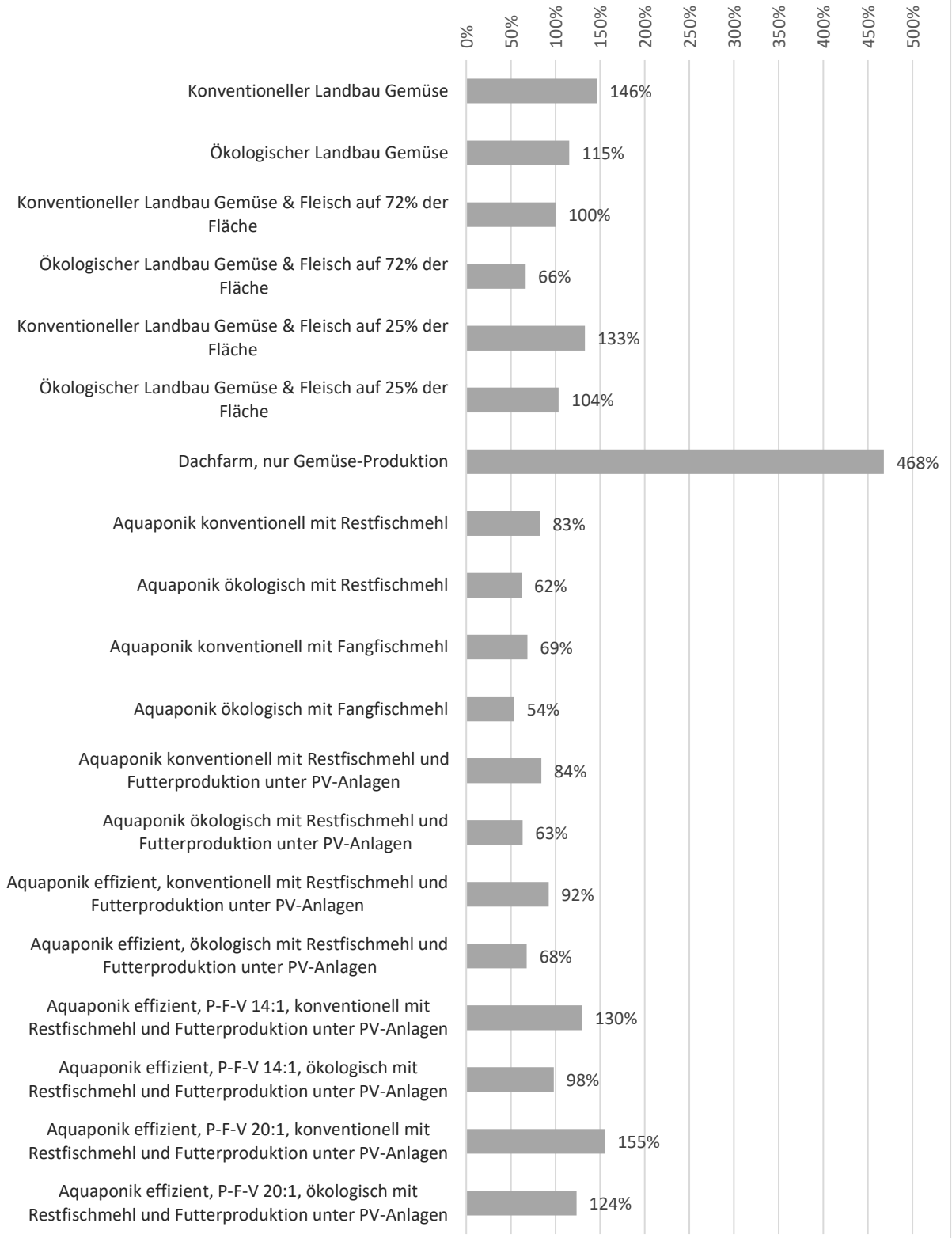
- Entlastung der Ackerflächen durch die Verlagerung des Flächenbedarfs hin zu anderen Flächenarten.
- Entlastung der maritimen Fischbestände
- Vermeidung von Nährstoff- oder Schadstoffeinträgen in maritime Ökosysteme
- Deutlich geringerer Bedarf an Dünge- und Pflanzenschutzmitteln
- Geringer Wasserbedarf.

Durch diese Vorteile wirkt die Aquaponik Problemen wie Ackerflächenverknappung, Überfischung, Überdüngung und Schadstoffeinträgen in die Umwelt sowie einer Übernutzung der Süßwasserreserven entgegen. Aquaponik bietet sich daher vor allem da an, wo Wärmequellen (z. B. Abwärme oder Erdwärme) vorhanden sind, die ansonsten nicht genutzt werden könnten. Im Vertical Farming dürfte die Nutzung von nicht flächenrelevanten, klimaneutralen Energiequellen schwieriger sein, weil sie viel Strom benötigt. Abwärme und Erdwärme kommen daher

in Deutschland vermutlich nur selten als Energiequelle infrage. Ob der hohe Strombedarf unter diesen Umständen und angesichts der erneuerbaren Energiepotenziale Deutschlands gerechtfertigt werden kann, bleibt fraglich. Der größte Unterschied und damit einer der größten Vorteile der vertikalen Landwirtschaft dürfte somit darin bestehen, dass der Bedarf an Ackerfläche reduziert wird, weil die benötigte Energie auch auf Grünland, entlang von Verkehrsflächen oder über Parkplätzen und Straßen gewonnen werden könnte.

Die mit Abstand höchste Flächeneffizienz aller Produktionssysteme weisen Dachfarmen mit einer reinen Gemüseproduktion ohne Fischzucht auf. Sie erzielen bei Installation auf einem viergeschossigen Gebäude und Nutzung von Energie aus einem Photovoltaik-Power-to-Gas-System einen um 262 Prozent höheren Kalorienertrag pro Hektar Grundfläche als die herkömmliche Landwirtschaft mit hohem Fleischproduktionsanteil, wie sie heute praktiziert wird. (Vgl. Abbildung 6 und Tabelle 259, sowie Anhang II Abschnitt 14.20.2)

Im Anhang I in Abschnitt 10.6.6 ist der Vergleich von urbaner Landwirtschaft und herkömmliche Landwirtschaft ausführlich dargestellt.



Grafik: Eigene Darstellung. Quelle: Eigene Berechnung nach diversen Quellen, vgl. ausführliche Darstellung im Anhang, Abschnitt 10.6.6 "Urbane Landwirtschaft und herkömmliche Landwirtschaft im Vergleich"

Abbildung 6: Flächeneffizienz der Nahrungserzeugung

5.2.2 Sektor Energie

Um den Energiebedarf eines typischen Landkreises in Süddeutschland zu decken, müssen neben den Potenzialen von Wasserkraft, Erdwärme, Umweltwärme, Abwärme, Deponiegasen, Klärgasen und thermisch genutzten Abfällen auch erneuerbare Energien genutzt werden, die mit einem erheblichen Flächenbedarf verbunden sind. Dies gilt vor allem für verschiedene Formen der Bioenergie und der Solarenergie. Die Windenergie weist zwar ebenfalls einen hohen (Abstands-)Flächenbedarf auf, der aber nur mit einer relativ geringen Flächeninanspruchnahme einhergeht, weshalb die Windenergie auch nur in geringem Umfang mit anderen Gütern in eine Konkurrenz um Produktionsflächen tritt (vgl. Anhang, Abschnitt 12.2.1). Um die Flächeneffizienz erneuerbarer Energien zu beurteilen, muss der Energieaufwand der Energiegewinnung in die Betrachtung mit einbezogen werden.

5.2.2.1 Energiebilanz

Erneuerbare Energien weisen bereits auf dem heutigen Stand der Technik insgesamt eine deutlich positive Energiebilanz auf. Die Erntefaktoren von Photovoltaik, Windenergie und Energiepflanzen der zweiten Generation liegen in den meisten Fällen deutlich im zweistelligen Bereich (vgl. Tabelle 22). Die vorliegende Datenbasis und die Berechnungen der Energiebilanzen von biogenen Energieträgern sind ausführlich im Anhang in Abschnitt 12.2.4.2 dargestellt. Photovoltaik, Solarthermie und Windenergie erreichen Erntefaktoren zwischen 7,5 und 51. Heute vorherrschende Energiepflanzen bleiben mit Erntefaktoren zwischen 1 und 6 deutlich dahinter zurück. Werden jedoch mehrjährige Energiepflanzen genutzt, weist die Nutzung von Anbaubiomasse im Mittel ähnliche Erntefaktoren auf, wie Solarthermie und Photovoltaik.

Tabelle 22: Erntefaktoren ausgewählter erneuerbarer Energiequellen

Energiequelle	Erntefaktoren	Quellen
Windenergie an Land	35 – 51	1)
Solarthermie	24	2)
Photovoltaik	7,5 – 17	2)
Miscanthus	13 – 26	3)
Sida	13 – 24	4)
Weidenholz aus KUP	28 – 53	5)
Raps-Brennstoffe	1 – 6	6)
Durchwachsene Silphie	3 – 5	7)
Mais	3 – 6	8)

Quellen: (1) ENERCON GmbH, 2011; (2) Quaschning, 2015; Rech, o. J., S. 30; (3) Ber. n. KTBL, 2018; Handler und Blumauer, 2011, S. 59; Kraft, 2017; (4) Ber. n. TFZ Bayern, 2017; KTBL, 2018; Handler und Blumauer, 2011, S. 59; Kraft, 2017 (5) KTBL, 2012; Schmid, 2013; Witzlinger, 2002, zit. n. Zimmer, 2007; (6) Ber. n. KTBL, 2012; FNR, 2018f; Ferchau et al., 2009; Lewandowski, 2016; Trän, et al., 2016; Umweltbundesamt Österreich, 2012; Biokompakt Heiztechnik, o. J.; Kraft, 2017; (7) Ber. n. KTBL, 2012/2018; WBA, 2007; (8) Ber. n. KTBL, 2018; KTBL, 2012; Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik, 2007;

Da erneuerbare Energien jedoch vor allem durch die verfügbare Produktionsfläche begrenzt werden, ist für die Beurteilung erneuerbarer Energien in erster Linie nicht der Erntefaktor entscheidend, sondern der Netto-Energieertrag pro Hektar. Auch niedrige Erntefaktoren ermöglichen bei hohen Brutto-Erträgen zum Teil hohe Netto-Energieerträge pro Hektar.

5.2.2.2 Netto-Energieerträge

Die Spanne der Brutto-Energieerträge erneuerbarer Energien auf Freiflächen liegt in Deutschland aktuell etwa zwischen 20 und ca. 700 MWh pro Hektar, wobei in der Regel Erntefaktoren zwischen 10 und 50 erreicht werden und ein Hektarertrag von 700 MWh/ha bisher nur von wenigen neuen Anlagen mit besonders ertragreichen Modulen erreicht wird. Im Mittel kann man bei durchschnittlichen Modulen Brutto-Erträge von 560 MWh/ha erwarten. Netto sind somit, je nach Energiequelle und Nutzungspfad, zwischen 7 und ca. 500 MWh pro Hektar zu erreichen. Den höchsten reinen Energieertrag liefern Freiflächen-PV-Anlagen. Den höchsten Gesamtertrag liefert dagegen die Agrophotovoltaik, da diese neben einem möglichen Netto-Energieertrag von mehr als 500 MWh/ha[12] eine landwirtschaftliche Nutzung zulässt, mit der unter heutigen klimatischen Bedingungen ca. 80 Prozent der sonst üblichen Erträge und mehr erreicht werden können (vgl. Anhang, Abschnitt 12.2.2.4). Die Windenergie ermöglicht in Süddeutschland Netto-Energieerträge von ca. mehr als 310 MWh/ha und nimmt dabei weniger als 2 Prozent der Windparkfläche in Anspruch (vgl. Anhang Abschnitt 12.2.1). Energiepflanzen der zweiten Generation liefern im Schnitt Netto-Energieerträge von ca. 43 MWh/ha. Diese können in vielfältiger und gut speicherbarer Form vor allem dort eingesetzt werden, wo eine Elektrifizierung bisher nicht gut möglich ist.

Tabelle 23: Durchschnittliche Netto-Energieerträge ausgewählter Energiequellen in Süddeutschland

Energiequelle	Netto-Energieertrag in MWh/ha [1)]
Windenergie an Land	310
Photovoltaik (FPV / APV)	500 (300 – 700)
Miscanthus	74
Sida	44
Weidenholz aus KUP	23 – 27
Raps-Brennstoffe	7 – 52
Durchwachsene Silphie	12 – 27
Mais	18 – 42
Energiepflanzen 2. Generation Durchschnitt	43

1) Die angegebenen Spannen ergeben sich aus unterschiedlichen PV-Modulen bzw. aus verschiedenen Nutzungspfaden

Quelle: Eigene Berechnung nach diversen Quellen, vgl. Anhang Abschnitt 12.2.4.2.2.

[12] Bei herkömmlichen Modulen. Die Energiebilanz bifazialer Module lag noch nicht vor.

Die Netto-Flächeninanspruchnahme pro Megawattstunde weist dementsprechend eine große Spanne auf. Kombiniert man beispielsweise die Windenergie, die nur geringe Anteile der Windparkfläche belegt, mit einer Nahrungsproduktion, nimmt die Energiegewinnung nur rund einen Quadratmeter pro MWh in Anspruch. Nutzt man auch die Abstandsfläche zwischen den Windenergieanlagen für die Energiegewinnung mittels Biomasseproduktion, werden rund 28 m²/MWh für die Energiegewinnung in Anspruch genommen. Mit rund 4 m²/MWh weist die Agrophotovoltaik nach der Windenergie die geringste Flächeninanspruchnahme auf. Die herkömmliche Freiflächenphotovoltaik folgt mit rund 20 m²/MWh auf dem dritten Platz. Knapp die siebenfache Fläche belegt mit ca. 135 m²/MWh die Energiegewinnung bei einer Biomasseproduktion durch den Anbau von Miscanthus an der vierten Stelle der Rangfolge. Im Durchschnitt der Energiepflanzen zweiter Generation wird mit ca. 233 m²/MWh etwas mehr als die elffache Fläche benötigt, um die gleiche Energiemenge zu gewinnen, die eine Freiflächenphotovoltaikanlage erzeugt. (Vgl. Tabelle 24) Je nach Speichermöglichkeit können jedoch 5 bis 70 Prozent des Stromertrags einer Photovoltaikanlage verloren gehen. Während moderne Kurzzeitspeicher auf Wirkungsgrade von 90 bis 95 Prozent kommen, sind bei einer saisonalen Speicherung mittels Wasserstoffes oder des Power-to-Gas-Verfahrens ohne Abwärmenutzung lediglich Wirkungsgrade zwischen 20 und 41 Prozent zu erwarten. Die Flächeninanspruchnahme liegt in diesem Fall folglich bei ca. 67 (49 – 100) m²/MWh, womit im Vergleich zu Miscanthus nur noch die doppelte Flächeneffizienz erreicht wird. Um Gesamtwirkungsgrade von ca. 70 Prozent (Deutscher Bundestag, 2018, S. 9) zu erreichen und damit die Flächeninanspruchnahme wieder auf bis zu 29 m²/MWh zu reduzieren, ist daher eine effiziente Abwärmenutzung bei der Rückverstromung unerlässlich. Biomasse, die kostengünstig dezentral produziert und genutzt werden kann, bietet daher vor allem dort Vorteile, wo eine solche effiziente saisonale Speicherung von PV-Strom nicht möglich ist, Synergieeffekte auf den Wasserhaushalt oder den Schutz von Böden, Gewässern und Artenvielfalt erzielt werden sollen (vgl. Abschnitt 5.3) und/oder eine Beeinträchtigung des Landschaftsbildes durch technische Anlagen vermieden werden soll. Somit stellt die vielseitig nutzbare Bioenergie eine wichtige Ergänzung zu den saisonal stark schwankenden Potenzialen von Windenergie- und Photovoltaik dar.

Eine Flächenkonkurrenz zwischen Energiegewinnung und Nahrungsproduktion besteht heute, bei einer Nutzung von 20 Prozent der Ackerfläche für die Bioenergieproduktion, allein aufgrund der aktuellen Verbrauchsgewohnheiten, die sich nicht an gesundheitlichen und ökologischen Kriterien orientieren und durch ein hohes Maß an Verschwendung und Überernährung gekennzeichnet sind (vgl. Anhang, Abschnitt 10.1 bis Abschnitt 10.4 und Abschnitt 12.2.4.1). Tatsächlich würde die Energiewende durch einen Verzicht auf die Nutzung von Anbaubiomasse deutlich erschwert, weil sie eines der größten erneuerbaren Energiepotenziale Deutschlands darstellt, ihr Anbau sich vergleichsweise gut organisieren lässt, keine zusätzlichen Speicher erfordert und Synergieeffekte mit anderen Zielen des Umweltschutzes möglich

sind. Sollte in der Folge eines Verzichts auf Anbaubiomasse das Klimaschutzziel des Pariser Klimaabkommens verfehlt werden, erwartet die globale Landwirtschaft dagegen erhebliche Ertragsrückgänge aufgrund eines deutlichen globalen Temperaturanstiegs (vgl. Anhang, Abschnitt 12.2.4.1.2). Langfristig betrachtet, stellen erneuerbare Energien daher keine Konkurrenz zur Nahrungsproduktion dar, sondern tragen, sofern ihre Anbaufläche auf ca. 20 Prozent der bestehenden Ackerflächen begrenzt wird, vielmehr zur globalen Ernährungssicherheit bei (vgl. Anhang, Abschnitt 12.2.4.1.3). Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung ist jedoch eine Ernährungsweise, die sich an gesundheitlichen und ökologischen Kriterien orientiert und allen Menschen das gleiche Recht auf Teilhabe an der Nahrungsproduktion sichert.

In Tabelle 24 ist die Netto-Flächeninanspruchnahme ausgewählter erneuerbarer Energien in einer Übersicht dargestellt. Die angegebenen Spannen ergeben sich aus unterschiedlichen Wirkungsgraden der Energiespeicherung.

Tabelle 24: Netto-Flächeninanspruchnahme ausgewählter erneuerbarer Energien (m²/MWh)

Energiequelle	**Netto-Flächeninan-spruchnahme in m²/MWh** [1)]
Windenergie bei direkter Nutzung	1
Windenergie bei saisonaler Speicherung	1 – 4
Windenergie und Bioenergie bei direkter Nutzung	28
Windenergie und Bioenergie bei saisonaler Speicherung	38 – 74
Agrophotovoltaik bei direkter Nutzung	4
Agrophotovoltaik bei saisonaler Speicherung	6 – 13
Freiflächen-Photovoltaik bei direkter Nutzung	20
Freiflächen-Photovoltaik bei saisonaler Speicherung	29 – 67
Miscanthus	135
Sida	227
Weidenholz aus KUP	400
Raps-Brennstoffe (aus konventionellem Anbau)	339
Durchwachsene Silphie	370
Mais (aus konventionellem Anbau)	238
Energiepflanzen 2. Generation (Durchschnitt)	233

1) Die angegebenen Spannen ergeben sich aus unterschiedlichen Wirkungsgraden der Energiespeicherung.
Quelle: Eigene Berechnung nach diversen Quellen, vgl. Anhang Abschnitt 12.2.4.2.2.

5.2.2.3 Flächenkonkurrenz zur Lebensmittelproduktion und nachhaltige Flächenverfügbarkeit bis 2050

Prognosen der FAO kommen zu dem Schluss, dass bis zum Jahr 2030 etwa 50 Prozent und im Jahr 2050 ca. 70 Prozent mehr Nahrungsmittel benötigt werden als um das Jahr 2000, um die gewachsene und wohlhabendere Weltbevölkerung noch ernähren zu können (FAO, 2009, p. 2). Da sich zusätzliche Ackerflächen zu großen Teilen nur noch durch Entwaldung hinzugewinnen lassen, müsste die notwendige Produktionssteigerung zu 80 Prozent „durch eine intensivere, zugleich nachhaltige und umweltverträgliche Landwirtschaft realisiert werden“ (FAO, 2003 zit. n. WBGU, 2009, S. 67). Welche Fläche tatsächlich für die Ernährung einer Weltbevölkerung von 9 bis 10 Milliarden Menschen benötigt wird, hängt jedoch von vielen Faktoren ab. Neben den Folgen des Klimawandels werden vor allem die weitere Entwicklung der Ernährungsgewohnheiten und der Verschwendung von Lebensmitteln darüber entscheiden, ob bei einer ausreichenden Versorgung mit Lebensmitteln noch Ackerflächen für den Anbau von Energie- oder Rohstoffpflanzen verfügbar sein werden. Aus diesem Grund sind auch Szenarien realistisch, in denen eine gute Ernährungssicherheit auch ohne eine zusätzliche Intensivierung einer ohnehin schon intensiven Landwirtschaft möglich ist. Nach Einschätzung der FAO ließen sich bereits heute bis zu 13 Milliarden Menschen ernähren, wenn alle Möglichkeiten genutzt würden (FAO zit. n. BZ, 2013). Allein die Produktion pflanzlicher Nahrungsmittel hätte im Jahr 2017 bereits ausgereicht, um 13 Milliarden Menschen zu ernähren (vgl. Anhang, Abschnitt 12.2.4.1.1, Tabelle 379). Hinzu kommen die Potenziale der grünlandbasierten Viehhaltung und der Fischerei. Allerdings wird ein großer Teil der ackerbaulichen Produktion nicht als Nahrungsmittel genutzt, sondern als Futtermittel, was zu erheblichen Kalorienverlusten führt. Zudem geht etwa ein Drittel der gesamten für den menschlichen Verbrauch bestimmten Lebensmittel verloren, rund 1,3 Milliarden Tonnen pro Jahr (FAO, 2019b). Die heutige Weltbevölkerung von rund 7,6 Milliarden wird somit von zwei Dritteln der erzeugten und für Ernährungszwecke bestimmten Lebensmitteln ernährt. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Zahl der überernährten Menschen heute mit ca. 2,1 Milliarden (Ng, et al., 2014) mehr als doppelt so hoch liegt, wie die Zahl der rund 803 Millionen Menschen, die an Unterernährung leiden (Statista, 2019h). „Olivier de Schutter, UN-Beauftragter für das Recht auf Nahrung, hält den Beweis für erbracht, dass man binnen fünf Jahren die Erträge von 500 Millionen Kleinbauern dieser Welt nachhaltig verdoppeln könnte“ (Haerlin, 2011).

Die Daten zur heutigen Produktivität der Landwirtschaft und den Potenzialen in Entwicklungsländern (vgl. Anhang, Abschnitt 12.2.4.1.1) belegen, dass bei einer Minimierung von Verlusten und Verschwendung sowie einer weitgehenden Durchsetzung des Grundsatzes „Feed no Food“ in der Viehhaltung allein auf den heute vorhandenen Ackerflächen ausreichend Nahrung für mehr als 12 Milliarden Menschen produziert wird bzw. werden kann. Eine massive Intensivierung der Landwirtschaft oder eine großflächige Ausweitung der Ackerflächen sind nicht zwingend erforderlich, wenn die vorhandenen Effizienzpotenziale weitgehend ausgeschöpft

werden (vgl. Anhang, Abschnitt 12.2.4.1.1). Schätzt man das Ertragspotenzial der weltweiten Wiesen und Weiden auf ein Fünftel der deutschen Ertragspotenziale, erscheint auch ein Ernährungspotenzial der Landwirtschaft, das für mehr als 13 Milliarden Menschen ausreicht, durchaus realistisch. Somit könnten selbst bei einer Weltbevölkerung von 9 bis 10 Mrd. Menschen mehr als 20 Prozent der landwirtschaftlichen Flächen für den Anbau von nachwachsenden Rohstoffen und Energiepflanzen verfügbar sein. Dazu müsste jedoch eine hohe Effizienz der Nutzung von Anbauflächen und der darauf erzeugten Lebensmittel zu einem vorrangigen Ziel der Ernährungswirtschaft werden. Dies gilt insbesondere, wenn die Landwirtschaft der Industrieländer zunehmend auf eine ökologische Wirtschaftsweise umgestellt werden soll.

Ein Verzicht auf die Nutzung von ackerbaulich kultivierten Energiepflanzen bereits vor dem Jahr 2050 führt, angesichts der zu erwartenden Ertragsrückgänge infolge des Klimawandels, langfristig nicht zu einer höheren Ernährungssicherheit, wenn dadurch das Ziel verfehlt wird, die globale Erwärmung auf maximal 2° Celsius gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen.

Zudem könnten in Deutschland allein durch eine Halbierung des Fleischkonsums auf das als gesund empfohlene Maß ähnlich große Flächenpotenziale für die Produktion pflanzlicher Nahrungsmittel freigesetzt werden[13] wie durch einen Verzicht auf die Energiepflanzennutzung, da der Anteil der Futtererzeugung an der Ackerflächennutzung im Jahr 2016 bei 46 Prozent lag. (BMEL, 2019, p. 90) Die Bereitstellung der Kalorien in pflanzlicher Form benötigt, wie bereits ausgeführt, deutlich weniger Ackerfläche.

Das Potenzial zur Flächenbedarfreduktion im Sektor Nahrung durch eine Minimierung der vermeidbaren Verluste und die Umstellung auf eine an ökologischen, sozialen und gesundheitlichen Kriterien orientierte Ernährung zu ermitteln, ist eines der vorrangigen Ziele der im Folgenden dargestellten Untersuchungen zu regionalen Autonomiepotenzialen in Süddeutschland. Dabei wurde im Bereich der Milchvieh- und Rinderhaltung der Grundsatz „Feed no Food“ befolgt. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 6.4.1 dargestellt.

[13] Wie bereits dargestellt, stehen 80 bis 90 Prozent der bei der Fleischproduktion verfütterten pflanzlichen Kalorien nicht für die menschliche Ernährung zur Verfügung.

5.2.3 Sektor Rohstoffe

Nachwachsende Rohstoffe haben bisher nur einen geringen Anteil an der Produktion der meisten Konsumgüter. Kennwerte für die Schätzung von Autonomiepotenzialen lagen bisher nur für wenige Konsumgüter vor, wie beispielsweise Textilien, Kunststoffe und Papier. Diese Kennwerte berücksichtigten jedoch keine möglichen Koppelprodukte. Gleiches gilt mit Blick auf die Situation im Hochbau. Geeignete Kennwerte für die Schätzung möglicher Autonomiepotenziale lagen bisher nur für die bekanntesten Holzbauweisen und wenige Baustoffe vor, wie etwa einige Naturfaserdämmstoffe. Mögliche Koppelprodukte wurden hierbei in der Regel nicht berücksichtigt. Im Rahmen der vorliegenden Erhebung wurden daher auch mögliche Koppelprodukte berücksichtigt und die Flächeneffizienz verschiedener Nutzungspfade verglichen.

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse zu den Bereichen Wohnungsbau und Konsumgüterversorgung zusammengefasst. Die ausführliche Darstellung der Kennwerte und ihrer Ermittlung ist im Anhang in Abschnitt 11 Rohstoffe nachzulesen.

5.2.3.1 Wohnungsbau[14]

Als Zuzugsregion schaffen die Landkreise in Baden-Württemberg regelmäßig neuen Wohnraum. In den zehn Jahren von 2008 bis 2017 wurde in Baden-Württemberg ungefähr eine Neubauwohnfläche von 0,33 Quadratmeter pro Einwohner (m²/Ea) fertiggestellt.[15]

Der Flächenbedarf der Rohstoffproduktion für die Errichtung von einem Quadratmeter Wohnfläche hängt neben der Wahl der nachwachsenden Rohstoffe und ihrer Verwendung vor allem von der Bauweise ab. Als Rohstoffe werden üblicherweise Holz und verschiedene Naturfaserdämmstoffe verwendet. Ein zwischenzeitlich selten genutzter aber heute wieder häufiger verwendeter Rohstoff ist Stroh. Daneben kommen beispielsweise, Hanf oder Miscanthus in Verbundbaustoffen zum Einsatz, wie beispielsweise Hanfstein. Im Holzbau werden, je nach Bauweise, zwischen 0,38 und 1,08 m³ Bauholz pro Quadratmeter Wohnfläche benötigt. Den geringsten Bedarf weist die Holzrahmenbauweise auf, den höchsten der Holzmassivbau mit massiven Außen- und Innenwänden. Im Durchschnitt aller betrachteten Beispielgebäude liegt der Bauholzbedarf bei etwa 0,56 m³ pro Quadratmeter Wohnfläche.

Die Ertragspotenziale der Forstwirtschaft liegen, je nach Baumartengruppe, zwischen insgesamt 6,2 und 14,9 Festmetern pro Hektar. Daraus lassen sich neben Baustoffen vor allem Rohstoffe für die Produktion von Möbeln, Papieren, Textilfasern und Brennstoffen gewinnen. Buche, Tanne und Fichte liefern mit knapp 5,2 t atro pro Hektar ähnliche Rohstofferträge, weisen dabei jedoch unterschiedliche Anteile an Rohstoffen für die Konstruktionsholzproduktion

[14] Es wurde nur der Wohnungsbau betrachtet, da für den Bau von Nichtwohngebäuden keine ausreichende Datengrundlage vorlag.

[15] Fertiggestellt wurden von 2008 bis 2017 rund 35.280.706 m² Wohnfläche. Im Durchschnitt lag die Einwohnerzahl bei rund 10,7 Millionen. (Vgl. Statistisches Landesamt, Regionaldatenbank)

auf, da Laubbäume im Vergleich zu Nadelbäumen deutlich höhere Astholzanteile aufweisen. In **Tabelle 25** sind die Rohstoffausbeuten wichtiger Baumartengruppen dargestellt.

Tabelle 25: Geschätzte Rohstoffausbeuten der Holzproduktion nach Baumartengruppe (t atro/ha)

Rohstoffaufkommen	Buche	Fichte/Tanne	Douglasie	Lärche
Konstruktionsholz	0,94	1,46	1,93	1,13
Holz für Bretter/Latten	0,38	0,60	0,79	0,46
Mehl Sägewerk	0,18	0,29	0,39	0,27
Verschnitt Sägewerk	0,35	0,59	0,78	0,54
Erntereste	0,36	0,45	0,64	0,37
DF-Holz	0,50	0,51	0,68	0,46
Rinde Stammholz	0,12	0,33	0,52	0,60
Rinde Astholz	0,21	0,12	0,18	0,22
Astholz stofflich	1,28	0,00	0,00	0,00
Astholz energetisch	0,85	0,84	1,12	0,68
SUMME	**5,17**	**5,19**	**7,02**	**4,73**

Quelle: Eigene Berechnung nach n. BMEL (2016), BMEL (2016b), Hessen-Forst (2018), BWI (2012), FVA zit. n. Rössler (2008), Schmitz (2018) und Baumgartner (2018)

Da Laubbäume infolge des Klimawandels für die Bauholzproduktion an Bedeutung gewinnen werden, sind in **Tabelle 26** beispielhaft die verschiedenen Rohstoffausbeuten verschiedener Pfade der Buchenholznutzung dargestellt.

Tabelle 26: Buchenbauholzerträge und mögliche Koppelprodukte nach Nutzungspfad in Tonnen/ha

Produkt	Nutzungspfad				
	Bii	BT	BiM	BiE	BE
Konstruktionsholz (14% RF)	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
Bretter/Latten (14% RF)	0,44	0,44		0,44	0,44
OSB/Spanplatten (14% RF)	1,86	1,46	1,86	1,46	
Möbel (8% RF)			0,41		
Zellstoff					
Textilfasern (Viskose)		0,14			
Dämmstoff					
Essigsäure, Furfural, Xylose		0,04			
Brennstoff (atro)	2,22	2,40	2,22	2,57	3,85
SUMME	**5,58**	**5,53**	**5,56**	**5,53**	**5,35**
Heizwert des Brennstoffs	11.096	11.469	11.096	12.865	19.253

B=Bauholz, Bi=Bauholz inklusive Verschnitt, Bii=Bauholz inkl. Verschnitt und Astholz, E=Energie, M=Möbel, T=Textilfasern
Quelle: Eigene Berechnung (vgl. Anhang, Abschnitt 11.2.1.1)

Daraus ergeben sich Bauholzerträge von 2,4 bis 5,3 Kubikmetern pro Hektar Buchenforst.

Tabelle 27: Bauholzerträge von Buchen ohne Koppelprodukte nach Nutzungspfad in Kubikmetern/ha

Produkt	Nutzungspfad				
	Bii	BT	BiM	BiE	BE
Konstruktionsholz	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
Bretter/Latten	0,7	0,7	0,0	0,7	0,7
OSB/Spanplatten	2,9	2,3	2,9	2,3	0,0
GESAMT	**5,3**	**4,7**	**4,6**	**4,7**	**2,4**

B=Bauholz, Bi=Bauholz inklusive Verschnitt, Bii=Bauholz inkl. Verschnitt und Astholz, E=Energie, M=Möbel, T=Textilfasern
Quelle: Eigene Berechnung (vgl. Anhang, Abschnitt 11.2.1.1)

Für die verschiedenen Koppelproduktpakete wurden Flächengutschriften zwischen 1.423 und 3.134 Quadratmetern pro Hektar Forstfläche berechnet (vgl. Anhang, Abschnitt 11.2.1.1.4.1). Daraus ergibt sich nach Berücksichtigung der Koppelprodukte eine Flächeninanspruchnahme von 1.492 bis 3.190 m² pro Kubikmeter Buchenbauholz.

Tabelle 28: Flächeninanspruchnahme pro Kubikmeter Buchenbauholz nach Nutzungspfaden und Berücksichtigung von Koppelprodukten (m²/m³)

Flächeninanspruchnahme	Nutzungspfad				
	Bii	BT	BiM	BiE	BE
… ohne Koppelprodukte	1.892	2.150	2.174	2.150	4.236
… inkl. Koppelprodukte	1.623	1.804	1.492	1.795	3.190

B=Bauholz, Bi=Bauholz inklusive Verschnitt, Bii=Bauholz inkl. Verschnitt und Astholz, E=Energie, M=Möbel, T=Textilfasern
Quelle: Eigene Berechnung (vgl. Anhang, Abschnitt 11.2.1.1)

Der Forstflächenbedarf pro Quadratmeter Wohnfläche in Holzbauweise liegt bei Gebäuden aus Fichten- oder Buchenholz je nach Bauweise zwischen rund 220 und 1.750 Quadratmetern (vgl. Tabelle 29). Würde man beim Neubau von Wohngebäuden nur Buchenholz als Baustoff verwenden, ergäbe sich bei einer Fortsetzung des Neubaus in unverändertem Umfang im Mittel ein Forstflächenbedarf von ca. 312 (168 – 525) m²/Ea. Würde Fichtenholz verwendet, betrüge der Flächenbedarf ca. 231 (124 – 389) m²/Ea.

Tabelle 29: Durchschnittlicher Forstflächenbedarf eines Holzhauses pro Quadratmeter Wohnfläche nach überwiegend verwendetem Baustoff (m²/m²)

Baustoff	Gering	Mittel	Hoch
Buchenholzbau	560	1.040	1.750
Fichtenholzbau	414	770	1.295
Buchenholz-Stahlbeton-Hybrid	300	890	1.020
Fichtenholz-Stahlbeton-Hybrid	222	659	755

Quelle: Eigene Berechnung (vgl. Anhang, Abschnitt 11.2.1.1.6)

Im mehrgeschossigen Wohnbau in Holz-Stahlbetonhybridbauweise ist der Holzbedarf um ca. 14 Prozent geringer. Bezogen auf eine Nutzungsdauer von 80 Jahren wird im Holzbau, je nach Bauweise, eine Forstfläche von 3 bis 22 m² pro Quadratmeter Wohnfläche und Nutzungsjahr in Anspruch genommen.

Tabelle 30: Durchschnittlicher Forstflächenbedarf eines Holzhauses pro Quadratmeter Wohnfläche und Nutzungsjahr nach überwiegend verwendetem Baustoff (m²/m²*a)

Baustoff	Gering	Mittel	Hoch
Buchenholzbau	7,0	13,0	21,9
Fichtenholzbau	5,2	9,6	16,2
Buchenholz-Stahlbeton-Hybrid	3,8	11,1	12,8
Fichtenholz-Stahlbeton-Hybrid	2,8	8,2	9,4

Quelle: Eigene Berechnung.

Im reinen Holzbau kann man mit einem mittleren Forstflächenbedarf der Bauholzproduktion von rund 11 m² pro Quadratmeter Wohnfläche und Nutzungsjahr rechnen.

Im Vergleich zum Bauholzbedarf nimmt der Dämmstoffbedarf mit ca. 2 bis 16 Prozent des Gesamtflächenbedarfs nur wenig Fläche in Anspruch. In Tabelle 31 ist die Flächeninanspruchnahme durch verschiedene Dämmstoffe pro Quadratmeter Wohnfläche nach verwendetem Rohstoff dargestellt. Bei den dargestellten Mittelwerten handelt es sich um die Durchschnittswerte der in dieser Untersuchung betrachteten Dämmstoffe und Gebäude. Es handelt sich daher lediglich um Orientierungswerte. Bei Verwendung eines Dämmstoffs mit einer anderen Raumdichte oder einer anderen Dämmstoffmenge ändert sich der Anbauflächenbedarf der Dämmstoffproduktion dementsprechend.

Tabelle 31: Mittlere Flächeninanspruchnahme durch handelsübliche Dämmstoffe* pro Quadratmeter Wohnfläche absolut und pro Jahr über eine Nutzungsdauer von 40 Jahren

Dämmstoff	m²/m²	m²/m²*a
Fichtenfaser	89	2,2
Hanf	55	1,4
Flachs	77	1,9
Wiesengras	93	2,3
Getreidestroh	54	1,4

* Die im Handel angebotenen Holzfaser-, Hanf-, Flachs, Gras- und Strohdämmstoffe haben unterschiedliche Raumdichten.
Quelle: Eigene Berechnung nach diversen Quellen (vgl. Anhang Abschnitt 11.2.2)

Ein klassischer Holzrahmenbau muss mit ca. einem Kubikmeter Dämmstoff pro Quadratmeter Holzfaserdämmstoff isoliert werden, um einen Heizenergiestandard von 29 kWh/m²*a zu erreichen (Krapmeier, 2014 S. 6). Daraus ergibt sich, wie in Tabelle 32 dargestellt, eine Forstflächeninanspruchnahme von rund 154 m² pro Quadratmeter Wohnfläche. Ein Massivholz-Passivhaus benötigt etwa einen halben Kubikmeter Dämmstoff pro Quadratmeter Wohnfläche.

Bei einer Nutzungsdauer von 40 Jahren ergibt sich daraus eine Forstflächeninanspruchnahme von 1,8 m²/m²*a im Massivholzbau. Im Holzrahmenbau beträgt der Bedarf mehr als 3,9 m²/m²*a, wenn der Energieverbrauch unter 30 kWh/m² gesenkt werden soll. Bei diesen Angaben handelt es sich um Orientierungswerte. Der tatsächliche Dämmstoffbedarf muss immer im Einzelfall ermittelt werden.

Tabelle 32: Forstflächeninanspruchnahme durch Wärmedämmung pro Quadratmeter Wohnfläche bei Dämmung mit Fichtenholzfaser in Abhängigkeit von Bauweise und Energiestandard

Bauweise, Energiestandard	Dämmung in m³/m² WF	Forstfläche in m²/m² WF	Forstfläche in m²/m² WF*a
Massivholzhaus, 70 kWh/m²	0,23 [1)]	~ 35 [3)]	0,9
Mosermassivholzhaus, Passivhausstandard	0,46 [1)]	~ 70 [3)]	1,8
Klassischer Holzrahmenbau, 29 kWh/m²	1,03 [2)]	~ 154 [3)]	3,9

Quellen: (1) Moser, C., 2016 (2) Krappmeier, 2014 (3) Eigene Berechnung

Insgesamt kann man im Wohnbau Baden-Württembergs daher mit eine Forstflächeninanspruchnahme durch die Bauholz- und Dämmstoffproduktion von ca. 11,3 m²/Ea rechnen, wenn der gesamte Neuwohnbau in Holzbauweise erfolgt.

5.2.3.2 Konsumgüter

Der Verbrauch von Konsumgütern (ohne Bau- und Dämmstoffe), die zu erheblichen Teilen oder vollständig aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden können, lag im Jahr 2017 bei ca. 546 kg/Ea (vgl. Tabelle 40). Bei den wichtigsten Konsumgütern, die großenteils oder vollständig aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden können, handelt es sich um Produkte, die den Produktgruppen Möbel, Textilien, Papier, Kunststoffe, Fahrzeugbauteile, Farben und Lacke, Wasch- und Reinigungsmittel, Schmierstoffe und Kerzen zugerechnet werden können. Sofern diese so weit wie möglich aus lokalen nachwachsenden Rohstoffen hergestellt würden, könnten darin potenziell ca. 334 kg biobasierte Rohstoffe pro Einwohner und Jahr verarbeitet werden. Da bei der Erzeugung und Verarbeitung nachwachsender Rohstoffe stets Nebenprodukte und Reststoffe anfallen, kann die Erzeugung nahezu jedes Produktes mit der Produktion verschiedener Koppelprodukte verbunden werden. Die Möglichkeit, eine Nutzpflanze nahezu vollständig zu einem einzigen Produkt zu verarbeiten, ist nur in seltenen Fällen gegeben. Je geringer der Anteil einer Nutzpflanze ist, der für die Herstellung eines bestimmten Produktes genutzt werden kann, desto größer ist die Bedeutung, die einer möglichst vollständigen Verwendung der übrigen Pflanzenteile für die Produktion von Koppelprodukten zukommt. Dabei liefern viele Nutzpflanzen Rohstoffe für drei bis fünf verschiedene Produkte gleichzeitig. Im Folgenden ist am Beispiel der Textilfasern dargestellt, wie sich mögliche Koppelprodukte auf die Flächeneffizienz eines bestimmten Produktes auswirken. Die Herleitung der Flächeneffizienzkennwerte der anschließend kürzer dargestellten Produktgruppen erfolgte dementsprechend und ist im Anhang (Abschnitte 11.2.3 bis 11.2.9) ausführlich dargestellt.

5.2.3.2.1 Textilfasern

Der Verbrauch von Textilfasern liegt in Deutschland bei ca. 26 kg pro Einwohner, der Anteil der Kleidung wird auf 12 bis 15 kg geschätzt (vgl. Anhang Abschnitt 11.2.5.1). Die reinen Fasererträge liegen, je nach Nutzpflanze, in der Regel zwischen 0,4 und 2,0 Tonnen pro Hektar, die damit am gesamten Ertrag meist nur einen Anteil von 10 bis 20 Prozent der jeweiligen Nutzpflanze haben (vgl. Anhang Abschnitt 11.2.5.7). Daneben liefern die wichtigsten in Deutschland für die Textilfaserproduktion nutzbaren Pflanzen u. a. Rohstoffe für die Produktion von Baustoffen, Dämmstoffen, Speiseölen, Viehfutter und Brennstoffen (vgl. Abbildung 7). Zudem kann das bei der Zellstoffgewinnung anfallende Lignin als Rohstoff für die Kunststoffproduktion oder für die Bereitstellung organischer Elektrolyte für Redox-Flow-Batterien genutzt werden (3N Kompetenzzentrum, 2017)

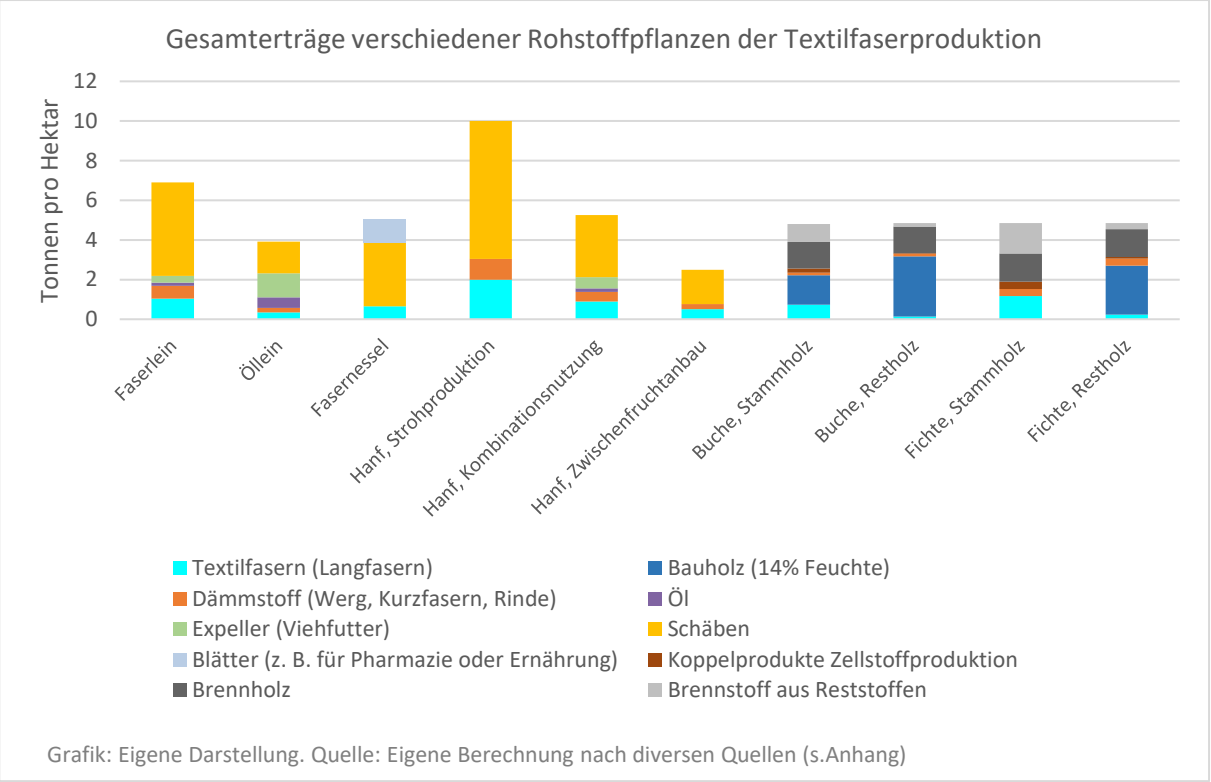


Abbildung 7: Gesamterträge verschiedener Rohstoffpflanzen der Textilfaserproduktion (t/ha)

Nach der beschriebenen Methodik ergeben sich für die möglichen Koppelprodukte beachtliche Flächengutschriften, die sich, je nach Nutzpflanze, auf Werte zwischen rund 3.400 und mehr als 10.300 m² pro Hektar Anbaufläche summieren können, wenn alle Rohstoffe vollständig zu den dargestellten Koppelprodukten verarbeitet werden. Relativ gering sind dabei die möglichen Gutschriften für Energieträger, da diese im Vergleich zu den meisten anderen Konsumgütern leichter kompensiert werden können. Produkte, die vergleichsweise große Flächen in Anspruch nehmen, führen dagegen auch schon bei relativ geringen Anteilen am Gesamtertrag zu beachtlichen Flächengutschriften. Deutlich wird dies beispielsweise mit Blick auf die Öl- und

Expellererträge von Faserlein und Hanf, die im Vergleich zu Öllein oder Raps gering erscheinen, aber Flächengutschriften zwischen 1.000 und 1.500 m² pro Hektar Anbaufläche ermöglichen. Diese durch Koppelprodukte freigesetzte Fläche entspricht ungefähr der Fläche, die in Deutschland benötigt wird, um einen Menschen vollwertig zu ernähren. Die größten Gutschriften ergeben sich allerdings aufgrund der hohen Aufkommen von Kurzfasern und Schäben aus der Baustoffproduktion. Diese setzen jedoch nicht in erster Linie Flächen frei, die auch für die Nahrungsproduktion genutzt werden können, da sie durch Baustoffe auf Basis forstwirtschaftlich erzeugter Rohstoffe ersetzt werden können. Ihre Nutzung ist aufgrund ihrer guten Dämmwirkung trotzdem sinnvoll, da sie ohnehin anfallen und nur einen geringen Einsatz von Produktionsenergie (Graue Energie) erfordern. Anders als bei vielen anderen Rohstoffen besteht aber auch die Möglichkeit, Rohstoffe für die Produktion von Textilfasern, Dämmstoffen und Papieren im Zwischenfruchtanbau zu erzeugen, da Hanf auch als Zwischenfrucht beachtliche Erträge liefern kann (Borchert, 2015). In Kombination mit Gerste als Vorfrucht ergeben sich in der Folge große Flächengutschriften für die Produkte der Hauptfrucht Gerste (Korn und Dämmstoff), die die Flächeninanspruchnahme der Hanfprodukte sogar überkompensieren.

Tabelle 33: Flächengutschriften für Koppelprodukte der Faserproduktion bei stofflicher Nutzung der Schäben (m²/ha)

Koppelprodukt	Faser-lein	Öllein	Faser-nessel	Hanf FN	Hanf KN	Hanf ZF	Buche SH	Buche RH	Fichte SH	Fichte RH
Getreidekorn						7.313				
Blätter			199							
Bauholz							3.141	6.379		5.188
OSB/Spanplatte	4.713	1.595	(3.200)	6.950	3.128	1.738				
Dämmstoff	791	268		1.008	454	1.281	44	44	129	129
Öl	405	1.419			507					
Expeller	607	2.126			976					
Festbrennstoff						0	1.103	904	1.342	1.024
SUMME	**6.516**	**5.408**	**3.399**	**7.958**	**5.064**	**10.332**	**4.288**	**7.327**	**1.472**	**6.341**

KN=Kombinationsnutzung, ZF=Zwischenfruchtanbau, SH=Stammholz als Rohstoff, RH=Restholz als Rohstoff. In Klammern: Unter Vorbehalt.
Quelle: Eigene Berechnung nach AustroCel Hallein, 2018a; FNR, 2013; Ganz, 2017; Lenzing, 2012; Lenzing, o. J.; Mattes & Ammann, o. J.; Mattes & Ammann, 2015a; Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2009b; Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2016b; HANFFASER Uckermark eG, o. J.; Borchert, 2015; Schönthaler, 2018a; Graf, et al., 2005, S. 10; Graf, et al., 2010; Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2009a; Gesamtverband Leinen, 2018; von Gleich, 1990; Steger, 2014; Brückner, 2014; Lehne, et al., 2001; u. a.

Im Hauptfruchtanbau erzielt man die höchste Flächeneffizienz mit Faserlein und Hanf in der reinen Fasernutzung (FN) ohne Kornnutzung mit Werten zwischen 1,0 und 3,3 m²/kg, gefolgt von Hanf in der Kombinationsnutzung (KN = Produktion von Korn und Stroh), die 5,0 m² pro Kilogramm Textilfaser in Anspruch nimmt. Eine solche Flächeneffizienz kann mit Textilfasern aus Reststoffen der forstwirtschaftlichen Produktion nicht ganz erreicht werden, die immer

noch 7 bis 8 Quadratmeter pro Kilogramm in Anspruch nehmen. Für diese auf Holz basierenden Fasern spricht aber im Vergleich zu Hanf- und Leinfaser, dass sie nicht in einer Flächenkonkurrenz um Ackerflächen stehen.

Tabelle 34: Flächeninanspruchnahme der Textilfaserproduktion nach Berücksichtigung von Koppelprodukten bei stofflicher Nutzung der Schäben (m²/kg)

Nutzung	Faser-lein	Öllein	Faser-nessel	Hanf, FN	Hanf, KN	Hanf, ZF	Buche SH	Buche RH	Fichte SH	Fichte RH
Ohne Koppel-produkte	9,6	28,4	15,4	5,0	11,1	20,0	13,7	71,5	8,5	42,5
Inklusive Kop-pelprodukte	3,3	13,0	(10,2)	1,0	5,5	-0,7	7,8	19,1	7,3	15,6

KN=Kombinationsnutzung, ZF=Zwischenfruchtanbau, SH=Stammholz als Rohstoff, RH=Restholz als Rohstoff.
In Klammern: Schätzung
Quelle: Eigene Berechnung (vgl. Anhang Anschnitt 11.2.5.7)

5.2.3.2.2 Möbel

Der Holzverbrauch des Möbelkonsums wird auf einen Wert von 0,17 Kubikmetern pro Person und Jahr geschätzt (vgl. Anhang Abschnitt 11.2.3.1). Daraus ergibt sich ein jährlicher Gesamtbedarf (einschließlich gewerblich genutzter Möbel) von ca. 70 kg Fichtenholz oder ca. 102 kg Buchenholz pro Einwohner. Bei einer weitestgehend auf Holz basierenden Wohnungsmöblierung und einer Nutzungsdauer von ca. 12 Jahren wird der Bedarf auf rund 48 bis 83 kg pro Einwohner und Jahr geschätzt (vgl. Abschnitt 11.2.3.7.3). Der Hektarertrag der Möbelproduktion aus Fichten- oder Buchenholz liegt, je nach Nutzungspfad, zwischen 0,9 – 2,6 t/ha. Mögliche Koppelprodukte sind unter anderem OSB-Platten, Spanplatten, chemische Textilfasern (hier Viskose), Zellstoff für die Papierproduktion, Holzfaserdämmstoffe, Rindendämmstoffe, Klebstoffe oder Brennstoffe (Holz, Braunlauge, Schwarzlauge). Unter Berücksichtigung der möglichen Koppelprodukte ergibt sich bei einer vorwiegenden Nutzung von Buchenholz eine Flächeninanspruchnahme von 3,14 bis 7,9 m²/kg und bei einer vorwiegenden Fichtenholznutzung von 3,1 bis 5,3 m²/kg. Ohne Koppelproduktnutzung liegen die Werte bei Buchenholz zwischen 4,3 und 11,2 m²/kg und bei Fichtenholz zwischen 3,9 und 6,8 m²/kg. Die meisten anderen Bäume weisen einen höheren Flächenbedarf auf. Insgesamt liegt die Spanne je nach Baumart und Koppelproduktnutzung zwischen 2,3 und mehr als 16,0 m²/kg (vgl. Tabelle 324). Bei einer Autonomiepotenzialabschätzung muss daher das Ertragspotenzial des lokalen Baumbestandes nach Baumarten differenziert berücksichtigt werden. (Vgl. Anhang Abschnitt 11.2.3 Möbel)

5.2.3.2.3 Papier

Im Jahr 2016 wurden in Deutschland 20,38 Millionen Tonnen verbraucht (VDP, 2016), was bei einer Bevölkerung von 81,2 Millionen Menschen rund 251 kg pro Einwohner entspricht. Der

Frischfaseranteil der Deutschen Papierproduktion beträgt knapp 25 Prozent (VDP, 2017), woraus sich ein Bedarf von rund 62 kg/Ea ergibt. Die Zellstofferträge liegen, je nach Nutzpflanze, zwischen einer und knapp acht Tonnen pro Hektar, wobei schnell wachsende Gräser die höchsten Erträge liefern (vgl. Anhang Abschnitt 11.2.6.5). Holzstoff für die Herstellung von Zeitungspapier und Pappen wird in der Regel ausschließlich aus Rest- und Durchforstungsholz gewonnen.

Bei der Produktion von Zellstoffen fallen ebenfalls zahlreiche Nebenprodukte an, die für die Herstellung von Koppelprodukten genutzt werden können. Zu nennen sind hier neben Rohstoffen für die Produktion von Dämmstoffen, Baustoffen, Brennstoffen, Nahrungs- und Futtermitteln auch die bei der Zellstoffproduktion anfallenden Schwarzlaugen. Das darin enthaltene Lignin kann beispielsweise für die Herstellung von Kunststoffen verwendet werden, aus denen unter anderem Möbel hergestellt werden können. Wie im Falle der Viskoseproduktion ist auch hier die Bereitstellung organischer Elektrolyte für Redox-Flow-Batterien eine alternative Verwendung des Lignins (3N Kompetenzzentrum, 2017). Ohne die Nutzung möglicher Koppelprodukte liegt der Flächenbedarf der Zellstoffproduktion zwischen 1,8 und ca. 11 m²/kg, wenn jeweils der maximal nutzbare Anteil der Rohstoffpflanzen für die Zellstoffproduktion genutzt wird[16]. Bei einer effizienten Nutzung möglicher Koppelprodukte liegt der Flächenbedarf, je nach Nutzpflanze, zwischen 0,7 und 9,1 m²/kg (vgl. **Abbildung 8** und Anhang Abschnitt 11.2.6.7).

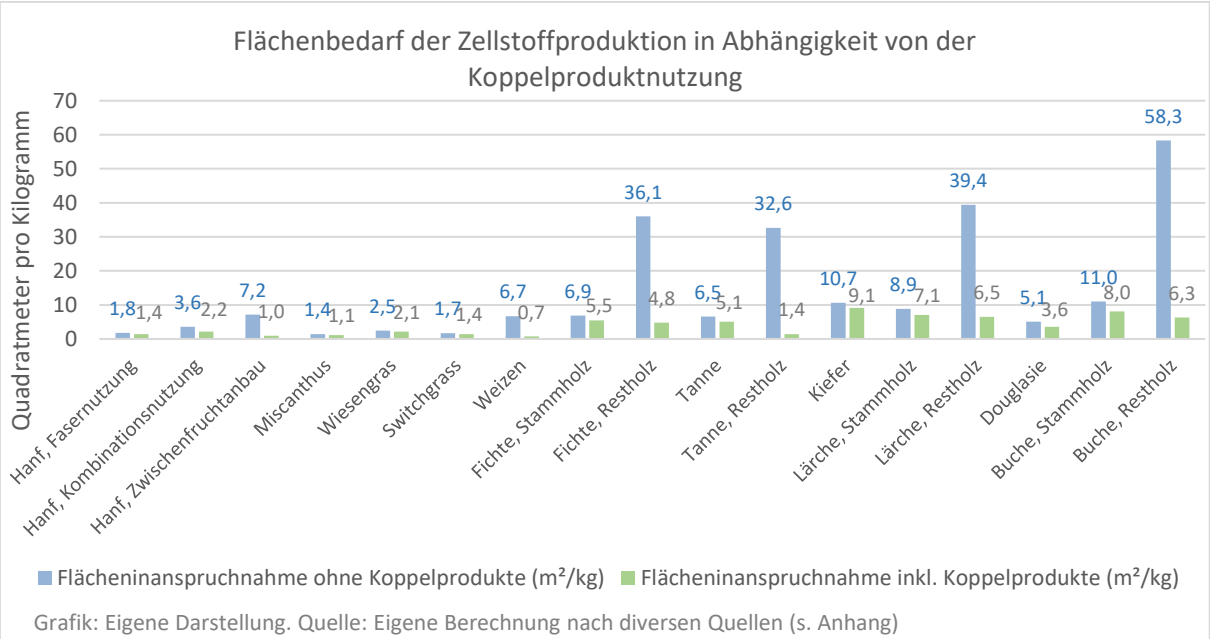
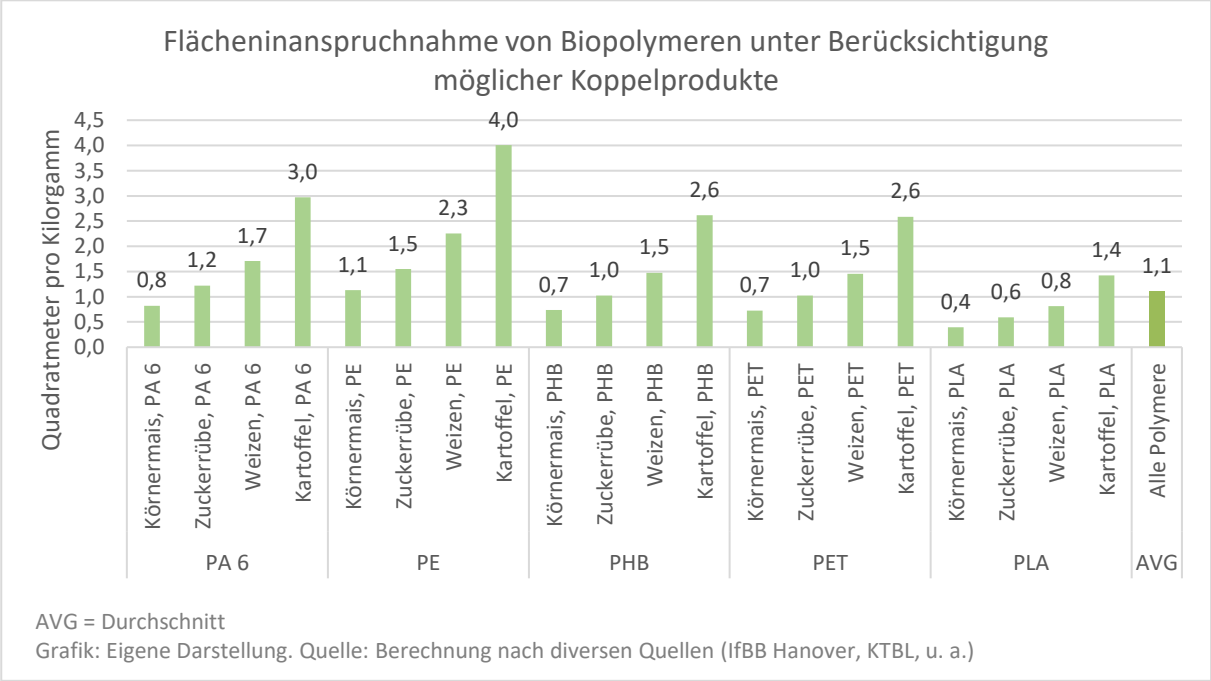


Abbildung 8: Flächenbedarf der Zellstoffproduktion in Abhängigkeit von der Koppelproduktnutzung

[16] Die in der Abbildung dargestellten Flächenbedarfe bei einer Nutzung von Restholz ohne berücksichtigung von Koppelprodukten sind rein theoretisch und in der Realität nicht relevant, da es sich bei ihren Koppelprodukten um die eigentlichen Hauptprodukte handelt. Sie wurden nur im Sinne der Vollständigkeit abgebildet und dienen nur der Veranschaulichung.

5.2.3.2.4 Kunststoffe

Der Inlandsverbrauch von Kunststoffen in Deutschland lag im Jahr 2015 bei rund 124 kg pro Einwohner (vgl. Consultic, 2016, S. 5) und damit etwas unterhalb des westeuropäischen Durchschnitts (vgl. Anhang, Abschnitt 11.2.7.1). Die Biopolymererträge liegen in Deutschland zwischen 0,8 und 6,5 Tonnen pro Hektar (IfBB Hannover, 2017). Bei gleichen Flächenanteilen aller betrachteten Biopolymere ergibt sich ein durchschnittliches Ertragspotenzial von 2,7 t/ha. Dies entspricht einer Flächeninanspruchnahme von 1,5 bis 12,5 m² pro Kilogramm Biopolymer. Bei der Ermittlung der Netto-Flächeninanspruchnahme der Polymererzeugung durch die Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte wurden Reststoffe der vorangehenden Stärke- und Zuckerproduktion sowie Pflanzenreste aus der landwirtschaftlichen Produktion der Ausgangsrohstoffe Maiskorn, Zuckerrübe und Kartoffel berücksichtigt. Danach ergaben sich Flächeninanspruchnahmen zwischen 0,8 und 4,0 m² pro Kilogramm Biopolymer (vgl. Abbildung 9 und Anhang Abschnitt 11.2.7)



AVG = Durchschnitt
Grafik: Eigene Darstellung. Quelle: Berechnung nach diversen Quellen (IfBB Hanover, KTBL, u. a.)

Abbildung 9: Flächeninanspruchnahme von Biopolymeren unter Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte

Eine höhere Flächeneffizienz wird erzielt, wenn Polymere aus Reststoffen der industriellen Speisekartoffelverarbeitung hergestellt werden. Auf diese Weise können, wie in Tabelle 35 dargestellt, Werte von 0,33 bis 0,93 m² pro Kilogramm Bio-Polymer erreicht werden (vgl. Tabelle 35 und Anhang Abschnitt 11.2.7.6). Mit einem Durchschnittsbedarf von 0,57 m² pro Kilogramm Bio-Polymer liegt die Effizienz der Speisekartoffel deutlich über der Effizienz jener Pflanzen, die vorrangig zur Produktion biobasierter Polymere angebaut werden.

Tabelle 35: Flächeninanspruchnahme von Polymeren aus Reststoffen der Speisekartoffelverarbeitung (m²/kg)

Kennwert	Polymer				
	PA 6	E	PHB	PET	PLA
Flächenbedarf (m²/kg)	0,70	0,93	0,61	0,60	0,33

Quelle: Eigene Berechnung nach diversen Quellen (KTBL, 2017; BIOTEC, 2018; Arapoglou, et al., 2010; Pathak, et al., 2017; VDGS, 2017)

5.2.3.2.5 Fahrzeugteile

Im Durchschnitt sind in einem Pkw der Mittelklasse bis zu 20 kg Naturfasern verbaut (FNR, 2018a), die überwiegend im Innenraum des Fahrzeugs zum Einsatz kommen. Wird auch die Karosserie aus Faserverbundwerkstoffen hergestellt, können auch mehr als 60 kg pro Fahrzeug verarbeitet werden. So werden z. B. in der Karosserie eines aktuellen Sportwagens 45 kg gewebten Hanfs verbaut (Dietzen zit. n. Steinbuch, 2016). Somit ergeben sich bei aktuellen Fahrzeugen Flächenbedarfe von 13 bis 100 m² pro Pkw. (Vgl. Anhang Abschnitt 11.2.4.1)

Tabelle 36: Fahrzeugbau - Flächenbedarf von Pkw-Fahrzeugteilen

Verwendung	Karosserie	Innenausstattung, Textilien	Innenausstattung, Sonstiges
Rohstoff	Hanf	Hanf	Flachs, Hanf, Holz, etc.
Gewicht	1) 45 kg	2) 20 kg	3) 10 kg
Ertrag	7,5 – 10,0 t/ha	7,5 – 10,0 t/ha	2,0 – 10,0 t/ha
Flächenbedarf 4)	< 60 m²	< 27 m²	< 13 m²

Quellen: (1) Dietzen zit. n. Steinbuch, 2016 ;(2) FNR, 2018a; (3) Schätzung (4) Eigene Berechnung

Pro Fahrrad werden zwischen 2 und 9 kg nachwachsende Rohstoffe verarbeitet. Dies ergibt einen Flächenbedarf von 4,6 bis 21,4 m² pro Fahrrad. (Vgl. Anhang Abschnitt 11.2.4.2)

Tabelle 37: Fahrradbau - Flächenbedarf von Holz- und Bambusbauteilen

Rad-Typ	Rennrad	Mountainbike	Holz-Stadtrad	Mountainbike
Bauteil	Rahmen	Rahmen	Rahmen, Lenker, etc.	Rahmen
Rohstoff	Holz	Holz	Holz	Bambus
Gewicht	1,6 – 2,3 kg 1)	2,0 – 3,0 kg 1)	3,0 – 9,0 kg 1)	2,0 kg 1)
Ertrag	3,4 – 5,0 t/ha	3,4 – 5,0 t/ha	3,4 – 5,0 t/ha	25 t/ha
Flächenbedarf	4,6 m²	6,0 m²	7,1 – 21,4 m²	0,8 m²

Quellen: (1) Cyclowood, 2013; (2) SermaX GmbH, 2018; (3) Bambooride OG, 2014

5.2.3.2.6 Ölbasierte Produkte

Bei den wichtigsten Produkten, die auf Basis von Pflanzenölen erzeugt werden können und etwa 60 Prozent der stofflichen Ölverwendung umfassen, handelt es sich um Farben und Lacke, Schmierstoffe, Kerzen und Tenside für Wasch- und Reinigungsmittel. Ihr Verbrauch liegt aktuell bei ca. 35,5 kg pro Einwohner. Für ihre Produktion werden rund 17 kg Öl benötigt.

Tabelle 38: Geschätzter Bedarf an pflanzlichen Ölen für ausgewählte stoffliche Verwendungen

Produktgruppe	Verbrauch in Mio. Tonnen pro Jahr	Verbrauch in kg/Ea	Geschätzter Ölbedarf in kg/Ea [6]	Geschätzter Ölbedarf in Mio. Tonnen pro Jahr [6]
Farben und Lacke	[1] 1,46	17,80	0,89	0,07
Schmierstoffe	[2] 1,00	12,20	12,20	1,00
Tenside, privat	[3] 0,18	2,24	2,24	0,18
Tenside, gewerblich/ industriell	[4] 0,05	0,65	0,65	0,05
Kerzen	[5] 0,21	2,60	1,14	0,09
SUMME	**2,91**	**35,49**	**17,01**	**1,40**

Quellen: (1) Statista, 2018c; (2) Statista, 2018d; (3) Forum Waschen, 2017; (4) FNR, 2014; (5) ECA zit. n. Maaß, 2013 (6) Eigene Berechnung

Wertvolle Pflanzenöle in relevanten Mengen pro Hektar liefern in Deutschland Algen, Raps, Sonnenblume, Lein, Soja, Walnuss, Leindotter und Hanf. Landwirtschaftliche Ölpflanzen produzieren zwischen 0,2 und 1,6 t Öl pro Hektar und darüber hinaus Rohstoffe, aus denen, wie in Abbildung 10 dargestellt ist, u. a. Brennstoffe, Nahrungsmittel (Honig, Presskuchen, Mehl), Futtermittel, Wertholz, Fasern (für Dämmstoffe oder Textilien) sowie Schäben für die Baustoffproduktion in beachtlichen Mengen erzeugt werden können. (Vgl. Anhang, Abschnitt 11.2.8)

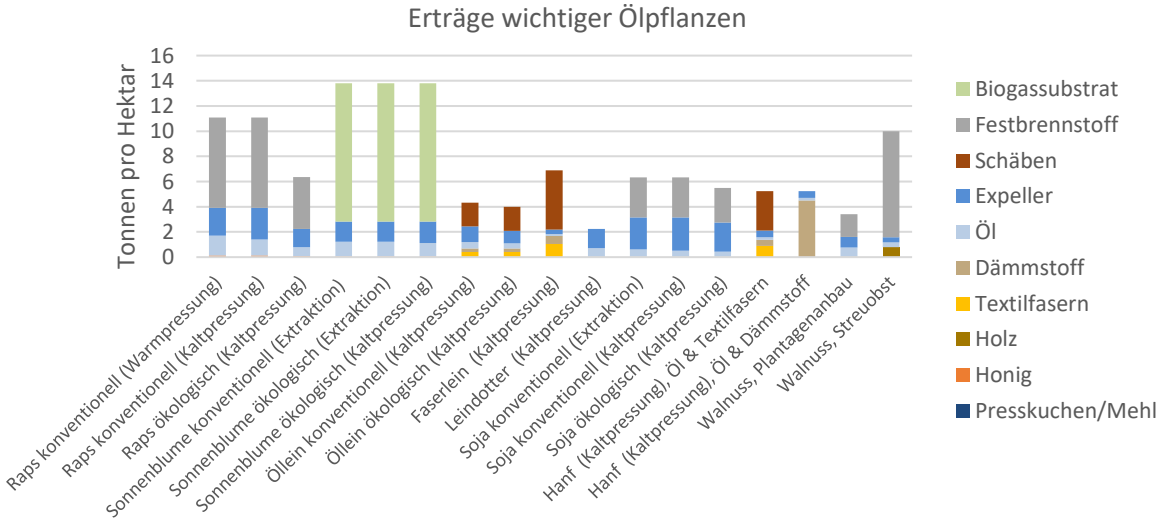
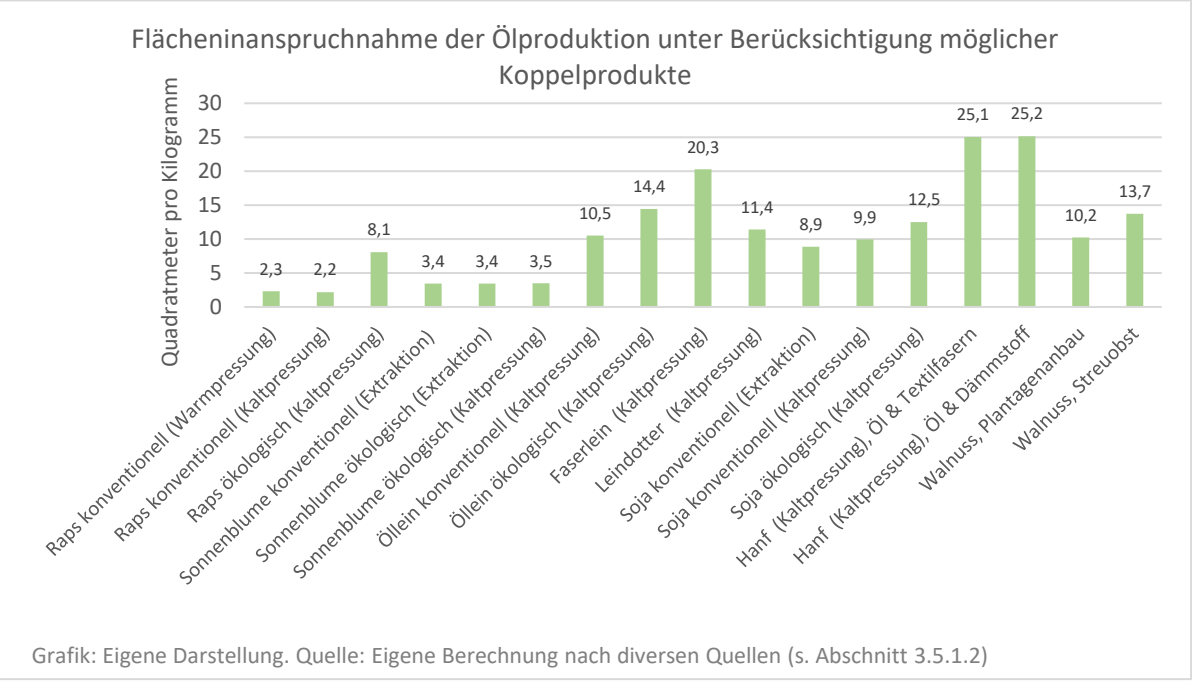


Abbildung 10: Erträge von Rohstoffpflanzen der Ölproduktion (t/ha)

Nach der beschriebenen Methodik sind, je nach Pflanze und Nutzungspfad, zwischen 2.078 und 7.229 m² pro Hektar Anbaufläche gutzuschreiben, wie im Anhang in Abschnitt 11.2.8.5.1 ausgeführt ist. Somit ergeben sich unter Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte Flächeninanspruchnahmen von 2,2 bis 25,2 m² pro Kilogramm Öl. Die Flächeneffizienzkennwerte, die sich aus den verschiedenen Optionen der Ölgewinnung ergeben, sind in **Abbildung 11** zusammengefasst. Bei der Wahl der Nutzpflanzen ist zu beachten, dass die verschiedenen Öle sich für unterschiedliche Verwendungen eignen.



Grafik: Eigene Darstellung. Quelle: Eigene Berechnung nach diversen Quellen (s. Abschnitt 3.5.1.2)

Abbildung 11: Flächeninanspruchnahme der Ölproduktion unter Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte

5.2.3.2.7 Ethanolbasierte Produkte

Der Anteil alkoholischer Lösungsmittel hatte im Jahr 2015 einen Anteil von 3 Prozent an den in Privathaushalten verwendeten Wasch-, Pflege- und Reinigungsmitteln, was einem Gesamtverbrauch von 13.636 t entsprach (FNR, 2018b S. 14). Der Verbrauch pro Person lag somit bei rund 0,17 kg/Ea.

Bioethanol kann aus verschiedenen Pflanzen und pflanzlichen Teilen hergestellt werden:

- aus zuckerhaltigen Pflanzen wie Zuckerrüben und Zuckerrohr
- aus stärkehaltigen Pflanzen wie Getreide, Kartoffeln und Mais
- aus zellulosehaltigen Rohstoffen wie z. B. Stroh und Holz.

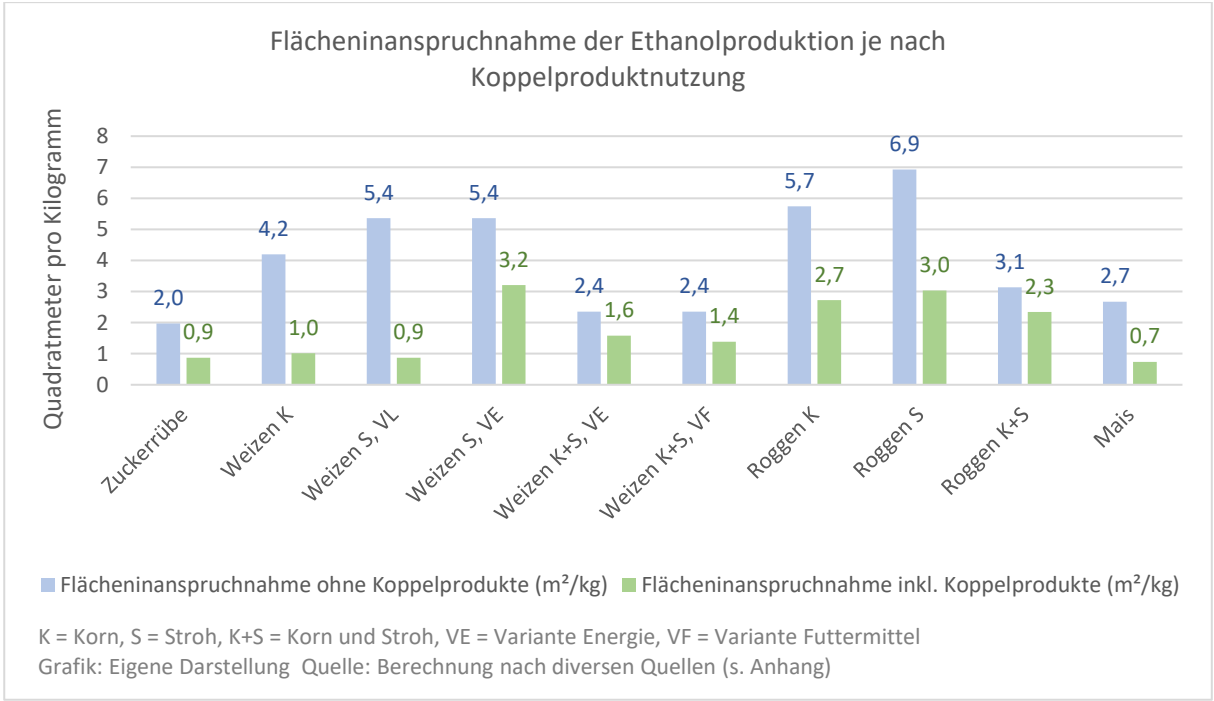
Die wichtigsten Rohstoffpflanzen der Ethanolproduktion sind Zuckerrübe, Mais, Weizen, Roggen und Triticale. Je nach Nutzpflanze und Nutzungspfad können in Deutschland im Durchschnitt zwischen 1,7 und 5,1 Tonnen Ethanol pro Hektar erzeugt werden, wie in **Tabelle 39** dargestellt ist.

Tabelle 39: Erträge wichtiger Ethanolpflanzen in Deutschland

Produkt	Zuckerrübe	Weizen	Roggen	Triticale	Mais
Biomasseerträge					
Rüben (t/ha)	[1] 60				
Korn (t/ha)		[1] 7,9	[1] 5,3	[1] 5,8	[1] 12,0
Stroh (t/ha)		[1] 8,4	[1] 6,5	[1] 6,8	[2] 10,5
Rübenblatt (t TM/ha)	[1] 6,3				
Herstellbare Ethanolmenge					
Bioethanol (l/ha)	[1] 6.452	[1] 3.034	[1] 2.219	[1] 2.327	[1] 4.775
Bioethanol (t/ha)	[1] 5,06	[1] 2,38	[1] 1,74	[1] 1,83	[1] 3,75

Quellen: (1) KTBL, 2012; (2) Fleschhut, 2016

Beim Anbau von Getreide, Mais und Zuckerrüben fallen in der Landwirtschaft Stroh und Rübenblätter an. Koppelprodukte der Ethanolproduktion können daher, je nach Nutzungspfad, verschiedene Energieträger (Biogas oder Festbrennstoffe), Nahrungsmittel und Futtermittel sein. Aus der Nutzung der Koppelprodukte ergeben sich deutliche Effizienzsteigerungen, da sie Flächengutschriften von 2.541 bis 7.590 m² pro Hektar Anbaufläche ermöglichen können. Dadurch sinkt die Flächeninanspruchnahme, je nach Nutzpflanze und Nutzungspfad, auf Werte zwischen 0,7 und 3,2 m² pro Kilogramm Ethanol.

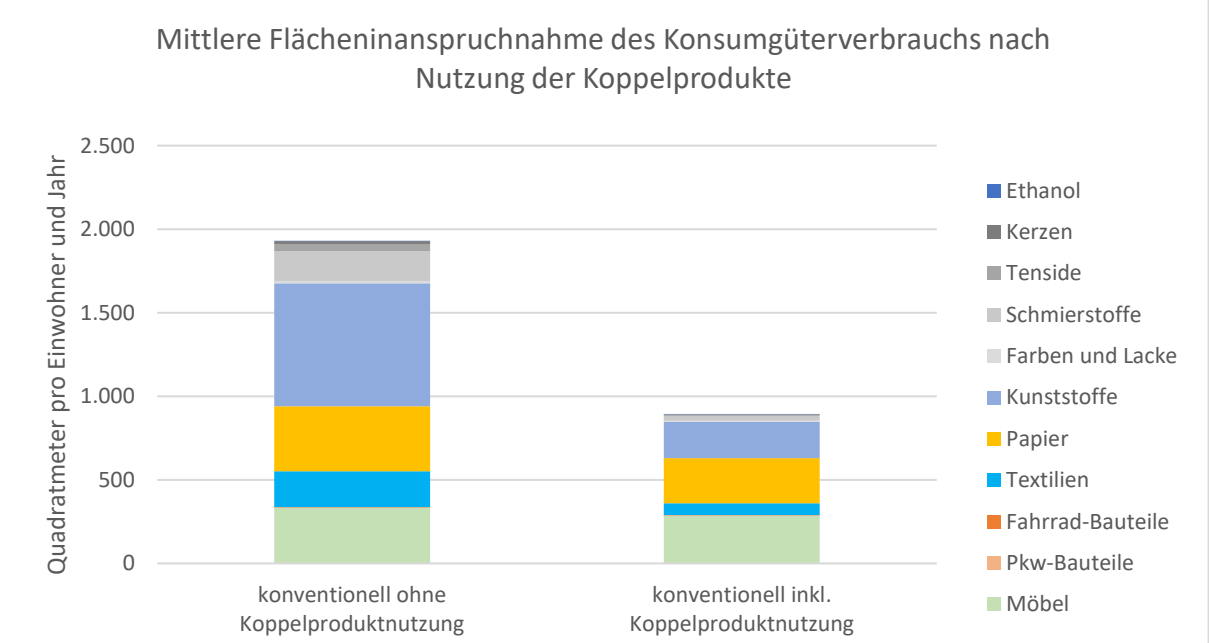


K = Korn, S = Stroh, K+S = Korn und Stroh, VE = Variante Energie, VF = Variante Futtermittel
Grafik: Eigene Darstellung Quelle: Berechnung nach diversen Quellen (s. Anhang)

5.2.3.2.8 Flächeninanspruchnahme des Konsumgüterverbrauchs

Die Nutzung der Koppelprodukte ist in der Regel entscheidend für die Flächeneffizienz biobasierter Produkte. Aufgrund der geringen Marktanteile vieler nachwachsender Rohstoffe befinden sich jedoch nur selten Abnehmer all dieser Rohstoffe an einem Ort, was die effiziente regionale Nutzung nachwachsender Rohstoffe häufig erschwert.

Werden die Koppelprodukte der Konsumgüter nicht genutzt, beträgt der Flächenbedarf der Konsumgüterproduktion ohne Baustoffe und Dämmstoffe über 0,19 Hektar pro Person. Durch eine effiziente Nutzung möglicher Koppelprodukte reduziert sich die Flächeninanspruchnahme um ca. 54 Prozent. Wie in Abbildung 12 dargestellt, verringert sich dabei insbesondere die Flächeninanspruchnahme durch Textilien, Kunststoffe und ölbasierte Produkte. Die Flächeninanspruchnahme durch Produkte, die auf Holz basieren, reduziert sich im Vergleich dazu weniger deutlich. Bei Möbeln sinkt die Flächeninanspruchnahme beispielsweise um knapp 15 Prozent.



Quelle: Eigene Berechnung auf Basis der Daten diverser Quellen (vgl. Anhang Abschnitt Rohstoffe).
Grafik: Eigene Darstellung

Abbildung 12: Mittlere Flächeninanspruchnahme des Konsumgüterverbrauchs nach Nutzung der Koppelprodukte (m²/Ea)

Der durchschnittliche Verbrauch von Konsumgütern ist in Tabelle 40 dargestellt. Zudem sind darin der Bedarf an nachwachsenden Rohstoffen und der Anbauflächenbedarf dargestellt, der sich je nach Wirtschaftsweise ergibt, wenn der Rohstoffbedarf aus nachwachsenden Rohstoffen gedeckt wird, sofern dies möglich ist.

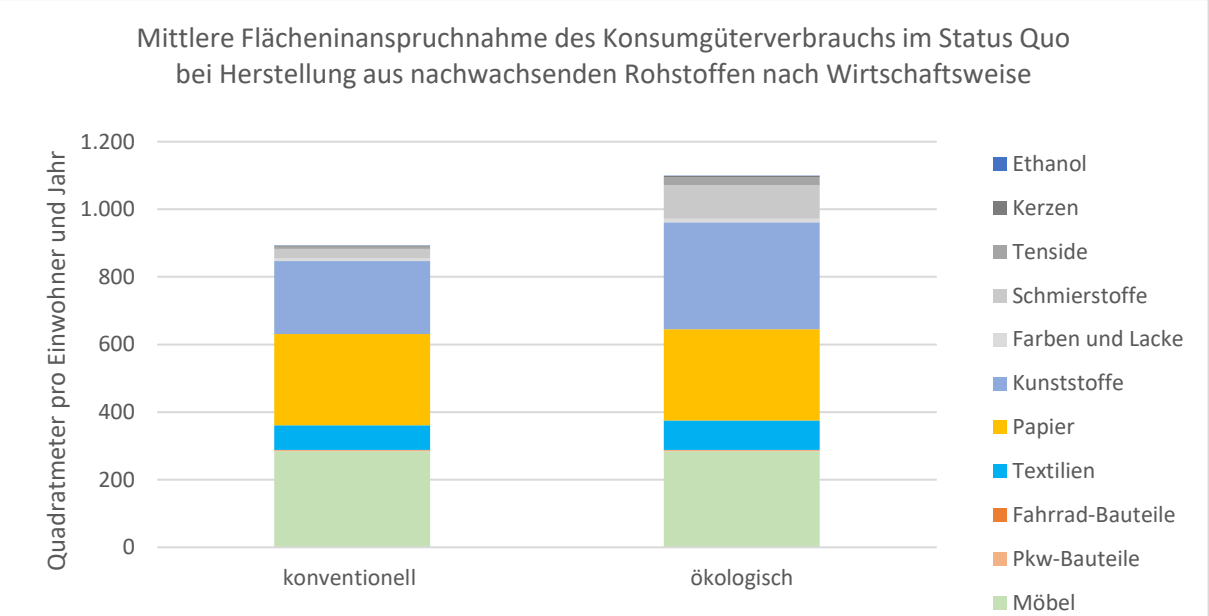
Bei einer ökologischen Wirtschaftsweise liegt der geschätzte Flächenbedarf um ca. 23 Prozent über dem Flächenbedarf einer konventionell integrierten Rohstoffproduktion. Durch eine Umstellung auf ökologische Landwirtschaft nimmt insbesondere der Flächenbedarf der Produktion von Ölprodukten und Kunststoffen deutlich zu.

Tabelle 40: Verbrauch und mittlere Flächeninanspruchnahme wichtiger Konsumgüter im Status Quo bei Produktion aus nachwachsenden Rohstoffen und Nutzung der Koppelprodukte

	Konsum (kg/Ea)	NawaRo-Verbrauch (kg/Ea)	Flächeninanspruchnahme konventionell (m²/Ea)	Flächeninanspruchnahme ökologisch (m²/Ea)
Möbel*	83,0	83,0	284,0	284,0
Fahrzeugbauteile**	4,0	4,0	5,6	5,6
…Pkw-Bauteile	3,3	3,3	4,3	4,3
…Fahrrad-Bauteile	0,7	0,7	1,3	1,3
Textilien	26,0	26,0	72,5	87,0
Papier	250,0	56,3	270,0	270,0
Kunststoffe	147,0	147,0	215,4	315,5
Ölprodukte	35,5	17,1	45,8	138,1
…Farben und Lacke***	17,8	0,9	8,5	11,1
…Schmierstoffe	12,2	12,2	28,1	98,8
…Tenside	2,9	2,9	6,7	23,5
…Kerzen	2,6	1,1	2,6	4,7
Ethanol	0,2	0,2	0,3	0,5
SUMME	545,7	333,5	893,6	1.100,7

Quelle: Eigene Berechnung auf Basis der Daten diverser Quellen (vgl. Anhang, Abschnitt 11 Rohstoffe)
* Durchschnittliche Nutzungsdauer: 12 Jahre
** Angenommene Nutzungsdauer von 13 Jahren und angenommene Dichte von 544 Pkw und 1.000 Fahrräder pro 1.000 Einwohner
***Angaben beziehen sich nur auf den Ölverbrauch

Die größten Anteile am Flächenbedarf haben in beiden Fällen Möbel, Papier und Kunststoffe. Gerade in diesen Produktgruppen lässt sich der Rohstoffbedarf durch Recycling, Reparatur und Effizienzsteigerungen deutlich reduzieren. Dementsprechend groß sind die Potenziale, den Flächenbedarf des Konsums durch Maßnahmen in diesen drei Produktgruppen zu reduzieren.



Quelle: Eigene Berechnung auf Basis der Daten diverser Quellen (vgl. Anhang Abschnitt Rohstoffe).
Grafik: Eigene Darstellung

Abbildung 13: Mittlere Flächeninanspruchnahme des Konsumgüterverbrauchs im Status Quo bei Herstellung aus nachwachsenden Rohstoffen nach Wirtschaftsweise (unter Berücksichtigung von Koppelprodukten)

5.3 Zusammenfassung wichtiger Umweltkennwerte

Alle baulichen Maßnahmen und landwirtschaftlichen Nutzungen stellen Eingriffe in die Ökosysteme dar und sind mit verschiedenen Auswirkungen auf die Schutzgüter verbunden. Dies gilt auch für die vergleichsweise neuen regenerativen Energiequellen.

Photovoltaik- und Windenergieanlagen sind mit einem geringen Flächenverbrauch verbunden, der im Falle der Photovoltaikanlagen vollständig reversibel ist. Bei geeigneter Pflege bieten Freiflächensolaranlagen auf Grünland Lebensraum und Rückzugsmöglichkeiten für eine große Artenvielfalt und geschützte Arten, die in der heutigen Agrarlandschaft immer weniger geeignete Lebensräume finden. Ein Pilotversuch des BUND und der solarcomplex AG hat am Beispiel des Solarparks Mooshof im Süden Baden-Württembergs belegt, dass sich intensiv genutzte Landwirtschaftsflächen unterhalb einer Solaranlage innerhalb kurzer Zeit zu einer artenreichen Wiese entwickeln können, die zahlreichen bedrohten Arten Lebensraum bieten können (solarcomplex AG, 2018). Solaranlagen bieten damit für den Naturschutz mehr Chancen als Risiken. Dies gilt insbesondere, wenn mit ihrer Hilfe das Klimaschutzziel des Pariser Klimaabkommens erreicht werden kann.

Energiepflanzen der 2. Generation weisen im Vergleich deutliche Vorteile gegenüber Energiepflanzen der 1. Generation auf. Ähnliches gilt auch für den Vergleich mit stofflich genutzten Rohstoffpflanzen, wenn auch in weniger deutlicher Ausprägung. Als größte Vorteile müssen die Mehrjährigkeit und der damit verbundene Erosionsschutz, das Humusaufbaupotenzial, der geringe Pflanzenschutzbedarf und das Insektenweidepotenzial genannt werden. Der Anbau von mehrjährigen Energiepflanzen ist in vielen Fällen sogar mit geringeren Beeinträchtigungen der Ökosysteme möglich als der Anbau vieler Nahrungspflanzen.

5.3.1 Biodiversität

Die Vorteile von Energiepflanzen der 2. Generation für den Umweltschutz werden unter anderem anhand eines Blühkalenders ersichtlich, der Energiepflanzen der 1. Generation (Tabelle 41), von denen viele zu den wichtigsten Nahrungspflanzen gehören, mit Energiepflanzen der 2. Generation (Tabelle 42) vergleicht. Die acht wichtigsten Energiepflanzen der ersten Generation bieten ohne Zwischenfruchtblühmischungen im Durchschnitt pro Pflanze für ca. 0,66 Monate nektarproduzierende Blüten. Ein Nektarangebot bieten sie dabei lediglich während der Rapsblüte von April bis Ende Mai. Durch den gezielten Einsatz von Zwischenfruchtblühmischungen kann im Idealfall wohl ein Durchschnittswert von bis zu 1,50 Monaten pro Energiepflanze und Jahr erreicht werden. Wie in (Tabelle 41) sichtbar wird, besteht dabei allerdings eine Lücke von Anfang Juni bis Ende Juli, in der für Insekten keine nektarspendenden Blüten zur Verfügung stehen.

Die 13 betrachteten Energiepflanzen der zweiten Generation bieten durchgehend von März bis Oktober Nektar. Pro Pflanze finden Insekten durchschnittlich über ca. 1,69 Monate nektarproduzierende Blüten. Dabei bieten die meisten der nektarproduzierenden Energiepflanzen der zweiten Generation ein reiches Nektarangebot (vgl. Anhang, Tabelle 402). Zudem bieten sie ein besonders großes Nektarangebot in der Zeit nach dem Ende der Rapsblüte ab Juni bis Ende September.

Tabelle 41: Blühkalender für landwirtschaftliche Energiepflanzen der 1. Generation

G	Energiepflanze	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov
1	Ackergras- und Leguminosen										
1	Dauergrünland intensiv										
1	Futterrübe										
1	Körnermais						P	P	P		
1	Silomais						P	P	P		
1	Wintergerste				P						
1	Winterraps			N4	N4						
1	Winterweizen					P					
-	Zwischenfruchtblühmischungen							N3	N3	N3	

G = Energiepflanzengeneration. N = Blüte mit Nektarproduktion. Mit "N" wird der Nektarwert und mit "P" der Pollenwert dargestellt. Die Skala reicht jeweils von 0 bis 4, wobei die Zahl 4 für den höchsten Wert steht (0 = kein, 1 = gering, 2 = mittel, 3 = reich, 4 = sehr reich). Produziert eine Pflanze Nektar und Pollen, so ist der Nektarwert angegeben. Ist keine Ziffer angegeben, lagen zu diesen Pflanzen keine Werte vor.
Die angegebenen Zahlen sind nur als Richtwerte zu sehen.
Quellen: FNR, 2015a, S. 9; Haller & Fritz, 2015, S. 57;Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen; Deutscher Imkerbund; Apis; , 2018; Imkerei Zocher, 2019; Diverse Gärtnereien

Energiepflanzen der zweiten Generation sind damit im Durchschnitt auch deutlich bienenfreundlicher als die wichtigen Rohstoffpflanzen. Unter den ackerbaulich genutzten Rohstoffpflanzen ist Lein (mit zwei Nutzungen/Sorten) die einzige Pflanze, die zumindest eine geringe Nektarproduktion aufweist. Im Durchschnitt kommen die acht ackerbaulich genutzten Rohstoffpflanzennutzungen somit lediglich auf 0,75 Monate Blütezeit pro Kulturpflanze und damit auf ein sehr geringes Nektarangebot. (Vgl. Anhang Abschnitt 13.2.3 und Tabelle 401)

Zudem bieten Energiepflanzen der 2. Generation im Gegensatz zu vielen einjährigen Kulturpflanzen auch vielen Wildtieren Unterschlupf (vgl. Anhang Abschnitt 13.2.2 Lebensraumqualität). Energiepflanzen der zweiten Generation, insbesondere die thermisch genutzten Pflanzen Sida, Miscanthus, Rutenhirse und Hirschgras werden erst im März oder April geerntet und bieten Wildtieren den ganzen Winter hindurch wertvolle Deckung. Aus diesem Grund nutzen z. B. auch „mehr und mehr Jäger Sida als Deckpflanze für das Wild“ (Sperr, 2018a). Anders als beim Anbau vieler einjähriger Kulturen müssen beim Anbau von Miscanthus, Sida, Silphie und Topinambur keine gravierenden Störungen während der Brutzeit der Wildvögel hingenommen werden.

Tabelle 42: Blühkalender für landwirtschaftliche Energiepflanzen der 2. Generation

G	Energiepflanze	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov
2	Durchwachsene Silphie						N3	N3	N3		
2	Miscanthus								P	P	
2	Pappel		P	P	P						
2	Paulownia			N1	N1						
2	Rutenhirse/Switchgrass,						P	P	P		
2	Sida					N3	N3	N3	N3	N3	
2	Sonnenblume						N3	N3	N3		
2	Sorghum bicolor							P			
2	Sudangras-Hybrid						P	P			
2	Topinambur, Biogas							N2	N2		
2	Ungarisches Hirschgras					P	P				
2	Weide		N3	N3	N3						
2	Wildblumen-Mischung					N3	N3	N3	N3		

G = Energiepflanzengeneration. N = Blüte mit Nektarproduktion. Mit "N" wird der Nektarwert und mit "P" der Pollenwert dargestellt. Die Skala reicht jeweils von 0 bis 4, wobei die Zahl 4 für den höchsten Wert steht (0 = kein, 1 = mäßig, 2 = mittel, 3 = reich, 4 = sehr reich). Produziert eine Pflanze Nektar und Pollen, so ist der Nektarwert angegeben. Ist keine Ziffer angegeben, lagen zu diesen Pflanzen keine Werte vor.
Die angegebenen Zahlen sind nur als Richtwerte zu sehen.
Quellen: FNR, 2015a, S. 9; Haller & Fritz, 2015, S. 57; Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, Deutscher Imkerbund, Apis; 2018; Imkerei Zocher, 2019; Diverse Gärtnereien

Insgesamt ist die Zahl der erheblichen Störungen pro Jahr (ohne Düngung und Pflanzenschutzanwendungen) beim Anbau von Energiepflanzen der zweiten Generation um 47 Prozent geringer als beim Anbau von Energiepflanzen der ersten Generation und um 34 Prozent geringer als beim Anbau wichtiger Rohstoffpflanzen (vgl. Abbildung 14 und Anhang, Abschnitt 13.2.6 Störungen). Untersuchungen ergaben auf Flächen mit Silphie und Topinambur signifikant mehr Brutnachweise als auf Flächen mit Wintergetreide oder Mais (Dziewiaty, 2011). Daher wird die Nutzung mehrjähriger Energiepflanzen von Dziewiaty (2011) empfohlen.

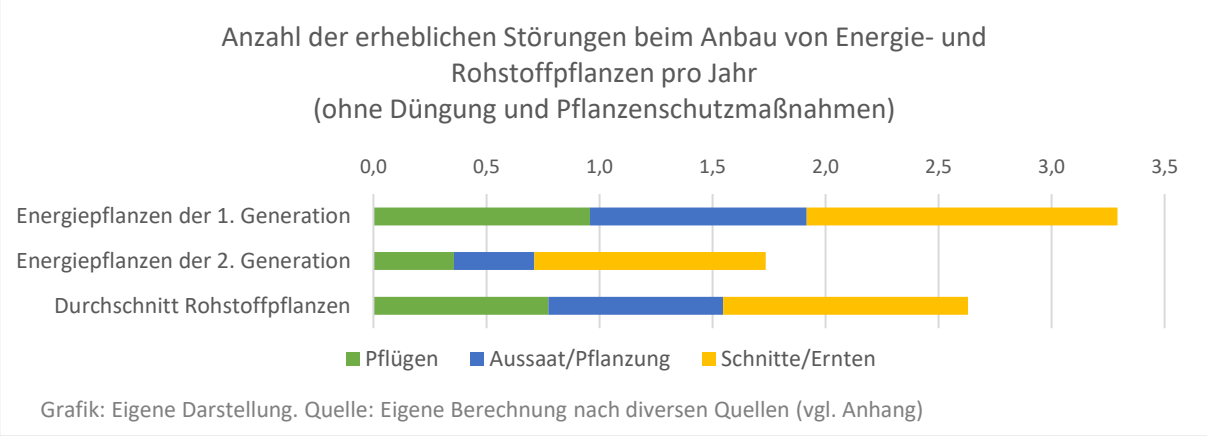
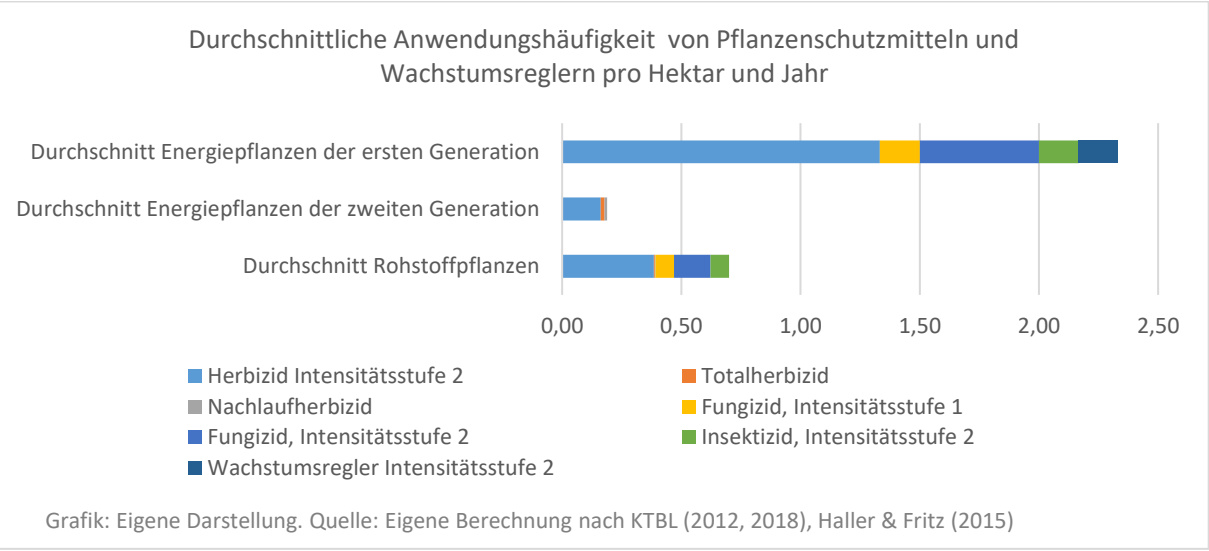


Abbildung 14: Anzahl der erheblichen Störungen beim Anbau von Energie- und Rohstoffpflanzen pro Jahr (ohne Düngung und Pflanzenschutzmaßnahmen)

5.3.2 Schutz von Böden, Gewässern und Grundwasser

Der großflächige Anbau von einjährigen Energiepflanzen kann Artenvielfalt und Böden sowie den Wasserhaushalt negativ beeinflussen, da sie im konventionellen Anbau Humusabbau fördern und einen hohen Bedarf an Dünge- und Pflanzenschutz aufweisen. Dies kann unter anderem zu einem Eintrag von unerwünschten Stoffen in Gewässer und Grundwasser beitragen und zu einem verstärkten Abfluss von Oberflächenwasser führen. Mehrjährige Energiepflanzen der zweiten Generation bieten dagegen die Möglichkeit, Klimaschutz mit Humusaufbau, einer Förderung der Artenvielfalt sowie einem besserem Erosionsschutz und Gewässerschutz zu verbinden. Durch den Anbau von Miscanthus, Pappel, Sida, Silphie oder Rutenhirse können im Boden 0,3 bis 2,5 t C/ha*a angereichert werden, wodurch eine CO_2-Minderung um 1,0 bis 9,2 t CO2/ha*a erreicht werden kann (vgl. Anhang, Tabelle 423). Ein höherer Humusgehalt verbessert zudem die Wasseraufnahmefähigkeit der Böden und kann so auch einen Beitrag zum Hochwasserschutz leisten.

Zudem können Energiepflanzen der zweiten Generation einen Beitrag zum Schutz von Gewässern und Grundwasser leisten, da sie auch im konventionellen Anbau bei vergleichbaren Energieerträgen deutlich geringere Mengen an Dünge- und Pflanzenschutzmitteln benötigen als Energiepflanzen der ersten Generation (vgl. Anhang: Abschnitte 13.2.4 Schadstoffeintrag, 13.2.5 Düngemittelaufwand, 13.2.7 Erosionsschutz). Die Anzahl der Anwendungen beim Anbau von Energiepflanzen der zweiten Generation ist im Durchschnitt der hier betrachteten Pflanzen um 92 Prozent geringer als beim Anbau von Energiepflanzen der ersten Generation (vgl. Abbildung 15). Im konventionellen Anbau sind die meisten Energiepflanzen der zweiten Generation sogar mit einem geringeren Bedarf an PSM-Anwendungen verbunden, als die meisten Nahrungspflanzen und der Durchschnitt der Rohstoffpflanzen.



Grafik: Eigene Darstellung. Quelle: Eigene Berechnung nach KTBL (2012, 2018), Haller & Fritz (2015)

Abbildung 15: Durchschnittliche Anwendungshäufigkeit von Pflanzenschutzmitteln und Wachstumsreglern im konventionellen Anbau von Energie- und Rohstoffpflanzen im Vergleich

Auch die deutschlandweit hohe Belastung der Grundwasservorkommen durch Nitrateinträge aus der Landwirtschaft (Umweltbundesamt, 2018b) könnte durch die Nutzung von Energiepflanzen der zweiten Generation reduziert werden (vgl. Tabelle 43). Der Bedarf an P_2O_5 liegt immerhin bei 7 von 12 betrachteten Energiepflanzennutzungen der zweiten Generation unter dem Durchschnitt der Energiepflanzen erster Generation, sodass der Eintrag in gefährdete Gewässer durch eine gezielte Pflanzenauswahl ebenfalls reduziert werden kann (vgl. Anhang Abschnitt 13.2.5 Düngemittelaufwand und Tabelle 405).

Tabelle 43: Durchschnittlicher Düngemittelbedarf der Energiepflanzengenerationen im konventionellen Anbau (kg/ha*a)

	N	P_2O_5	K_2O	CaO	MgO	S
Energiepflanzen der 1. Generation	198	82	214	0	30	8
Energiepflanzen der 2. Generation	126	86	177	55	22	0
Relation 2. Generation zu 1. Generation	64%	105%	83%		75%	0%

Quellen: Eigene Berechnung nach BED, 2017; BED, 2017b; Haller & Fritz, 2015 ; KTBL, 2018; LWK Niedersachsen, 2010; Raiffeisen, 2017; Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2008; Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2016b; Vetter, et al., 2009;
Vgl. Gesamtübersicht in Tabelle 405

5.3.3 Wasserhaushalt

Entscheidende Faktoren für den Einfluss von Kulturpflanzen auf den Wasserhaushalt sind die sogenannte Interzeption (das vorübergehende Speichern von Niederschlag an Pflanzenoberflächen, von wo aus es verdunsten oder durch Abtropfen oder Ablaufen zum Boden gelangen kann) und die Verdunstung, die sich aus der Evaporation und der Transpiration der Pflanzen zusammensetzt. Wasser, das weder von den Pflanzen aufgefangen werden noch im Boden versickern kann, gelangt als Oberflächenabfluss unmittelbar über die Bodenoberfläche in die sogenannten Vorfluter (Bäche, Flüsse). Ein höherer Humusgehalt erhöht die Wasseraufnahmefähigkeit der Böden und kann die Gefahr durch Hochwasser reduzieren. Die Versickerung ist, vereinfachend dargestellt, die Differenz zwischen dem Niederschlag und dem kapillaren Aufstieg (bei Grundwasseranschluss) einerseits und der Verdunstung (Evaporation und Transpiration) und dem Oberflächenabfluss andererseits. Nur die Versickerung trägt letztlich zur Grundwasserneubildung bei.

Die Landwirtschaft kann ihren Wasserbedarf durch die Wahl geeigneter Anbaukulturen und deren Bewässerungsbedarf beeinflussen und in einem gewissen Rahmen an die regionalen und lokalen Gegebenheiten anpassen (Umweltbundesamt, 2011 S. 29). Ein direkter Vergleich einer größeren Zahl verschiedener Energie- und Rohstoffpflanzen ist bisher nur bezüglich der durchschnittlichen Transpiration möglich, da z. B. zur Evaporation keine ausreichende Datengrundlage vorliegt. Die niedrigsten Transpirationskoeffizienten weisen, wie in Tabelle 413 dargestellt, Sudangras mit ca. 189 l H_2O/kg TM und Miscanthus mit 204 l H_2O/kg TM auf. Im

durchgeführten Vergleich von Energiepflanzen und ihrer Verwendungen liegt der durchschnittliche Transpirationskoeffizient von Energiepflanzen der zweiten Generation (ohne Topinambur) je Kilogramm Trockenmasse um 23 Prozent und die potenzielle Transpiration je Hektar um 27 Prozent unterhalb der Durchschnittswerte von Energiepflanzen der ersten Generation (vgl. Tabelle 44).

Tabelle 44: Vergleich der durchschnittlichen Transpiration von Energiepflanzen erster und zweiter Generation im konventionellen Anbau (ohne Topinambur)

Pflanzengruppe	Mittlerer Durchschnittsertrag in t TM/ha	Transpirationskoeffizient in l H_2O/kg TM, Mittelwert	Mittlere potenzielle Transpiration in l H_2O/ha
Energiepflanzen der 1. Generation (9 Nutzungen)	14,30	429	5.904.144
Energiepflanzen der 2. Generation (9 Nutzungen)	13,14	331	4.302.685
2. Generation im Vergleich zur 1. Generation	92%	77%	73%

Quelle: Eigene Berechnung

Die geringste Transpiration pro Hektar und pro Kilowattstunde Energieertrag weisen Energiepflanzen der 2. Generation für die thermische Nutzung auf. Ihre Werte liegen deutlich unter den heute vorherrschenden Energiepflanzen der 1. Generation, die vor allem für die Produktion von Biogas und Biokraftstoffen genutzt werden.

Tabelle 45: Transpiration von Energiepflanzen pro Hektar und pro Kilowattstunde im Vergleich

Energiepflanzengruppe und Nutzung	Mittlere Transpiration in l H_2O/ha	Netto-Energieertrag in kWh/ha*	Mittlere Transpiration in l H_2O pro kWh
Ø Energiepflanzen 1. Generation für Biogasnutzung (KWK)**	6.294.029	39.412	169
Ø Energiepflanzen 1. Generation für Ethanolproduktion***	5.717.869	36.876	160
Ø Energiepflanzen 1. Generation für thermische Nutzung	5.406.021	51.616	105
Ø Energiepflanzen 2. Generation für Biogasnutzung (KWK)**	5.104.496	29.028	196
Ø Energiepflanzen 2. Generation für thermische Nutzung****	4.438.250	56.246	95

* Ohne Abzug des Energieaufwandes der Konversion.
** Es wurden nur die Nutzungsvarianten mit Kraftwärmekopplung ausgewählt. Topinambur wurde aufgrund des deutlich überdurchschnittlichen Wasserverbrauchs nicht berücksichtigt.
*** Es wurden nur die Nutzungsvarianten mit energetischer Verwertung des Strohs ausgewählt.
**** Es wurden nur Miscanthus und Faserhanf berücksichtigt, da die Interzeption bei Pappeln und Weiden im Vergleich eine deutlich größere Rolle spielen dürfte als bei Stauden und Gräsern.
Quelle: Eigene Berechnung

Der Transpirationskoeffizient der Rohstoffpflanzen liegt im Durchschnitt um ein Drittel über dem Durchschnittswert von Energiepflanzen der zweiten Generation. Pro Hektar transpirieren sie jedoch mit 5,2 m³/a ungefähr die gleiche Menge Wasser wie die Energiepflanzen der zweiten Generation und 11 Prozent weniger als die Energiepflanzen der ersten Generation.

Ausführlich dargestellt ist der Vergleich der Energie und Rohstoffpflanzen im Anhang in Abschnitt 13.2.8 Wasserhaushalt.

5.3.4 Zwischenfazit zur Ökologie

Die Nutzung von erneuerbaren Energien und nachwachsenden Rohstoffen bietet zahlreiche Vorteile für den Natur- und Umweltschutz. Neben Möglichkeiten zur Förderung der Artenvielfalt bietet die Energiewende zahlreiche Potenziale, positiv auf die Klima- und Humusbilanz, den Wasserhaushalt, die Gewässerqualität und den Erhalt wertvoller Ackerböden einzuwirken. Zudem können Risiken durch Schadstoffeinträge oder Hochwasser infolge von Starkregenereignissen gemindert werden. Die größten Potenziale bieten dabei Freiflächensolaranlagen über extensiv gepflegten Wiesen und Energiepflanzen der zweiten Generation.

Mit Blick auf die Unterschiede, die sich bereits im konventionellen Anbau ergeben, erscheint es wahrscheinlich, dass Energiepflanzen der zweiten Generation im ökologischen Landbau noch größere Vorteile gegenüber den Energiepflanzen der ersten Generation aufweisen, da ihre Ertragspotenziale durch eine Umstellung auf den ökologischen Landbau weniger gemindert werden als dies bei Energiepflanzen der ersten Generation der Fall ist. Die Nutzung von Energiepflanzen der zweiten Generation und der ökologische Landbau könnten sich daher mit Blick auf den Umweltschutz gut ergänzen. Für Pflanzen, die für die Produktion nachwachsender Rohstoffe genutzt werden, gilt dies nur teilweise, da im Rohstoffsektor der Einsatz von unempfindlichen mehrjährigen Nutzpflanzen nicht in allen Rohstoffsegmenten möglich ist.

Den Energiepflanzenanbau kann man daher nicht pauschal als ein Problem oder als einen Gewinn für den Natur- und Umweltschutz bezeichnen. Der vorliegende Vergleich belegt sehr deutlich, dass Energie- und Rohstoffpflanzen auch in dieser Hinsicht differenziert betrachtet werden müssen.

6 Mögliche Autonomiegrade in den Landkreisen

Verschiedenen Studien zufolge muss die Energieversorgung zwischen den Jahren 2030 und 2035 klimaneutral werden, um die Ziele des Pariser Klimaschutzabkommens erreichen zu können. Deshalb wurde das Jahr 2035 als Jahr des Zukunftsszenarios gewählt. Die hier berechneten Autonomiegrade der Landkreise geben Aufschluss darüber, bis zu welchem Grad sich die Landkreise im Status Quo (Stand 2017) und im Szenario für das Jahr 2035 aus lokalen Quellen regenerativ selbst versorgen können.

Die Ziele für den Energiesektor orientieren sich am Ziel der Landesregierung Baden-Württembergs, die mit der Energiewende eine Endenergieeinsparung von 50 Prozent anstrebt (UM Baden-Württemberg, 2014). Die Ziele einer möglichen Ernährungsumstellung bis 2035 orientieren sich an den Empfehlungen von DGE, AGES Österreich und Vegetarierbund für eine gesunde Ernährung. Als nachhaltige Ernährungsweise, die sowohl gesund als auch umweltverträglich ist, wurde mit der Ernährungsweise „Eco-Mix“ ein Mittelwert zwischen den Empfehlungen der AGES Österreich und einer vegetarischen Ernährung gewählt. Dabei wurde angenommen, dass dieser Mittelwert trotz eines gewissen Fleischkonsums hohe Autonomiegrade ermöglicht und somit einen Kompromiss zwischen gesundheitlichen, ökologischen und sozialen Zielen darstellt. Für die Nutzung nachwachsender Rohstoffe wurden von der Politik bisher keine konkreten Ziele formuliert, von denen sich der künftige Verbrauch ableiten ließe[17]. Bei den Zielen der Bundesregierung, die in der Nationalen Politikstrategie Bioökonomie formuliert wurden, handelt es sich vor allem um qualitative Ziele für eine nachhaltige Entwicklung. Quantitativ begrenzend vorgegeben wird lediglich der Vorrang der Ernährungssicherung auch im globalen Kontext (BMEL, 2014 S. 9). Als Orientierungswert für das Szenario 2035 wurde daher der sogenannte ökologische Fußabdruck gewählt. Dem ökologischen Fußabdruck zufolge beträgt die Nutzung natürlicher Ressourcen in Deutschland etwa das Dreifache der global pro Person verfügbaren Menge (Simonis, 2017; Statista, 2019d). Im globalen Durchschnitt liegt der Wert bei 1,75 (Statista, 2019i). Der Materialverbrauch Deutschlands beträgt nach Tucker et al. etwa das Zweieinhalbfache und der Treibhausgasausstoß knapp das Dreifache des globalen Durchschnitts. Die durch Deutschland pro Einwohner genutzte Landfläche liegt um 70 Prozent über dem globalen Durchschnittswert (Tukker, et al., 2014). Ausgehend von diesen Werten wurde im Szenario 2035 untersucht, welcher Flächenbedarf und welche Autonomiegrade sich ergeben, wenn der Rohstoffbedarf auf ein Drittel des heutigen Verbrauchs reduziert und - so weit möglich – mit nachwachsenden Rohstoffen gedeckt wird.

[17] Das Ökoinstitut hat im im Jahr 2016 rohstoffspezifische Ziele für Deutschland im Jahr 2049 formuliert, die sich auf abiotische Rohstoffe für die stofflichen Nutzung beziehen (Ökoinstitut e. V., 2016, S. 5)

6.1 Angenommene Entwicklung der Verbrauchsgewohnheiten 2017 – 2035

Im Folgenden werden die Verbräuche im Status Quo und die angenommenen Veränderungen der Verbrauchsgewohnheiten zwischen 2017 und 2035 zusammenfasst.

6.1.1 Veränderung von Ernährung und Konsum

Die angenommene Veränderung der Verbrauchs im Sektor Nahrung orientiert sich, wie beschrieben, an ökologischen und sozialen Zielen und entspricht daher einem Durchschnittswert einer als gesund eingestuften Mischkosternährung und einer ebenfalls als vollwertig eigestuften vegetarischen Ernährung, der als „Eco-Mix“ bezeichnet wird. Dies führt vor allem zu einer deutlichen Reduktion des Verbrauchs von Fleisch und Fisch und einem dementsprechend höheren Anteil pflanzlicher Nahrung an den verzehrten Kalorien. Zudem wurde angenommen, dass vermeidbare Nahrungsverluste bis 2035 weitgehend vermieden werden, wobei, wie bereits beschrieben, ein kleiner Sicherheitspuffer hinzugefügt wurde. Bei Konsumgütern wurde, wie ebenfalls zuvor beschrieben, orientiert am ökologischen Fußabdruck Deutschlands pauschal eine Reduktion des Verbrauchs um zwei Drittel angenommen.

6.1.2 Veränderung der Beheizungsstruktur der Wohnungen

Für das Szenario im Jahr 2035 wurde - orientiert an den möglichen Brennstoffaufkommen in den dichter besiedelten Landkreisen - ein Festbrennstoffanteil von 20 Prozent angenommen.[18] Für Gas wurde ein Anteil von 5 Prozent und für Solarthermie ein Anteil von 4 Prozent angenommen. Pflanzenöl wurde lediglich eine ergänzende Funktion von 1 Prozent zugewiesen. Die größte Bedeutung haben im Szenario für 2035 strombetriebene Wärmepumpensysteme, da sie den geringsten Endenergiebedarf pro Quadratmeter Wohnfläche aufweisen. Die unterstellten Beheizungsstrukturen im Jahr 2017 und im Jahr 2035 sind in Tabelle 46 dargestellt.

Tabelle 46: Beheizungsstruktur 2017 und im Szenario 2035

Energieträger	Geschätzter Bestand [1)]	Mix 2035 [2)]
Öl	47,3%	1,0%
Gas	45,0%	5,0%
Festbrennstoffe	6,0%	20,0%
Solarthermie	0,7%	4,0%
Strom (z. B. Wärmepumpe)	2,0%	70,0%
SUMME	**100%**	**100%**

Quellen: (1) Krentz, 2012; Statista, 2019c; Energieagentur Ravensburg gGmbH, 2015a, S. 56. (2) Eigene Annahmen

[18] Im Kombination mit der angenommen Energiebedarfsreduktion (vgl. 6.1.3) entspricht die Erhöhung des Anteils von 6 auf 20 Prozent nur einer Zunahme Verbrauchs um ca. 38 Prozent.

Eine Umstellung von älteren Bestandsgebäuden auf Wärmepumpen erfordert aufgrund der geringeren Vorlauftemperatur (ca. 45°C) in der Regel eine weitgehende energetische Sanierung der Gebäudehülle und häufig auch die Installation von Flächenheizkörpern (z. B. Wand- oder Fußbodenheizungen). Bei der getroffenen Annahme handelt es sich daher um ein technisches Potenzial, von dem das wirtschaftliche Potenzial unter aktuellen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen deutlich abweichen kann.

6.1.3 Veränderung des Heizenergiebedarfs für das Wohnen

Der durchschnittliche Heizenergiebedarf der Wohngebäude in Baden-Württemberg lag im Zeitraum 2011 – 2013 auf dem Niveau des bundesweiten Durchschnitts, der mit 134 kWh/m² angegeben wird (co2online gemeinnützige GmbH, 2011/2014 a). Im Zeitraum von 2002 bis 2013 ist der Energiebedarf pro Jahr um rund 3 kWh/m² gesunken (co2online gemeinnützige GmbH, 2011/2014 a). Bei einer Fortsetzung dieses Trends müsste der Heizenergiebedarf im Jahr 2017 auf 122 kWh/m² gesunken sein. Reale Verbrauchsdaten im Landkreis Konstanz weichen hiervon jedoch deutlich ab. Nach Daten der LUBW lag der Verbrauch von Heizöl, Erdgas, Biomasse und Kohlen durch Kleinfeuerungsanlagen im Kreis Konstanz im Zeitraum 2013 bis 2016 bei 2.444 GWh (8.799 TJ) pro Jahr. Davon entfielen mit 1.827 GWh/a rund 74,7 Prozent auf den Öl- und Gasverbrauch der Haushalte. (LUBW zit. n. KEA-BW, 2020)

Mit einem Anteil von ca. 92 Prozent an den Haushalten des Landkreises prägen die mit Öl- und Gas beheizten Haushalte den Gesamtbestand. Die Wohnfläche im Landkreis Konstanz betrug in diesem Zeitraum 12,39 Millionen Quadratmeter. Geht man davon aus, dass der Anteil der Öl- und Gasheizungen an der Wohnfläche ebenfalls bei 92 Prozent liegt, ergibt sich ein Heizenergieverbrauch von 160,4 kWh/m². Angenommen wurde, dass der Wärmebedarf der übrigen Haushalte pro Quadratmeter nicht wesentlich von den Wohnungen mit Öl- und Gasheizungen abweicht. Nimmt man für Wärmepumpen eine durchschnittliche Arbeitszahl von mindestens 2,5 an, ergibt sich für den Gesamtbestand ein Endenergiebedarf von 160,0 kWh/m². Welcher Wert sich witterungsbereinigt daraus ergibt und wie repräsentativ diese Werte für die übrigen Landkreise in Baden-Württemberg sind, kann hier nicht beantwortet werden. Daher wurde der Durchschnittsverbrauch des Zeitraums 2011-2013 nach co2online als Ausgangswert für das Jahr 2017 beibehalten.

Die langfristig erreichbaren Einsparungen sind schwer abzuschätzen. Bei Altbauten (Baujahr vor 1979) konnte der Heizenergiebedarf durch Vollsanierung bisher durchschnittlich auf ca. 84 kWh/m² reduziert werden (co2online gemeinnützige GmbH, 2011/2014 b). Nach einer Studie der Deutschen Energie-Agentur GmbH (dena) sind im Durchschnitt Werte von 50 – 60 kWh/m² erreichbar. Bei besserem Dämmstandard, einer Nutzung von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung und von Solaranlagen etc. sind auch Werte von ca. 30 kWh/m² möglich. (dena,

2016 S. 3) Für das Szenario 2035 wurde daher ein Mittelwert von 55 kWh/m² angenommen. Dies entspricht einer Energiebedarfsreduktion um 55 Prozent.

6.1.4 Veränderung des Treibstoffverbrauchs

Im Durchschnitt benötigten Pkw mit Ottomotor im Jahr 2017 laut Umweltbundesamt rund 7,7 l Benzin pro 100 km Fahrleistung. Der Durchschnittswert für Pkw mit Dieselmotor lag im selben Jahr bei 7,0 l/100 km. Im Jahr 2019 benötigten die zehn sparsamsten Pkw mit Ottomotor im Alltagsbetrieb zwischen 4,7 und 5,2 l/100 km, die 10 sparsamsten Modelle mit Dieselmotor verbrauchten zwischen 3,6 und 4,7 l/100 km (Fisch und Fischl GmbH, 2019a). Somit ließe sich der Treibstoffverbrauch bereits mit heute erhältlichen Fahrzeugen um 40 Prozent reduzieren. Bis zum Jahr 2035 dürften weitere Effizienzsteigerungen möglich sein. Für eine konservative Schätzung wurde jedoch mit den bereits heute realisierbaren Werten gerechnet. Die angenommene Entwicklung ist in Tabelle 47 dargestellt.

Elektroautos benötigen im Alltagsbetrieb rund 17 kWh, es sind jedoch auch mehrere Modelle auf dem Markt, die nur 15 kWh/100 km benötigen (vgl. Anhang, Tabelle 486). Auch hier wurde der bereits heute realisierte Verbrauchswert als Basis der Schätzung für das Jahr 2035 gewählt. Für leichte und schwere Nutzfahrzeuge wird aufgrund der im Vergleich zu den Pkw bereits hohen Energieeffizienz ein geringeres Einsparpotenzial erwartet. Hier wurden deshalb Einsparungen von 20 bzw. 10 Prozent angenommen.

Tabelle 47: Entwicklung des Treibstoffverbrauchs von Kraftfahrzeugen nach Motorisierung 2017-2035

Fahrzeugart und Motorisierung	Treibstoffverbrauch 2017 [1)]	Treibstoffverbrauch 2035 [2)]	Einheit
Pkw mit Ottomotor, Gas	5,5	3,0	kg Gas/100 km
Pkw mit Ottomotor, Benzin	7,7	4,7	l Benzin/100 km
Pkw mit Dieselmotor	7,0	4,2	l Diesel/100 km
Pkw mit Elektromotor	17,0	15,3	kWh Strom/100 km
LNF mit Dieselmotor	11,0	8,8	l Diesel/100 km
SNF mit Dieselmotor	23,0	20,7	l Diesel/100 km

Quelle: (1) Angaben nach (Statista, 2019c) und (Fisch und Fischl GmbH, 2019) (2) Eigene Annahmen

6.1.5 Veränderung der Pkw-Motorisierung

Bisher haben Ottomotoren den größten Anteil an der Pkw-Fahrleistung gehabt. Der Anteil der der Dieselmotoren an der Pkw-Fahrleistung in Baden-Württemberg ist jedoch in den Jahren 2013 bis 2016 von rund 46 Prozent (Büringer, et al., 2015) auf rund 48 Prozent gewachsen (Schmidtmeier, 2017a). Da ihr Anteil an den Neuzulassungen im Land und in den betrachteten

Landkreisen im Jahr 2017 ebenfalls hoch war[19] (Kraftfahrt-Bundesamt, 2017a), wurde davon ausgegangen, dass ihr Anteil an den Fahrleistungen im Jahr 2017 noch einmal gestiegen ist. Elektromotoren haben dagegen nur einen sehr geringen Anteil an Pkw-Bestand und Pkw-Fahrleistungen. Aufgrund ihrer hohen Energieeffizienz mit Wirkungsgraden von ca. 90 Prozent gelten sie jedoch derzeit als die beste Option, um mit Diesel oder Benzin angetriebene Verbrennungsmotoren zu ersetzen (Groneweg, et al., 2018 S. 6). Für das Szenario 2035 wurde daher unterstellt, dass möglichst nur noch weite Strecken oder Fahrten im ländlichen Raum ohne ausreichende Ladeninfrastruktur mit Verbrennungsmotoren zurückgelegt werden und dabei, aufgrund der höheren Flächeneffizienz, überwiegend mit Gas angetriebene Fahrzeuge zum Einsatz kommen. Es wurde unterstellt, dass es sich beim Anteil der Verbrenner jedoch um maximal ein Viertel der benötigten Fahrleistung handelt, da heute bereits rund drei Viertel der Bevölkerung Deutschlands in Städten wohnen und Vieles dafür spricht, dass der größte Teil des Individualverkehrs in Gebieten stattfindet, wo die zurückzulegenden Wege die Reichweite von elektrifizierten Verkehrsmitteln nur selten übersteigen sollten. Für einen Anteil dieser Größenordnung spricht zudem, dass der Anteil der Berufspendler, deren Wohnungen weniger als 25 km von ihrem Arbeitsort entfernt liegen, ebenfalls bei rund 75 Prozent liegt (Statista, 2019j). Bei den Berechnungen der möglichen Autonomiegrade wurde daher zunächst ein Anteil elektrifizierter Fahrzeuge von 75 Prozent an der Fahrleistung unterstellt. Aufgrund des viel diskutierten Flächenbedarfs von Biotreibstoffen wurde anschließend in vergleichenden Berechnungen (optimiertes Szenario 2035) vollständig auf Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor verzichtet (100 Prozent Elektro-Pkw).

Tabelle 48: Unterstellte Veränderung der Motorisierung im Pkw-Verkehr 2017-2035

Motorisierung	Anteil an JFL 2017 [1)]	Anteil an JFL 2035 [2)]
Ottomotor, Gas	0,7%	15,0%
Ottomotor, Benzin/Ethanol	50,0%	5,0%
Dieselmotor	49,0%	5,0%
Elektromotor	0,2%	75,0%

Quelle: (1) Schätzung anhand des Kfz-Bestandes (Kraftfahrt-Bundesamt, 2017), der Neuzulassungen (Kraftfahrt-Bundesamt, 2017a), und der Fahrleistungen 2016 (Schmidtmeier, 2017a) (2) Eigene Annahmen

6.1.6 Elektrifizierung von Bussen und Nutzfahrzeugen

Busse und Nutzfahrzeuge werden heute fast ausschließlich mit Diesel angetrieben. Im Szenario 2035 wurde eine Elektrifizierung von 50 Prozent der Busse und 50 Prozent der leichten Nutzfahrzeuge angenommen. Eine Elektrifizierung von schweren Nutzfahrzeugen und Landmaschinen wurde im Szenario 2035 zunächst nicht angenommen. Im optimierten Szenario

[19] Der Bestand an Pkw mit Ottomotor hat in Baden-Württemberg von 2016 bis 2017 um 1,0 Prozent zugenommen, der Dieselbestand um 3,7 Prozent. Im Landkreis Konstanz hat der Dieselbestand im gleichen Zeitraum um 5,2 Prozent zugenommen, im Landkreis Esslingen um 2,9 Prozent.

2035 wurde eine vollständige Elektrifizierung von Bussen, leichten Nutzfahrzeugen und Landmaschinen sowie eine fünfzigprozentige Elektrifizierung von schweren Nutzfahrzeugen im Straßenverkehr angenommen. Ob eine Elektrifizierung schwerer Nutzfahrzeuge mit Blick auf Nachhaltigkeit und wirtschaftliche Machbarkeit auch auf Langstrecken sinnvoll sein kann, ist bisher noch nicht abschließend geklärt. Grundsätzlich ist aber eine Elektrifizierung von schweren Nutzfahrzeugen technisch ebenso möglich wie die Elektrifizierung leichter Nutzfahrzeuge. Geprüft wird beispielsweise die Nutzung von Oberleitungen an Autobahnen in Kombination mit einer Batterienutzung abseits der Oberleitungsstrecken. In einem Test verbrauchten 18-Tonner beim Einsatz auf gemischten Touren mit Stadt-, Landstraßen- und Autobahnverkehr knapp 88 kWh Strom pro 100 Kilometer Fahrleistung (SFM GmbH, 2015). 18-Tonner mit Dieselmotor verbrauchen durchschnittlich ca. 220 kWh pro 100 Kilometer, 40-Tonner mit Dieselmotor benötigen ca. 320 kWh/100km.

Elektrisch betriebene Traktoren benötigen nach Herstellerangaben rund 100 kWh Strom für ca. 5 bis 6 Stunden durchschnittlichen Betrieb (AGCO GmbH, 2018). Herkömmliche Traktoren mit Dieselmotoren benötigen für eine Stunde durchschnittlichen Betriebs ca. 80 bis über 100 kWh (LWK Niedersachsen, 2005).

6.1.7 Veränderung der Jahresfahrleistungen

Der Ressourcenverbrauch der Pkw-Produktion ist, ungeachtet der Antriebstechnik, grundsätzlich hoch. „Für die Produktion von Akkus für Elektrofahrzeuge werden zusätzlich Rohstoffe wie Kobalt, Lithium, Graphit und Nickel benötigt, deren Verbrauch drastisch ansteigen wird. Bereits 2030 könnte vier Mal so viel Lithium in Elektroautos verbaut werden, wie heute jährlich weltweit abgebaut wird“ (Groneweg, et al., 2018 S. 6). Aufgrund der ökologischen und sozialen Folgen, die mit der Nutzung und Produktion von Pkw verbunden sind, sehen Groneweg & Weis (2018) es daher als wichtiges Ziel einer zukunftsfähigen und global gerechten Mobilitätspolitik, „die Zahl der Autos und die mit ihnen zurückgelegten Kilometer drastisch zu reduzieren“ (Groneweg, et al., 2018 S. 7).

Im Jahr 2016 hatte der Urlaubs- und Freizeitverkehr mit 40,1 % den größten Anteil am Verkehrsaufwand im motorisierten Individualverkehr (Personenkraftwagen und motorisierte Zweiräder) in Deutschland (vgl. Tabelle 49). Der arbeitsbezogene Verkehr (Berufs- und Ausbildungs- sowie Geschäftsverkehr) folgte mit 36,7 Prozent (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2019 S. 225).

Nicht zuletzt aufgrund der hohen Anteile von Einkauf, Freizeit und Urlaub wurde davon ausgegangen, dass durch ein verbessertes Angebot der Bahn und einen ausgebauten ÖPNV in Kombination mit effizienten Liefersystemen und einer verbesserten Nahversorgung mit attraktiven Freizeitangeboten ein Drittel der Pkw-Fahrleistungen verzichtbar gemacht werden kann.

Tabelle 49: Anteile der Fahrzwecke im motorisierten Individualverkehr

Fahrzweck	2016 [1)]	2035 [2)]	Veränderung bis 2035 [2)]
Beruf	20,1 %	20,3 %	- 33,0 %
Ausbildung	2,0 %	2,0 %	- 33,0 %
Geschäft	14,6 %	17,6 %	- 20,0 %
Einkauf	17,3 %	17,4 %	- 33,0 %
Freizeit	35,3 %	31,9 %	- 40,0 %
Begleitung	5,9 %	6,0 %	- 33,0 %
Urlaub	4,8 %	4,8 %	- 33,0 %

Quelle: (1) Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2019, S. 225 (2) Eigene Annahmen

Durch eine höhere Insassenzahl können bei gleicher Pkw-Fahrleistung mehr Personenkilometer ermöglicht werden, sodass die Zahl der Pkw um mehr als ein Drittel reduziert werden könnte. Eine um ein Drittel reduzierte Pkw-Fahrleistung würde das Pkw-Verkehrsaufkommen in den Landkreisen, wie in Tabelle 50 von 6.520 (4.552 – 8.064) km/Ea auf ca. 4.300 (3.862 – 5.322) km/Ea senken. Zudem kann durch die beschriebenen Veränderungen der Motorisierung nur eine Energieeinsparung von 62 Prozent erzielt werden, während in Verbindung mit der beschriebenen Reduktion der Fahrleistung insgesamt 71 Prozent Energieeinsparung möglich sind.

Tabelle 50: Angenommene Veränderung der Fahrleistungen im Pkw-Verkehr 2017-2035 (km/Ea)

Landkreis	2017 [1)]	2035 [2)]
Bodenseekreis	6.929	4.573
Kreis Esslingen	6.371	4.205
Kreis Konstanz	5.851	3.862
Kreis Ravensburg	8.064	5.322
Kreis Sigmaringen	4.552	4.552
Durchschnitt	**6.520**	**4.300**

Quellen: (1) Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (2) Eigene Annahmen

6.1.8 Veränderung des Energieverbrauchs des Sektors GHD und der öffentlichen Verbraucher

Im Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistung und im Sektor der öffentlichen Verbraucher wurde im Szenario 2035 eine Reduktion des Stromverbrauchs um 80 Prozent und eine Halbierung des Verbrauchs von Öl und Gas unterstellt, die vor allem durch eine verbesserte energetische Gebäudeisolierung erreicht werden könnte, da es sich beim Wärmebedarf des Sektors GHD überwiegend um Raumwärme handelt. Im Durchschnitt der fünf Landkreise ergibt sich daraus für diese beiden Bereiche eine Endenergieeinsparung von knapp 40 Prozent. Bei einer fortschreitenden Umstellung der Gebäudebeheizung auf strombasierte Systeme, wie z.

B. Wärmepumpen und Infrarotheizungen, erscheint es unwahrscheinlich, dass der Stromverbrauch deutlich darüberhinausgehend gesenkt werden kann. Voraussichtlich dürfte er im Laufe der weitergehen Umstellung auf solche strombasierten Heizsysteme sogar merklich ansteigen.

Tabelle 51: Angenommener Energieverbrauch des Sektors GHD im Szenario 2035

Zielwert	Bedarf im Vergleich zu heute
Strom	80%
Gas	50%
Öl	50%

Quelle: Eigene Annahmen

6.1.9 Veränderung des Energieverbrauchs im Sektor Industrie

Das BMU ging im Jahr 2009 davon aus, dass in der Industrie zwischen 20 und 40 Prozent des Energieverbrauchs „zu wirtschaftlich vernünftigen Bedingungen bis 2020“ eingespart werden könnten (BMU, 2009). Die tatsächlich erfolgte Einsparung bis zum Jahr 2017 lag in den fünf betrachteten Landkreisen lediglich bei 6 Prozent. Berücksichtigt man die Bevölkerungsentwicklung auf Basis des Zensus 2011, dürfte sich die Veränderung pro Einwohner in einer ähnlichen Größenordnung bewegen, auch wenn sich in den einzelnen Landkreisen Unterschiede zu der Veränderung des Gesamtverbrauchs zeigen. Das nach BMU vorhandene Potenzial wurde daher kaum ausgeschöpft. Auf dieser Basis wurde angenommen, dass der Energieverbrauch pro Einwohner, gemäß der Einschätzung des BMU, bis 2035 mindestens um ein Drittel gesenkt werden kann. Dafür spricht auch, dass ein reduzierter Konsum und eine verbesserte Reparatureignung von Konsumgütern angenommen wurden. In Tabelle 52 ist zudem die angenommene Veränderung des Endenergieverbrauchs der Industrie im Jahr 2035 verglichen mit dem Bedarf des Jahres 2017 nach Energieträgern dargestellt.

Tabelle 52: Veränderung des Energieverbrauchs der Industrie in den Landkreisen bis 2035

Veränderung des Gesamtverbrauchs 2009 - 2017				**Angenommene Veränderung aller Landkreise 2017 - 2035 nach Energieträgern**	
Landkreis	2009 (GWh)	2017 (GWh)	Veränderung 2009 - 2017	Zielwert	Veränderung 2017 - 2035
Bodenseekreis	752	906	20 %	**Strom**	-20 %
Esslingen	2.655	2.234	-16 %	**Gas, Öl, Kohle**	-50 %
Konstanz	1.490	1.735	16 %	**Wärme**	-30 %
Ravensburg	2.451	1.994	-19 %	**Erneuerbare Energien**	-20 %
Sigmaringen	556	556	0 %	**Sonstige**	-20 %
Insgesamt	**7.903**	**7.424**	**-6 %**	**Insgesamt**	**-34 %**

Quelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (Angaben wurden umgerechnet von TJ in GWh)

Die Einsparungen beim Verbrauch der einzelnen Energieträger wurden so gewählt, dass der Energieverbrauch der Industrie insgesamt auf rund zwei Drittel des Energieverbrauchs im Jahr 2017 reduziert wurde. Je nach Struktur des Energieverbrauchs der einzelnen Landkreise kann die Einsparung jedoch um wenige Prozentpunkte von diesem Durchschnittswert abweichen. In den hier betrachteten fünf Landkreisen beträgt die Einsparung, die sich aus diesen Annahmen ergibt, zwischen 31 und 35 Prozent. Insgesamt ergibt sich für die fünf Landkreise eine Einsparung von 34 Prozent.

6.1.10 Veränderung des Endenergieverbrauchs insgesamt

Durch die beschriebenen Änderungen auf Seite des Verbrauchs reduziert sich der Endenergieverbrauch der fünf betrachteten Landkreise um mehr als die Hälfte, sofern alle Maßnahmen zur Einsparung kombiniert werden. Damit würde das Ziel der Landesregierung einer fünfzigprozentigen Einsparung (UM Baden-Württemberg, 2014) erreicht. Die Ausgangswerte unterscheiden sich allerdings von Kreis zu Kreis. Im Durchschnitt der fünf Landkreise sinkt der Endenergiebedarf insgesamt um 55 Prozent von rund 24,7 MWh/Ea auf rund 11,1 MWh/Ea. Im Kreis Konstanz sinkt der Verbrauch von 25,5 MWh/Ea auf 11,9 MWh/Ea.

Tabelle 53: Veränderung des Endenergieverbrauchs in den Landkreisen bis 2035 insgesamt

Landkreis	2017 [1)]	2035 [2)]	Veränderung 2017 – 2035 [2)]
Bodenseekreis	24,0	10,7	-55%
Kreis Esslingen	23,0	10,2	-56%
Kreis Konstanz	25,3	12,0	-53%
Kreis Ravensburg	27,7	12,3	-56%
Kreis Sigmaringen	24,7	11,6	-53%
Durchschnitt	**24,7**	**11,1**	**-55%**

Quelle: (1) Eigene Berechnung, (2) Eigene Annahmen

6.2 Anteile an der Flächennutzung

Die große Vielfalt der Nutzpflanzen und ihrer jeweiligen Nutzungsmöglichkeiten lassen zahllose Kombinationen zu, die auf verschiedenste Ziele ausgerichtet werden können. Um eine bessere Vergleichbarkeit zu erhalten, wurden jedoch zunächst für alle Landkreise und Szenarien die gleichen Kombinationen ausgewählt, die in den folgenden Tabellen dargestellt sind. Die Anteile der ackerbaulich kultivierten Nahrungspflanzen, die in Tabelle 54 dargestellt sind, orientieren sich an den Ernährungsempfehlungen nach AGES (2018) für eine vollwertige Ernährung (AGES, 2018).

Tabelle 54: Anteile der Kulturpflanzen an der ackerbaulichen Nahrungsmittelproduktionsfläche*

Gruppe	Gruppenanteil	Pflanze	Einzelanteil
Getreide	38,0 %	Winterweizen	14,0 %
		Roggen	11,0 %
		Hafer	7,0 %
		Winterweizen	6,0 %
Hackfrüchte	13,0 %	Kartoffel	10,0 %
		Frühkartoffel	3,0 %
Hülsen- & Eiweißfrüchte	16,5 %	Erbsen	4,0 %
		Buschbohnen	2,0 %
		Linse & Leindotter	1,0 %
		Linse & Hafer	9,0 %
		Soja	0,5 %
Ölfrüchte	18,0 %	Winterraps	7,0 %
		Öllein	3,0 %
		Soja	3,0 %
		Sonnenblume (Kaltpressung)	2,0 %
		Ölkürbis	2,0 %
		Sonnenblume	1,0 %
Gemüse	13,0 %	Möhren/Karotten	3,0 %
		Brokkoli	2,0 %
		Rotkohl	2,0 %
		Zucchini	1,5 %
		Speisezwiebeln	1,0 %
		Blumenkohl	1,0 %
		Weißkohl	0,5 %
		Porree	0,5 %
		Radies	0,5 %
		Rote Beete	0,5 %
		Spinat	0,4 %
		Kürbis	0,1 %
Salate	1,5 %	Feldsalat	1,2 %
		Kopfsalat	0,3 %

* Ohne Futterbau
Quelle: Eigene Annahmen, orientiert an einer Ernährungsweise nach AGES, 2018.

Diese beinhalten einen geringeren Fleischverzehr als die Empfehlungen der DGE für eine vollwertige Ernährung (DGE, 2018a) und kommen daher den Empfehlungen des VEBU für eine vollwertige vegetarische Ernährung näher. Damit liegen die Empfehlungen der AGES etwa in der Mitte des Spektrums. Die übrigen Ernährungsweisen unterscheiden sich deutlicher von den jeweils anderen.

Da keine nach Sorten differenzierten Empfehlungen zum Verzehr von Gemüse gemacht werden, wurde hier eine Auswahl getroffen, die sich ungefähr am Kalorienertrag und an der Beliebtheit der einzelnen Gemüsesorten orientiert[20]. Spargel wurde aufgrund seines geringen Kalorienertrags durch Zucchini ersetzt. Unberücksichtigt blieben zudem Gurken wegen ihres hohen Transportgewichts und Wasserbedarfs bei vergleichsweise geringen Kalorienerträgen. Zudem dürften Gurken angesichts eines erhöhten Dürrerisikos für den Freilandanbau künftig weniger geeignet sein. Auf Tomaten und Paprika wurde im Freilandanbau ebenfalls verzichtet. Sie wurden stattdessen als vorrangige Kulturen in der urbanen Nahrungsmittelproduktion (Dachfarmen, Aquaponik etc.) berücksichtigt. Aufgrund ihres hohen Transportaufwandes und der besser kontrollierbaren Anbaubedingungen in Gebäuden bieten sich Tomaten, Paprika und Gurken besonders für die verbrauchsnahe und wassereffiziente urbane Produktion an.

6.2.1 Futterbau

Die Anteile der einzelnen Pflanzen an der Ackerfutterfläche sind in Tabelle 55 dargestellt. Die Anteilszuweisung orientierte sich vorrangig am Futtermittelbedarf der Schweine- und Hühnerhaltung sowie am Ziel eines hohen Gesamtautonomiegrades. Die Flächenanteile sind nicht proportional zum Anteil am tatsächlichen Futterbedarf. In der Milchvieh- und Rinderhaltung wurde eine Umstellung auf eine grünlandbasierte Haltung angenommen.

Tabelle 55: Anteile der Kulturpflanzen an der Ackerfutterfläche

Pflanze	Anteil
Winterweizen	36,0 %
Körnermais	22,0 %
Soja	21,0 %
Wintergerste, Sorghum	13,0 %
Roggen	3,0 %
Triticale	2,0 %
Soja	1,3 %
Winterraps	1,2 %
Hafer	0,5 %

Quelle: Eigene Annahmen

[20] Die meistverzehrten Gemüsesorten im Erhebungsjahr 2016/2017 waren Tomaten gefolgt von Möhren, Speisezwiebeln, Gurken, Weißkohl, Rotkohl, diversen Salaten, diversen Kohlsorten, Spargel, Spinat, Erbsen, Porree und sonstigem Gemüse (BMEL, 2017)

6.2.2 Streuobst

In Tabelle 56 sind die angenommenen Anteile der Kulturpflanzen an der Streuobstfläche dargestellt. Sie entsprechen den tatsächlichen Anteilen der Streuobstbestände in Baden-Württemberg. Dabei hat die Walnuss bisher mit nur 4 Prozent einen sehr geringen Anteil, während Apfelbäume fast die Hälfte des Bestandes stellen (Schmieder, et al., 2010).

Es wurde angenommen, dass der Grasschnitt der Streuobstflächen nicht als Viehfutter, sondern als Biogassubstrat verwendet wird.

Tabelle 56: Anteile der Kulturpflanzen an der Streuobstfläche

Pflanze	Anteil
Walnuss	4 %
Apfel	48 %
Birne	11 %
Pflaume	14 %
Kirsche	23 %

Quelle: Schmieder & Küpfer, 2010

6.2.3 Obstanlagen

Apfel und Birne zählen nicht nur zu den beliebtesten Obstsorten, sondern liefern auch die höchsten Hektarerträge. Für das Szenario 2035 wurden trotzdem geringere Anteile von Apfel und Birne an der Anlagenfläche gewählt, weil ihre Hektarerträge und Flächenanteile im Streuobstanbau ebenfalls hoch sind. Berücksichtigt man den Streuobstanbau, muss man bei einer bedarfsorientierten Produktion die Anteile anderer Baumobstsorten erhöhen. Die Anteile der Erdbeeren wurden aufgrund der geringen Kalorienerträge reduziert.

Tabelle 57: Anteile der Kulturpflanzen an der Obstanlagenfläche 2035

Pflanze, Hauptprodukt	Anteil
Walnuss, Nüsse	18 %
Walnuss, Nussöl	15 %
Haselnuss, Nüsse	20 %
Apfel, Speiseobst	20 %
Birne, Speiseobst	5 %
Pflaume, Speiseobst	10 %
Kirsche, Speiseobst	5 %
Erdbeere, Speiseobst	7 %

Quelle: Eigene Annahmen

6.2.4 Energiepflanzen

Bei Berechnungen des Status Quo entsprechen die Anteile der einzelnen Energiepflanzen an der Energiepflanzenanbaufläche ihren aktuellen Anteilen an der Energiepflanzenanbaufläche in Deutschland (Stand 2017). Wurden in Zukunftsszenarien Energiepflanzen der 1. Generation verwendet, wurden diese Flächenanteile beibehalten. Es wurde unterstellt, dass das Stroh jeweils energetisch verwendet wird. Für Rapspresskuchen wurde eine Nutzung als Futtermittel angenommen. Die Kombination der Pflanzen mit ihren Anteilen ist in Tabelle 58 dargestellt.

Tabelle 58: Anteile der Kulturpflanzen an der Energiepflanzenfläche bei Nutzung von Energiepflanzen der 1. Generation

Pflanze, Hauptprodukt	Hauptprodukt	Anteil
Silomais	Biogas	40,0 %
Winterweizen GPS	Biogas	20,0 %
Winterraps	Öltreibstoff	25,0 %
Winterraps	Heizöl	5,0 %
Winterweizen	Ethanol	4,0 %
Zuckerrübe	Ethanol	4,0 %
Körnermais	Ethanol	2,0 %

Quelle: Eigene Annahmen

Wurden, wie im Szenario 2035, Energiepflanzen der zweiten Generation gewählt, wurde ein Kompromiss zwischen Energieertrag und positiven Effekten auf Insekten und Böden gewählt. Dementsprechend wurden Pflanzen kombiniert, die jeweils mindestens eines der Kriterien Mehrjährigkeit und Bienenweide erfüllen. Die Kombination der Pflanzen mit ihren Anteilen ist in Tabelle 59 dargestellt. Miscanthus und Sida haben höhere Anteile, da sie überdurchschnittlich hohe Energieerträge liefern, überdurchschnittlich zur Kohlenstoffeinlagerung in die Böden beitragen, Wildtieren auch im Winter Schutz bieten und Sida darüber hinaus eine wertvolle Bienen- bzw. Insektenweide darstellt.

Tabelle 59: Anteile der Kulturpflanzen nach Hauptnutzung an der Energiepflanzenfläche bei Nutzung von Energiepflanzen der 2. Generation

Pflanze,	Hauptprodukt	Anteil
Miscanthus	Festbrennstoff	15,0 %
Sida	Festbrennstoff	15,0 %
Rutenhirse/Switchgrass	Festbrennstoff	10,0 %
Weide	Festbrennstoff	10,0 %
Durchwachsene Silphie	Biogas	10,0 %
Sida	Biogas	10,0 %
Hirschgras	Biogas	10,0 %
Blühpflanzenmischung	Biogas	10,0 %
Sonnenblume	Heizöl	10,0 %

Quelle: Eigene Annahmen

6.2.5 Rohstoffpflanzen

Für die Wahl der Rohstoffpflanzen gibt es relativ wenig aktuelle Anhaltspunkte, die der Orientierung dienen können. Insgesamt lag ihr Anteil im Jahr 2017 bei weniger als 0,3 Prozent und in den betrachteten Landkreisen werden viele der Pflanzen bisher kaum oder gar nicht angebaut. Daher wurde die Auswahl vorrangig danach getroffen, auch in den dichtbesiedelten Landkreisen hohe Autonomiegrade bei den jeweils produzierten Produkten zu erreichen. So wurde z. B. auf den Anbau von „Kunststoffpflanzen“ verzichtet, da im Produktsegment Kunststoffe ohnehin nur geringe Autonomiegrade erzielt werden können. Die ausgewählten Pflanzen für das Szenario 2035 sind in Tabelle 60 dargestellt

Tabelle 60: Anteile der Kulturpflanzen und ihrer Verwendungsarten an der Rohstoffpflanzenfläche

Pflanze	Verwendung (Produkte)	Anteil
Winterraps	Tenside, Futtermittel, Energie, Nahrungsmittel	10,0 %
Sonnenblume	Öl für technische Anwendungen, Futtermittel, Energie, Nahrungsmittel	12,0 %
Öllein	Öl für Farben und Lacke, Futtermittel, Textilfasern, Dämmstoff, Baustoff	5,0 %
Öllein	Öl für Kosmetik, Futtermittel, Dämmstoff, Baustoff	2,0 %
Faserlein	Textilfasern, Dämmstoff, Baustoff, Öl für Kosmetik, Futtermittel	10,0 %
Fasernessel	Textilfasern, Energie, Nahrungsmittel	10,0 %
Hanf, KN	Dämmstoff, Baustoff, Nahrungsmittel, Futtermittel	4,0 %
Hanf, KN	Werkstoff für Autoindustrie, Baustoff, Nahrungsmittel	5,0 %
Hanf, KN	Papier, Energie, Nahrungsmittel, Futtermittel	10,0 %
Hanf, SN	Textilfasern, Dämmstoff, Baustoff	10,0 %
Hanf, SN	Papier, Energie	5,0 %
Körnermais	Alkohol, Energie, Futtermittel	3,0 %
Körnermais	Stärke, Energie, Futtermittel	4,0 %
Kartoffel	Stärke, Energie	4,0 %
Miscanthus	Papier, Energie	5,0 %
Paulownia	Möbel, Baustoff, Energie	1,0 %

KN=Kombinationsnutzung, SN=Strohnutzung
Quelle: Eigene Annahmen

In Tabelle 61 ist dargestellt, welche Verwendungen für die verschiedenen Baumartengruppen angenommen wurden. Die in Tabelle 61 dargestellten Anteile beziehen sich auf den rechnerischen Reinbestand der jeweiligen Baumartengruppe.

Tabelle 61: Anteile der Verwendungen an der Reinbestandsfläche der jeweiligen Baumartengruppe in der Forstwirtschaft

Baumartengruppe	Verwendung (Hauptprodukt, Koppelprodukte)	Anteil an der Reinbestandsfläche
Fichte	Bauholz, Textilfasern, Brennstoff	33 %
	Bauholz, Dämmstoff	33 %
	Möbel, Brennstoff	33 %
Tanne	Bauholz, Papier, Brennstoff	50 %
	Möbel, Brennstoff	50 %
Kiefer	Bauholz, Papier, Brennstoff	33 %
	Bauholz, Dämmstoff	33 %
	Möbel, Brennstoff	33 %
Lärche	Bauholz, Papier, Brennstoff	50 %
	Möbel, Brennstoff	50 %
Buche	Bauholz, Möbel, Brennstoff	25 %
	Bauholz, Papier, Brennstoff	25 %
	Möbel, Brennstoff	25 %
	Möbel, Brennstoff	25 %
Douglasie	Bauholz, Papier, Brennstoff	100 %
Eiche	Bauholz, Brennstoff	33 %
	Möbel, Brennstoff	67 %
Sonstige Laubbäume	Bauholz, Brennstoff	10 %
	Möbel, Brennstoff	90 %
Sonstige Nadelbäume	Brennstoff	100 %

N=Nahrung, F=Futtermittel, M=Medizin/Pharmazie, E=Energie, B=Baustoff, D=Dämmstoff, T=Textilfasern, M=Möbel, P=Papier, C=Chemischer Rohstoff, K=Kunststoff, Ö=Öl, A=Alkohol, S=Stärke, Z=Zucker, L-Landwirtschaftsdünger, V=Einstreu Viehhaltung
Quelle: Eigene Annahmen

6.2.6 Agroforst

Sofern Agroforst als Komponente berücksichtigt wurde, wurden die dafür aufgewendeten Flächen aus Gründen der Berechnung vereinfachend zu 100 Prozent für die kombinierte Produktion von Walnuss und Winterweizen vorgesehen. Die Flächen wurden jeweils von den für den Winterweizenanbau vorgesehenen Flächen abgezogen.

Tabelle 62: Angenommene Kulturpflanzen auf Agroforstflächen und ihre Verwendung

Kulturpflanzen	Hauptprodukt, Koppelprodukte	Anteil
Walnuss, Winterweizen	Weizenkorn als Nahrungsmittel, Stroh als Brennstoff, Walnüsse als Nahrungsmittel, Schalenbriketts als Brennstoff, Wertholz	100%

Quelle: Eigene Annahmen

6.2.7 Grünland

Bei der Potenzialschätzung wurde unterstellt, dass die Milcherzeugung bei der Grünlandnutzung Vorrang hat. Wenn in einem Landkreis mehr Grünland vorhanden ist, als für die Deckung des jeweiligen Milchbedarfs eines Szenarios benötigt wird, wurden die übrigen Flächen zu 50 Prozent für den Export von Milchprodukten, zu 15 Prozent für die Fleischproduktion und zu 10 Prozent für die Streuobstproduktion vorgesehen. Darüber hinaus wurden 15 Prozent der Energiegewinnung und 10 Prozent der Rohstoffproduktion zugewiesen. Die angenommenen Nutzungen und Produktionspotenziale sind in Tabelle 63 beschrieben.

Tabelle 63: Anteile der Nutzungen an der nicht für die interne Milchversorgung benötigten Grünlandfläche

Nutzung	Beschreibung	Anteil
Milchproduktion (für Export)	Durchschnittliches Ertragspotenzial	50 %
Rindermast für Fleischproduktion	Durchschnittliches Ertragspotenzial	10 %
Haltung von Schafen und Ziegen	Durchschnittliches Ertragspotenzial	5 %
Streuobstwiesen	Baumartenzusammensetzung nach Tabelle 56	10 %
Energiegewinnung	50% Biogasnutzung, 50% extensive Festbrennstofferzeugung	15 %
Rohstoffproduktion	67% Papierproduktion, 33% Dämmstoffproduktion,	10 %
Kontrollsumme		100 %

Quelle: Eigene Annahmen

6.3 Beschreibung des Bestands und Definition der Szenarien

6.3.1 Der Status Quo

Der hier berechnete Status Quo entspricht einem vereinfachten Abbild von Verbrauch und Produktion im Jahr 2017. Zugrunde gelegt wurden die in den voranstehenden Kapiteln beschriebenen Daten zu Ernährungsgewohnheiten, Lebensmittelverschwendung, Warenkonsum, Bautätigkeit im Wohnbau, Gebäudebeheizungsstruktur, Pkw-Neuzulassungen, Kfz-Motorisierung, Energieverbrauch und Rohstoffbedarf des Jahres 2017. Im Falle des Konsums von Nahrungsmitteln und Rohstoffen wurden die deutschen Durchschnittswerte übernommen.

Auf der Seite der Produktion erfolgte, dem Bestand des Jahres 2017 entsprechend, keine nennenswerte Nutzung von Agrophotovoltaikanlagen, Agroforstsystemen, Agrothermie oder Urban Farming. Anbaubiomasse für die energetische Nutzung wurde im Jahr 2017 fast ausschließlich mit Energiepflanzen der 1. Generation produziert. Die regenerative Stromerzeugung entspricht dem Bestand der EEG-Anlagen des Jahres 2015, da für das Jahr 2017 keine ausreichenden Daten vorlagen.

Die Flächennutzung entspricht jeweils den realen Werten des Jahres 2017. Da jedoch auf Ebene der Landkreise keine nach Nahrungs-, Energie- und Rohstoffpflanzen differenzierten Daten zur Nutzung der Ackerflächen vorlagen, wurden hier für alle Landkreise vereinfachend die Anteile des bundesweiten Durchschnitts (46 Prozent Futtermittel, 35 Prozent Nahrung, 18,5 Prozent Energie, 0,2 Prozent Rohstoffe) übernommen. Zudem wurde die Wirtschaftsweise für die Berechnungen des Bestandes vereinfachend als vollständig konventionell integriert definiert, da der tatsächliche Anteil ökologisch bewirtschafteter Flächen in Baden-Württemberg im Jahr 2017 bei etwa 10 Prozent lag. Ein Anteil von 10 Prozent ökologischer Bewirtschaftung reduziert den Gesamtertrag der wichtigsten Getreidesorten lediglich um ca. 4 Prozent im Vergleich zu einer rein konventionellen Erzeugung. Bei Ölfrüchten, Gemüse und Obst sind die Ertragsdifferenzen zwischen konventionell integriertem und ökologischem Landbau noch geringer. Ein Anteil von 10 Prozent an der Gesamtfläche fällt hier daher noch weniger ins Gewicht als beim Getreideanbau. Zudem lag eine nach Nahrungsmittelgruppen differenzierte Information zu den Flächenanteilen nicht vor.

Die Definition des berechneten Status Quo ist in Tabelle 64 dargestellt.

Tabelle 64: Beschreibung des Status Quo

Szenario	**Status Quo**
Beschreibung	**Bestand 2017, konventionell**
Verbrauch	
Ernährungsweise	Bestand 2017
Lebensmittelverluste	Bestand 2017
Stromverbrauch Haushalte	Bestand 2017
Gebäudebeheizungsstruktur	Bestand 2017
Heizenergiebedarf	Bestand 2017
Motorisierung der Pkw	Bestand 2017
Jahresfahrleistung der Pkw	Bestand 2017
Motorisierung der Nutzfahrzeuge	Bestand 2017
Jahresfahrleistung der Nutzfahrzeuge	Bestand 2017
Energieverbrauch Industrie und GHD	Bestand 2017
Energieverbrauch Landwirtschaft	Bestand 2017
Rohstoffbedarf	Bestand 2017 ohne Neubau von Gewerbebauten *
Erzeugung	
Wirtschaftsweise	Konventionell **
Viehhaltung auf Grünland	ja
Hühnerhaltung	Hybrid
Energiepflanzen	1. Generation
Restpflanzenpotenzial	vollständige Nutzung
Anteil Nahrungspflanzen	35,0 %
Anteil Futterpflanzen	46,0 %
Anteil Energiepflanzen	18,5 %
Anteil Rohstoffpflanzen	0,2 %
Windenergienutzung	Bestand 2015 ***
Dachflächen-PV-Nutzung	Bestand 2015 ***
Freiflächen-PV-Nutzung	Keine Nutzung
Agro-PV	Keine Nutzung
Agroforst	Keine Nutzung
Agrothermie	Keine Nutzung
Urban Farming - Dachgewächshaus	Keine Nutzung
Urban Farming - Aquaponik	Keine Nutzung

* Der Rohstoffbedarf des gewerblichen Neubaus konnte mangels Datengrundlage nicht ermittelt werden.
** Der Anteil ökologischer Landwirtschaft lag in Baden-Württemberg bis 2016 unter 10 Prozent
*** Datenquelle ist EnergymaS.info der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie e.V. (DGS). Seit August 2015 war eine Aktualisierung der Daten durch die DGS nicht mehr möglich.

6.3.2 Szenarien mit der Priorität Nahrungsversorgung

Mit dem Ziel, den Flächenbedarf der Ernährung zu reduzieren und somit ein hohes Maß an Ernährungssicherheit zu ermöglichen, werden Maßnahmen zur Vermeidung von Nahrungsmittelverlusten sowie eine Umstellung der Ernährungsweise empfohlen. Diskutiert wird auch, ob ein Verzicht auf Energiepflanzen und nachwachsende Rohstoffe erforderlich ist, um eine

ausreichende Ernährungssicherheit zu gewährleisten. Zugleich wird versucht, mit verschiedenen Tierhaltungsformen und Produktionssystemen das Tierwohl zu fördern, ökologisch zu produzieren und den Flächenbedarf zu reduzieren. Allerdings reduzieren einige Maßnahmen, die dem Tierwohl oder dem Naturschutz dienen, die Flächeneffizienz.

In den Szenarien N1 bis N10 wurde daher berechnet, wie sich unterschiedliche Konsumgewohnheiten (Nutzungseffizienz), Flächenbelegungen und Ernährungsweisen auf den Flächenbedarf auswirken. In den Szenarien N11 bis N17 wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Produktionssysteme verglichen. Dazu zählt zum einen die dem Tierwohl dienende Haltung von Zweinutzungshühnern in der Masthähnchen- und Legehennenhaltung. Zum anderen wurden hier Systeme betrachtet, die ökologische Vorteile bieten (z. B. Agroforstsysteme), oder allgemein die Flächeneffizienz der Flächennutzung steigern sollen (z. B. Agrophotovoltaik oder die gebäudeintegrierte urbane Landwirtschaft). In den Szenarien N04 bis N17 wurde zudem untersucht, welche Nahrungsautonomiegrade erreicht werden können, wenn die gesamte Ackerfläche ausschließlich für die Nahrungserzeugung aufgewendet wird.

6.3.2.1 Steigerung der Nutzungseffizienz

In Szenario N01 erfolgt als einzige Veränderung gegenüber dem Status Quo eine Reduktion von Verlusten und Verschwendung (Zero Waste). Angenommen wurde, dass die Nahrungsmittelverluste insgesamt auf 10 Prozent des Verzehrs minimiert werden können.

6.3.2.2 Veränderung der Flächenbelegung

In den Szenarien N02 bis N04 wurde ebenfalls eine Reduktion der heutigen Verluste und Verschwendung auf 10 Prozent des Verzehrs angenommen. Verändert wurde in diesen drei Szenarien jeweils die Flächenbelegung: In Szenario N02 wurde auf den Anbau von Energie- und Rohstoffpflanzen verzichtet, das Verhältnis von Nahrungsproduktion zu Futterproduktion beibehalten und auf die gesamte Ackerfläche angewendet. In Szenario N03 wurde nicht auf den Anbau von Energie- und Rohstoffpflanzen verzichtet, sondern lediglich das Verhältnis von Nahrungsproduktion zu Futterproduktion verändert. Der Futterflächenanteil beträgt in diesem Szenario 25 Prozent der Ackerfläche. In Szenario N04 erfolgt eine weitere Reduktion der Futterfläche auf 15 Prozent der Ackerfläche und ein Verzicht auf den Anbau von Energie- und Rohstoffpflanzen. (Vgl. Tabelle 65)

6.3.2.3 Vergleich der Ernährungsweisen

Anhand der Szenarien N05 bis N10 wurde untersucht, wie sich eine Umstellung der Ernährungsweise im Vergleich zu Szenario N04 auswirkt, welches das Autonomiepotenzial bei heutigen Ernährungsgewohnheiten ohne Verschwendung abbildet. Der Futterflächenanteil wurde jeweils grob an den Bedarf der verschiedenen Ernährungsweisen angepasst, in Schritten von

5 Prozent der Ackerfläche: In den Szenarien N5 und N06, denen die Ernährungsweisen zugrunde liegen, die von den Gesellschaften für Ernährung DGE und AGES empfohlen werden, wurde das Verhältnis von 85 zu 15 aus Szenario N04 beibehalten, das sich an einer Ernährung mit geringeren Anteilen tierischer Produkte orientiert. In Szenario N10, in dem die Ernährungsweise Eco-Mix einen Mittelwert zwischen den Empfehlungen der AGES und einer vegetarischen Ernährung bildet, wurde der Futterflächenanteil auf den Wert von 10 Prozent gesetzt. Bei ökologischer Erzeugung reicht ein Anteil der Futterflächen von 10 Prozent an der Ackerfläche aus, um den Fleischbedarf der Ernährungsweise Eco-Mix fast exakt zu 100 Prozent zu decken. Da die Ernährungsweise Eco-Mix einen Mittelwert aus einer Ernährung nach AGES und einer vegetarischen Ernährung darstellt, wurden die Futterflächen der Ernährungsweisen AGES, Eco-Mix und Vegetarisch in ein dementsprechendes Verhältnis gesetzt. Daraus ergab sich eine Abstufung in Schritten von 5 Prozentpunkten. Bei einem Futterflächenanteil von 5 Prozent an der gesamten Ackerfläche kann der Bedarf an ackerbaulich produziertem Futter, der sich aus der vegetarischen Ernährungsweise ergibt, gut gedeckt werden, sodass bei Eiern ein Autonomiegrad von 113 Prozent erreicht werden kann. Die Abstufung in Schritten von 5 Prozent ist somit gut geeignet.

Tabelle 65: Kurzbeschreibung der Szenarien N01 bis N10 mit der Priorität Ernährung zur Berechnung von Auswirkungen unterschiedlicher Ernährungsweisen

Szenario	Ernährung	Ackerflächennutzung			Grünland
		Nahrung (%)	Futter (%)	Energie/Rohstoffe (%)	Weidenutzung
SQ	Status Quo	35	46	19	ja
N01	Zero Waste	35	46	19	ja
N02	Zero Waste	43	57	-	ja
N03	Zero Waste	56	25	19	ja
N04	Zero Waste	85	15	-	ja
N05	AGES	85	15	-	ja
N06	DGE	85	15	-	ja
N07	Vegetarisch	95	5	-	ja
N08	Vegan	100	-	-	ja
N09	Vegan	100	-	-	nein
N10	Eco-Mix	92	10	-	ja

Zero Waste = Die Verluste werden auf 10 Prozent des Verzehrs reduziert, Ernährungsweise bleibt unverändert.

6.3.2.4 Vergleich von Systemen/Technologien zur Steigerung der Flächeneffizienz

In den Szenarien N11 bis N17 wurden die Auswirkungen einer speziellen Tierhaltungsform sowie verschiedener Technologien auf die Autonomiepotenziale verglichen, jeweils differen-

ziert nach konventioneller und ökologischer Wirtschaftsweise. Dabei wurden stets die Ernährungsweise „Eco-Mix“ und ein Anteil der Futterflächen von 10 Prozent an der Ackerfläche beibehalten.

In Szenario N11 wurden die Hybrid-Leistungslinien in der Hühnerhaltung durch Zweinutzungshühner ersetzt. In den Szenarien N12 bis N16 wurde dem Szenario N10 jeweils eine der Technologien Agroforst (AF), Urbane Dachfarm (UDF), Aquaponik (AqP), Agrophotovoltaik (APV), Freiflächenphotovoltaik (FPV) hinzugefügt. Für die Nutzung des Agroforstsystems in Szenario N12 wurde aus Gründen der Berechnung eine Fläche von 1.000 Hektar oder rund 5 Prozent der Ackerfläche gewählt. Für die Urbane Landwirtschaft (UDF oder AqP) wurde in den Szenarien N13 und N14 eine Anlagenfläche von 2,0 m² pro Einwohner angenommen. Für die Berechnung der Auswirkungen von Agrophotovoltaikanlagen auf Ackerland und Freiflächen-PV-Anlagen auf Grünland wurden wiederum aus Gründen der Vergleichbarkeit jeweils 1.000 Hektar als Anlagenfläche angenommen. Auf Ackerland entsprechen 1.000 Hektar 5 Prozent der Ackerfläche, auf Grünland rund 8 Prozent der Grünlandfläche. In Szenario N17 wurde nicht eine einzelne Technologie, sondern eine Kombination aus Urbanen Dachfarmen und Freiflächenphotovoltaik gewählt. Dachfarmen erhöhen den Energiebedarf der Nahrungsproduktion deutlich und können zudem in einer Konkurrenz zur Photovoltaiknutzung um geeignete Flachdachflächen stehen. Die zusätzliche Stromerzeugung mittels Freiflächenphotovoltaikanlagen dient dazu, diese beiden Faktoren zu kompensieren.

Der Anteil von Futterpflanzen an der Ackerfläche beträgt in den Szenarien N11 – N17 jeweils 10 Prozent. Die angenommenen Verluste betragen in Relation zum angenommenen Verzehr 10 Prozent.

Eine Kurzbeschreibung der Szenarien N10 bis N16 ist in Tabelle 66 dargestellt. Ausführlichere Beschreibungen der Szenarien N01 bis N17 sind im Anhang (Tabelle 492 bis Tabelle 495) dargestellt.

Tabelle 66: Kurzbeschreibung der Szenarien N10 bis N17 mit der Priorität Ernährung zur Berechnung von Auswirkungen unterschiedlicher Produktionssysteme

Szenario	Ernährung	Besondere Systeme/ Technologien	Viehhaltung	Verluste	Nahrungspflanzen (%)	Futterpflanzen (%)
N11	Eco-Mix	-	ZN-Huhn	minimiert	90	10
N12	Eco-Mix	Agroforst (AF)	Leistungslinie	minimiert	90	10
N13	Eco-Mix	Urbane Dachfarm (UDF)	Leistungslinie	minimiert	90	10
N14	Eco-Mix	Aquaponik (AqP)	Leistungslinie	minimiert	90	10
N15	Eco-Mix	Agrophotovoltaik (APV)	Leistungslinie	minimiert	90	10
N16	Eco-Mix	Freiflächen-PV (FPV)	Leistungslinie	minimiert	90	10
N17	Eco-Mix	FPV + UDF	Leistungslinie	minimiert	90	10

6.3.3 Szenarien mit der Priorität Energie

In der Energieversorgung steht eine Vielzahl von Technologien zur Wahl, die entweder der Energieerzeugung oder der Energieeinsparung dienen. Daraus ergeben sich vielfache Kombinationsmöglichkeiten. Um die Auswirkungen einzelner Technologien auf die Autonomiegrade sichtbar zu machen, wurden die wichtigsten Maßnahmen in einzelnen Schritten hinzugefügt:

In den Szenarien E01 bis E12 jeweils eine Stellschraube im Bereich der Erzeugung verändert. Bei diesen Stellschrauben handelt es sich um die Wirtschaftsweise der landwirtschaftlichen Produktion (konventionell/ökologisch), die Generation der Energiepflanzen sowie den Einsatz der weiteren erneuerbaren Energien Dachflächenphotovoltaik (DPV), Freiflächenphotovoltaik (FPV), Agrophotovoltaik (APV), Agrothermie und Windenergie. Als Bestand ist der Energieanlagenbestand des Jahres 2015 bezeichnet. Die Gesamtpotenziale von Dachflächenphotovoltaik und Windenergie sind nur dann berücksichtigt, wenn diese in der Beschreibung des Szenarios ausdrücklich angegeben sind. Andernfalls wurde lediglich der Anlagenbestand berücksichtigt. In allen Szenarien wurde angenommen, dass 100 Prozent der Ackerfläche für den Anbau von Energiepflanzen genutzt werden.

In den Szenarien E01 bis E04 wurde das Energiepotenzial von Energiepflanzen der ersten und der zweiten Generation verglichen. In Szenario E05 wurde angenommen, dass neben den Energiepflanzen der 2. Generation die Eignungsfläche für Dachflächenphotovoltaik (DPV) vollständig genutzt wird. In Szenario E06 wurde für die Berechnung der Auswirkungen von Freiflächenphotovoltaik eine Fläche von 10 Prozent des Grünlandes gewählt. In Szenario E07 wurde die FPV-Fläche auf insgesamt 16 Prozent der Grünlandfläche erweitert. Dadurch entspricht im Landkreis Konstanz die FPV-Fläche auf Grünland der Agrophotovoltaikfläche in Szenario E08, in dem 10 Prozent der Ackerfläche mit APV-Anlagen belegt wurden. Die Szenarien E07 und E08 ermöglichen somit den direkten Vergleich der Auswirkungen von FPV- und APV-Anlagen, die diese bei gleicher Anlagengröße auf die drei Sektoren (Nahrung, Energie, Rohstoffe) haben. In Szenario E09 wurde angenommen, dass 10 Prozent der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche (Acker- und Grünland) mit Agrophotovoltaikanlagen belegt werden. In Szenario E10 wurde Agrothermie hinzugefügt. Hierfür wurde ebenfalls eine Fläche von 10 Prozent des Ackerlandes angenommen, um den direkten Vergleich mit den Auswirkungen von FPV- und APV-Anlagen zu vereinfachen. Im nächsten Schritt in Szenario E11 wurde angenommen, dass das bekannte Windenergiepotenzial vollständig ausgeschöpft wird. In Szenario E12 wurde als letzte Maßnahme auf Seite der Erzeugung berechnet, welche Größe FPV- und APV-Anlagen auf landwirtschaftlichen Flächen haben müssten, damit der gesamte Energiebedarf des Landkreises im Status Quo (Stand 2017) mit lokalen erneuerbaren Energien gedeckt werden könnte.

Tabelle 67: Szenarien mit der Priorität Energieversorgung und Maßnahmen zur Steigerung der Energieerzeugung

Szenario	Ökologische Wirtschaftsweise	E-Pflanzen G1 Anteil am Ackerland (%)	E-Pflanzen G2 Anteil am Ackerland (%)	DPV Genutztes Potenzial (%)	FPV Anteil am Grünland (%)	Agro-PV Anteil am Ackerland (%)	Agrothermie Anteil am Ackerland (%)	Windenergie Genutztes Potenzial (%)
SQ	10	18	0	18	0	0	0	0
E01	0	100	0	18	0	0	0	0
E02	100	100	0	18	0	0	0	0
E03	0	0	100	18	0	0	0	0
E04	100	0	100	18	0	0	0	0
E05	100	0	100	100	0	0	0	0
E06	100	0	100	100	10	0	0	0
E07	100	0	100	100	16	0	0	0
E08	100	0	100	100	0	10	0	0
E09	100	0	100	100	10	10	0	0
E10	100	0	100	100	10	10	10	0
E11	100	0	100	100	10	10	10	100
E12	100	0	100	100	?	?	10	100

Abkürzungen in Reihenfolge der Nennung: G1 = Energiepflanzen der 1. Generation; G2 = Energiepflanzen der 2. Generation; AL=Ackerland; GL = Grünland; DPV = Dachflächenphotovoltaik; FPV = Freiflächenphotovoltaik; APV = Agrophotovoltaik; GDS = Gebäudedämmstandard; BHS 2035 = Angenommene Beheizungsstruktur im Jahr 2035; TS = Treibstoff; JFL = Jahresfahrleistung; LNF = Leichte Nutzfahrzeuge; SNF = Schwere Nutzfahrzeuge und Busse; GHD = Gewerbe, Handel und Dienstleistung

In den Szenarien E13 bis E26 wurden Maßnahmen zur Energieeinsparung in ihren Auswirkungen auf die Autonomiepotenziale verglichen. Bei den Maßnahmen im Sektor Wohnen handelt es sich um die Erhöhung des Gebäudedämmstandards (GDS) [21] und die Veränderung der Gebäudebeheizungsstruktur (BHS) von der Bestandsstruktur hin zur unterstellten Struktur des Jahres 2035[22] (vgl. Tabelle 46). Bei den Maßnahmen im Verkehrssektor handelt es sich um eine Reduktion des spezifischen Treibstoffverbrauchs (kWh/km) der Pkw, die Reduktion der Jahresfahrleistung (JFL) im Straßenverkehr um ein Drittel (vgl. Tabelle 50), sowie Veränderungen der Motorisierung von Pkw (vgl. Tabelle 48) und Nutzfahrzeugen. Bei leichten Nutzfahrzeugen wurde ab Szenario E21 eine Elektrifizierung von 100 Prozent angenommen.

[21] Es wurde eine Reduktion des spezifischen Energiebedarfs von 122 kWh/m² auf 55 kWh/m² unterstellt, was einer Reduktion um 55 (50 – 60) Prozent entspricht.

[22] Eine Umstellung von älteren Bestandsgebäuden auf Wärmepumpen erfordert aufgrund der geringeren Vorlauftemperatur (ca. 45°C) in der Regel eine energetische (Teil-)Sanierung der Gebäudehülle und häufig auch die Installation von geeigneten Heizkörpern (z. B. Wand- oder Fußbodenheizungen). Bei der getroffenen Annahme handelt es sich daher um ein technisches Potenzial, von dem das wirtschaftliche Potenzial u. U. deutlich abweichen kann.

Ab Szenario E22 wurde bei Bussen eine vollständige Elektrifizierung und bei schweren Nutzfahrzeugen eine Elektrifizierung von 50 Prozent angenommen. In Szenario E23 wurden schließlich auch Landmaschinen elektrifiziert. In Szenario 24 wurde eine Einsparung des Stromverbrauchs der Haushalte um 20 Prozent angenommen, um zu prüfen, ob durch diese Maßnahme der Mehrverbrauch im Verkehr kompensiert werden kann. In Szenario E24

Tabelle 68: Szenarien mit der Priorität Energieversorgung und Maßnahmen zur Energieeinsparung

Szenario	GDS (kWh/m²)	BHS Wohngebäude (Szenario)	TS-Verbrauch (%)	JFL Pkw (%)	Motorisierung Pkw (Szenario)	JFL SNF & LNF (%)	Elektrifizierung LNF (%)	Elektrifizierung SNF (%)	Elektrifizierung Busse (%)	Elektr. Landmaschinen (%)	Stromeinsparung Haushalte (%)	GHD: Energieverbrauch* (%)	Industrie: Energieverbrauch ** (%)
SQ	135	SQ	100	100	SQ	100	0	0	0	0	0	100	100
E13	55	SQ	100	100	SQ	100	0	0	0	0	0	100	100
E14	135	2035	100	100	SQ	100	0	0	0	0	0	100	100
E15	55	2035	100	100	SQ	100	0	0	0	0	0	100	100
E16	55	2035	67	100	SQ	100	0	0	0	0	0	100	100
E17	55	2035	67	67	SQ	100	0	0	0	0	0	100	100
E18	55	2035	67	67	2035	100	0	0	0	0	0	100	100
E19	55	2035	67	67	2035	67	0	0	0	0	0	100	100
E20	55	2035	67	67	2035	67	100	0	0	0	0	100	100
E21	55	2035	67	67	2035	67	100	50	0	0	0	100	100
E22	55	2035	67	67	2035	67	100	50	100	0	0	100	100
E23	55	2035	67	67	2035	67	100	50	100	100	0	100	100
E24	55	2035	67	67	2035	67	100	50	100	100	20	100	100
E25	55	2035	67	67	2035	67	100	50	100	100	20	62	100
E26	55	2035	67	67	2035	67	100	50	100	100	20	62	66

* Verbrauch im Vergleich zum Status Quo (SQ). Die Veränderungen bei den einzelnen Energieträgern sind in Abschnitt 6.1.8 dargestellt
** Verbrauch im Vergleich zum Status Quo (SQ). Die Veränderungen bei den einzelnen Energieträgern sind in Abschnitt 6.1.9 dargestellt
Abkürzungen in Reihenfolge der Nennung: G1 = Energiepflanzen der 1. Generation; G2 = Energiepflanzen der 2. Generation; AL=Ackerland; GL = Grünland; DPV = Dachflächenphotovoltaik; FPV = Freiflächenphotovoltaik; APV = Agrophotovoltaik; GDS = Gebäudedämmstandard; BHS 2035 = Angenommene Beheizungsstruktur im Jahr 2035; TS-Verbrauch = Treibstoffverbrauch von Pkw mit Verbrennungsmotoren; JFL = Jahresfahrleistung; LNF = Leichte Nutzfahrzeuge; SNF = Schwere Nutzfahrzeuge und Busse; GHD = Gewerbe, Handel und Dienstleistung

In den Szenarien E27 bis E30 wurden die Technologien der Energieerzeugung mit den Maßnahmen zur Energieeinsparung kombiniert. Der Energieverbrauch der Szenarien E26 bis E30 2035 entspricht dem Verbrauch, der auch im Kapitel 6.1 für das Szenario 2035 unterstellt wurde.

Tabelle 69: Szenarien mit der Priorität Energieversorgung und Maßnahmen zu Energieeinsparung und Energieerzeugung

Szenario	**GDS** (kWh/m²)	**BHS Wohngebäude** (Szenario)	**Stromeinsparung Haushalte** (%)	**TS-Verbrauch** (%)	**JFL Straßenverkehr** (%)	**Motorisierung Pkw** (Szenario)	**Elektrifizierung LNF, Busse & Landmaschinen** (%)	**Elektrifizierung SNF** (%)	**GHD & Industrie: Energieverbrauch*** (%)	**E-Pflanzen G2, Flächenanteil** (%)	**DPV** Genutztes Potenzial (%)	**FPV Anteil** am Grünland (%)	**Agro-PV** Anteil am Ackerland (%)	**Agrothermie** Anteil am Ackerland (%)	**Windenergie** Genutztes Potenzial (%)
E27	55	2035	20	67	67	2035	100	50	100	100	100				100
E28	55	2035	20	67	67	2035	100	50	100	100	100	10			100
E29	55	2035	20	67	67	2035	100	50	100	100	100	10	10		100
E30	55	2035	20	67	67	2035	100	50	100	100	100	10	10	10	100

* Verbrauch im Vergleich zum Status Quo (2017). Die Veränderungen bei den einzelnen Energieträgern sind in Abschnitt 6.1 dargestellt

Abkürzungen in Reihenfolge der Nennung: G1 = Energiepflanzen der 1. Generation; G2 = Energiepflanzen der 2. Generation; AL=Ackerland; GL = Grünland; DPV = Dachflächenphotovoltaik; FPV = Freiflächenphotovoltaik; APV = Agrophotovoltaik; GDS = Gebäudedämmstandard; BHS 2035 = Angenommene Beheizungsstruktur im Jahr 2035; TS-Verbrauch = Treibstoff von Pkw mit Verbrennungsmotoren; JFL = Jahresfahrleistung; LNF = Leichte Nutzfahrzeuge; SNF = Schwere Nutzfahrzeuge und Busse; GHD = Gewerbe, Handel und Dienstleistung

6.3.4 Szenarien mit der Priorität Rohstofferzeugung

In den Szenarien R01 bis R15 mit der Priorität Rohstofferzeugung wurde untersucht, welche Autonomiegrade möglich sind, wenn 100 Prozent der Ackerfläche für die Erzeugung nachwachsender Rohstoffe genutzt werden. Zudem wurde untersucht, in welchem Segment durch gezielte Veränderungen die größten Effekte auf die Autonomiegrade erreicht werden können. In den Szenarien R02 bis R07 wird daher jeweils in einem Segment der Verbrauch um zwei Drittel des Verbrauchs des Status Quo reduziert. In Szenario R08 wird der der Verbrauch in allen Segmenten insgesamt um zwei Drittel reduziert. Die Reduktion orientiert sich am ökologischen Fußabdruck, der in Deutschland aktuell etwa dem Dreifachen der Verfügbarkeit entspricht.

In den Szenarien R01 bis R08 wurde auf den Anbau von Pflanzen für die Kunststoffproduktion verzichtet. In Szenario R09 wurden dagegen 25 Prozent der Ackerfläche für diesen Zweck genutzt. Auf den übrigen 75 Prozent wird ein Mix der übrigen Rohstoffpflanzen angebaut. In den Szenarien wird der Rohstoffverbrauch des Status Quo beibehalten und jeweils die gesamte Ackerfläche für den Anbau einer Rohstoffpflanzengruppe genutzt. Dies soll zeigen, wie sich die Rohstoffpflanzengruppen neben dem Rohstoffsektor z. B. auf die Sektoren Nahrung und Energiesektor auswirken. Die Ergebnisse dieses Vergleichs sind in Abschnitt 6.4.3.2.4 (Auswirkungen der Rohstoffszenarien auf die Sektoren Nahrung und Energie) dargestellt.

Tabelle 70: Szenarien mit der Priorität Rohstofferzeugung

Szenario	Wirtschaftsweise	Rohstoffpflanzen-Mix ohne Rohstoffpflanzen der Kunststoffproduktion	Rohstoffpflanzen der Baustoffproduktion (für Gebäude & Möbel)	Rohstoffpflanzen der Textilproduktion	Rohstoffpflanzen der Papierproduktion	Rohstoffpflanzen der Kunststoffproduktion	Rohstoffpflanzen der Ölproduktion	Rohstoffpflanzen der Ethanolproduktion	Baustoffkonsum	Möbelkonsum	Textilkonsum	Papierkonsum	Kunststoffkonsum	Konsum von Ölen und Alkoholen
		Anteil an Ackerfläche (%)							Konsum im Vergleich zum Status Quo (%)					
SQ	K	0,2							100	100	100	100	100	100
R01	K	100							100	100	100	100	100	100
R02	K	100							33	100	100	100	100	100
R03	K	100							100	33	100	100	100	100
R04	K	100							100	100	33	100	100	100
R05	K	100							100	100	100	33	100	100
R06	K	100							100	100	100	100	33	100
R07	K	100							100	100	100	100	100	33
R08	K	100							33	33	33	33	33	33
R09	K	75				25			100	100	100	100	33	100
R10	K		100						100	100	100	100	100	100
R11	K			100					100	100	100	100	100	100
R12	K				100				100	100	100	100	100	100
R13	K					100			100	100	100	100	100	100
R14	K						100		100	100	100	100	100	100
R15	K							100	100	100	100	100	100	100

K = Konventionell

6.3.5 Vergleich der Landkreise

Für den Vergleich der Landkreise wurden der Status Quo auf dem Stand des Jahres 2017 und ein Zukunftsszenario für das Jahr 2035 gewählt. In Tabelle 71 sind die Annahmen dargestellt, die der Berechnung der Autonomiepotenziale in den Jahren 2017 und 2035 zugrunde liegen und bereits in Abschnitt 6.1 genauer beschrieben wurden. Die wichtigsten Maßnahmen sind auf Seite des Verbrauchs die Umstellung von Ernährungsweise und Konsum, die verbesserte Gebäudeisolierung, der weitgehende Umstieg auf Wärmepumpen, die Reduktion der Kfz-Fahrleistungen und die Elektrifizierung großer Teile des Pkw-Bestandes (75 Prozent) sowie der leichten Nutzfahrzeuge (50 Prozent). Auf Seite der Erzeugung sind vor allem die veränderte Nutzung der Ackerflächen und der massive Ausbau der Photovoltaik hervorzuheben.

Tabelle 71: Annahmen für die Berechnung der Autonomiepotenziale in den Jahren 2017 und 2035

Parameter	Status Quo 2017	Szenario 2035	Veränderung*
Verbrauch			
Ernährungsweise	Bestand 2017	Eco-Mix	strukturell
Lebensmittelverluste	Bestand 2017	10% d. Verzehrs	-60 %
Stromverbrauch Haushalte	Bestand 2017	Szenario 2035	-20 %
Heizenergiebedarf Wohngebäude	Bestand 2017	55 kWh/m²	-60 %
Gebäudebeheizungsstruktur	Bestand 2017	Mix 2035	strukturell
Treibstoffverbrauch der Kfz mit VM pro 100 km	Bestand 2017	Szenario 2035	-34 %*
Motorisierung der Pkw	Bestand 2017	Szenario 2035	strukturell
Jahresfahrleistung der Pkw	Bestand 2017	Szenario 2035	-33 %
Jahresfahrleistung der Lkw (LNF & SNF)	Bestand 2017	Szenario 2035	-33 %
Elektrifizierung von LNF & Bussen	Bestand 2017	50,0 %	+50 PP
Energieverbrauch Sektor Industrie	Bestand 2017	Szenario 2035	-34 %*
Energieverbrauch Sektor GHD	Bestand 2017	Szenario 2035	-39 %
Endenergiebedarf Insgesamt	Bestand 2017	Szenario 2035	-55 %*
Rohstoffbedarf	Bestand 2017	Szenario 2035	-67 %
Erzeugung			
Wirtschaftsweise	konventionell	ökologisch	strukturell
Grünlandbasierte Milchviehhaltung	ja	ja	-
Zweinutzungsrassen	nein	ZN-Huhn	strukturell
Energiepflanzen	1. Generation	2. Generation	strukturell
Restpflanzenpotenzial	vollst. Nutzung	vollst. Nutzung	-
Anteil Nahrungspflanzen*	35,0 %	68,0 %	+94 %
Anteil Futterpflanzen*	46,0 %	14,0 %	-70 %
Anteil Energiepflanzen*	18,5 %	15,0 %	+19 %
Anteil Rohstoffpflanzen*	0,2 %	3,0 %	+1.150 %**
Windenergienutzung	EA-Bestand 2015	Potenzial 2035	+2.950 %**
Dachflächen-PV ***	EA-Bestand 2015	Gesamtpotenzial	> +430 %
Freiflächen-PV (Genutzter LNF-Anteil) ***	unbekannt***	5,0 %	unbekannt
Agrothermie (Genutzter Ackerlandanteil)	-	-	-
Urban-Farming: Dachgewächshaus o. Aquaponik	-	-	-

* Anteil an der Ackerfläche **Veränderung im Durchschnitt der Landkreise. *** Die aktuelle FPV-Erzeugung wurde den Dachflächen zugerechnet, da die Fläche der FPV nicht bekannt ist; EA = Energieanlagen; PP = Prozentpunkte

6.4 Ergebnisse der Autonomiepotenzialberechnungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Berechnung der Szenarien dargestellt, die in Abschnitt 6.3 definiert wurden. Dabei wurden in den Abschnitten 6.4.1 bis 6.4.3 die Effekte einzelner Stellschrauben innerhalb der drei Sektoren am Beispiel des Landkreises Konstanz untersucht. In Abschnitt 6.4.4 ist dargestellt, wie sich verschiedene Maßnahmen auf flächenbezogene ökologische Kennwerte auswirken. Abschließend wird in Abschnitt 6.4.5 die mögliche Entwicklung der fünf Landkreise vom Status Quo des Jahres 2017 bis zum Szenario für das Jahr 2035 im Vergleich dargestellt.

6.4.1 Potenzielle Nahrungsautonomie

Die potenzielle Nahrungsautonomie hängt wesentlich von der Ernährungsweise, der Wirtschaftsweise und den pro Person vorhandenen Flächen mit ihren jeweiligen Ertragspotenzialen ab. Ob die land- und forstwirtschaftlichen Produktionsflächen in einem Landkreis durch Landnutzungsänderungen besser an den Bedarf angepasst werden können, muss im Einzelfall geprüft werden. In Baden-Württemberg ist jedoch seit dem Dezember 2011 ein Grünlandumwandlungsverbot in Kraft, das die Umwandlung wertvoller Wiesen und Weiden in Ackerland oder Dauerkulturen weitgehend unterbindet. Mit Blick auf den Klimaschutz ist ein Umwandlungsverbot auch bei weniger artenreichen Wiesen und Weiden sinnvoll. Auf Seite der Produktion liegen die wesentlichen Stellschrauben daher im Bereich der Maßnahmen, die zur Steigerung der Landnutzungseffizienz beitragen können. Auf Seite der Verbraucher liegen die Stellschrauben vor allem in der Orientierung der Ernährungsweise an ökologischen Rahmenbedingungen und insbesondere in der Vermeidung von Verschwendung und der Reduktion von Verlusten. Zudem kann eine bessere Anpassung des Verbrauchs an lokale Potenziale sehr sinnvoll sein. Dabei geht es vor allem darum, den Flächenbedarf zu reduzieren, um mit den vorhandenen Flächen höhere Autonomiegrade erreichen zu können, weshalb auch eine effiziente Nutzung von Koppelprodukten der Nahrungsproduktion angestrebt werden sollte.

6.4.1.1 Flächenbedarf der Ernährung

Der Flächenbedarf für die vollwertige Ernährung eines Menschen ist keine unveränderliche Größe, sondern in hohem Maße abhängig von den jeweiligen Anbaubedingungen in den Herkunftsregionen der Nahrungsmittel, der Flächenstruktur (Verhältnis Ackerland-Grünland-Obstbauflächen), der Ernährungsweise, der Wirtschaftsweise, dem Ausmaß der Verschwendung oder den technischen Möglichkeiten, bei Produktion und Transporten Verluste zu vermeiden. Zudem haben die Ausbildung der Produzenten, die technische Ausstattung und der Zugang zu Saatgut und Düngemitteln, aber auch wirtschaftliche und fiskalische Rahmenbedingungen erheblichen Einfluss auf die Flächeneffizienz. So erfordert arbeitsintensive Permakultur andere Rahmenbedingungen als eine energieintensive konventionelle Landwirtschaft, um ihre maximale Flächeneffizienz zu erreichen. Bei den folgenden Werten handelt es sich daher nicht um

verallgemeinerbare Werte, sondern um Durchschnittswerte für Süddeutschland, die sich auf die landwirtschaftlichen Nutzflächen (LNF) ohne Urban Farming beziehen. Diese Durchschnittswerte ergeben sich – je nach Ernährungs- und Wirtschaftsweise – aus den Durchschnittserträgen der verbrauchten Nahrungsmittel. Bei importierten Nahrungsmitteln wurden für die Berechnung jeweils die Durchschnittserträge des jeweiligen Außenhandelspartners (Inland oder globales Ausland) berücksichtigt. Die Flächenbedarfe, die sich daraus ergeben gelten daher für den süddeutschen Raum und sind lediglich auf solche Regionen übertragbar, in denen ähnliche Anbaubedingungen herrschen.

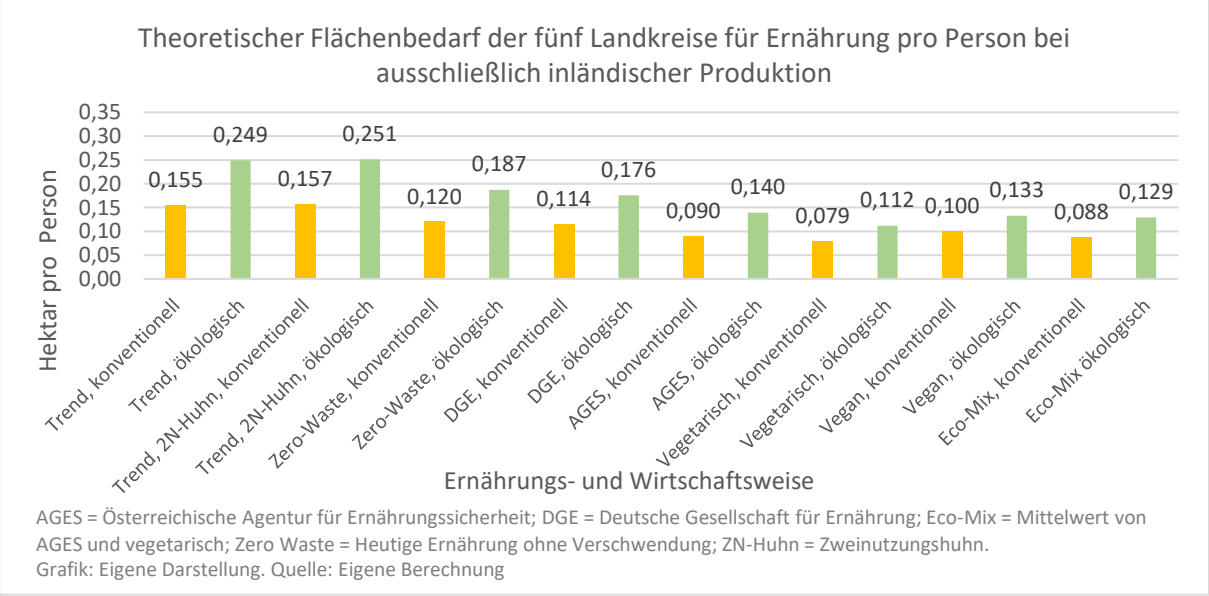
6.4.1.1.1 Berechneter Flächenbedarf

Bei der heutigen Ernährungsweise und konventioneller Erzeugung werden in Süddeutschland ca. 0,15 – 0,16 Hektar LNF pro Einwohner benötigt, sofern außer Reis, Kaffee und Tee keine Nahrungsmittel importiert werden müssen. Dieser Flächenbedarf beinhaltet die gesamten Anbauflächen der verbrauchten Nahrungsmittel einschließlich der heutigen Verschwendung und der unvermeidbaren Verluste. Bei den heutigen Ernährungsgewohnheiten und einem Ackerflächenanteil der Energie- und Rohstoffpflanzen zwischen ca. 10 und 30 Prozent ist es in den meisten Landkreisen Südwestdeutschlands nicht möglich, den Nahrungsbedarf ohne Importe zu decken. Daher handelt es sich bei einem Flächenbedarf der heutigen Ernährung, der ausschließlich auf Basis der inländischen Ertragspotenziale berechnet wird, um einen theoretischen Wert, der nicht auf die Gesamtbevölkerung übertragbar ist. Werden weniger ertragreiche Pflanzen genutzt[23] oder größere Anteile der verbrauchten Nahrungsmittel aus dem Ausland importiert, kann der Flächenbedarf pro Person aufgrund der niedrigeren globalen Durchschnittserträge auch höher ausfallen. Für das Jahr 2017 hat das Statistische Bundesamt daher eine Flächenbelegung von rund 0,23 Hektar pro Einwohner ermittelt, obwohl nur ein geringer Teil der verbrauchten Nahrungsmittel ökologisch erzeugt wurde.

Nimmt man eine weitestgehend lokale Nahrungsproduktion an, werden je nach Ernährungs- und Wirtschaftsweise zwischen 0,08 und 0,25 Hektar benötigt. Den geringsten Flächenbedarf weist eine überwiegend vegetarische Ernährung bei konventioneller Wirtschaftsweise auf. Der höchste Flächenbedarf ergibt sich, wenn die heutigen Konsumgewohnheiten beibehalten werden und die Produktion auf eine ökologische Wirtschaftsweise umgestellt wird, bei der in der Viehhaltung Zweinutzungsrassen eingesetzt werden. Dabei ist der Effekt der Umstellung auf Zweinutzungsrassen vergleichsweise gering. Der Einsatz von Zweinutzungshühnern erhöht zwar den Flächenbedarf von Hühnermast und Eierproduktion erheblich, dies wirkt sich jedoch auf den Gesamtflächenbedarf der Ernährung bei den heutigen Konsumgewohnheiten lediglich

[23] Beispiel Olivenöl: Bei einem Olivenertrag von ca. 2 t/ha*a und einer Ölausbeute von 17 – 23 Prozent ergibt sich ein Ölertrag von rund 0,4 t/ha*a. Ein Kilogramm Ölivenöl nimmt somit eine um den Faktor 3,2 größere Fläche in Anspruch als heimisches Winterrapsöl (ohne Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte von Raps- und Ölivenöl).

mit einer Erhöhung von rund 1,0 (0,8 – 1,3) Prozent aus. Wesentlich größere Effekte haben Veränderungen bei Verlusten und Verschwendung einerseits oder Umstellungen der Ernährungsweise andererseits. Verluste und Verschwendung zu minimieren (Ernährungsweise Zero Waste), kann den Flächenbedarf bei ansonsten unveränderter Ernährung um ca. 20 bis 25 Prozent reduzieren. Eine zusätzliche Umstellung auf die aus gesundheitlichen Gründen empfohlenen Ernährungsweisen nach DGE und AGES kann den Flächenbedarf weiter reduzieren. So liegt der Flächenbedarf einer Ernährung nach DGE noch einmal um 5 bis 6 Prozent unter dem Bedarf der Ernährungsweise „Zero-Waste“[24]. Der Flächenbedarf einer Ernährung nach AGES liegt bei beiden Wirtschaftsweisen um ca. 25 Prozent unter dem des Szenarios „Zero Waste“. Die größte Reduktion des Flächenbedarfs ergibt sich aber aus einer Umstellung auf eine weitgehend vegetarische Ernährung. Bei konventioneller Wirtschaftsweise ermöglicht sie eine Reduktion um ca. 34 Prozent und bei ökologischer Wirtschaftsweise um ca. 40 Prozent. Eine vegane Ernährung führt dagegen lediglich zu einer Gesamtreduktion um ca. 17 Prozent bei konventioneller Produktion und um ca. 29 Prozent bei ökologischer Produktion. Die Ernährungsweise „Eco-Mix“ als Mittelwert zwischen den Empfehlungen der AGES und einer vegetarischen Ernährung führt im Vergleich zu einer veganen Ernährung zu einer größeren Reduktion des Flächenbedarfs: Bei konventioneller Wirtschaftsweise senkt sie den Bedarf um 27 Prozent. Bei ökologischer Wirtschaftsweise liegt der Flächenbedarf der Ernährungsweise „Eco-Mix“ um 31 Prozent unter dem Vergleichswert der Ernährungsweise „Zero-Waste“. (Vgl. Abbildung 16)



AGES = Österreichische Agentur für Ernährungssicherheit; DGE = Deutsche Gesellschaft für Ernährung; Eco-Mix = Mittelwert von AGES und vegetarisch; Zero Waste = Heutige Ernährung ohne Verschwendung; ZN-Huhn = Zweinutzungshuhn.
Grafik: Eigene Darstellung. Quelle: Eigene Berechnung

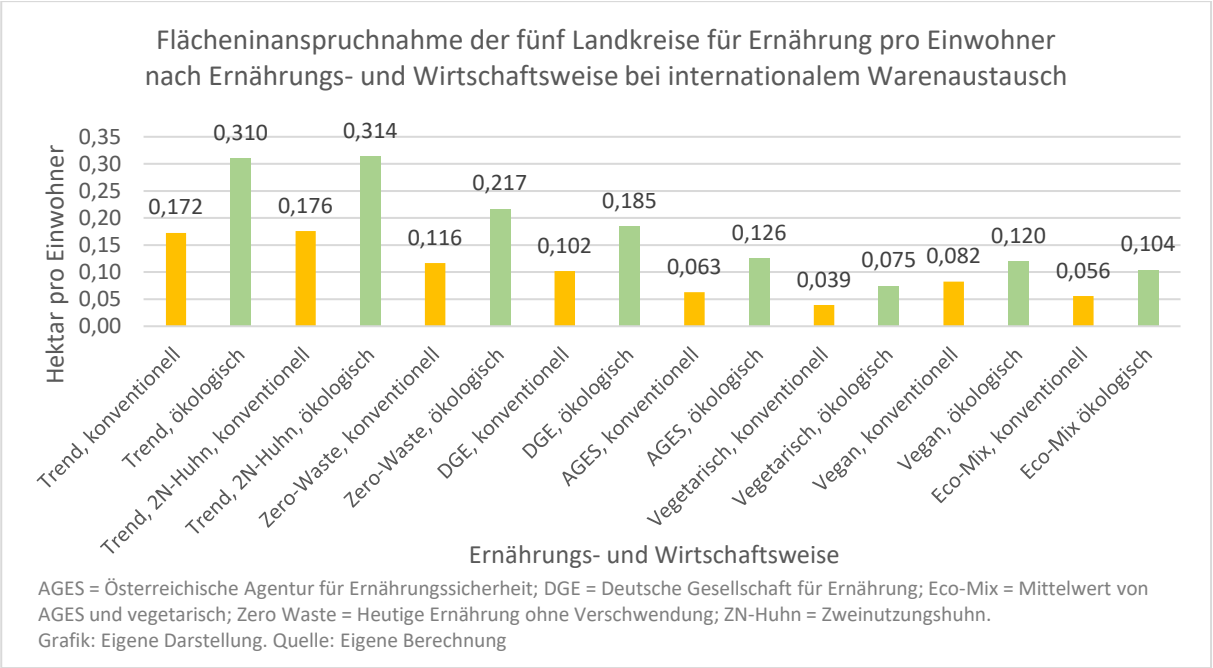
Abbildung 16: Theoretischer Flächenbedarf für Ernährung pro Person nach Ernährungs- und Wirtschaftsweise in Süddeutschland bei weitestgehend inländischer Produktion

[24] Die verschiedenen Ernährungsweisen wurden in Absatz 10.3 Ernährungsweisen vorgestellt. „Zero Waste“ entspricht den heutigen Ernährungsgewohnheiten bei minimierter Verschwendung. Bei den Empfehlungen nach AGES und DGE handelt es sich um Empfehlungen für eine gesunde Mischkost. „Eco-Mix“ stellt einen Mittelwert zwischen den Ernährungsweisen „AGES“ und „Vegetarisch“ dar.

Im direkten Vergleich mit einer veganen Ernährung liegt der Flächenbedarf um 3 Prozent niedriger, obwohl bei der Ernährungsweise „Eco-Mix“ und einer an sie angepassten Flächennutzung bei ökologischer Wirtschaftsweise bis zu 20 Kilogramm Fleisch pro Person bereitgestellt werden. Pro Person werden in diesem Fall lediglich 1.290 Quadratmeter Produktionsfläche benötigt. Bei einem kompletten Verzicht auf Nutztierhaltung werden bei einer veganen Ernährung rund 1.330 m²/Ea benötigt. Ein kompletter Verzicht auf Fleisch und tierische Produkte führt daher nicht zu einer maximalen Reduktion des Flächenbedarfs. Dies zeigt sich noch deutlicher, wenn in einer realitätsnäheren Berechnung mögliche Autonomiegrade bei den einzelnen Nahrungsmittelgruppen und die sich daraus ergebenden Importbedarfe und Exportpotenziale berücksichtigt werden.

Bei der heutigen Ernährungsweise erhöht die Berücksichtigung von Importen und Exporten den Flächenbedarf der fünf Beispiellandkreise bei konventioneller Produktion auf mehr als 0,17 Hektar pro Einwohner und bei ökologischer Wirtschaftsweise auf 0,31 Hektar pro Einwohner. Werden Verluste und Verschwendung minimiert, sinkt die Flächeninanspruchnahme konventionell auf 0,116 ha/EW und ökologisch auf 0,217 ha/EW. Dies entspricht einer Reduktion des Flächenbedarfs um 34 bzw. 31 Prozent. Durch eine zusätzliche Umstellung der Ernährungsweise kann die Flächeninanspruchnahme insgesamt, je nach Ernährungsweise, bei konventioneller Wirtschaftsweise um 12 bis 67 Prozent und bei ökologischer Wirtschaftsweise um 15 bis 66 Prozent reduziert werden. Der geringste globale Flächenfußabdruck ergibt sich bei konventioneller Produktion und einer Ernährung mit einem Fleischverzehr von ca. 16 kg pro Person. Bei ökologischer Produktion zeigt sich der geringste globale Flächenfußabdruck bei einer Fleischproduktion von ca. 12 Kilogramm pro Person und Jahr. Eine vegane Ernährung nimmt im Vergleich dazu bei konventioneller Produktion 110 Prozent und bei ökologischer Produktion um 60 Prozent mehr Fläche in Anspruch. Die Ernährungsweise „Eco-Mix“ liegt bei der Flächeninanspruchnahme ebenfalls deutlich unter der veganen Ernährungsweise. Ökologisch nimmt sie ca. 1.040 m² pro Person in Anspruch. Werden zudem Zweinutzungshühner eingesetzt, steigt die Flächeninanspruchnahme auf ca. 1.070 m² pro Person. In diesem Fall werden ca. 19 Kilogramm Fleisch pro Person und Jahr produziert. Der Flächenbedarf der Ernährungsweise Eco-Mix liegt somit trotz ökologischer Produktion um 53 Prozent unter der Flächeninanspruchnahme, die das Statistische Bundesamt im Jahr 2019 bei weitestgehend konventioneller Produktion für das Jahr 2017 ermittelt hat (Statistisches Bundesamt, 2019g S. 8).

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Reduktion des Fleischverbrauchs mit Blick auf den Flächenbedarf bei ökologischer Wirtschaftsweise stärker ins Gewicht fällt als bei konventioneller Produktion. Ein vollständiger Verzicht auf tierische Produkte wirkt sich jedoch negativ auf die Flächeninanspruchnahme und die Nahrungsautonomiepotenziale aus, da das Grünlandpotenzial in diesem Fall nicht vollständig genutzt werden kann und viele pflanzliche Nahrungsmittel keine höhere Flächeneffizienz aufweisen als die Milchviehhaltung.



AGES = Österreichische Agentur für Ernährungssicherheit; DGE = Deutsche Gesellschaft für Ernährung; Eco-Mix = Mittelwert von AGES und vegetarisch; Zero Waste = Heutige Ernährung ohne Verschwendung; ZN-Huhn = Zweinutzungshuhn.
Grafik: Eigene Darstellung. Quelle: Eigene Berechnung

Abbildung 17: Flächeninanspruchnahme der fünf Landkreise für Ernährung pro Einwohner nach Ernährungs- und Wirtschaftsweise bei internationalem Warenaustausch

Die Ergebnisse machen zudem deutlich, dass Importbedarfe sich überproportional negativ auf den globalen Flächenfußabdruck der Ernährung auswirken, während exportierte Überschüsse sich überproportional positiv auswirken. Diese Tatsache ist besonders relevant, da Deutschland heute Netto-Flächenimporteur ist, aber Netto-Flächenexporteur sein könnte, auch wenn in Deutschland flächendeckend auf ökologischen Landbau umgestellt würde.

6.4.1.1.2 Vergleich mit Angaben des Statistischen Bundesamtes

Nach Berechnungen des Statistischen Bundesamtes wurden für den deutschen Inlandsverbrauch von Ernährungsgütern im Jahr 2017 19,082 Mio. Hektar landwirtschaftlich genutzter Fläche aufgewendet (Statistisches Bundesamt, 2019g S. 8). Bei einer Bevölkerung von 82,792 Mio. Einwohnern entspricht dies einer Flächeninanspruchnahme von mehr als 0,23 ha pro Einwohner[25]. Die für den Inlandsverbrauch im Jahr 2017 belegte Fläche überstieg damit die im Inland für Ernährungszwecke belegte Fläche um 5,0 Mio. Hektar. (Statistisches Bundesamt, 2019g S. 8). Dabei handelte es sich bei den verbrauchten Nahrungsmitteln größtenteils um konventionell erzeugte Produkte. Der Marktanteil von ökologisch erzeugten Lebensmitteln ist im Zeitraum 2010 bis 2017 von 3,7 Prozent auf 5,2 Prozent (Anteil am Umsatz) gestiegen (Statista, 2019d). Die Auswirkungen auf den Flächenbedarf fallen bei diesem geringen Anteil kaum ins Gewicht.

[25] Flächenbelegung für den Inlandsverbrauch von Ernährungsgütern im Jahr 2017: 19,08 Mio. Hektar. Bevölkerung im Jahr 2017: rund 82,792 Mio. Einwohner

Mit 0,23 liegt die tatsächliche Flächeninanspruchnahme um rund 39 Prozent über dem Wert, der sich rechnerisch aus den Durchschnittserträgen inländischer Landwirtschaftsflächen ergibt. Einer der wichtigsten Gründe für diese Differenz ist der hohe Importanteil der tatsächlichen Nahrungsbereitstellung, der sich aus den Konsumgewohnheiten der Verbraucher und der inländischen Flächenbelegung ergibt. Insbesondere der Import von Getreide und Kraftfutter erhöht den Flächenbedarf pro Tonne deutlich. Ähnliche Effekte haben Importe von Gemüse und Obst. Vor allem bei Gemüse und Obst werden in Deutschland aber regelmäßig nur geringe Selbstversorgungsgrade erreicht: In den Jahren 2016 bis 2018 betrug der Selbstversorgungsgrad bei Gemüse nur etwas mehr als 36 Prozent und bei Obst lediglich 22 Prozent (BLE, 2019/2020). Des Weiteren werden rund 19 Prozent der Ackerflächen für den Anbau von Energie- und Rohstoffpflanzen genutzt, was den Importanteil des Nahrungssektors und damit auch den Flächenbedarf der Nahrungsversorgung erhöht. Abschließend sei noch darauf hingewiesen, dass bei den vorliegenden am Kalorienbedarf orientierten Berechnungen Nutzpflanzen mit sehr geringen Kalorienerträgen nicht berücksichtigt wurden und ein eher ertragreicher Pflanzenmix gewählt wurde. In der Realität haben Pflanzen mit geringen Kalorienerträgen pro Hektar jedoch beachtliche Anteile an der Flächennutzung. Beispielhaft sei hier lediglich der Spargel genannt, welcher rund ein Fünftel der Gemüseanbaufläche in Deutschland in Anspruch nimmt. Auch einige Südfrüchte, Pflanzenöle (z. B. Olivenöl) und Genussgüter wie Kakao erhöhen den Flächenbedarf zur Erzeugung von 1.000 kcal im Vergleich zu den berücksichtigten in Deutschland kultivierbaren Pflanzen zum Teil deutlich. Abschließend sei auf die Grünlandnutzung hingewiesen, deren Potenziale im berechneten Szenario fast vollständig ausgeschöpft wurden. In der Realität ist dies nicht der Fall.

6.4.1.1.3 Vergleich mit Angaben in der Literatur

Nach einer Berechnung der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) benötigt man bei konventioneller Landbewirtschaftung lediglich rund 1.209 m² im Inland (Thüringen) und 161 m² im Ausland, um den Nahrungsmittelverbrauch eines deutschen Durchschnittsbürgers zu decken, woraus sich ein Flächenbedarf von 0,137 ha pro Person ergibt (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2010 S. 22). Soweit ersichtlich handelt es sich in diesem Fall um einen theoretischen Wert, der die aktuelle Flächenbelegung im Inland und daraus folgende mögliche Autonomiegrade und Import-Exportsalden nicht berücksichtigt. Somit ergibt sich eine Differenz von 11 Prozent zu dem für Baden-Württemberg berechneten Vergleichswert von 0,155 ha/EW, der ebenfalls auf der Annahme beruht, dass die Produktion weitestgehend im Inland erfolgt. Diese Differenz ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass bei den vorliegenden Berechnungen im Gegensatz zur Berechnung der TLL ausschließlich grünlandbasierte Milchviehhaltung berücksichtigt wurde, welche mehr Fläche in Anspruch nimmt als eine

ackerlandbasierte Milchproduktion. Somit ergibt sich eine hohe Übereinstimmung. Unter Berücksichtigung von Import-Export-Salden ergibt sich allerdings, wie zuvor dargestellt, ein höherer Flächenbedarf.

Bei einer rein ökologischen Erzeugung wären nach Wakamiya (2011), bezogen auf die Ernährungsgewohnheiten im Jahr 2009, pro Person 0,252 Hektar erforderlich, um den Nahrungsmittelbedarf zu decken (Wakamiya, 2011). Dieser Wert deckt sich fast genau mit dem hier berechneten Wert für den Flächenbedarf von 0,249 ha/EW, der sich im Inland bei ökologischer Erzeugung aus dem heutigen Verbrauch ergibt. Allerdings handelt es sich auch hierbei um theoretische Werte, die auf einer nahezu ausschließlich inländischen Erzeugung basieren und sich somit in der Realität nicht auf die ganze Bevölkerung übertragen lassen. Solange der Nahrungsautonomiegrad in Deutschland unter 100 Prozent liegt, ist der tatsächliche Flächenbedarf der Ernährung in Deutschland unter Berücksichtigung notwendiger Importe und Exporte, wie zuvor dargestellt, größer und dürfte mindestens 0,310 ha pro Einwohner betragen.

6.4.1.2 Kalorien- und flächenbezogene Nahrungsautonomiepotenziale am Beispiel des Landkreises Konstanz

Mit Blick auf die Autonomiepotenziale ist eine kalorienbezogene Betrachtung sinnvoller als eine gewichtsbezogene Betrachtung, da sie auch kleine Veränderungen des Warenkorbes berücksichtigen kann, ohne an Genauigkeit zu verlieren. Das Gewicht der verzehrten Nahrungsmittel kann dagegen bei gleichem Kalorienverzehr, je nach Ernährungsweise zwischen ca. 560 und ca. 740 kg schwanken. Noch aussagekräftiger wird das Ergebnis jedoch, wenn das kalorienbezogene und das flächenbezogene Autonomiepotenzial gemeinsam betrachtet werden, weil diese Betrachtung vermeidet, dass die Wirkung bestimmter Maßnahmen unter- oder überschätzt wird.

Möglichkeiten, den Flächenbedarf der Ernährung durch gezielte Maßnahmen zu verändern, bestehen sowohl auf Seite der Verbraucher als auch auf Seite der Produzenten. Der Einfluss der Verbrauchsgewohnheiten, der vor allem durch die Ernährungsweise bestimmt wird, wurde anhand der Szenarien N1 bis N8 verglichen. Der Einfluss von Maßnahmen auf Seiten der Produktion wurde in den N9 bis N15 untersucht. Zu den Maßnahmen auf Seiten der Produktion gehört die Nutzung von Agroforstsystemen, Agrophotovoltaik und urbaner Landwirtschaft auf Gebäudedächern. Die Autonomiepotenziale, die sich aus den verschiedenen Szenarien ergeben, werden im Folgenden jeweils nach Wirtschaftsweise (konventionell und ökologisch) differenziert dargestellt.

6.4.1.2.1 Kalorienbezogene Nahrungsautonomiepotenziale

Der kalorienbezogene Autonomiegrad kann auch bei konstanter Größe der Ackerflächen, unveränderten Ernährungsgewohnheiten und konstanter Einwohnerzahl, je nach Auswahl und

Flächenanteilen der Nahrungspflanzen, ganz unterschiedlich ausfallen, da sich z. B. die Auswahl der angebauten Nahrungspflanzen variieren lässt und z. B. ertragreiche Pflanzen bevorzugt werden können. Der aus einer bestimmten Ernährungsweise folgende Flächenbedarf pro Person bleibt dadurch jedoch unverändert, sofern der Nahrungsmittelhandel innerhalb Deutschlands erfolgt, wo die Anbauflächen nahezu gleiche Ertragspotenziale aufweisen. Wenn ein internationaler Außenhandel mit Nahrungsmitteln betrieben wird, wirkt sich eine gezielte Schwerpunktsetzung bei der Auswahl der lokal angebauten Nahrungspflanzen (z. B. auf Getreide oder Ölfrüchte) nur dann positiv auf den Flächenbedarf aus, wenn vorzugsweise solche Pflanzen angebaut werden, mit denen vor Ort Hektarerträge erzielt werden, die über dem überregionalen bzw. internationalen Durchschnitt liegen. Deutlich über dem globalen Durchschnitt liegen in Süddeutschland vor allem die Erträge von Getreide und getreidebasierten Fleisch- und Milchprodukten sowie die Erträge einiger Obstarten und diverser Gemüsesorten (u. a. Zwiebeln, Broccoli, Kürbis, verschiedene Kohlarten). Die deutschen Erträge bei Hülsenfrüchten (Linsen, Erbsen, Bohnen) und Erdbeeren liegen dagegen, zumindest aktuell, unter dem internationalen Durchschnitt. In ihrem Fall erhöht eine lokale Produktion folglich die Flächeninanspruchnahme pro Person.

Um den Einfluss anderer Faktoren auf die kalorienbezogenen Autonomiepotenziale zu untersuchen, wurde im nachfolgend beschriebenen Vergleich auf den für die Nahrungsproduktion aufgewendeten Ackerflächen stets die gleiche Nahrungspflanzenkombination angewendet – unabhängig von der jeweiligen Ernährungsweise. Die speziell betrachteten Produktionssysteme, wie z. B. Agroforst und Agrophotovoltaik, wurden jeweils auf einer Fläche von 1.000 Hektar angewendet, um eine direkte Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Systeme zu erhalten, die zum Teil auf Ackerland und zum Teil auf Grünland angewendet werden. Im Landkreis Konstanz entsprechen 1.000 Hektar rund 5 Prozent des Ackerlandes oder rund 8 Prozent des Grünlandes oder rund 3 Prozent der landwirtschaftlichen Nutzflächen.

Wie zu erwarten, wird bei gleichen Anteilen an der Ackerfläche bei fast allen Ernährungsweisen ein ähnlicher kalorienbezogener Autonomiegrad erreicht. Bei einer veganen Ernährung ist allerdings ein deutlich niedrigerer kalorienbezogener Autonomiegrad möglich, da das Grünlandpotenzial für die Nahrungsversorgung ohne Futterproduktion größtenteils ungenutzt bleibt. Im Falle des Landkreises Konstanz beträgt die Differenz der veganen Ernährung zu den übrigen Ernährungsweisen bei konventioneller Wirtschaftsweise ca. 14 (10 – 18) Prozentpunkte und bei ökologischer Wirtschaftsweise rund 11 (9 – 14) Prozentpunkte.

Positiv wirkt sich vor allem die Reduktion der Verschwendung aus. Bei unveränderten Anteilen der Energie- und Rohstoffproduktion an der Ackerflächennutzung steigt das kalorienbezogene Autonomiepotenzial durch eine Reduktion der Verluste auf maximal 10 Prozent des Verzehrs bei konventioneller Wirtschaftsweise von rund 67 auf 83 Prozent und bei ökologischer Produktion von rund 44 Prozent auf rund 52 Prozent (Szenario N01).

Auch der Umstieg von Energiepflanzen der ersten Generation auf Energiepflanzen der zweiten Generation in Szenario N02 hat Auswirkungen auf das kalorienbezogene Nahrungsautonomiepotenzial, die aber mit einem möglichen Plus von 0,2 Prozentpunkten gering sind.

Die Aufteilung der Ackerflächen zwischen Nahrungsmittel-, Futtermittel-, Energie- und Rohstoffproduktion hat dagegen einen großen Einfluss auf die kalorienbezogenen Autonomiepotenziale. Verzichtet man auf Energie- und Rohstoffpflanzen, behält aber das Verhältnis von Nahrungsproduktion zu Futterproduktion bei (Szenario N03), so erreicht man konventionell einen Autonomiegrad von 95 Prozent und ökologisch von 58 Prozent. Zum Vergleich: Behält man stattdessen den Anbau von Energie- und Rohstoffpflanzen unverändert bei (auf 19 Prozent der Ackerfläche), und reduziert den Anteil der Futterproduktion um die durch Energiepflanzen belegte Fläche auf ca. 28 Prozent der Ackerfläche (Szenario ist nicht grafisch dargestellt), steigen die Autonomiegrade konventionell auf 97 Prozent und ökologisch auf 63 Prozent. Der direkte Vergleich zeigt, dass Futterpflanzenanbau und Fleischproduktion sich ähnlich negativ auf die kalorienbezogenen Autonomiepotenziale auswirken, wie der Anbau von Energie- und Rohstoffpflanzen.

Reduziert man den Anteil der Futtermittelproduktion auf 15 Prozent der Ackerfläche und verzichtet, wie in den Szenarien N4 bis N17 angenommen, auf den Anbau von Energie- und Rohstoffpflanzen, lassen sich im Landkreis Konstanz bei reduzierter Verschwendung und konventioneller Produktion kalorienbezogene Autonomiegrade von 126 bis 147 Prozent erreichen (vgl. Abbildung 18). Bei ökologischer Produktion sind Autonomiegrade von 82 bis 97 Prozent möglich (vgl. Abbildung 19).

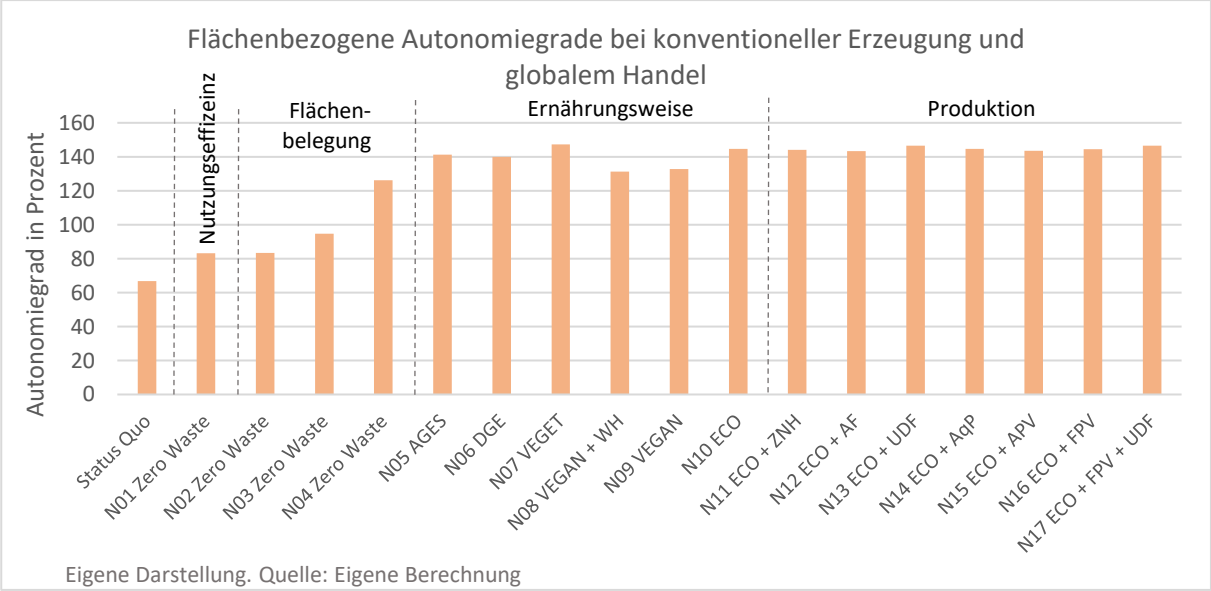


Abbildung 18: Kalorienbezogene Autonomiegrade bei konventioneller Erzeugung nach Ernährungsweise und Ackerflächennutzung im Kreis Konstanz

Systematische und technologische Maßnahmen auf Seite der Produktion bewirken unterschiedlich relevante Effekte. Ein Agroforstsystem (Szenario N12) mit Winterweizen und Walnussbäumen (AF) auf 1.000 Hektar Ackerfläche (ca. 5 Prozent der Ackerfläche oder 35 m²/Einwohner) wirkt sich bei einer konventionellen Nahrungsproduktion mit Einbußen von 1,2 Prozentpunkten stärker auf das Autonomiepotenzial aus als bei ökologischer Produktion. Bei ökologischer Bewirtschaftung führt das Agroforstsystem mit 0,5 Prozentpunkten zu geringeren Einbußen, da die Differenz der Kalorienerträge zwischen Weizen- und Walnussproduktion im ökologischen Landbau nicht so groß ausfällt. Urbane Dachfarmen ohne Fischzucht (UDF) mit einer Anlagenfläche von 2,0 m²/Einwohner erhöhen den Autonomiegrad sowohl konventionell als auch ökologisch um rund zwei Prozentpunkte. Dachfarmen mit Aquaponik (AqP) mit einer Anlagenfläche von 2,0 m²/Einwohner steigern den Autonomiegrad im Kreis Konstanz bei konventioneller Wirtschaftsweise um 0,6 Prozent und bei ökologischer Wirtschaftsweise um 1,8 Prozentpunkte. Agrophotovoltaik (APV) auf ca. 1.000 Hektar Ackerfläche (ca. 5 Prozent der Ackerfläche oder 35 m²/Einwohner) führt im Landkreis Konstanz (Szenario N15) bei konventioneller Bewirtschaftung zu einer Potenzialeinbuße von 1,1 Prozentpunkten, bei ökologischer Bewirtschaftung zu einem Verlust von 0,7 Prozentpunkten. Freiflächenphotovoltaik (FPV) auf 1.000 Hektar Dauergrünland (ca. 5 Prozent der Grünlandfläche oder 35 m²/Einwohner) wirkt sich dagegen nicht auf den Nahrungsautonomiegrad aus, wenn die Anlagen auf Flächen errichtet werden, die auch bisher nicht der Nahrungsproduktion dienen, sondern gar nicht wirtschaftlich oder, wie im berechneten Beispielfall, für die Biogasproduktion genutzt werden. Wird unter den Anlagen auch Milchvieh gehalten, ist beim Nahrungsautonomiepotenzial mit Einbußen von 0,1 Prozentpunkten zu rechnen, wenn die landwirtschaftlichen Flächen konventionell bewirtschaftet werden. Wird ökologisch gewirtschaftet, beträgt der Verlust ebenfalls rund 0,1 Prozentpunkte.

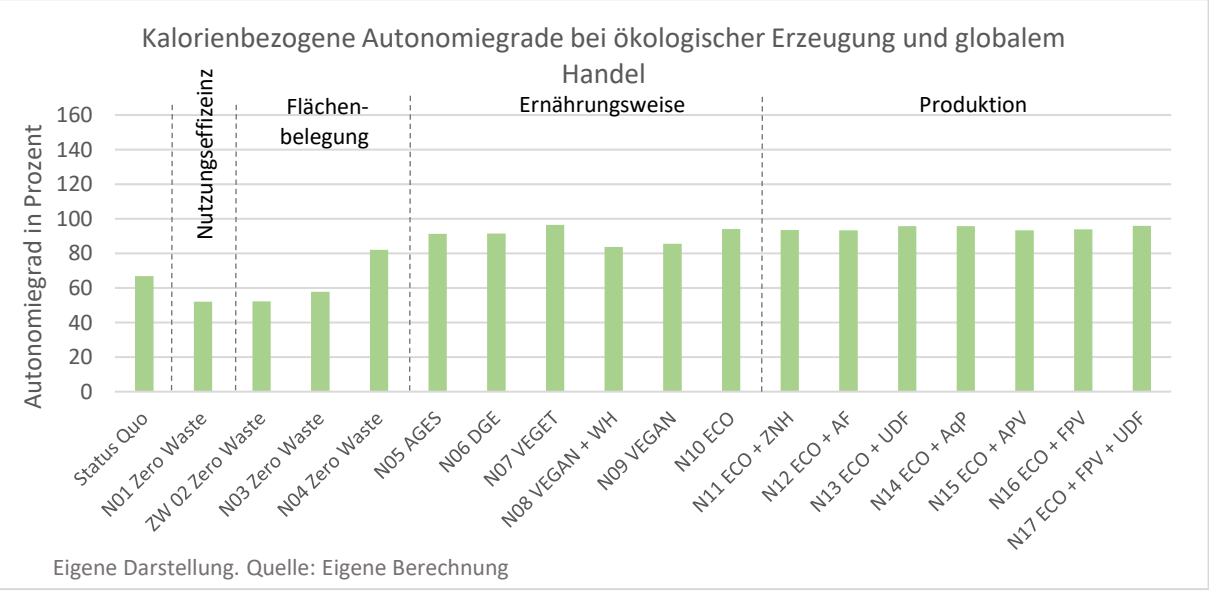


Abbildung 19: Kalorienbezogene Autonomiegrade bei ökologischer Erzeugung nach Ernährungsweise und Ackerflächennutzung im Kreis Konstanz

Somit bieten Agrophotovoltaikanlagen über Ackerland im Vergleich zu Freiflächen-PV-Anlagen auf Dauergrünland unter den bisherigen klimatischen Bedingungen keinen Vorteil, sondern führen sogar zu größeren Einbußen beim kalorienbezogenen Nahrungsautonomiepotenzial als PV-Anlagen auf Grünland. Sollte sich bestätigen, dass die meisten ackerbaulich kultivierten Pflanzen mit Ertragseinbußen auf die Beschattung durch APV-Anlagen reagieren, sollten unter ihnen vorzugsweise Pflanzen kultiviert werden, die ohnehin geringe Kalorienerträge pro Hektar liefern. Da sich jedoch abzeichnet, dass die klimatischen Bedingungen sich dahingehend verändern, dass die Verschattung durch die Solarmodule Pflanzen und Böden bei zunehmenden Hitze- und Trockenphasen vor Austrocknung schützen, könnten APV-Anlagen in trocken-heißen Sommern dazu beitragen, die Erträge bis zu einem gewissen Grad zu stabilisieren und durch den Klimawandel bedingte Ertragseinbußen zu begrenzen. Ob dies die Einbußen kompensiert, die in Jahren mit gemäßigter Witterung entstehen, lässt sich bisher noch nicht absehen.

Auf den kalorienbezogenen Autonomiegrad hat es, anders als im Fall des flächenbezogenen Autonomiegrades, keinen Einfluss, ob der Außenhandel mit dem Inland oder dem Ausland erfolgt.

Hinweis zur Festlegung der Futterbauflächen:

Je nach Ernährungsweise werden unterschiedliche Flächen für den Futterbau benötigt. Eine genaue Anpassung der Produktion an den Bedarf ist jedoch kaum möglich, da auch die verschiedenen Tierarten mit ihren unterschiedlichen Futtermischungen ganz verschiedene Anforderungen an den Futterbau stellen. Zudem erhöhen als Futtermittel nutzbare Koppelprodukte aus der Nahrungsmittel-, Energieträger- und Rohstoffproduktion die Komplexität. Daher wurden die Flächenanteile des Futterbaus zunächst vereinfachend in Abstufungen von 5 Prozentpunkten auf Werte von 0, 5, 10 und 15 Prozent festgelegt, um die reduzierten Bedarfe an Futtermitteln zu berücksichtigen. Im Durchschnitt der fünf betrachteten Landkreise zeigte sich, dass bei der Wahl der Ernährungsweise Eco-Mix und konventioneller Erzeugung eine hundertprozentige Futtermittelautonomie bereits ab einem Futterflächenanteil an der Ackerfläche von ca. 7 Prozent erreicht wird. Bei ökologischer Ernährung wird mindestens die doppelte Fläche benötigt. Bei hohem Anteil von Hühnerfleisch am Fleischverbrauch fällt die Differenz zwischen konventioneller und ökologischer Wirtschaftsweise noch größer aus. Der Mittelwert wurde daher auf 10 Prozent gerundet. Im Szenario 2035, das grundsätzlich eine ökologische Bewirtschaftung beinhaltet, wurde der erforderliche Mindestbedarf an Ackerfutterflächen von 14 Prozent auf die einzelnen Landkreise angewendet.

6.4.1.2.2 Flächenbezogene Nahrungsautonomiepotenziale

Veränderungen bei der Flächenbelegung wirken sich vor allem auf den kalorienbezogenen Autonomiegrad aus. Auf die flächenbezogenen Autonomiegrade haben diese Anpassungen

fast keine Auswirkungen, wenn der Handel innerhalb Deutschlands erfolgt, da sich Überschüsse und Defizite im Außenhandel rechnerisch ausgleichen. Erfolgt der Außenhandel international, kann der flächenbezogene Autonomiegrad durch die Pflanzenwahl beeinflusst werden, wenn die Erträge der gewählten Pflanzen deutlich von den internationalen Durchschnittswerten abweichen.

Kalorienbezogene Autonomiegrade geben in erster Linie darüber Auskunft, ob und zu welchem Grad sich eine Region oder ein Landkreis im Krisenfall selbst ernähren kann, wenn Importe nicht in größerem Umfang möglich sind. Sie sind umso höher, je größer der Flächenanteil von ertragreichen Pflanzen (vor allem Getreide und Kartoffeln) ist. Das Ziel einer vollwertigen und gesunden Ernährung kann bei einem kalorienbezogenen Autonomiegrad von 100 Prozent jedoch deutlich verfehlt werden. Denn für eine ausgewogene Ernährung werden auch tierische Erzeugnisse oder Pflanzen, wie etwa diverse Gemüsesorten und Hülsenfrüchte, benötigt, die pro Hektar nur geringe Kalorienerträge liefern. So kann der Kalorienbedarf eines Landkreises bereits weitgehend mit heimischen Produkten gedeckt sein, obwohl sich mehr als die Hälfte der für eine ausgewogene Ernährung benötigten Anbauflächen außerhalb der Landkreisgrenzen befinden.

Dementsprechend weichen die flächenbezogenen Nahrungsautonomiepotenziale zum Teil deutlich von den kalorienbezogenen Autonomiegraden ab. Mit Blick auf das Ziel einer vollwertigen und gesunden Ernährung ist daher der flächenbezogene Autonomiegrad von entscheidender Bedeutung. Er ist der Indikator, der einigermaßen verlässlich Auskunft darüber gibt, wie viel Fläche je nach Szenario außerhalb der eigenen Gebietsgrenzen in Anspruch genommen werden muss. Wie sich verschiedene Maßnahmen auf die flächenbezogenen Autonomiepotenziale auswirken, wird im Folgenden dargestellt.

Der Vergleich der Szenarien macht ersichtlich, dass eine Reduktion von Verlusten und Verschwendung mehr Fläche freisetzen könnte, als heute für den Anbau von Energie- und Rohstoffpflanzen aufgewendet wird: Bei heutigen Verbrauchsgewohnheiten und Flächenbelegungen kann im Landkreis Konstanz, je nach Außenhandel, ein flächenbezogener Autonomiegrad von 61 bis 69 Prozent erreicht werden. Verzichtet man vollständig auf den Anbau von Energie- und Rohstoffpflanzen, kann im Landkreis Konstanz bei der heutigen Ernährungsweise und den heutigen Verlusten mit konventionellem Landbau ein Autonomiegrad von ca. 70 - 76 Prozent erreicht werden. Mit ökologischem Landbau wäre in diesem Fall ein Autonomiegrad von ca. 37 - 46 Prozent zu erreichen. Reduziert man die Verluste und behält den Anbau von Energiepflanzen bei, betragen die entsprechenden Werte bei konventioneller Wirtschaftsweise rund 84 Prozent (Szenario N01) und bei ökologischer Wirtschaftsweise rund 47 - 54 Prozent (Szenario N02). Werden, wie im Szenario N03, die Verluste minimiert und der Energiepflanzenanbau unterlassen, können konventionell ca. 93,2 – 99,0 Prozent und ökologisch ca. 51,6 – 58,4 Prozent Autonomie erwartet werden. Die Reduktion der Futterflächen von 57 Prozent auf 15

Prozent im Szenario N04 wirkt sich je nach Wirtschaftsweise und Außenhandelspartner unterschiedlich aus. Bei konventioneller Wirtschaftsweise ergeben sich Autonomiegrade von 93,6 – 97,5 Prozent. Bei nationalem Güteraustausch steigt der flächenbezogene Autonomiegrad somit um 0,4 Prozent, während er bei globalem Güteraustausch um 1,5 Prozentpunkte sinkt. Bei ökologischer Wirtschaftsweise lässt die Reduktion der Futterflächen den Autonomiegrad dagegen in beiden Fällen steigen: Bei inländischem Handel um 4,0 Prozentpunkte auf 62,4 Prozent und bei globalem Handel um 1,8 Prozentpunkte auf 53,4 Prozent.

Angesichts des weiter voranschreitenden Flächenverbrauchs und eines absehbar fortschreitenden Bevölkerungswachstums ist im Landkreis Konstanz eine flächenbezogene Autonomie von mindestens 100 Prozent trotz der aufgezeigten Effizienzpotenziale in Zukunft nur noch zu erreichen, wenn sich die Ernährungsgewohnheiten der Bevölkerung ändern und das Land weiterhin konventionell bewirtschaftet wird. Die praktisch einzige Ausnahme von dieser Regel ist eine Ernährung mit deutlich reduziertem Fleischverbrauch, die auch bei einer ökologischen Landbewirtschaftung, je nach Außenhandelspartner, flächenbezogene Nahrungsautonomiegrade von 98 bis 134 Prozent ermöglicht. Eine Ernährung mit geringem Fleischverbrauch ermöglicht somit eine höhere Flächeneffizienz und einen höheren Autonomiegrad als eine rein vegetarische oder vegane Ernährung. Die entscheidenden Gründe hierfür sind die Nutzung des Grünlandes für die Viehhaltung und die Nutzung des unweigerlich anfallenden Rind- und Hühnerfleisches aus der Eier- und Milchproduktion. Im vegetarischen Szenario N07 werden bei konventioneller Wirtschaftsweise etwa 16 kg Fleisch pro Einwohner und bei ökologischer Wirtschaftsweise rund 12 kg Fleisch pro Einwohner als Nebenprodukte erzeugt.[26]

Oberhalb dieser Mengen wirkt sich eine Reduktion des Fleischverbrauchs jedoch grundsätzlich positiv auf Flächenbedarf und flächenbezogene Autonomie aus. Dies zeigt z. B. der Vergleich der Ernährungsweisen „DGE“, „AGES“ und „Eco-Mix“ recht deutlich. Während bei einer Ernährung nach Empfehlungen der DGE, je nach Außenhandelspartner, konventionell 97 – 108 Prozent und ökologogisch 61 – 66 Prozent Autonomie erreicht werden, sind bei einer Ernährungsweise nach AGES mit einem geringeren Anteil tierischer Produkte konventionell 115 bis 138 Prozent und ökologisch 79 bis 84 Prozent zu erwarten. Bei der Ernährungsweise Eco-Mix, die den Mittelwert zwischen den Ernährungsweisen „AGES“ und „Vegetarisch“ darstellt, sind konventionell 117 bis 147 Prozent und ökologisch 84 bis 102 Prozent flächenbezogene Nahrungsautonomie möglich.

[26] In der Milchviehhaltung fallen Rindfleisch und Kalbfleisch als Nebenprodukte an, in der Legehennenhaltung wird Hühnerfleisch produziert. Würden diese Produkte nicht als Nahrungsmittel genutzt, müsste das Fleisch entsorgt werden. Ein Verzicht auf die Schlachtung der Tiere am Ende der Nutzungsdauer erscheint auch in einer vollständig vegetarisch lebenden Gesellschaft sowohl aus wirtschaftlichen Gründen als auch mit Blick auf die begrenzten Futterflächenpotenziale unwahrscheinlich.

Ein vollständiger Verzicht auf tierische Produkte ist einer Erhöhung des Autonomiegrades nicht zuträglich, denn eine vegane Ernährung erhöht den Flächenimportbedarf im Vergleich zu einer vegetarischen Ernährung im Landkreis Konstanz deutlich. Wird auch auf die grünlandbasierte Viehhaltung (beispielsweise zur Milchproduktion für den Export) vollständig verzichtet, ist ohne eine massive Ausweitung des Streuobstanbaus auf Dauergrünland konventionell lediglich ein Autonomiegrad von 88 bis 108 Prozent und ökologisch von ca. 62 - 67 Prozent zu erwarten. Dies ist der geringste Wert aller alternativen Ernährungsstile, der etwa gleichauf mit der fleischreichen Ernährungsweise „Zero Waste“ liegt, bei der lediglich die Nahrungsmittelverluste minimiert und die heutigen Ernährungsgewohnheiten ansonsten unverändert beibehalten werden.

Die höchsten flächenbezogenen Autonomiegrade sind möglich, wenn die Ackerflächen vollständig für den Anbau pflanzlicher Nahrungsmittel (Vegan) und das Dauergrünland zu großen Teilen für die Milchviehhaltung genutzt werden. In diesem Fall, der in Szenario N08 (Vegan + Weidehaltung) dargestellt ist, können konventionell 123 – 170 Prozent und ökologisch 90 bis 135 Prozent Autonomie erreicht werden. Damit bietet sie jedoch nur leichte Effizienzvorteile gegenüber der weitgehend vegetarischen Ernährungsweise in Szenario N07, die zudem nur dann eintreten, wenn der Außenhandel global erfolgt.

Bemerkenswert ist, dass sich die Fleischproduktion in den drei Szenarien mit den höchsten Autonomiegraden zwischen 12 und 16 kg pro Einwohner und Jahr bewegt, wobei es sich im ersten Fall (Szenario N08) um eine reine Rindfleischproduktion handelt, während der Ernährungsweise Eco-Mix (Szenario N10) auch rund 5 kg Hühner- und Schweinefleisch erzeugt werden. Der Einsatz von Zweinutzungshühnern aus Gründen des Tierschutzes, der in Szenario N11 simuliert wurde, reduziert das Autonomiepotenzial bei dieser Ernährungsweise mit geringem Fleischanteil und konventioneller Wirtschaftsweise um ca. 0,9 – 1,5 Prozentpunkte. Bei ökologischer Produktion sinkt das flächenbezogene Autonomiepotenzial durch die Umstellung auf Zweinutzungshühner um ca. 0,6 – 1,4 Prozentpunkte.

Die Auswirkungen der Systeme, die die Flächeneffizienz steigern und zu mehr Diversifizierung führen sollen, wirken sich mit Blick auf die flächenbezogenen Autonomiepotenziale folgendermaßen aus:

- Agroforst auf 1.000 Hektar Ackerfläche (rund 5 Prozent der Ackerfläche) führt sowohl bei konventioneller (-0,1 bis -0,6 Prozentpunkte) als auch bei ökologischer Landbewirtschaftung (-0,1 bis -0,2 Prozentpunkte) zu geringen Einbußen beim flächenbezogenen Nahrungsautonomiepotenzial. Diese Einbußen werden jedoch durch leichte Zugewinne im Rohstoffsektor weitgehend kompensiert.
- Agrophotovoltaik (Agro-PV) auf 1.000 Hektar Ackerfläche (rund 5 Prozent der Ackerfläche) senkt das Nahrungsautonomiepotenzial bei konventioneller Wirtschaftsweise um 0,6

– 1,2 Prozentpunkte und bei ökologischer Wirtschaftsweise um 0,4 – 0,7 Prozentpunkte. Mit Blick auf die flächenbezogene Gesamtautonomie werden diese Verluste durch Zugewinne im Energiesektor vollständig kompensiert.

- Agrophotovoltaik (APV) auf 1.000 Hektar Grünland (rund 8,6 Prozent des Dauergrünlandes), die als Futterfläche (FF) genutzt werden, senkt das Autonomiepotenzial bei konventioneller Wirtschaftsweise um 0,2 – 0,3 Prozentpunkte und bei ökologischer Wirtschaftsweise um 0,1 – 0,3 Prozentpunkte. Diese Verluste werden durch Zugewinne im Energiesektor mehr als kompensiert, sodass die flächenbezogene Gesamtautonomie leicht gesteigert werden kann (+0,2 Prozentpunkte).
- Freiflächenphotovoltaik (FPV) auf 1.000 Hektar Grünland (8,6 Prozent des Grünlandes), die für die Rohstoffgewinnung genutzt werden, steigert die flächenbezogene Gesamtautonomie noch etwas deutlicher (ca. +0,3 Prozentpunkte).
- Urbane Dachfarmen ohne Fischzucht mit 2,0 m² Anlagenfläche pro Einwohner erhöhen das flächenbezogene Autonomiepotenzial konventionell um rund 1,7 – 3,7 Prozentpunkte und bei ökologischer Wirtschaftsweise um rund 1,7 – 3,4 Prozentpunkte.
- Aquaponik reduziert den flächenbezogenen Autonomiegrad aufgrund des zusätzlichen Futterbedarfs deutlich. Bei 2,0 m² Anlagenfläche pro Einwohner und konventioneller Wirtschaftsweise sinkt im Landkreis Konstanz das Autonomiepotenzial um rund 8,6 – 14,0 Prozentpunkte. Bei ökologischer Wirtschaftsweise sinkt das Autonomiepotenzial mit Einbußen von 9,1 – 17,9 Prozentpunkten noch deutlicher. Fischzucht ist somit im Vergleich zur Haltung von Schweinen oder Hühnern nicht mit einer geringeren Flächeninanspruchnahme verbunden. Es besteht jedoch die Möglichkeit, den Flächenbedarf der Aquaponik deutlich zu reduzieren, wenn z. B. Fliegenlarven als Fischfutter verwendet werden, die auf Basis von schadstofffreien Biomassen (z. B. unvermeidbare Lebensmittelabfälle aus ökologischer Produktion) gezüchtet werden, die ansonsten nicht für die menschliche Ernährung genutzt werden können. Welche Futtermittelmengen durch Fliegenlarven ersetzt werden können und wie sich das auf den Bedarf an Futterflächen auswirkt, ist bisher jedoch noch nicht bekannt.

Der Energiepflanzenanbau auf einer Fläche von 1.000 Hektar Ackerfläche (ca. 5 Prozent) wirkt sich bei konventioneller Wirtschaftsweise mit Einbußen bei der flächenbezogenen Nahrungsautonomie von 3,9 bis 6,0 Prozentpunkten aus. Bei ökologischer Bewirtschaftung liegen die Einbußen bei 2,4 – 4,6 Prozentpunkten. Nicht quantifiziert werden können hier zukünftige Effekte des Energiepflanzenanbaus, die sich im Anschluss an den Energiepflanzenanbau ergeben können. So kann der vorübergehende Energiepflanzenanbau nicht nur zur Begrenzung des Klimawandels beitragen, sondern auch einen wesentlichen Beitrag zum Schutz von Insekten, Gewässern und Böden leisten und den Humusgehalt der Böden erhöhen, was dazu beitragen kann, die zukünftigen Ertragspotenziale der Landwirtschaft zu steigern.

In Tabelle 72 sind die Auswirkungen verschiedener Produktionsmethoden auf die flächenbezogenen Autonomiegrade in einer Übersicht nach Außenhandel und Wirtschaftsweise dargestellt. Erfolgt der Güteraustausch allein im Inland, wirken sich die einzelnen Maßnahmen weniger deutlich aus, als dies bei einem globalen Güteraustausch der Fall ist.

Tabelle 72: Auswirkungen verschiedener Produktionsmethoden auf die flächenbezogene Nahrungsautonomie bei der Ernährungsweise Eco-Mix (Veränderung in Prozentpunkten)

Technologie/Methode	Nationaler Handel		Globaler Handel	
	Konventionell	Ökologisch	Konventionell	Ökologisch
Zweinutzungshuhn	-0,9	-0,6	-1,5	-1,4
Agroforst (1.000 ha)	-0,1	-0,1	-0,6	-0,1
Urbane Dachfarm	1,7	1,7	3,7	3,4
Aquaponik	-8,6	-9,1	-14,0	-17,9
APV auf Ackerland (1.000 ha = ca. 5%)	-0,7	-0,4	-1,2	-0,7
APV auf Grünland FF (1.000 ha)	-0,2	-0,1	-0,3	-0,3
FPV auf Grünland o. FF (1.000 ha)	0,0	0,0	0,0	0,0
APV auf Grünland + Urbane Dachfarm	1,5	1,5	3,4	3,1
E-Pflanzen auf Ackerland (1.000 ha)	-3,9	-2,4	-6,0	-4,6

FF= Futterfläche Quelle: Eigene Berechnung

In Abbildung 20 sind die Autonomiepotenziale, je nach Außenhandelspartnerschaft, bei konventioneller Wirtschaftsweise dargestellt. Die grafische Darstellung macht anschaulich, dass das Ausmaß der Verluste und die Wahl der Ernährungsweise die größten Auswirkungen auf die Autonomiepotenziale haben. Effizienzsteigernde Technologien müssen sehr großflächig eingesetzt werden, um ähnliche Effekte zu zeigen. Urbane Dachfarmen bieten dabei nur ein sehr begrenztes Potenzial. Geht man bisherigen Potenzialschätzungen folgend von einem Flächenpotenzial für Dachgewächshäuser von 4 bis 5 Quadratmetern pro Person aus, können die Autonomiegrade um etwas mehr als 7 Prozent gesteigert werden. Somit können Dachfarmen nur teilweise jene Verluste kompensieren, die etwa durch ein hohes Maß an Verschwendung oder den die Ernährungsempfehlungen deutlich übersteigenden Konsum tierischer Nahrungsmittel entstehen.

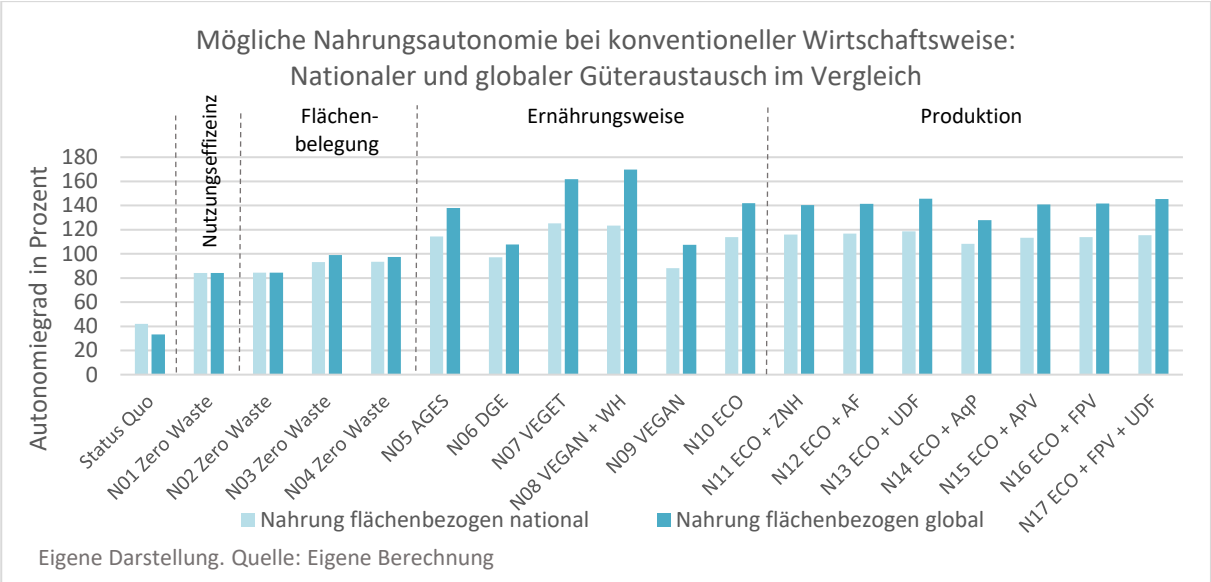


Abbildung 20: Flächenbezogene Nahrungsautonomiepotenziale im Kreis Konstanz bei konventioneller Erzeugung

In Abbildung 21 sind die Autonomiepotenziale, je nach Außenhandelspartnerschaft, bei ökologischer Wirtschaftsweise dargestellt. Die grafische Darstellung macht ersichtlich, dass der Effekt eines reduzierten Fleischverbrauchs bei ökologischer Wirtschaftsweise noch größer ist als bei konventioneller Wirtschaftsweise.

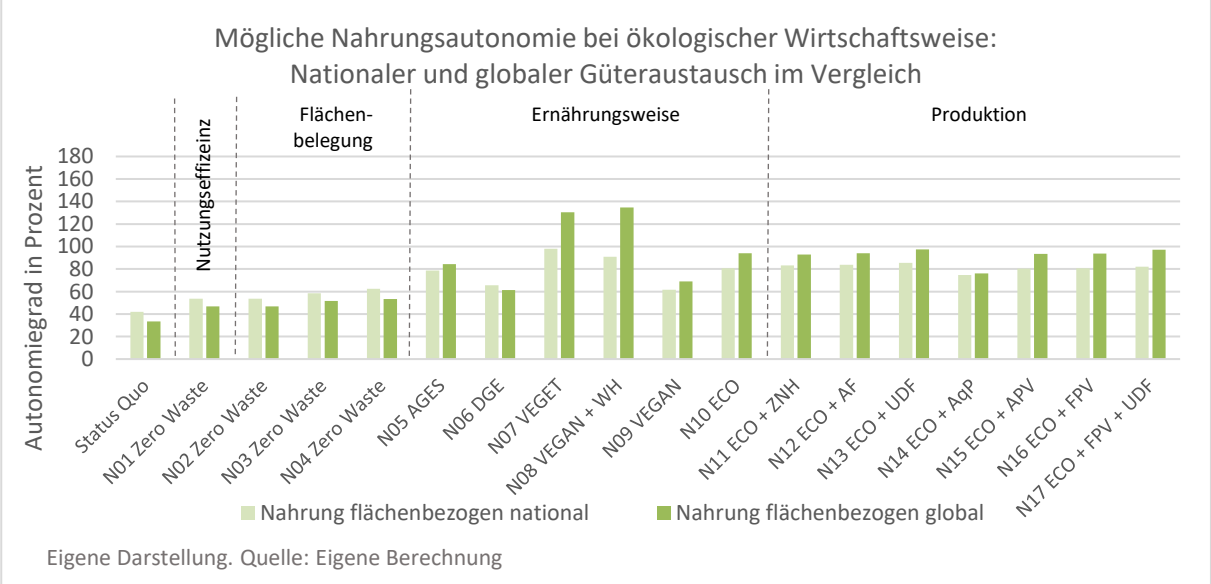


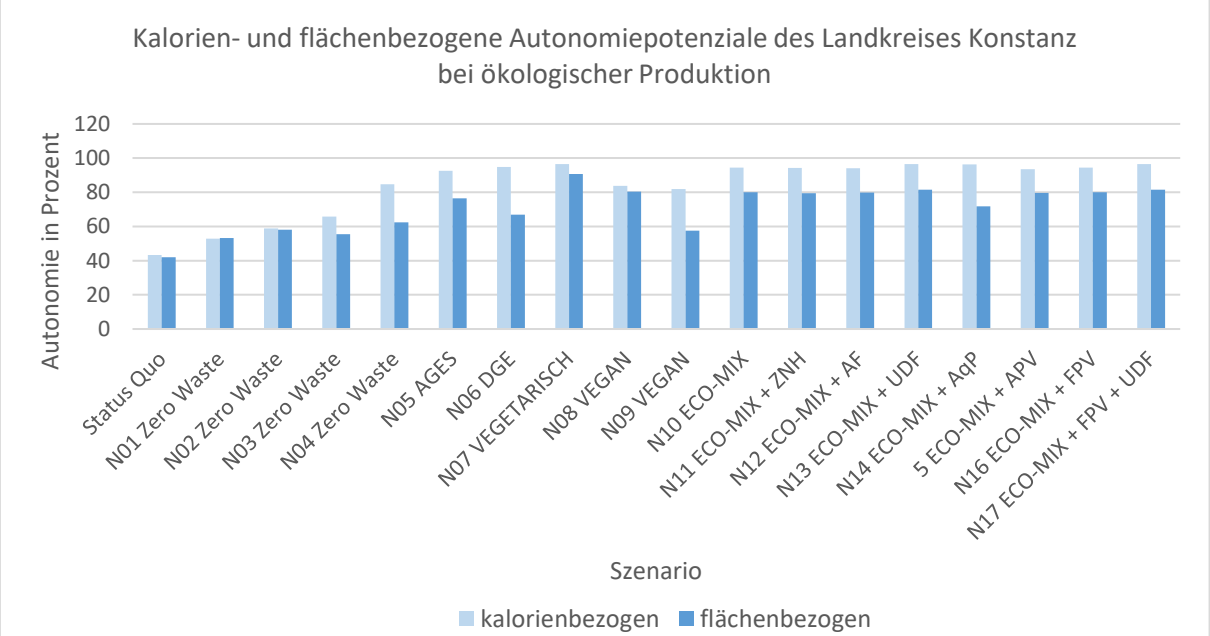
Abbildung 21: Flächenbezogene Nahrungsautonomiepotenziale im Kreis Konstanz bei ökologischer Erzeugung

Vollständige Autonomie oder gar Überschüsse kann der Landkreis Konstanz bei ökologischer Wirtschaftsweise nur erzielen, wenn die Produktion tierischer Produkte mindestens auf jenes Maß reduziert wird, das sich aus der Ernährungsweise „Eco-Mix“ ergibt.

In Abbildung 22 sind die kalorienbezogenen und die flächenbezogenen Nahrungsautonomiepotenziale des Landkreises Konstanz bei ökologischer Wirtschaftsweise im direkten Vergleich

dargestellt. In diesem Fall wurde ein größtenteils inländischer Güteraustausch angenommen, da Deutschland insgesamt eine vollständige bilanzielle Nahrungsautonomie erreichen kann, wenn Verschwendung und Verluste auf das mögliche Maß und der Verzehr tierischer Produkte auf das aus gesundheitlichen Gründen empfohlene Maß reduziert werden.

Die Ernährungsweise „Eco-Mix“ ermöglicht trotz einer Fleischproduktion von ca. 16 bis 20 kg pro Person und Jahr einen flächenbezogenen Autonomiegrad, der nur mit einer großenteils vegetarischen Ernährung der Bevölkerung übertroffen werden kann, bei der allerdings ebenfalls relevante Mengen Fleisch pro Person und Jahr produziert werden. Der direkte Vergleich macht zudem deutlich, dass eine rein vegane Ernährung ohne jegliche Art der Nutzviehhaltung das mit Abstand niedrigste Nahrungsautonomiepotenzial bietet, sofern die Verluste jeweils im gleichen Verhältnis zum Verzehr stehen wie bei den anderen Ernährungsweisen.



Eigene Darstellung. Quelle: Eigene Berechnung

Abbildung 22: Kalorien- und flächenbezogene Autonomiepotenziale des Landkreises Konstanz bei ökologischer Produktion im Vergleich

6.4.1.2.3 Auswirkung von Urbaner Landwirtschaft auf Autonomiepotenziale und Energiebilanz

Um den Energieaufwand und das Ernährungspotenzial urbaner Landwirtschaft in ein Verhältnis zur herkömmlichen Landwirtschaft zu setzen, wurde untersucht, welchen Anteil am Energieaufwand der Nahrungsproduktion die urbane Landwirtschaft mit Dachgewächshäusern in Anspruch nehmen würde und welchen Beitrag sie zur Kalorienversorgung leisten könnte.

Untersucht wurde dies am Beispiel des Szenarios 2035 für den Landkreis Konstanz, bei dem der Energiebedarf bei 12,1 MWh pro Einwohner liegt und die Bevölkerung sich nach der Ernährungsweise „Eco-Mix“ ernährt. 68 Prozent der Ackerfläche werden für die Nahrungsproduktion, 15 Prozent für den Energiepflanzenanbau (Energiepflanzen der 2. Generation), 14 Prozent für den Futterbau und 3 Prozent für den Rohstoffpflanzenanbau aufgewendet. Der Bedarf an Rohstoffen wurde um zwei Drittel reduziert. Für die Dachfarmen wurden jeweils 2,0 m² pro Einwohner aufgewendet, was etwa der Hälfte des von der Deutschen Gesellschaft für Hydrokultur geschätzten Gesamtpotenzials in Deutschland entspricht (DGHK, 2015)[27].

6.4.1.2.3.1 Dachfarmen ohne Fischzucht

Insgesamt verbrauchen Dachfarmen ohne Fischzucht bei einer Anlagenfläche von 2 m² pro Einwohner im Kreis Konstanz mit ca. 85 GWh/a nur um 22 Prozent weniger Energie als die klassische Landwirtschaft bei konventioneller Landbewirtschaftung ohne Gewächshäuser mit ca. 109 GWh/a verbraucht. Den kalorienbezogenen Autonomiegrad erhöht sie trotz dieses hohen Energieaufwandes nur um ca. 1,9 Prozentpunkte von 116,2 auf 118,1 Prozent. Der flächenbezogene Nahrungsautonomiegrad steigt bei inländischem Güteraustausch mit einem Zugewinn von 2,0 Prozentpunkten in einer ähnlichen Größenordnung von 106,0 auf 108,0 Prozent. Bei internationalem Handel steigt der flächenbezogene Nahrungsautonomiegrad mit um 4,3 Prozentpunkte - von 132,1 auf 136,4 Prozent. Dies entspricht einem relativen Zugewinn von 3,2 Prozent. Der auf den Energiebedarf bezogene Energieautonomiegrad (produktbezogen) reduziert sich bei dem angenommenen zukünftigen Energieverbrauch von 12 MWh/Ea durch die Nutzung der Gewächshäuser um 2,8 Prozentpunkte von 42,7 auf 39,9 Prozent, was einer Einbuße von 6,5 Prozent entspricht. Flächenbezogen sinkt der Energieautonomiegrad um bis zu 0,5 Prozentpunkte von ca. 26,0 auf ca. 25,5 Prozent, was einem Verlust von 1,9 Prozent entspricht. Bei internationalem Güteraustausch sinkt der flächenbezogene Energieautonomiegrad um 0,6 Prozentpunkte, was einer Einbuße von 2,3 Prozent entspricht.

Bei ökologischer Landbewirtschaftung fallen die Dachgewächshäuser im Vergleich zur klassischen Landwirtschaft etwas stärker ins Gewicht (85 GWh/a im Vergleich zu 101 GWh/a). So

[27] Laut DGHK (2015) können in Deutschland rund 360 Millionen Quadratmeter für den Anbau von Pflanzen in Gewächshäusern genutzt werden.

lassen sie den kalorienbezogenen Nahrungsautonomiegrad hier ebenfalls um 1,9 Prozentpunkte steigen, was aber bei einer Erhöhung des Autonomiegrades von 75,9 auf 77,8 Prozent einer Steigerung von 2,5 Prozent entspricht. Der flächenbezogene Nahrungsautonomiegrad erhöht sich um 1,5 Prozentpunkte von 73,2 auf 74,7 Prozent, was einer Steigerung von 2,0 Prozent entspricht. Der auf den Energiebedarf bezogene Energieautonomiegrad reduziert sich um 2,7 Prozentpunkte von 40,9 auf 38,2 Prozent, was einer Einbuße von 6,7 Prozent entspricht. Flächenbezogen sinkt der Energieautonomiegrad um bis zu einem halben Prozentpunkt von 20,7 auf 20,3 Prozent, was einer Einbuße von 2,2 Prozent entspricht. Der zusätzliche Flächenbedarf für die Energiegewinnung ist etwas größer als die Flächeneinsparung im Nahrungssektor, sodass die flächenbezogene Versorgungsautonomie durch die Nutzung von Dachgewächshäusern insgesamt geringfügig abnimmt.

Die Ergebnisse, die in Tabelle 73 zusammengefasst sind, zeigen, dass Dachgewächshäuser nur einen positiven Effekt auf die flächenbezogene Versorgungsautonomie haben, wenn der Flächenbedarf ihres Energieverbrauchs zukünftig reduziert werden kann.

Tabelle 73: Auswirkungen von Urbanen Dachfarmen (UDF) mit einer Anlagenfläche von 2,0 m²/EW auf die Autonomiepotenziale im Kreis Konstanz bei inländischem Güteraustausch nach Sektoren

Sektor	Konventionell ohne UDF	Konventionell mit UDF	Ökologisch ohne UDF	Ökologisch mit UDF
Produktbezogene Autonomiepotenziale				
Nahrung (Kalorien)	116,2%	118,1%	75,9%	77,8%
Energie (kWh)	42,7%	39,9%	40,9%	38,2%
Rohstoffe (kg)	148,7%	148,7%	146,9%	146,9%
Durchschnitt	102,5%	102,2%	87,9%	87,6%
Flächenbezogene Autonomiepotenziale				
Nahrung (Fläche)	106,0%	108,0%	73,2%	74,7%
Energie (Fläche)	26,0%	25,5%	20,7%	20,3%
Rohstoffe (Fläche)	119,4%	119,4%	112,9%	112,9%
Insgesamt (Fläche)	62,6%	62,3%	49,4%	49,0%

UDF= Urbane Dachfarm. Quelle: Eigene Berechnung.

Erfolgt der Güteraustausch international, so sind die Effekte etwas größer, jedoch kompensieren sie sich auch in diesem Fall nahezu vollständig (vgl. Tabelle 74). Auf dem aktuellen Stand der Technik erfolgt daher auch hier lediglich eine Verlagerung des Flächenbedarfs vom Nahrungssektor in den Energiesektor.

Tabelle 74: Auswirkungen von Urbanen Dachfarmen (UDF) mit einer Anlagenfläche von 2,0 m²/EW auf die Autonomiepotenziale im Kreis Konstanz bei internationalem Güteraustausch nach Sektoren

Sektor	Konventionell ohne UDF	Konventionell mit UDF	Ökologisch ohne UDF	Ökologisch mit UDF
Produktbezogene Autonomiepotenziale				
Nahrung (Kalorien)	116,2%	118,1%	75,9%	77,8%
Energie (kWh)	42,7%	39,9%	40,9%	38,2%
Rohstoffe (kg)	148,7%	148,7%	146,9%	146,9%
Durchschnitt	102,5%	102,2%	87,9%	87,6%
Flächenbezogene Autonomiepotenziale				
Nahrung (Fläche)	132,1%	136,4%	87,9%	91,4%
Energie (Fläche)	27,1%	26,5%	21,8%	21,3%
Rohstoffe (Fläche)	128,4%	128,4%	116,1%	116,1%
Insgesamt (Fläche)	62,3%	62,1%	46,5%	45,9%

UDF= Urbane Dachfarm. Quelle: Eigene Berechnung.

6.4.1.2.3.2 Urbane Aquaponik

Bei Aquaponikanlagen ist der Energiebedarf noch einmal deutlich höher als bei der reinen Gemüseproduktion und wirkt sich dementsprechend auf die Autonomiepotenziale aus. Hinzu kommt der Futterbedarf der Fischzucht, der sich auch auf die Futtermittelautonomie der klassischen Viehhaltung auswirkt. Infolgedessen sinken die Autonomiepotenziale bei der Versorgung mit Fleischprodukten (Schwein, Huhn) und Eiern deutlich, sodass die Aquaponik nicht so einen positiven Effekt auf die kalorienbezogene Nahrungsautonomie hat, wie Dachfarmen ohne Fischzucht. Im Fall der konventionellen Wirtschaftsweise führt dies sogar zu einem leichten Rückgang des kalorienbezogenen Nahrungsautonomiepotenzials von 116,2 auf 115,5 Prozent. Mit Blick auf die flächenbezogene Nahrungsautonomie führt Aquaponik damit auch zu erheblichen Einbußen: Bei konventioneller Wirtschaftsweise werden hier 9,3 Prozentpunkte Autonomie eingebüßt, was einem Verlust von 8,8 Prozent entspricht.

Bei ökologischer Wirtschaftsweise führt die Aquaponik zumindest kalorienbezogen zu einem Zugewinn an Autonomie von 1,8 Prozent, was einer Steigerung um 2,3 Prozent entspricht. Flächenbezogen ergibt sich aber auch bei ökologischer Wirtschaftsweise ein Autonomieverlust von 7,8 Prozentpunkten, was einer Reduktion der Autonomie um 10,0 Prozent entspricht. Das flächenbezogene Gesamtautonomiepotenzial sinkt aufgrund des erhöhten Bedarfs an Energie und Futtermitteln, dementsprechend deutlich – bei konventioneller Wirtschaftsweise um 3,0 Prozentpunkte (4,8 Prozent) und bei ökologischer Wirtschaftsweise um 2,5 Prozentpunkte (5,1 Prozent). Dies hat seine Ursache vor allem darin, dass der hohe Futterflächenbe-

darf die Flächenexportpotenziale abschmelzen lässt, die im Szenario 2035 bei der Fleischproduktion erzielt werden können und beachtliche Flächengutschriften ermöglichen. Dieser Verlust kann durch den Zugewinn im Bereich der Gemüseproduktion nicht kompensiert werden.

Tabelle 75: Auswirkungen von Aquaponik mit einer Anlagenfläche von 2,0 m²/EW auf die Autonomiepotenziale im Kreis Konstanz bei inländischem Güteraustausch nach Sektoren

Sektor	Konventionell ohne AqP	Konventionell mit AqP	Ökologisch ohne AqP	Ökologisch mit AqP
Produktbezogene Autonomiepotenziale				
Nahrung (Kalorien)	116,2%	115,5%	75,9%	77,7%
Energie (kWh)	42,7%	39,0%	40,9%	37,5%
Rohstoffe (kg)	148,7%	148,7%	146,9%	146,9%
Durchschnitt	102,5%	101,1%	87,9%	87,4%
Flächenbezogene Autonomiepotenziale				
Nahrung (Fläche)	106,0%	96,7%	73,2%	65,4%
Energie (Fläche)	26,0%	25,0%	20,7%	19,9%
Rohstoffe (Fläche)	119,4%	119,4%	112,9%	112,9%
Insgesamt (Fläche)	62,6%	59,6%	49,4%	46,9%

AqP= Aquaponik. Quelle: Eigene Berechnung.

Bei internationalem Güteraustausch sind die Auswirkungen der Aquaponik auf die flächenbezogene Nahrungsautonomie noch deutlicher. Bei konventioneller Wirtschaftsweise werden hier 15,3 Prozentpunkte (11,6 Prozent) Autonomie eingebüßt, bei ökologischer Wirtschaftsweise wiegt der Verlust mit 17,3 Prozentpunkten (19,7 Prozent) noch schwerer, da in diesem Fall ohnehin ein Importbedarf besteht.

Tabelle 76: Auswirkungen von Aquaponik mit einer Anlagenfläche von 2,0 m²/EW auf die Autonomiepotenziale im Kreis Konstanz bei internationalem Güteraustausch nach Sektoren

Sektor	Konventionell ohne AqP	Konventionell mit AqP	Ökologisch ohne AqP	Ökologisch mit AqP
Produktbezogene Autonomiepotenziale				
Nahrung (Kalorien)	116,2%	115,5%	75,9%	77,7%
Energie (kWh)	42,7%	39,0%	40,9%	37,5%
Rohstoffe (kg)	148,7%	148,7%	146,9%	146,9%
Durchschnitt	102,5%	101,1%	87,9%	87,4%
Flächenbezogene Autonomiepotenziale				
Nahrung (Fläche)	132,1%	116,8%	87,9%	70,6%
Energie (Fläche)	27,1%	26,0%	21,8%	20,8%
Rohstoffe (Fläche)	128,4%	128,4%	116,1%	116,1%
Insgesamt (Fläche)	62,3%	58,0%	46,5%	43,2%

AqP= Aquaponik. Quelle: Eigene Berechnung.

6.4.1.2.4 Potenzielle Fleischproduktion

Die potenzielle Fleischproduktion variiert in Abhängigkeit von den für den Futterbau aufgewendeten Ackerflächen und der gewählten Ernährungsweise. Denn je nach Höhe der Produktion von Eiern und Milchprodukten fallen, wie bereits dargestellt, gewisse Mengen an Fleisch an, weshalb auch bei vollständig vegetarischer Ernährung im Landkreis Konstanz und ökologischer Wirtschaftsweise bis zu 7 Kilogramm Fleisch pro Einwohner erzeugt werden, die für die menschliche Ernährung bereitgestellt werden können. Wird dieses Fleisch nicht im Landkreis verzehrt, muss es exportiert oder entsorgt werden. Der Landkreis Konstanz ist damit durchaus typisch für den Südwesten Deutschlands: Bei gleichem Anteil des Futterbaus an den Acker- und Grünlandflächen würden im gesamten Land Baden-Württemberg ca. 7,4 kg Fleisch pro Einwohner und Jahr erzeugt. Darüber hinaus stünden weitere Grünlandflächen zur Verfügung, die für die Weideviehhaltung bzw. eine grünlandbasierte Viehhaltung genutzt werden und einen Beitrag zur Ernährung leisten könnten.

Bei ökologischer Wirtschaftsweise und einem Futterflächenanteil an der Ackerfläche von 10 Prozent würden, angepasst an die Ernährungsweise „Eco-Mix“, ca. 11 kg Fleisch pro Einwohner erzeugt. Wendet man stattdessen, dem deutschen Durchschnitt des Jahres 2017 entsprechend, rund 46 Prozent des Ackerlandes für den Futterbau auf, können in Kombination mit der grünlandbasierten Haltung von Milchvieh und Rindern bei ökologischer Wirtschaftsweise bis zu 31 kg Fleisch pro Einwohner erzeugt werden. Bei konventioneller Wirtschaftsweise ist die Produktion von mehr als 90 kg Fleisch pro Einwohner möglich. Auf die flächenbezogenen Autonomiegrade wirkt sich die Verlagerung der Futterflächen in das eigene Gebiet nicht aus, sofern die Hektarerträge der Handelspartner auf dem gleichen Niveau liegen. Die kalorienbezogenen Autonomiegrade sinken hingegen infolge einer solchen Maßnahme deutlich. Erfolgt der Handel mit dem Ausland, kann ein Export von tierischen Produkten trotzdem zu einer Erhöhung des Autonomiegrades führen, wenn die Futtermittel aus heimischer Produktion stammen. Müssen tierische Produkte oder Futtermittel dagegen aus dem Ausland importiert werden, senkt dies die flächenbezogenen Autonomiegrade sowohl im Nahrungssektor als auch sektorenübergreifend.

6.4.1.2.5 Transportaufwand der Nahrungsversorgung

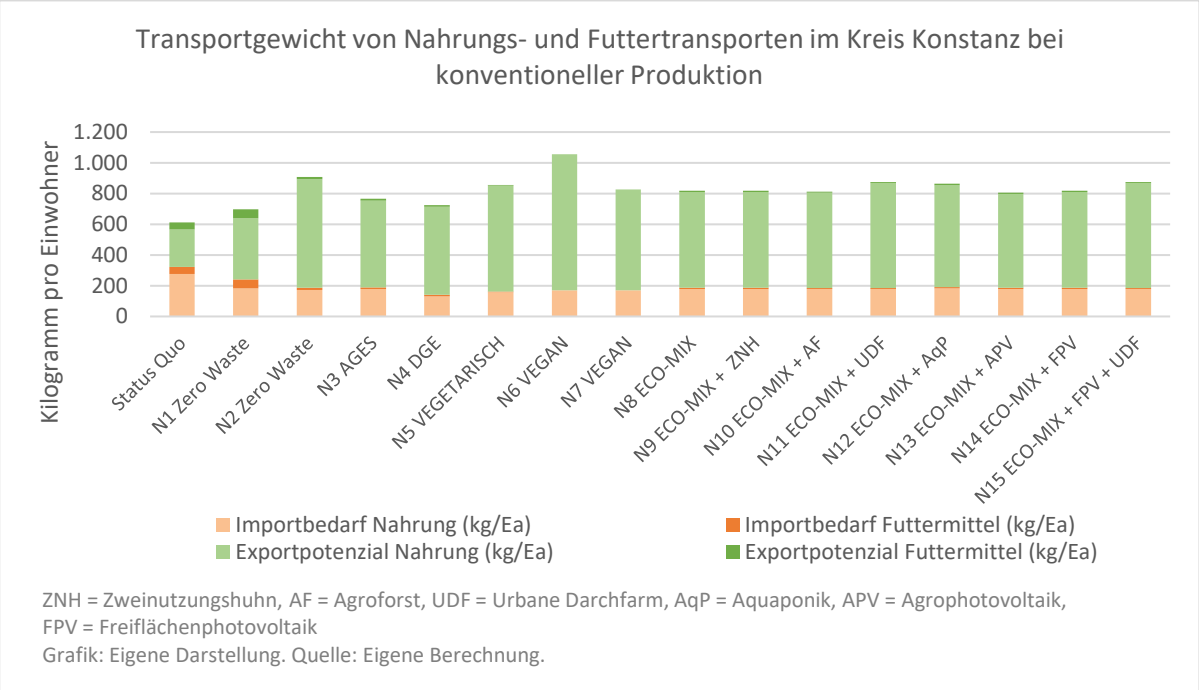
Das Gewicht der pro Person benötigten Nahrungsmittel bewegt sich, wie bereits dargestellt, bei heutigen Konsumgewohnheiten um ca. 820 Kilogramm. Je nach Ernährungsweise kann der Verbrauch jedoch stark variieren. Mit der Umstellung auf eine bestimmte Ernährungsweise ändern sich daher nicht nur die zu importierenden Mengen, sondern auch die Exportpotenziale in diversen Produktgruppen. Wie das Beispiel des Landkreises Konstanz im Szenario N01 zeigt, kann dabei das Gewicht der potenziell zu exportierenden Nahrungsmittel das Gewicht

der benötigten Nahrungsimporte deutlich übersteigen, selbst wenn ein Landkreis keinen Autonomiegrad von 100 Prozent oder mehr erreicht. Deshalb kann das Transportaufkommen eines Landkreises, wie in Abbildung 23 dargestellt, insgesamt sogar zunehmen, obwohl der Importbedarf durch eine Änderung der Ernährungsweise abnimmt. In den Szenarien wurde neben den Effekten verschiedener Ernährungsweisen auch untersucht, wie sich unterschiedliche Verhältnisse von Nahrungspflanzen- zu Futterpflanzenanbau auf die Autonomiegrade und die Transportmengen auswirken. Die Szenarien N1 und N2 unterscheiden sich daher lediglich in der Ackerflächennutzung. In Szenario N1 wurde das Verhältnis von Nahrungs- zu Futtermittelproduktion des Status Quo von (43 Prozent Nahrungspflanzen, 57 Prozent Futterpflanzen) beibehalten, während in Szenario N2 der Anteil der Futterpflanzen auf 15 Prozent reduziert wurde. Da der Viehbestand stets an die lokale Futterproduktion gekoppelt wurde, reduzierten sich dadurch im Szenario N2 der Importbedarf an Futtermitteln sowie die potenziellen Futtermittelexporte proportional zu den Veränderungen der Futterflächen. Anstelle eines Anstiegs bei den Futtermittelimporten erhöhte sich folglich der Import von tierischen Nahrungsmitteln (Fleisch, Wurst, Eier etc.). Gleichzeitig reduzierte sich der Importbedarf an pflanzlichen Nahrungsmitteln, während die potenziellen Exporte pflanzlicher Nahrungsmittel wiederum anwuchsen.

Die Ernährungsweisen nach AGES und DGE unterscheiden sich hinsichtlich des Transportaufkommens nur geringfügig, während eine vegetarische und insbesondere eine vegane Ernährung die potenziellen Exportmengen im Vergleich zu den Ernährungsweisen nach AGES und DGE deutlich erhöhen. Dies ist jedoch nur der Fall, wenn das Grünland weiterhin für den Export tierischer Nahrungsmittel genutzt wird. Der Vergleich der Szenarien N6 und N7 zeigt dagegen, wie sich das Exportpotenzial des Landkreises Konstanz (um 217 kg/Ea) reduziert, wenn bei veganer Ernährung auch auf eine grünlandbasierte Milchvieh- und Rinderhaltung mit dem Zweck des Milch- und Fleischexportes vollständig verzichtet wird. Dies verdeutlicht das Potenzial der grünlandbasierten Milchviehhaltung, einen wesentlichen Beitrag zur Ernährungssicherheit zu leisten.

Im Vergleich zu Veränderungen der Ernährungsweise haben Veränderungen auf der Seite der Erzeuger einen geringeren Einfluss auf das Transportaufkommen. Kombiniert man sie mit der Ernährungsweise Eco-Mix, führen sie zu folgenden Veränderungen: Durch Zweinutzungshühner nimmt der Transportaufwand geringfügig zu (um bis zu 0,3 Prozent bei ökologischer Wirtschaftsweise). Agroforstsysteme mit Walnussbäumen auf rund 5 Prozent der Ackerfläche (35 m²/Einwohner bzw. 1.000 Hektar) lassen bei konventioneller Produktion sowohl den Importbedarf als auch das Exportpotenzial im Nahrungssektor leicht sinken, was die Transportmenge um ca. 0,7 Prozent reduziert. Bei ökologischer Produktion nimmt die Importmenge um 0,9 Prozent zu, während der Export nahezu konstant bleibt, was die Transportmenge insgesamt

um 0,4 Prozent wachsen lässt. Durch Agrophotovoltaikanlagen auf rund 5 Prozent der Ackerfläche sinkt das Exportpotenzial konventionell um rund 1,4 Prozent und ökologisch um rund 1,3 Prozent, während der Importbedarf konventionell um 0,1 prozent und ökologisch um 0,7 Prozent zunimmt. In der Summe lässt Agro-PV die Transportmenge daher konventionell um 1,0 Prozent und ökologisch um 0,5 Prozent abnehmen. Freiflächenanlagen auf Grünland haben einen sehr geringen Einfluss auf die Transportmengen, wenn sie über Futterflächen errichtet werden. Ist dies nicht der Fall, beeinflussen sie auch die Nahrungstransporte nicht.



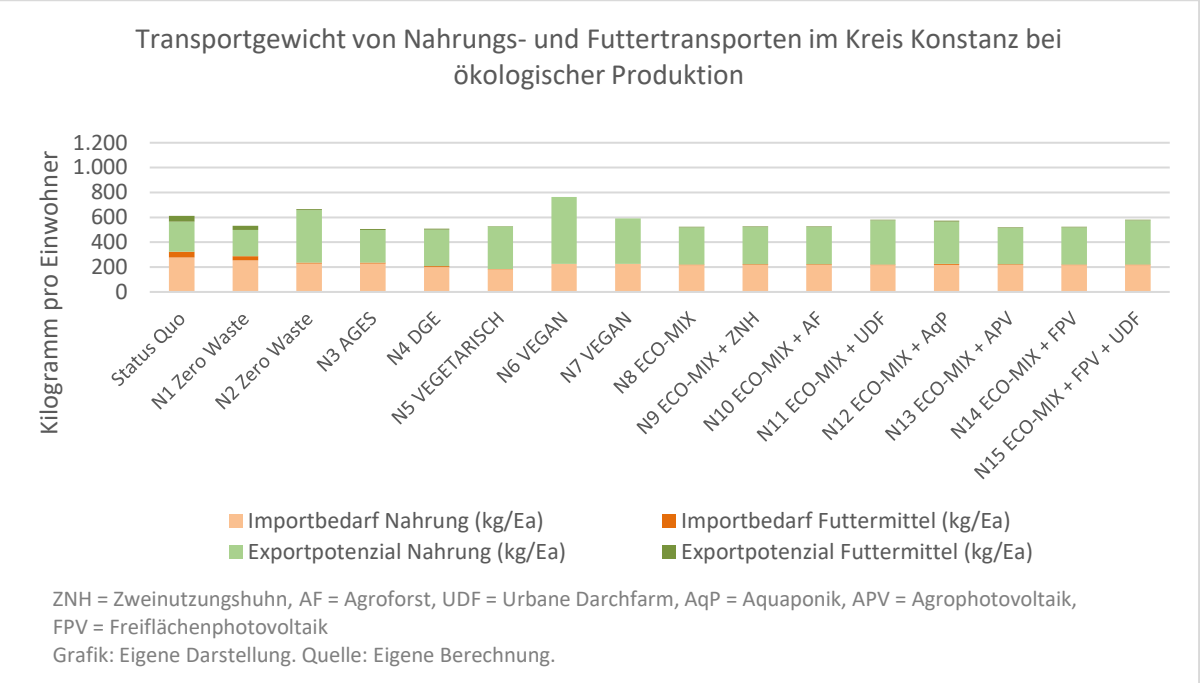
ZNH = Zweinutzungshuhn, AF = Agroforst, UDF = Urbane Darchfarm, AqP = Aquaponik, APV = Agrophotovoltaik, FPV = Freiflächenphotovoltaik
Grafik: Eigene Darstellung. Quelle: Eigene Berechnung.

Abbildung 23: Transportgewicht von Nahrungs- und Futtertransporten im Kreis Konstanz bei konventioneller Wirtschaftsweise nach Ernährungsweise und Technologie (kg/Ea)

Einen deutlich größeren Einfluss haben Urbane Dachfarmen. Bei einer reinen Gemüseproduktion nimmt die Transportmenge deutlich zu, und zwar konventionell um 7 Prozent und ökologisch um 11 Prozent. Aquaponikanlagen lassen die Transportmenge konventionell um 6 Prozent und ökologisch um 9 Prozent zunehmen. Dies gilt jedoch unter der Annahme, dass keine Anpassung der Produktion im Freilandanbau erfolgt. Beispielsweise könnte im Falle der Urbanen Dachfarmen die Gemüseproduktion im Freiland z. B. zugunsten des Getreide- oder Ölfrüchteanbaus reduziert werden. Im Falle der Aquaponik kommt es jedoch zu Verschiebungen in verschiedenen Bereichen: Betroffen sind davon neben der Gemüseversorgung auch die Transporte von Futtermitteln sowie von Fisch und Fleisch, da Viehhaltung und Fischproduktion teilweise in einer Konkurrenz um Futtermittel stehen. Hinsichtlich einer optimierten Abstimmung dieser Bereiche wird weiterer Forschungsbedarf gesehen, um die Transportmengen möglichst weitgehend reduzieren zu können.

Insgesamt ist zudem festzustellen, dass die potenziellen Transportaufkommen im Landkreis Konstanz bei einer ökologischen Landbewirtschaftung deutlich geringer ausfallen, als bei einer

konventionellen Wirtschaftsweise. Wie in Abbildung 24 dargestellt ist, beträgt das Transportgewicht in der Regel weniger als 600 kg/Ea und liegt damit meist um ein Drittel (24 bis 38 Prozent) unter dem Transportaufkommen, das bei einer konventionellen Produktion zu erwarten ist. Dies ist vor allem auf die reduzierten Exportpotenziale zurückzuführen, während die Importe ein wenig höher liegen als bei einer konventionellen Landbewirtschaftung.

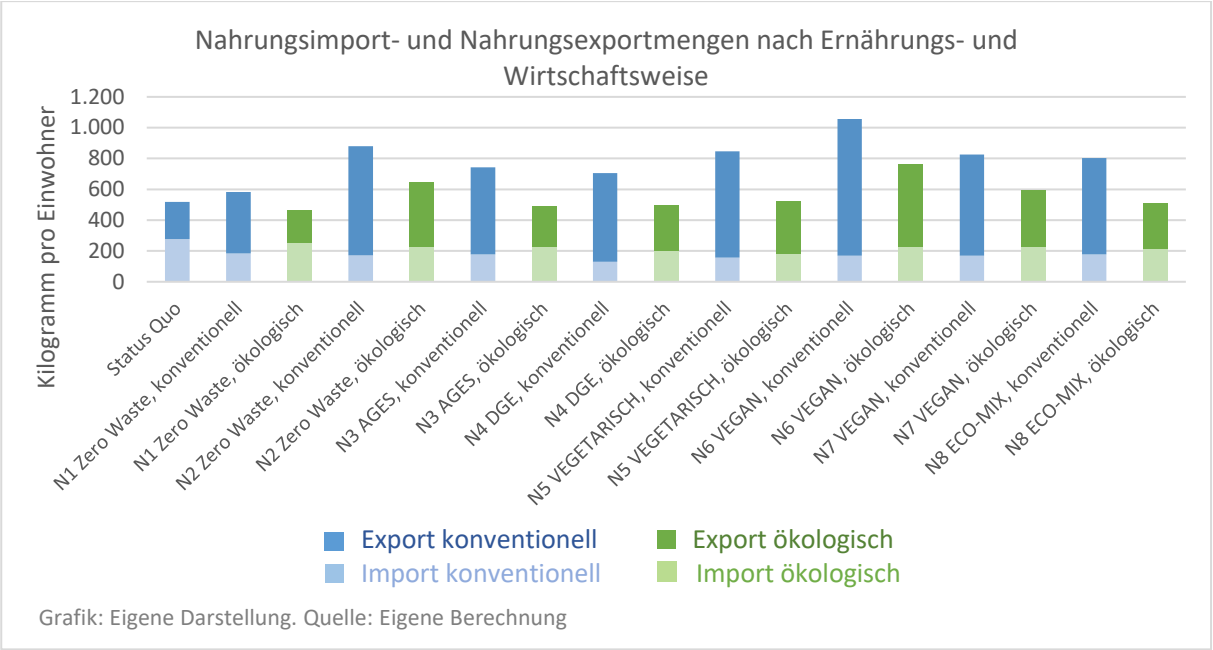


ZNH = Zweinutzungshuhn, AF = Agroforst, UDF = Urbane Darchfarm, AqP = Aquaponik, APV = Agrophotovoltaik, FPV = Freiflächenphotovoltaik
Grafik: Eigene Darstellung. Quelle: Eigene Berechnung.

Abbildung 24: Transportgewicht von Nahrungs- und Futtertransporten im Kreis Konstanz bei ökologischer Wirtschaftsweise nach Ernährungsweise und Technologie (kg/Ea)

Ein höherer Autonomiegrad ist folglich nicht zwangsläufig mit einem geringeren Transportaufwand verbunden. In Abbildung 25 sind die Unterschiede zwischen konventioneller und ökologischer Wirtschaftsweise im direkten Vergleich jeweils nach Ernährungsszenario dargestellt. Er verdeutlicht, dass im Landkreis Konstanz die Exporte eine deutlich größere Bedeutung für das Transportaufkommen haben als die Importe, sofern die gesamte Ackerfläche zur Nahrungsproduktion genutzt wird. Sie stehen in engem Zusammenhang mit dem erreichten Autonomiegrad, der bei konventioneller Produktion, gesunder Ernährung und reduzierter Verschwendung (Szenarien N2 bis N8) kalorienbezogen immer deutlich über 100 Prozent liegt.

Bei ökologischer Wirtschaftsweise bewegen sich die kalorienbezogenen Autonomiegrade dagegen nahe bei 100 Prozent, sodass sich die Import- und Exportmengen nicht so deutlich unterscheiden.



Grafik: Eigene Darstellung. Quelle: Eigene Berechnung

Abbildung 25: Nahrungsimport- und Nahrungsexportmengen nach Ernährungs- und Wirtschaftsweise

In Abbildung 26 sind die möglichen Aufkommen der Landkreise an zu transportierenden Nahrungsmitteln im Vergleich dargestellt. Der Vergleich der Landkreise zeigt, dass auch Landkreise mit geringer Bevölkerungsdichte und sehr hohen Autonomiepotenzialen, wie z. B. Ravensburg und Sigmaringen, noch einen erheblichen Importbedarf aufweisen. Einem großen Exportpotenzial bei tierischen Nahrungsmitteln steht hier ein relativ hoher Importbedarf bei pflanzlichen Nahrungsmitteln gegenüber.

Des Weiteren machen die Ergebnisse ersichtlich, dass der Transportaufwand bei der Ernährungsweise Eco-Mix nicht wesentlich geringer ist als bei anderen Ernährungsweisen, obwohl die Ackerflächenbelegung an dieser Ernährungsweise orientiert wurde. Dies deutet darauf hin, dass eine hundertprozentige Abstimmung von Erzeugung und Verbrauch aufeinander, durch welche der Transportaufwand auf einen Wert nahe Null reduziert wird, nicht ohne Weiteres zu erreichen und wahrscheinlich mit einem erheblichen zusätzlichen Planungsaufwand verbunden ist. Unter anderem ist eine gezielte Abstimmung der Verwertungsketten von Haupt- und Koppelprodukten erforderlich, wie z. B. im Falle der Speiseölproduktion, bei der neben Öl auch Presskuchen anfällt, der in vielen Fällen sowohl als Nahrungsmittel als auch als Futtermittel verwendet werden kann.

Ob es überhaupt möglich ist, den Transportaufwand der Nahrungsversorgung durch gezielte Planung annähernd auf null zu reduzieren und dabei eine gesunde und vollwertige Ernährung zu gewährleisten ohne dabei Exportpotenziale zu verschenken, könnte als Fragestellung für weitere Untersuchungen dienen. Zumindest scheint ein Potenzial zur Optimierung vorhanden zu sein, woraus sich weiterer Forschungsbedarf ableiten lässt. Dabei wäre zu prüfen, wie sich

etwa Änderungen bei der Landnutzung auf die Autonomiepotenziale, das Transportaufkommen und die Umweltbilanz auswirken würden. Dabei müssen die klimarelevanten Folgen von Landnutzungsänderungen im Verhältnis zu den Veränderungen im Bereich des Transportaufwandes betrachtet werden. In dicht besiedelten Stadt- und Landkreisen, wie z. B. im Kreis Esslingen oder im hier ergänzten Stadtkreis Stuttgart besteht nur wenig Spielraum, den Transportaufwand durch eine darauf abgestimmte Produktion zu reduzieren. Allerdings bietet urbane Landwirtschaft ein gewisses Potenzial, z. B. gefragte Gemüsesorten mit hohen Transportgewichten und geringer Kaloriendichte (kcal/100 g) gezielt vor Ort zu erzeugen. Aquaponik kann dagegen den Transportaufwand unter Umständen sogar erhöhen. Die Gründe dafür sind der Futtermittelbedarf der Aquaponik und die mögliche Konkurrenz zur einheimischen Viehhaltung um lokal produzierte Futtermittel. Somit kann Aquaponik nicht nur den Importbedarf an Fischfutter erhöhen, sondern auch indirekt den Bedarf an Fleischimporten oder an Futtermittelimporten für die Fleischproduktion.

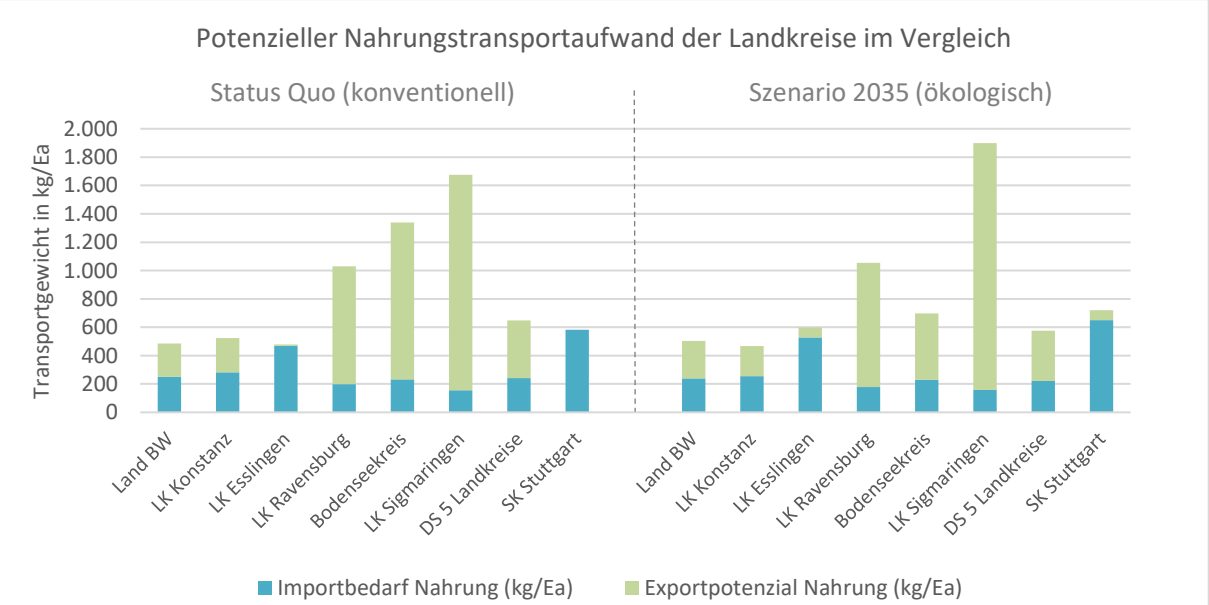


Abbildung 26: Potenzieller Nahrungstransportaufwand der Landkreise im Vergleich

6.4.2 Potenzielle Energieautonomie

Das Energieautonomiepotenzial eines Landkreises wird durch Faktoren bestimmt, die mit den Faktoren vergleichbar sind, die das Nahrungsautonomiepotenzial bestimmen. So entscheiden auch hier vor allem die Verbrauchsgewohnheiten, vorhandene Flächenpotenziale, die Wirtschaftsweise sowie Maßnahmen zur Steigerung der Flächeneffizienz über die Möglichkeiten, hohe Autonomiegrade zu erreichen.

Vergleichbar mit dem Nahrungssektor, in dem zwischen dem kalorienbezogenen und dem flächenbezogenen Autonomiegrad unterschieden werden muss, ist auch im Energiesektor zwischen dem energiebezogenen und flächenbezogenen Autonomiegrad zu differenzieren.

6.4.2.1 Energiebedarf des Landkreises Konstanz

Der Flächenbedarf der Energieversorgung wird durch den Endenergiebedarf, die Flächenerträge der erneuerbaren Energien und die gewählte Wirtschaftsweise bestimmt. Der Energiebedarf resultiert aus dem Konsumverhalten sowie aus der Wahl der Energieträger und Technologien, die etwa zur Gebäudebeheizung oder zum Antrieb von Kraftfahrzeugen genutzt werden und den Energiemix prägen. Der Endenergieverbrauch und seine Zusammensetzung wurden auf Basis der zu den Landkreisen vorliegenden Daten geschätzt. Mit ca. 25,2 MWh/Ea liegt er im Landkreis Konstanz um mehr als 2 MWh/Ea unter dem Landesdurchschnitt und um ca. 0,6 MWh/Ea über dem Durchschnitt der fünf Landkreise, die in dieser Untersuchung genauer betrachtet wurden. Den größten Anteil am Endenergieverbrauch hat Erdgas mit rund 27 Prozent. Rund 23 Prozent des Endenergieverbrauchs entfallen auf die Treibstoffe Benzin und Diesel, etwa 21 Prozent auf Strom und rund 19 Prozent auf Heizöl.

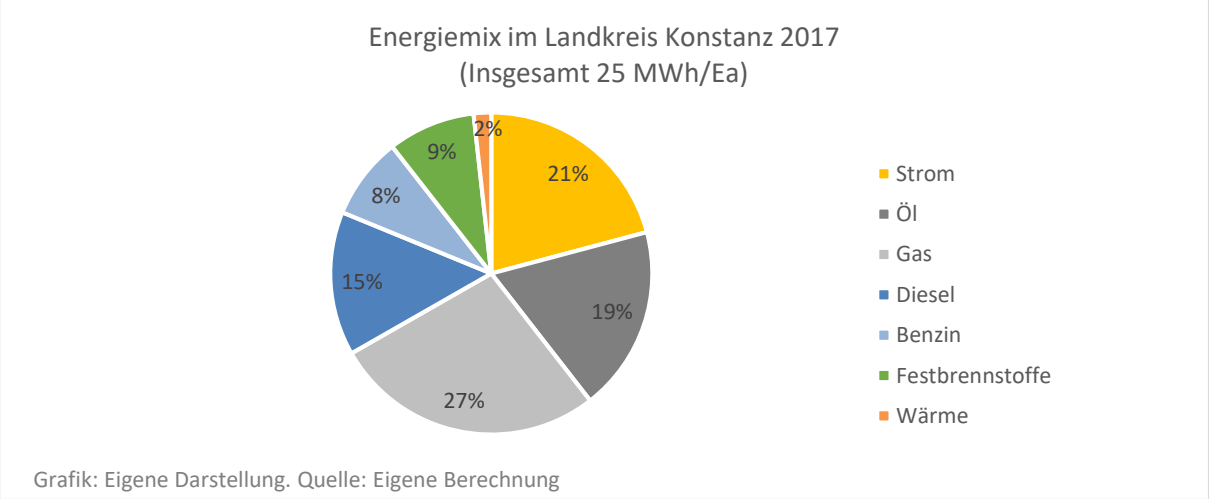


Abbildung 27: Energiemix des Landkreises Konstanz 2017

Damit haben Flüssigbrennstoffe einen Anteil von mehr als 42 Prozent. Im Vergleich weisen sie unter den erneuerbaren Energieträgern den größten Flächenbedarf pro Megawattstunde Endenergie auf. Erdgas, mit einem Anteil von 27 Prozent an zweiter Stelle, weist ebenfalls einen relativ hohen Flächenbedarf auf. Energieträger wie Strom und Festbrennstoffe, die bei

einer Gewinnung aus erneuerbaren Quellen mit einer vergleichsweise geringen Flächeninanspruchnahme verbunden sind, tragen nur rund 26 Prozent zur Deckung des Endenergieverbrauchs bei. Sehr gering ist der Anteil der Solarthermie, der auf ca. ein halbes Prozent geschätzt wird.

6.4.2.2 Flächenbedarf der Energieversorgung im Landkreis Konstanz

Um den heutigen Energiebedarf im Landkreis Konstanz ausschließlich mit erneuerbaren Energien zu decken werden bei konventioneller Landbewirtschaftung ca. 0,897 Hektar Produktionsfläche pro Einwohner benötigt. Im Jahr 2017 entsprach dies etwa 419 Prozent der wirtschaftlich genutzten Freiflächen (LNF und forstwirtschaftliche Flächen). Bei ökologischer Wirtschaftsweise steigt der Flächenbedarf der Energieversorgung um ca. 30 Prozent auf ca. 1,169 Hektar pro Einwohner, was im Jahr 2017 rund 547 Prozent der wirtschaftlich genutzten Freiflächen (LNF und forstwirtschaftliche Flächen) entsprach.

Dabei entfällt mit 39 Prozent der größte Teil des Flächenbedarfs auf den Verkehrssektor. Der Anteil des Wohnens ist mit 36 Prozent kaum geringer. Rund 14 Prozent entfallen auf den Sektor GHD einschließlich der öffentlichen Verbraucher. Vergleichsweise gering sind die Flächenbedarfe der Industrie mit 7 Prozent und der Landwirtschaft mit weniger als 3 Prozent. Nach Energieträgern differenziert fällt der hohe Anteil ölbasierter Brennstoffe auf. In der Summe entfallen auf die Ölprodukte Heizöl (40 Prozent) und Diesel (31 Prozent) beinahe drei Viertel des Flächenbedarfs. Es folgen Gas mit 17 Prozent, Bioethanol mit 9 Prozent und Festbrennstoffe mit rund 3 Prozent. Der Verbrauch von Strom fällt mit einem Prozent kaum ins Gewicht. Der geringe Flächenbedarf der Festbrennstoffe ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass viele Festbrennstoffe als Nebenprodukt anderer Produkte anfallen und bei einem gezielten Anbau relativ hohe Erträge liefern (z. B. Miscanthus).

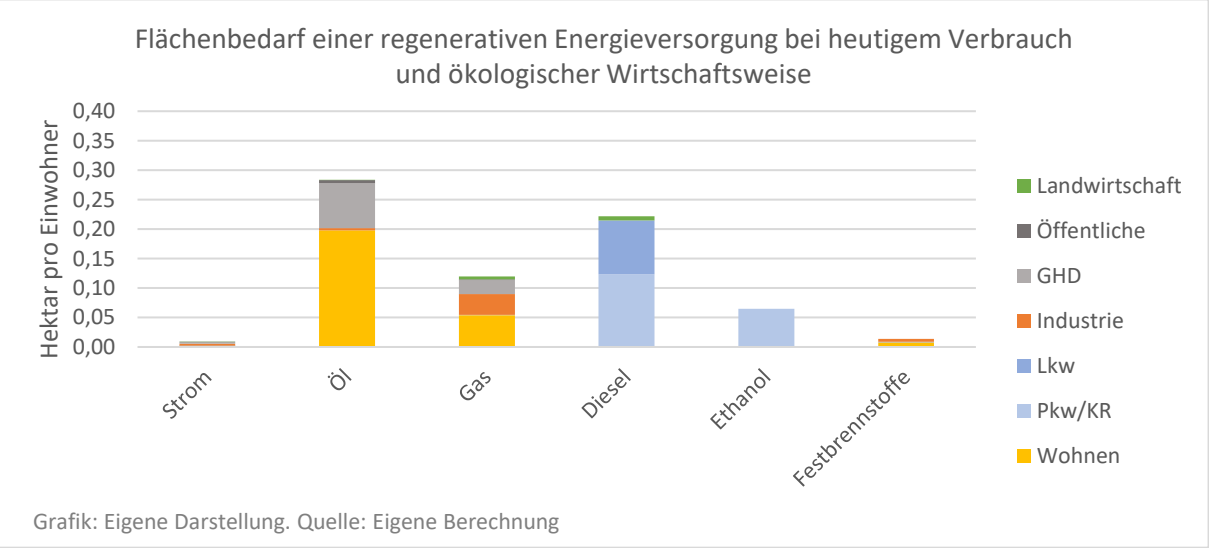


Abbildung 28: Flächenbedarf einer regenerativen Energieversorgung bei heutigem Verbrauch und ökologischer Wirtschaftsweise nach Energieträgern und Verbrauchern

Im Bereich der Energieerzeugung bieten vor allem solche Maßnahmen die Möglichkeit, den flächenbezogenen Autonomiegrad zu erhöhen, die Photovoltaikanlagen mit anderen Nutzungen kombinieren (z. B. Agro-PV) oder die Flächeneffizienz der Biomasseproduktion steigern. Als solche sind zuvorderst die Nutzung von Stroh und anderen Pflanzenresten sowie der Einsatz flächeneffizienter Energie- und Rohstoffpflanzen zu nennen. Hohe Erträge liefern herkömmliche Energiepflanzen nur im konventionellen Anbau. Der Umstieg auf ökologischen Landbau lässt daher die flächenbezogenen Autonomiegrade deutlich sinken, wenn nicht zugleich ein Umstieg auf Energiepflanzen der zweiten Generation erfolgt. Dies erfordert jedoch Anpassungen auf der Seite der Verbraucher, beispielsweise bei der Gebäudebeheizungsstruktur. Ansonsten kann der Flächenbedarf eines regenerativen Energiesektors nur durch Maßnahmen zur Energieeinsparung und den Umstieg auf effiziente strombasierte Technologien deutlich reduziert werden. Ohne eine solche Elektrifizierung können Agrophotovoltaikanlagen über Energiepflanzenflächen trotz einer Steigerung der Flächeneffizienz sogar zu Einbußen beim flächenbezogenen Energieautonomiegrad führen.

Die Effekte verschiedener Maßnahmen in den Bereichen Effizienz, Einsparung und Elektrifizierung bei ökologischer Wirtschaftsweise sind, beginnend mit dem Szenario E13, in Abbildung 29 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Gebäudedämmung zur Verbesserung des Energiestandards auf 55 kWh/m² in Szenario E13 mit einer Reduktion des Flächenbedarfs um 17 Prozent einen großen Effekt hat, der jedoch geringer ausfällt als jener Effekt, den die Veränderung der Gebäudebeheizungsstruktur in Szenario E14 mit 28 Prozent Reduktion bewirkt. Die Kombination beider Maßnahmen in Szenario E15 bewirkt im Vergleich zu Szenario E14 zwar eine erhebliche Endenergieeinsparung, aber mit nur 2 weiteren Prozentpunkten keine wesentliche Reduktion des Flächenbedarfs mehr, da die veränderte Gebäudebeheizung in diesen Szenarien zu 70 Prozent auf Wärmepumpen basiert und nur noch ein Prozent Ölheizungen und fünf Prozent Gasheizungen enthält. Die zusätzliche Reduktion des spezifischen Treibstoffverbrauchs der Pkw je 100 km Fahrleistung um ein Drittel in Szenario E16 bewirkt eine weitere Reduktion um 14 Prozentpunkte. Die Reduktion der Pkw-Fahrleistung um ein Drittel in Szenario E17 führt zu einer zusätzlichen Reduktion um 6,3 Prozentpunkte. Die Elektrifizierung von drei Vierteln der Pkw in Szenario E18 senkt den Flächenbedarf um weitere 10,7 Prozentpunkte.[28] Eine Reduktion der Lkw-Fahrleistung in Szenario E19 bewirkt eine zusätzliche Reduktion um 2,7 Prozentpunkte, die Elektrifizierung der leichten Nutzfahrzeuge (LNF) in Szenario E20 führt zu einer Senkung um weitere 1,8 Prozentpunkte. Eine Elektrifizierung von 50 Prozent der schweren Nutzfahrzeuge in Szenario E21 bewirkt mit einer Reduktion um 1,8 Prozentpunkte den gleichen Effekt. Die vollständige Elektrifizierung der Busse in Szenario E22

[28] Bei der Priorisierung von Maßnahmen, die den Pkw-Verkehr betreffen, ist zu bedenken, dass eine andere Reihenfolge der Maßnahmen zu anderen Prozentwerten bei den einzelnen Maßnahmen führt, wenn auch ihre Summe stets die gleichen Effekte zeigt. Gleiches gilt für den Lkw-Verkehr.

hat mit einer Einsparung von 0,5 Prozentpunkten den geringsten Effekt. Die Elektrifizierung der Landmaschinen in Szenario E23 reduziert den Flächenbedarf um einen Prozentpunkt. Keinen nennenswerten Effekt hat die Stromeinsparung von 20 Prozent in den Haushalten, die in Szenario E24 als Maßnahme hinzugefügt wurde. Eine Reduktion um 6,3 Prozentpunkte bewirken dagegen die Energieeinsparungen im Sektor GHD, die in Szenario E25 ergänzt wurden. Vergleichsweise gering ist der Effekt, den die angenommenen Energieeinsparungen der Industrie in Szenario E26 mit 3,7 Prozentpunkten haben. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass der Energiemix des GHD-Sektors einen deutlich höheren Ölanteil aufweist. So verbraucht der Industriesektor nur ein Achtel des Ölverbrauchs, der bisher im Sektor GHD zu verzeichnen ist.

Insgesamt senken die berücksichtigten Maßnahmen den Flächenbedarf des Energiesektors bei Umstellung auf ökologische Wirtschaftsweise um 73 Prozent von 0,897 auf 0,241 Hektar pro Person und Jahr. Wird die konventionelle Wirtschaftsweise beibehalten, führen dieselben Maßnahmen zu einer Reduktion um 78 Prozent von 0,897 auf 0,196 Hektar pro Person und Jahr. Der verbleibende Flächenbedarf ist somit bei ökologischer Wirtschaftsweise um ca. 23 Prozent oder 0,045 Hektar/Ea größer als bei konventioneller Wirtschaftsweise.

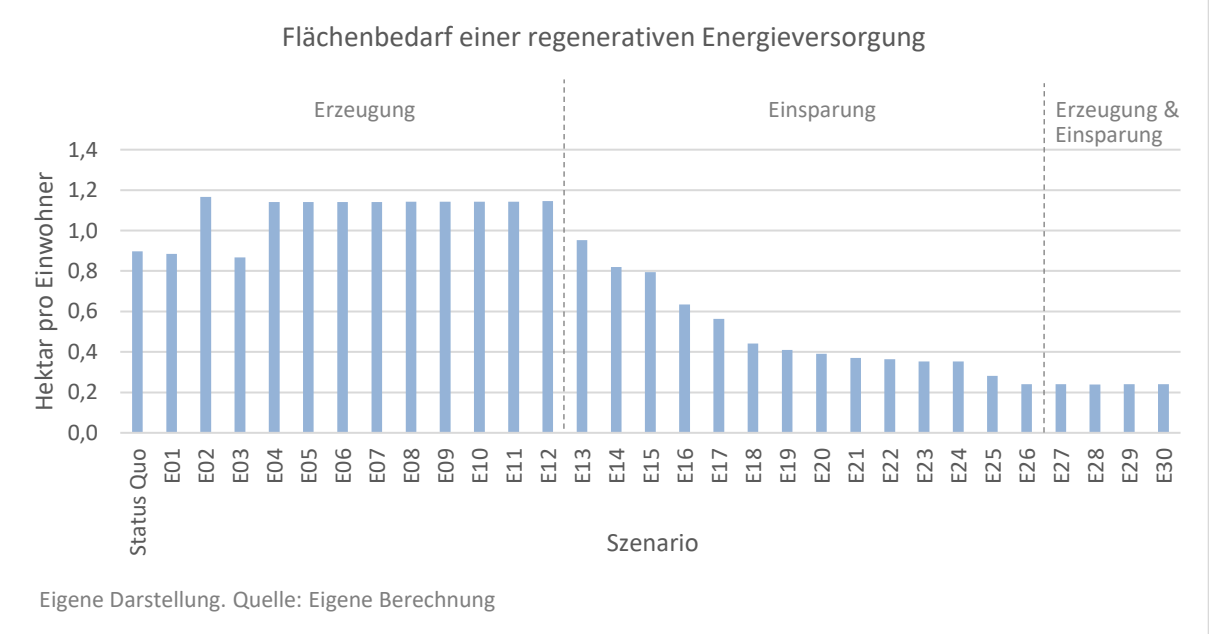


Abbildung 29: Flächenbedarf einer vollständig regenerativen Energieversorgung pro Einwohner

In Abbildung 30 ist der verbleibende Flächenbedarf der Energieversorgung im Szenario E30 (Abb. rechts) im Vergleich zu dem Flächenbedarf dargestellt, der sich bei regenerativer und ökologischer Energiegewinnung aus dem heutigen Verbrauch (Abb. links) ergibt. Die graphische Darstellung macht anschaulich, dass der verbleibende Flächenbedarf vor allem auf den Ölverbrauch im Sektor GHD, den Dieselverbrauch der Lastkraftwagen und den Gasverbrauch

der Industrie zurückzuführen ist. Um den Flächenbedarf weiter zu reduzieren, müssen anschließende Maßnahmen daher vor allem an diesen drei Stellen ansetzen.

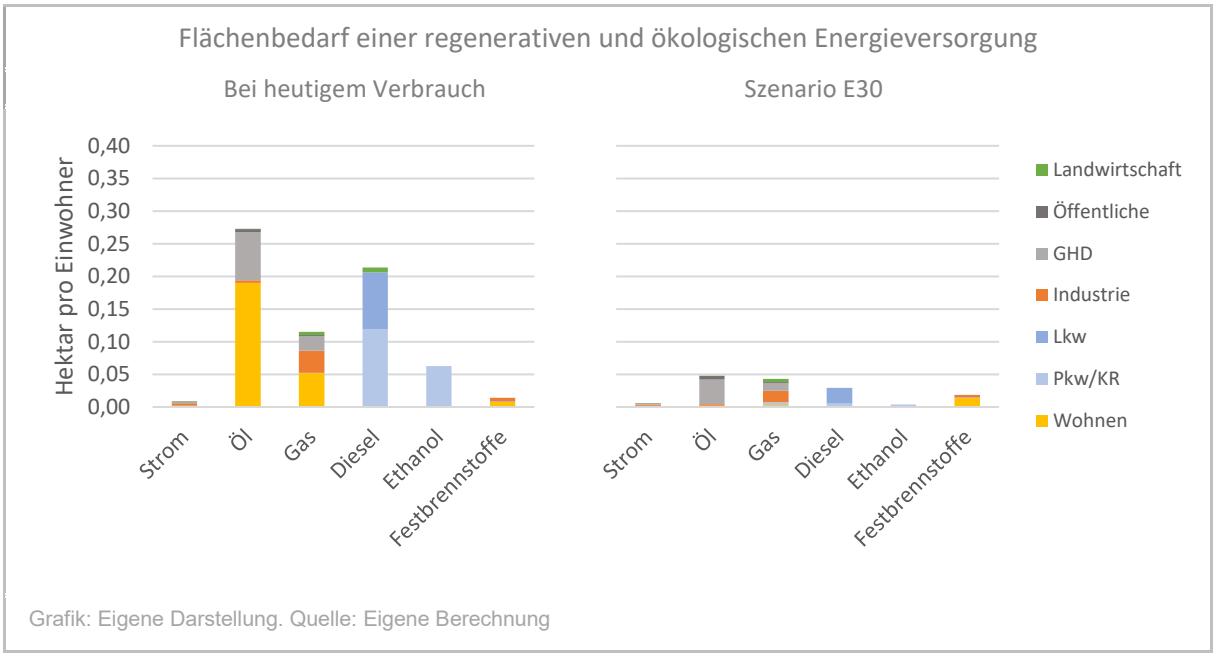


Abbildung 30: Flächenbedarf einer regenerativen und ökologischen Energieversorgung bei heutigem Verbrauch und im Szenario E30 nach Energieträgern und Verbrauchern

6.4.2.3 Energiebedarfsbezogenes Autonomiepotenzial im Kreis Konstanz

Im Landkreis Konstanz lag der geschätzte Energieautonomiegrad im Jahr 2017 (Status Quo) je nach Energiepflanzenwahl und Restpflanzennutzung zwischen 8 und 13 Prozent, bezogen auf den Endenergiebedarf [29]. Bisher basiert die erneuerbare Energiebereitstellung im Landkreis Konstanz vor allem auf Solar- und Bioenergie.

6.4.2.3.1 Maßnahmen zur Steigerung der Energieerzeugung (Szenarien E01 – E12)

Energiepflanzen werden in Deutschland bisher auf knapp einem Fünftel der Ackerfläche kultiviert. Nutzt man 100 Prozent der Ackerfläche für den konventionellen Anbau von Energiepflanzen der ersten Generation, lässt sich der Energieautonomiegrad im Kreis Konstanz durch diese Maßnahme um 6,7 Prozent steigern. Bei einem ökologischen Anbau von Energiepflanzen wird eine Steigerung um 4,5 Prozent erreicht. Wirtschaftet die Landwirtschaft insgesamt ökologisch, wie in Szenario E02 dargestellt, wird insgesamt jedoch nur eine Steigerung um 2,8 Prozent gegenüber dem Status Quo erreicht. Die geringere Steigerung in diesem Szenario ist damit zu erklären, dass neben den Energiepflanzen auch die grünlandbasierte Viehhaltung und sonstige Grünlandnutzungen bei ökologischer Bewirtschaftung geringere Energieerträge liefern können.

[29] Der Energieautonomiegrad des Jahres 2017 musste geschätzt werden, da für das Jahr 2017 keine Daten zur erneuerbaren Energieerzeugung vorlagen. Die Schätzung geht von einer Fortsetzung der Entwicklung aus, die sich in den Jahren 2011 bis 2015 zeigte.

Bei einem konventionellen Anbau von Energiepflanzen der zweiten Generation auf der gesamten Ackerfläche (Szenario E03) lässt sich der Autonomiegrad um 6,9 Prozentpunkte steigern. Eine ähnliche Steigerung sollte auch bei einem ökologischen Anbau möglich sein, da sich der ökologische Anbau von Energiepflanzen der zweiten Generation im Vergleich zum konventionellen Anbau nur geringfügig unterscheidet und die Erträge unwesentlich geringer ausfallen. Die erwarteten Effekte des ökologischen Anbaus sind in dem Szenario E04 dargestellt.

Ein Ausbau der Dachflächenphotovoltaik in Szenario E05 mit vollständiger Ausschöpfung des Potenzials von 20 m² pro Einwohner (vgl. LUBW, 2019a) führt mit einem Zuwachs von 7,2 Prozentpunkten zu einer Steigerung des Autonomiegrades in ähnlicher Größenordnung wie ein Anbau von Energiepflanzen auf 100 Prozent der Ackerfläche. Im Gegensatz zur Energiepflanzennutzung wird durch die Dachflächenphotovoltaik allerdings die Nahrungsproduktion nicht verdrängt.

Die Nutzung von Freiflächenphotovoltaikanlagen auf 10 Prozent des Grünlandes (rund 39 m² Anlagenfläche pro Einwohner) in Szenario E06 würde mit ca. 9,2 Prozentpunkten einen größeren Zugewinn ermöglichen, als die vollständige Nutzung des Dachflächenphotovoltaikpotenzials.

In Szenario E07 wurde die Anlagenfläche der Freiflächenphotovoltaik auf Grünland auf 16 Prozent des Grünlandes ausgeweitet, um den direkten Vergleich mit Agrophotovoltaik auf Ackerland in Szenario E08 zu erhalten. Im Jahr 2017 entsprachen sowohl 16 Prozent des Grünlandes als auch 10 Prozent des Ackerlandes jeweils einer Fläche von rund 66 m² pro Einwohner. Eine Anlagenfläche dieser Größe führt auf Grünland zu einem Zugewinn von rund 14,8 Prozentpunkten (Szenario E07). Auf Ackerland ist ein etwas geringerer Zugewinn von ca. 14,1 Prozent zu erwarten (Szenario E08), da die erwarteten Ertragseinbußen des Energiepflanzenanbaus unterhalb der PV-Anlagen stärker ins Gewicht fallen als die Ertragseinbußen, die unterhalb der PV-Anlagen auf Grünland zu erwarten sind.

In Szenario E09 wurden sowohl 10 Prozent des Grünlandes als auch 10 Prozent des Ackerlandes mit Agrophotovoltaikanlagen belegt, was zu einem produktbezogenen Energieautonomiegrad von 50,7 Prozent führt, wozu die Agrophotovoltaikanlagen mit 23,3 Prozentpunkten fast die Hälfte beitragen. In Szenario E10 werden darüber hinaus 10 Prozent der Ackerfläche für Agrothermie genutzt, was zu einer Steigerung um 4,3 Prozentpunkte führt. Die zusätzliche Nutzung des Windenergiepotenzials in Szenario E11 führt im Landkreis Konstanz zu einer Erhöhung des Energieautonomiepotenzials um rund 1 Prozentpunkt.

Um bei heutigem Endenergieverbrauch – ohne Berücksichtigung von Speicherverlusten – einen Energieautonomiegrad von 100 Prozent zu erreichen, müssten die Agrophotovoltaikanlagen bei einem Stromertrag von rund 570 MWh/ha und vollständiger Nutzung des Dachflächenphotovoltaikpotenzials auf ca. 30 Prozent der landwirtschaftlichen Nutzfläche (Acker- und

Grünland) ausgedehnt werden. Diese Variante ist in Szenario E12 dargestellt. Betrachtet man die Autonomiegrade, die in diesem Szenario in den drei Energiesektoren erreicht werden, zeigt sich, dass selbst in diesem Szenario der Wärmebedarf nicht einmal zur Hälfte gedeckt werden kann, während der Bedarf an Treibstoffen weiterhin nahezu vollständig durch Importe gedeckt werden muss. Der enorme Überschuss im Stromsektor, der in Abbildung 31 dargestellt ist, macht aber auch deutlich, dass bei einer Umstellung auf strombasierte Technologien im Verkehr und in der Gebäudebeheizung ausreichend Energie für die Deckung des Eigenbedarfs vorhanden wäre, da Elektroautos und Wärmepumpen deutlich weniger Endenergie benötigen, um die gleiche Leistung zu erbringen wie Systeme, die auf der Verbrennung von Gas oder Erdölprodukten basieren.

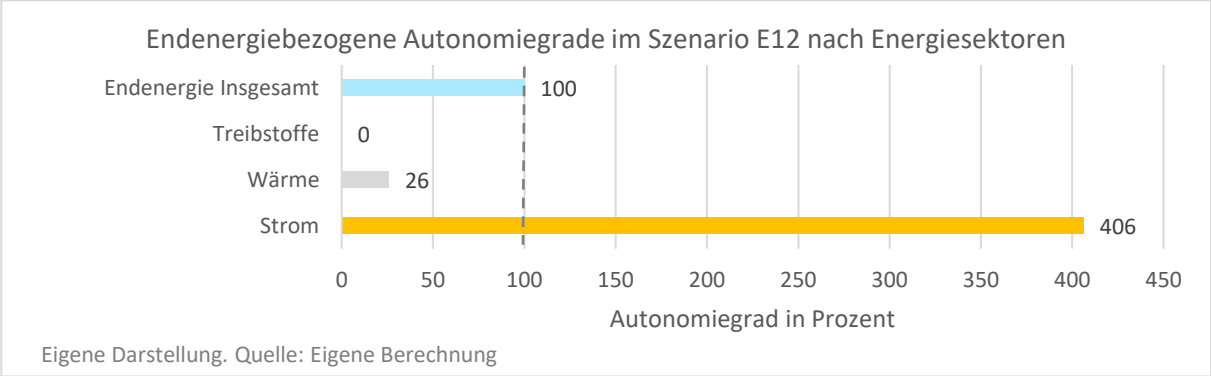


Abbildung 31: Endenergiebezogene Autonomiegrade im Szenario E12 nach Energiesektoren

6.4.2.3.2 Maßnahmen zur Energieeinsparung (Szenarien E13 bis E26)

Die Auswirkungen möglicher Maßnahmen zur Reduktion des Verbrauchs wurden anhand der Szenarien E13 bis E26 bestimmt. Dies umfasst sowohl technische Maßnahmen zur Effizienzsteigerung sowie Verhaltensänderungen, wie z. B. die Reduktion der Pkw-Nutzung (Mobilitätsverhalten).

Relativ deutliche Effekte auf den energiebezogenen Autonomiegrad haben unter diesen Maßnahmen die Gebäudesanierung zur Erhöhung des Energiestandards in Szenario E13 und die Veränderung der Gebäudebeheizungsstruktur in Szenario E14, die sich mit Autonomiezugewinnen von 3,3 und 3,1 Prozentpunkten ganz ähnlich auswirken. Keine andere untersuchte Einzelmaßnahme bewirkt einen derart großen Effekt.[30] Werden beide Maßnahmen wie in Szenario E15 kombiniert, steigt der energiebedarfsbezogene Autonomiegrad im Vergleich zum Status Quo insgesamt um 5,2 Prozentpunkte.

[30] In der Praxis erfordert der Einbau von Wärmepumpen in Bestandsgebäude allerdings in vielen Fällen eine vorbereitende energetische Sanierung der Gebäude oder zumindest den Einbau von Flächenheizungen, sodass die Sanierung der Gebäudehülle und de Austausch der Heizung meist miteinander verbunden sind.

Die Steigerung der Energieeffizienz des Kfz-Bestandes in Szenario E16 zur Reduktion des spezifischen Treibstoffverbrauchs je 100 km Fahrleistung [31] führt zu einer Erhöhung des Autonomiegrades um 2,5 Prozentpunkte. Die anschließende Reduktion der Pkw-Fahrleistung um ein Drittel wirkt sich in Szenario E17 mit einem Zugewinn von 1,3 Prozentpunkten aus. Die angenommene Veränderung der Pkw-Motorisierung inkl. der Erhöhung des Anteils von Elektrofahrzeugen an der Pkw-Fahrleistung auf 75 Prozent in Szenario E18 führt zu einem Zugewinn von 1,4 Prozentpunkten. Dabei ist zu bedenken, dass die Maßnahmen hier aufeinander folgen. Bei unveränderter Fahrleistung und unverändertem Treibstoffverbrauch der Verbrennungsmotoren wirkt sich ein Umstieg auf 75 Prozent Elektrofahrzeuge mit einem Effekt von 2,1 Prozentpunkten deutlich stärker aus, als wenn der Elektrifizierung bereits Effizienzsteigerungen und eine Reduktion des Verkehrs vorausgegangen sind.

Die Reduktion der Nutzfahrzeug-Fahrleistung (SNF & LNF) um ein Drittel in Szenario E19 führt zu einem Autonomiezugewinn von 0,7 Prozentpunkten. Die anschließende vollständige Elektrifizierung der leichten Nutzfahrzeuge in Szenario E20 bringt einen Zugewinn von 0,3 Prozentpunkten. Eine Elektrifizierung von 50 Prozent der schweren Nutzfahrzeuge in Szenario E21 führt zu einem Zugewinn von 0,2 Prozentpunkten. Die vollständige Elektrifizierung der Busse in Szenario E22 bewirkt dagegen nur eine Steigerung um ca. 0,1 Prozentpunkte. Die Elektrifizierung der Landmaschinen in Szenario E23 hat mit einem Zugewinn von mehr als 0,2 Prozentpunkten einen größeren Effekt. Insgesamt bewirken die auf die Nutzfahrzeuge bezogenen Maßnahmen einen Autonomiezugewinn von 1,5 Prozentpunkten.

Insgesamt bewirken die auf den Verkehr bezogenen Maßnahmen einen Autonomiezugewinn von 6,6 Prozentpunkten.

Die Reduktion des Stromverbrauchs der Privathaushalte um 20 Prozent in Szenario E24, wie sie beispielsweise in Frankfurt bei dem Projekt „Frankfurt spart Strom“ von den teilnehmenden Haushalten erreicht wurde, erhöht den energiebezogenen Autonomiegrad um knapp 0,6 Prozentpunkte.

Die in Szenario E25 angenommene Reduktion des Energieverbrauchs im Sektor GHD um 38 Prozent steigert den Energieautonomiegrad um 3,9 Prozentpunkte. Die in Szenario E26 angenommene Reduktion des Energieverbrauchs der Industrie um ein Drittel Prozent steigert den Autonomiegrad um 6,0 Prozentpunkte.

Insgesamt steigern die dargestellten Maßnahmen zur Energieeinsparung die Autonomiegrade bei den einzelnen Energieträgergruppen mit Ausnahme des Stroms deutlich. Je nach Energieträgergruppe und Energiepflanzenkombination werden zwischen 3 und 135 Prozent Autonomie erreicht. Energiepflanzen der ersten Generation liefern in ihrer aktuellen Kombination

[31] Angenommen wurde eine Treibstoffeinsparung bei Pkw von 40 Prozent, bei LNF von 20 Prozent und bei SNF und Bussen von 10 Prozent. (Vgl. 6.1.4)

mehr Flüssigbrennstoffe und können im Szenario E26 auch bei ökologischem Anbau einen relevanten Anteil des Treibstoffbedarfs decken (vgl. Abbildung 32). Energiepflanzen der zweiten Generation liefern dagegen vor allem Festbrennstoffe und Biogas. Bei ökologischer Wirtschaftsweise ist mit Energiepflanzen der zweiten Generation allerdings ein deutlich höherer Gesamtautonomiegrad zu erreichen. In der gewählten Pflanzenkombination ermöglicht die ökologische Nutzung von Energiepflanzen der zweiten Generation einen um ca. 8 Prozentpunkte höheren Autonomiegrad als ökologisch angebaute Energiepflanzen der ersten Generation (vgl. Abbildung 33).

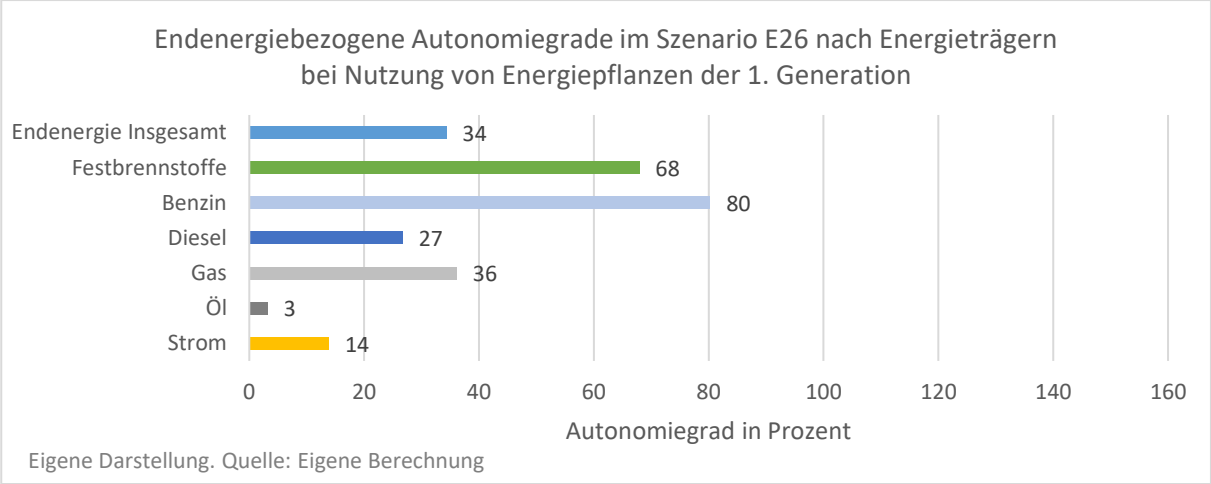


Abbildung 32: Endenergiebezogene Autonomiegrade im Szenario E26 nach Energieträgern bei Nutzung der 1. Energiepflanzengeneration

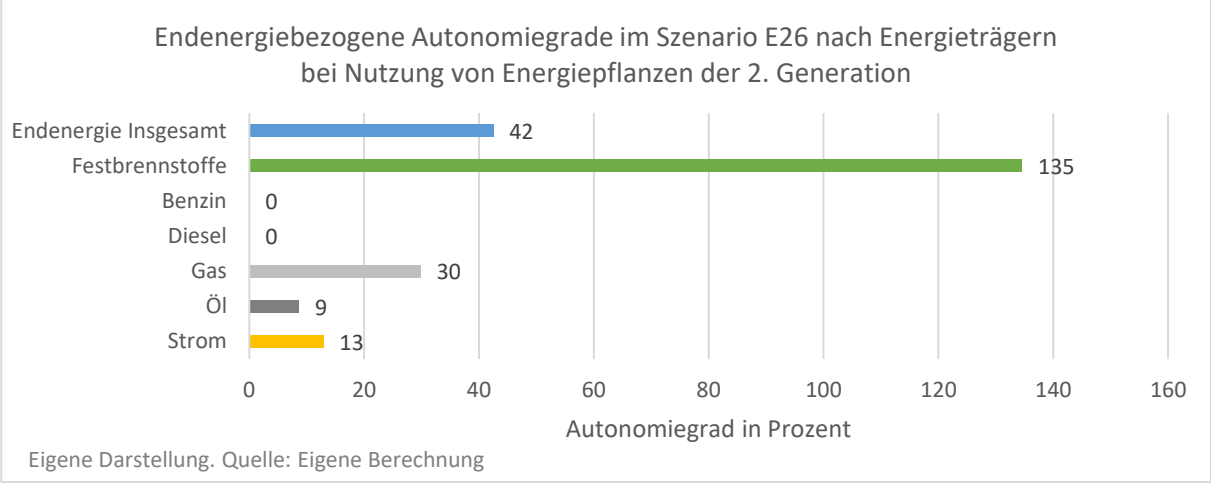


Abbildung 33: Endenergiebezogene Autonomiegrade im Szenario E26 nach Energieträgern bei Nutzung der 2. Energiepflanzengeneration

Betrachtet man die drei Energiesektoren im Vergleich zu Szenario E12 (vgl. Abbildung 34 und Abbildung 35), ermöglichen die untersuchten Maßnahmen zur Energieeinsparung vor allem im Wärmesektor eine erhebliche Steigerung des Autonomiegrades – je nach Energiepflanzenkombination um 28 bis 51 Prozentpunkte auf Autonomiegrade von 56 bis 79 Prozent. Bei den Treibstoffen wird jedoch mit 9 bis 36 Prozent trotz des hohen Flächenaufwandes noch immer nur ein geringer Autonomiegrad erreicht.

Der Stromautonomiegrad steigt nur um wenige Prozentpunkte, da die Stromeinsparungen in den Haushalten und in den Sektoren Industrie und GHD weitgehend durch den zusätzlichen Stromverbrauch kompensiert werden, der aus der weitgehenden Elektrifizierung von Straßenverkehr und Gebäudebeheizung folgt.

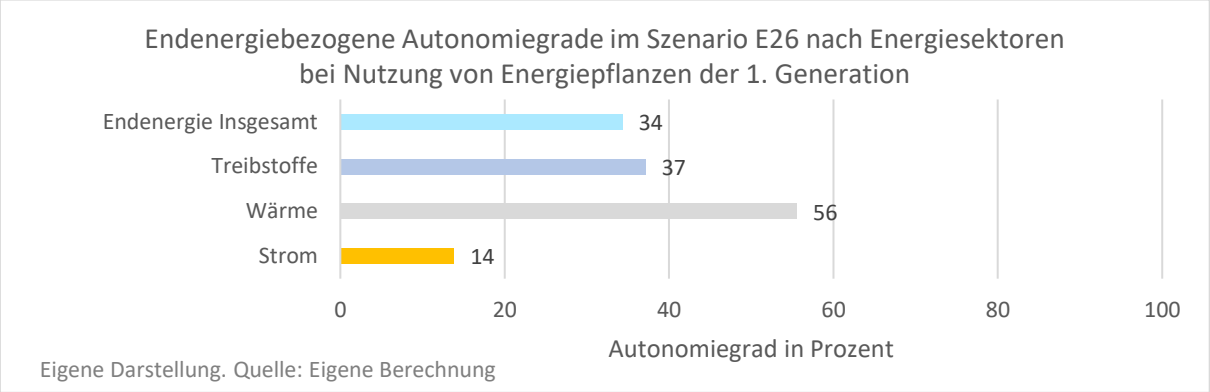


Abbildung 34: Endenergiebezogene Autonomiegrade im Szenario E26 nach Energiesektoren bei Nutzung der 1. Energiepflanzengeneration

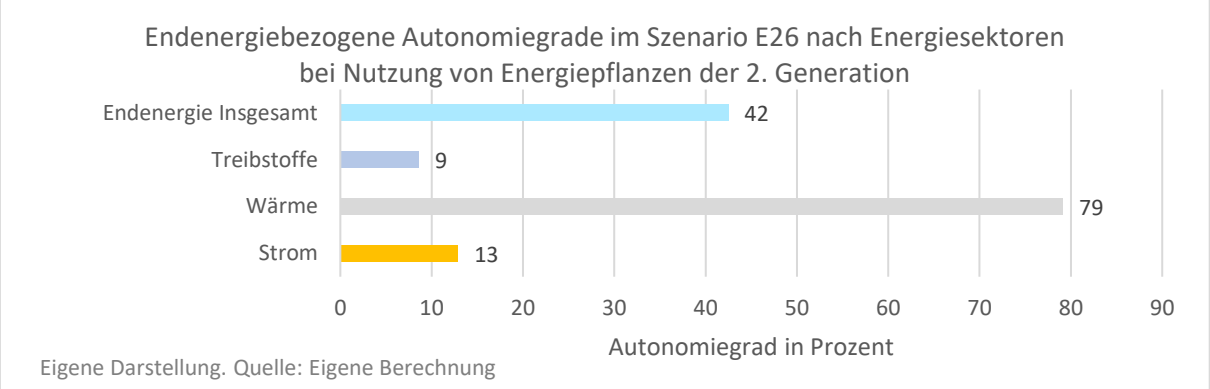


Abbildung 35: Endenergiebezogene Autonomiegrade im Szenario E26 nach Energiesektoren bei Nutzung der 2. Energiepflanzengeneration

6.4.2.3.3 Maßnahmenkombination zur Energieerzeugung und zur Energieeinsparung

Kombiniert man die Maßnahmen zur Energieeinsparung aus dem Szenario E26 mit den Maßnahmen zum Ausbau der erneuerbaren Energien, können auch sektorenübergreifend hohe Autonomiegrade erreicht werden. In Szenario E27 wird so bei vollständiger Nutzung des Dachflächenphotovoltaikpotenzials und des Windenergiepotenzials ein produktbezogener Energieautonomiegrad von ca. 59 Prozent erreicht. Für höhere Autonomiegrade müsste ein erheblicher Ausbau von Freiflächenphotovoltaikanlagen erfolgen. Ergänzt man beispielsweise, wie in Szenario E28, Agrophotovoltaikanlagen auf 10 Prozent des Grünlandes, steigt der Energieautonomiegrad auf 79 Prozent. Fügt man in Szenario 29 Agrophotovoltaikanlagen auf 10 Prozent des Ackerlandes hinzu, wird ein Energieautonomiegrad von 109 Prozent erreicht. Durch Hinzunahme von Agrothermie auf 10 Prozent des Ackerlandes steigt das Autonomiepotenzial in Szenario E30 auf 115 Prozent. Dabei wird im Stromsektor ein Autonomiegrad von 135 Prozent

und im Wärmesektor ein Autonomiegrad von 109 Prozent erreicht. Im Treibstoffsektor werden zwar nur 8 Prozent Autonomie erreicht, aber das Defizit beträgt weniger als 0,8 MWh/Ea, was etwa 6 Prozent des gesamten Endenergiebedarfs entspricht. Schließen lässt sich die Lücke durch die Elektrifizierung der verbleibenden 25 Prozent der Pkw und 50 Prozent der Lkw, die in diesem Szenario noch mit Verbrennungsmotoren ausgestattet sind. Durch diese Elektrifizierung steigt zudem der Energieautonomiegrad insgesamt von 115 auf 119 Prozent.

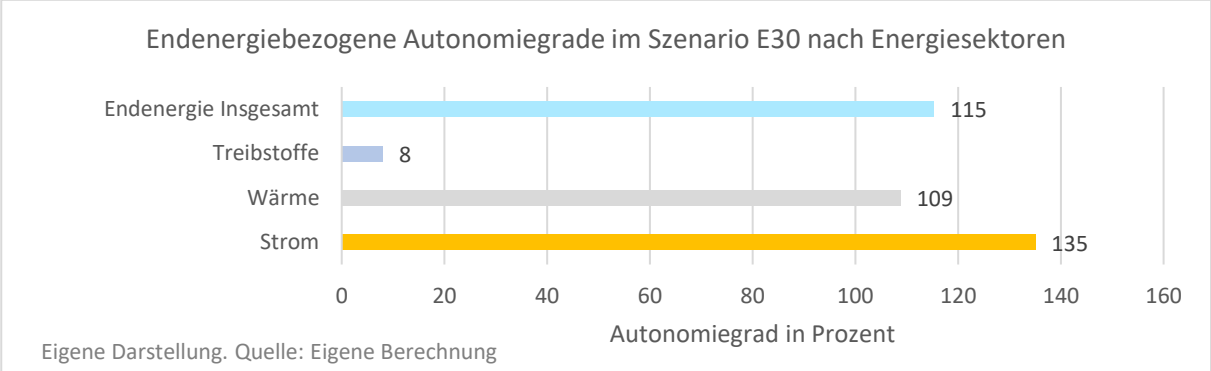


Abbildung 36: Endenergiebezogene Autonomiegrade im Szenario E30 nach Energiesektoren

In Abbildung 37 sind die energiebedarfsbezogenen Energieautonomiepotenziale in der Übersicht dargestellt, die im Status Quo und in den Szenarien E01 bis E30 erreicht werden. Die zuvor dargestellten Unterschiede bei den einzelnen Energieträgern zeigen, dass Einsparungen und Ausbau der Erzeugung Hand in Hand gehen müssen, wenn in allen drei Energiesektoren (Strom, Wärme, Treibstoffe) hohe Autonomiegrade erreicht werden sollen.

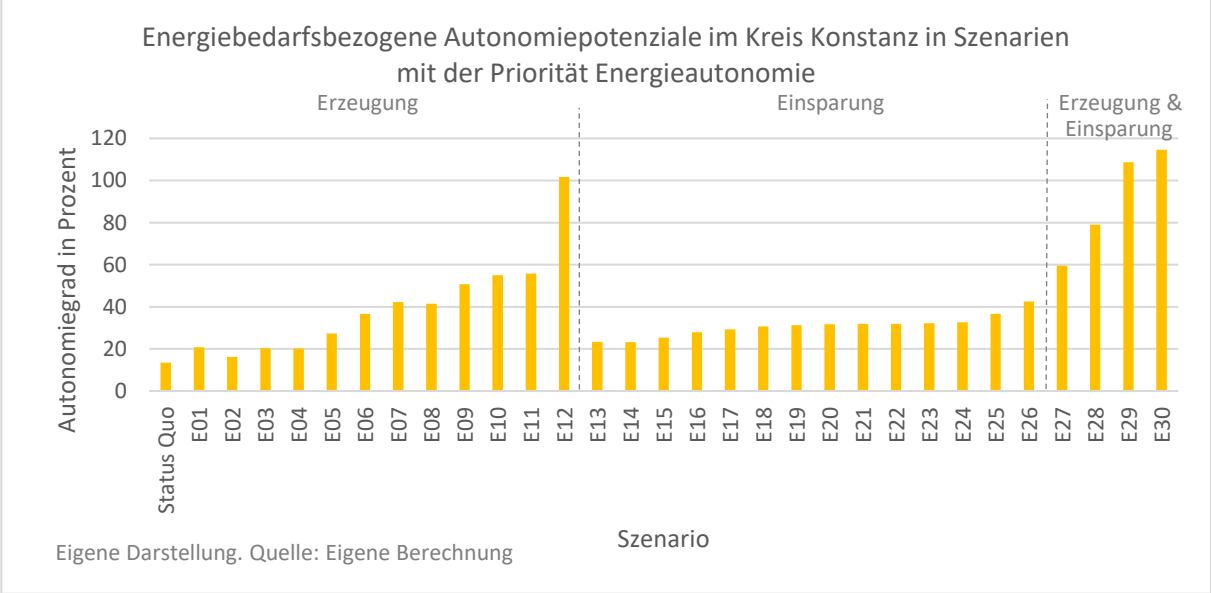


Abbildung 37: Übersicht der produktbezogenen Energieautonomiepotenziale im Kreis Konstanz in den Szenarien E01 bis E30

6.4.2.4 Flächenbezogene Energieautonomiepotenziale im Kreis Konstanz

Flächenbezogen betrug der Energieautonomiegrad im Landkreis Konstanz im Jahr 2017 knapp 7,8 Prozent (Status Quo). Im Folgenden werden die Auswirkungen der bereits zuvor beschriebenen Maßnahmen auf den flächenbezogenen Energieautonomiegrad dargestellt.

6.4.2.4.1 Maßnahmen zur Steigerung der Energieerzeugung

Durch eine Ausweitung des konventionellen Anbaus von Energiepflanzen der ersten Generation auf 100 Prozent der Ackerfläche in Szenario E01 steigt der Autonomiegrad um 4,3 Prozentpunkte von 8,6 auf 12,9 Prozent. Bei einer konventionellen Nutzung von Energiepflanzen der zweiten Generation auf 100 Prozent der Ackerfläche (Szenario E03) beträgt das flächenbezogene Energieautonomiepotenzial 11,0 Prozent. Bei ökologischer Wirtschaftsweise können mit dem vollflächigen Anbau von Energiepflanzen der ersten Generation die Verluste nicht kompensiert werden, die mit der Umstellung auf die ökologische Wirtschaftsweise etwa in der Grünlandnutzung und der Viehhaltung einhergehen. Der Autonomiegrad in Szenario E02 liegt daher mit 9,2 Prozent nur geringfügig oberhalb des Status Quo (Stand 2017). Mit Energiepflanzen der zweiten Generation wird dagegen ein großer Teil der Einbußen kompensiert, die aus der Umstellung auf die ökologische Wirtschaftsweise folgen, sodass ein flächenbezogener Energieautonomiegrad von 9,0 Prozent erreicht wird (Szenario E04). Insgesamt zeigen die geringen Autonomiegrade, die bei einem Anbau von Energiepflanzen auf 100 Prozent der Ackerfläche erreicht werden, dass der heutige Brennstoffverbrauch das Potenzial der land- und forstwirtschaftlichen Biomasseproduktion um ein Vielfaches übersteigt.

Allerdings wirkt sich auch der Zubau von Photovoltaik, Agrothermie und Windenergie, wie er in den Szenarien E05 bis E12 angenommen wurde, auf den flächenbezogenen Autonomiegrad kaum aus, da die Flächeninanspruchnahme durch Strom aus diesen Quellen im Vergleich zu den übrigen Energieträgern sehr gering ist.

Höhere flächenbezogene Autonomiegrade sind deshalb nur durch Einsparungen beim Verbrauch flüssiger und gasförmiger Energieträger zu erreichen.

6.4.2.4.2 Maßnahmen zur Energieeinsparung (Szenarien E13 bis E26)

Im Vergleich zu ihrem Einfluss auf den produktbezogenen Energieautonomiegrad sind die Effekte der Gebäudesanierung in Szenario E13 (mit 1,9 Prozentpunkten) und der Veränderung der Gebäudebeheizungsstruktur in Szenario E14 (mit 3,7 Prozentpunkten) auf den flächenbezogenen Energieautonomiegrad etwas geringer: Werden beide Maßnahmen wie in Szenario E15 kombiniert, steigt der energiebedarfsbezogene Autonomiegrad insgesamt um 4,1 Prozentpunkte. Der Effekt ist damit deutlich geringer, als der Effekt der Energieeinsparungen des Sektors GHD in Szenario E25. Dies ist jedoch nicht zuletzt auf die jeweiligen Positionen in der Abfolge der Maßnahmen zurückzuführen. Ist bereits eine Energieverbrauchsreduktion durch

andere Maßnahmen erfolgt, ist der relative Effekt von Gebäudesanierung und Heizungsaustausch auf die Autonomiegrade dementsprechend größer.

Die Steigerung der Energieeffizienz des Kfz-Bestandes mit Verbrennungsmotoren in Szenario E16 zur Reduktion des spezifischen Treibstoffverbrauchs je 100 km Fahrleistung um ein Drittel[32] führt dagegen trotz ihrer frühen Position in der Maßnahmenkette alleine zu einer Erhöhung des Autonomiegrades um 3,0 Prozentpunkte. Ihr Effekt auf den flächenbezogenen Autonomiegrad ist somit um ein Viertel größer als auf den energiebedarfsbezogenen Autonomiegrad. Auch die anschließende Reduktion der Jahresfahrleistung um ein Drittel in Szenario E17 wirkt sich auf den flächenbezogenen Energieautonomiegrad mit einem Zugewinn von 1,9 Prozentpunkten deutlich stärker aus als auf die endenergiebezogene Autonomie. Die angenommene Veränderung der Pkw-Motorisierung inkl. der Erhöhung des Anteils von Elektrofahrzeugen an der Pkw-Fahrleistung auf 75 Prozent in Szenario E18 führt zu einem Zugewinn von 4,3 Prozentpunkten. Ihr Effekt auf den flächenbezogenen Energieautonomiegrad ist somit dreimal so groß wie auf den produktbezogenen Energieautonomiegrad. Mit Blick auf die Effekte der Einzelmaßnahmen im Verkehrssektor ist weiterhin zu bedenken, dass die Maßnahmen hier aufeinander folgen und sich die einzelnen Anteile am Gesamtzugewinn bei einer anderen Reihenfolge anders verteilen.

Die Reduktion der Nutzfahrzeug-Fahrleistung (SNF & LNF) um ein Drittel in Szenario E19 führt zu einem Autonomiezugewinn von 1,5 Prozentpunkten und hat damit auf den flächenbezogenen Energieautonomiegrad einen doppelt so großen Effekt wie auf den produktbezogenen Energieautonomiegrad. Die anschließende vollständige Elektrifizierung der leichten Nutzfahrzeuge in Szenario E20 bringt einen Zugewinn von 1,1 Prozentpunkten. Ihr Effekt wirkt sich damit um das Dreieinhalbfache stärker auf den flächenbezogenen Energieautonomiegrad aus als auf den produktbezogenen Energieautonomiegrad. Ein deutlich verstärkter Effekt zeigt sich in Szenario E21 durch die Elektrifizierung von 50 Prozent der schweren Nutzfahrzeuge, die einen flächenbezogenen Autonomiezugewinn von 1,3 Prozentpunkten bewirkt. Die vollständige Elektrifizierung der Busse in Szenario E22 bewirkt lediglich eine Steigerung um 0,4 Prozentpunkte. Einen größeren Effekt hat die Elektrifizierung der Landmaschinen in Szenario E23 mit einem Zugewinn von 0,8 Prozentpunkten. Insgesamt bewirken die auf die Nutzfahrzeuge bezogenen Maßnahmen einen Autonomiezugewinn von 5,0 Prozentpunkten. Sie wirken sich damit um den Faktor 3,3 stärker auf den flächenbezogenen Energieautonomiegrad aus als auf den produktbezogenen Energieautonomiegrad.

[32] Angenommen wurde eine Einsparung bei Pkw von 40 Prozent, bei LNF von 20 Prozent und bei SNF und Bussen von 10 Prozent. (Vgl. 6.1.4)

Die auf den Straßenverkehr bezogenen Maßnahmen bewirken insgesamt einen Autonomiezugewinn von 13,5 Prozentpunkten. Ihr Effekt ist damit fast dreieinhalbmal so groß wie der Effekt der Maßnahmen, die die Wohngebäude betreffen.

Die Reduktion des Stromverbrauchs der Privathaushalte um 20 Prozent in Szenario E24 hat keinen nennenswerten Effekt auf den flächenbezogenen Energieautonomiegrad. Die in Szenario E25 angenommene Reduktion des Energieverbrauchs im Sektor GHD um 38 Prozent steigert den flächenbezogenen Energieautonomiegrad um 7,4 Prozentpunkte. Dieser deutliche Effekt ist in erster Linie auf den hohen Anteil des Öls am Energieverbrauch des GHD-Sektors zurückzuführen. Die in Szenario E26 angenommene Reduktion des Energieverbrauchs der Industrie um ein Drittel steigert den flächenbezogenen Energieautonomiegrad um 7,0 Prozentpunkte.

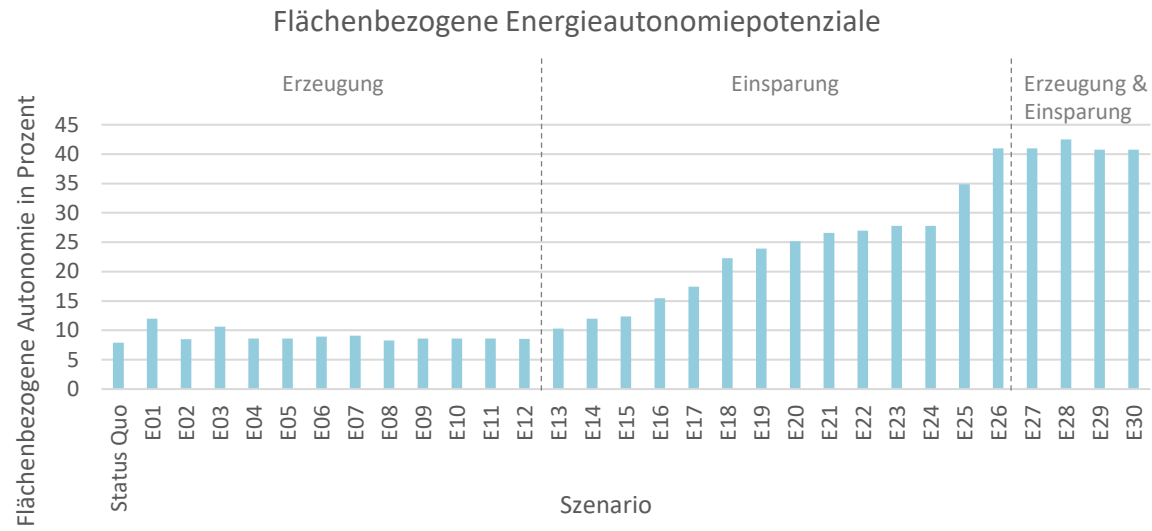
Auch hier ist weiterhin zu bedenken, dass die Reihenfolge der Maßnahmen erheblichen Einfluss auf die Effekte der Einzelmaßnahmen hat. Beispielsweise ist der große Effekt der Einsparungen im Sektor GHD, der sich in Szenario E25 zeigt, damit zu erklären, dass der Sektor in diesem Szenario einen großen Anteil am verbleibenden Verbrauch von Flüssigbrennstoffen hat. Werden die Einsparungen im Sektor GHD als erste Einsparungsmaßnahme (im Anschluss an Szenario E12) durchgeführt, beträgt ihr Effekt auf das flächenbezogene Energieautonomiepotenzial weniger als ein Prozent, da der Gesamtverbrauch zu Beginn der Einsparungen noch sehr hoch ist und der Anteil des GHD-Sektors dementsprechend geringer.

6.4.2.4.3 Kombination von Maßnahmen zur Energieerzeugung und zur Energieeinsparung

Die Nutzung der Dachflächenphotovoltaik- und der Windenergiepotenziale haben, wie bereits beschrieben, keine nennenswerten Effekte auf die flächenbezogene Energieautonomie. Daher ergibt sich in Szenario E27 keine relevante Veränderung des Autonomiegrades. Auch die Installation großflächiger Freiflächensolaranlagen auf 10 Prozent des Dauergrünlandes in Szenario E28 kann den flächenbezogenen Energieautonomiegrad nur um 1,0 bis 1,5 Prozentpunkte steigern, da der Flächenbedarf der Stromerzeugung im Vergleich zur Flüssigbrennstoffproduktion sehr gering ist. Die Errichtung von Agrophotovoltaik auf 10 Prozent der Ackerflächen in Szenario E29 kann sich sogar negativ auf die flächenbezogene Energieautonomie auswirken: Wenn sie bei Energiepflanzen im Durchschnitt zu ähnlichen Ertragseinbußen führt, wie dies bei Getreide und Kartoffeln der Fall ist, kann der flächenbezogene Energieautonomiegrad durch Agro-PV auf Ackerland in Szenario E29 um ca. 0,2 Prozentpunkte sinken. Die Ergänzung der Agrothermie in Szenario E30 wirkt sich dagegen nicht in nennenswertem Umfang auf den flächenbezogenen Autonomiegrad aus.

Wie sich die verschiedenen Maßnahmen der Erzeugung und Einsparung auf dem Weg zu einer höheren flächenbezogenen Energieautonomie summieren, ist in Abbildung 38 dargestellt.

Anhand der Szenarien E16 bis E24 wird die besondere Bedeutung deutlich, die den Flüssigbrennstoffen und insbesondere den ölbasierten Brennstoffen in einer auf regenerativen Energien basierten Energiewirtschaft zukommt, die nicht annähernd proportional zu ihrem Anteil am Endenergieverbrauch ist. Während der energiebedarfsbezogene Autonomiegrad in diesen Szenarien nur in vergleichsweise geringem Ausmaß zunimmt, steigt der flächenbezogene Autonomiegrad mit jeder Maßnahme zur Einsparung von biogenen Treibstoffen und Heizöl deutlich. Der direkte Vergleich in Abbildung 40 veranschaulicht dies.



Grafik: Eigene Darstellung. Quelle: Eigene Berechnung

Abbildung 38: Flächenbezogene Energieautonomiepotenziale im Kreis Konstanz in den Szenarien E01 bis E30

6.4.2.5 Bedeutung des Energiesektors für das flächenbezogene Gesamtautonomiepotenzial

Welch entscheidende Bedeutung der Energieversorgung mit Blick auf das flächenbezogene Autonomiepotenzial zukommt, wird beim direkten Vergleich der flächenbezogenen Energieautonomiepotenziale mit den Gesamtautonomiepotenzialen deutlich, der in Abbildung 39 dargestellt ist. Mit den Energieeinsparungen in den Szenarien E13 bis E26 nimmt auch das Gesamtautonomiepotenzial um 25 Prozentpunkte zu und steigt von knapp 15 auf 40 Prozent. Damit haben die beschriebenen Maßnahmen im Energiesektor einen deutlich größeren Effekt als vergleichbare Maßnahmen in den Sektoren Rohstoffe und Nahrung haben können: Würde man ausgehend vom Status Quo auf Maßnahmen im Energiesektor verzichten, 100 Prozent der Ackerfläche für die Rohstoffproduktion aufwenden und den Rohstoffverbrauch um zwei

Drittel reduzieren, würde lediglich ein Autonomiegrad von 23 Prozent erreicht. In einem gänzlich auf die Nahrungsproduktion ausgerichteten System, in dem 100 Prozent der Ackerfläche mit Ernährungsgütern belegt und der Verbrauch minimiert würden (Ernährungsweise „Eco-Mix“ bei 10 Prozent Verlusten), würde ein Gesamtautonomiegrad von ca. 16 Prozent erreicht.

Die große Bedeutung des Energiesektors für die flächenbezogene Autonomie ist darauf zurückzuführen, dass auf die Energieversorgung mit Abstand der größte Anteil des Gesamtflächenbedarfs entfallen würde, wenn man den heutigen Bedarf an Nahrung, Energie und Rohstoffen vollständig aus regenerativen Quellen decken würde. Der Flächenbedarf, der sich aus der Versorgung mit Nahrung und nachwachsenden Rohstoffen ergibt, fällt dagegen erheblich weniger stark ins Gewicht. Deutlich wird aber auch, dass der Landkreis Konstanz in Szenario E30 mit einer flächenbezogenen Gesamtautonomie von ca. 40 Prozent immer noch zu drei Fünfteln von Flächen außerhalb des Landkreises abhängig wäre.

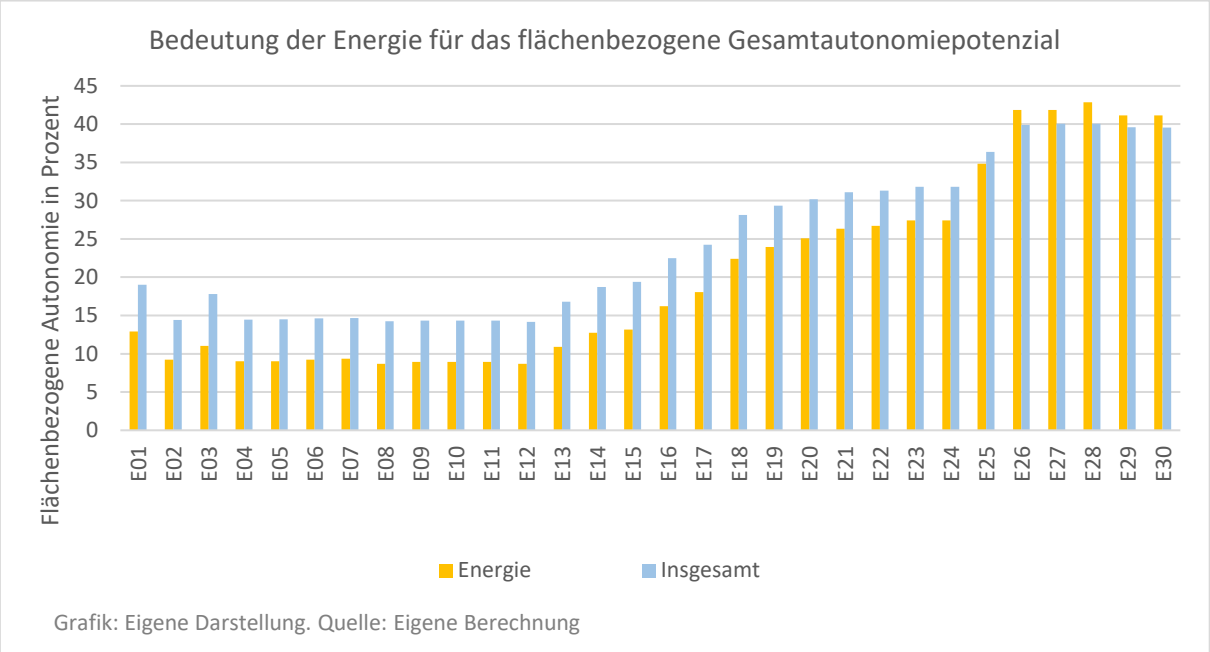


Abbildung 39: Bedeutung der Energie für das flächenbezogene Autonomiepotenzial insgesamt

6.4.2.6 Zusammenfassung und Diskussion

Die Ergebnisse der Szenarienberechnung zeigen vor allem, dass ein hoher flächenbezogener Energieautonomiegrad nur möglich ist, wenn sowohl eine hohe Flächeneffizienz der regenerativen Energieerzeugung als auch eine hohe Energieeffizienz auf Seite der Verbraucher erreicht wird. Eine entscheidende Voraussetzung hierfür ist, dass auf die Nutzung von biogenen Flüssigbrennstoffen nahezu vollständig verzichtet wird und auch der Verbrauch von Biogas als Energieträger auf das Nötigste reduziert werden kann. Zugleich muss der Endenergiebedarf insgesamt auf ca. 9 bis 11 MWh pro Person und Jahr gesenkt werden. Für die fünf betrachte-

ten Landkreise macht dies eine Endenergieeinsparung von rund 60 Prozent erforderlich. Möglich erscheint dies nur durch eine weitgehende Elektrifizierung aller Sektoren, wobei dem Umstieg auf Elektrofahrzeuge und Wärmepumpen besondere Bedeutung zukommt. Da bei einer flächeneffizienten regenerativen Energieversorgung mehr als zwei Drittel des künftigen Endenergieverbrauchs mit Strom gedeckt werden müssen und die bekannten Windenergiepotenziale in den fünf Landkreisen mit ca. 0,5 MWh/Ea (5 Prozent des möglichen zukünftigen Bedarfs) recht eng begrenzt sind, ist ein massiver Ausbau der Photovoltaik auf Dach- und Freiflächen erforderlich. Die Dachflächenphotovoltaik spielt dabei eine entscheidende Rolle. Um einen dem Dachflächenpotenzial entsprechenden Beitrag leisten zu können, müssten beispielsweise im Landkreis Konstanz Freiflächenanlagen auf ca. 8 Prozent des Dauergrünlandes errichtet werden. Agrophotovoltaikanlagen auf Grünland wirken sich positiver auf die Energieautonomie aus als Agrophotovoltaikanlagen auf Ackerland. Die Auswirkungen beider Anlagenvarianten auf den Nahrungsautonomiegrad variieren aber je nach Art der Grünlandnutzung, Wirtschaftsweise und Witterung. Grundsätzlich sind natürlich auch größere Anteile der Agrophotovoltaik an der landwirtschaftlichen Nutzfläche vorstellbar, sofern die Akzeptanz hierfür vorhanden ist. In diesem Fall müssten die Einsparungen beim Endenergieverbrauch nicht so umfangreich sein. Allerdings führen größere PV-Anlagen stets zu relevanten Einbußen bei der Nahrungsproduktion. Diese sind mit Blick auf die globale Ernährungssituation und die wachsende Weltbevölkerung nur durch eine Umstellung der Ernährungsweise und eine Reduktion der Verschwendung zu kompensieren. Gleiches gilt für eine großflächige Nutzung von Energiepflanzen.

Das zweitgrößte Energiepotenzial nach der Photovoltaik entfällt in den betrachteten fünf Landkreisen mit 15 bis 20 Prozent des möglichen zukünftigen Bedarfs auf biogene Festbrennstoffe, bei denen es sich um die flächeneffizienteste Form der Bioenergie handelt. Da biogene Festbrennstoffe jedoch eine große Vielfalt aufweisen, müssten Kraftwerke und insbesondere die Gebäudebeheizungsstruktur an diese Energieträger angepasst werden. In diesem Fall kann die Bioenergie einen wesentlichen Beitrag zur Energieautonomie leisten. Dabei geht es z. B. im relativ dicht besiedelten Landkreis Konstanz vor allem um die Nutzung von Reststoffen oder Koppelprodukten aus der Forstwirtschaft und der Lebensmittelproduktion. Energiepflanzen auf Ackerflächen können in dicht besiedelten Landkreisen lediglich jene Lücken schließen, die mit Energie aus anderen Quellen nicht gedeckt werden können. Ihr Einsatz dürfte beispielsweise in älteren Bestandsgebäuden erforderlich bleiben, die nicht auf strombasierte Systeme umgestellt werden können. In solchen Bereichen erscheint der Einsatz von Biomasse auf absehbare Zeit kaum verzichtbar. Von Vorteil sind dabei die ökologischen Effekte, die Energiepflanzen der zweiten Generation mit sich bringen und mit keiner anderen betrachteten Nutzpflanzengruppe erreicht werden können.

In Abbildung 40 sind die Auswirkungen der verschiedenen Maßnahmen auf den produktbezogenen und den flächenbezogenen Energieautonomiegrad des Landkreises Konstanz im direkten Vergleich abgebildet. Der Vergleich macht vor allem anschaulich, welch große Bedeutung der Verbrauch von Flüssigbrennstoffen für die flächenbezogene Energieautonomie hat: Obwohl ihr Effekt auf das produktbezogene Energiepotenzial (gelb) sehr gering ist, lassen vor allem Einsparungen beim Verbrauch dieser Produkte den flächenbezogenen Autonomiegrad (blau) deutlich steigen. So bewirken allein jene Maßnahmen in den Szenarien E16 bis E23, die ausschließlich den Verbrauch von flüssigen Treibstoffen reduzieren, einen Anstieg des flächenbezogenen Autonomiegrades von 13 auf über 27 Prozent. Sie tragen damit fast die Hälfte (14,4 von 32,8 Prozentpunkten) zur Steigerung der flächenbezogenen Energieautonomie bei, die mit den hier untersuchten Maßnahmen erreicht wird. Zudem ist der in Szenario E26 verbleibende Verbrauch von Flüssigbrennstoffen der wichtigste Grund dafür, dass trotz der umfangreichen Einsparung nur ein Autonomiegrad von knapp über 40 Prozent erreicht wird.

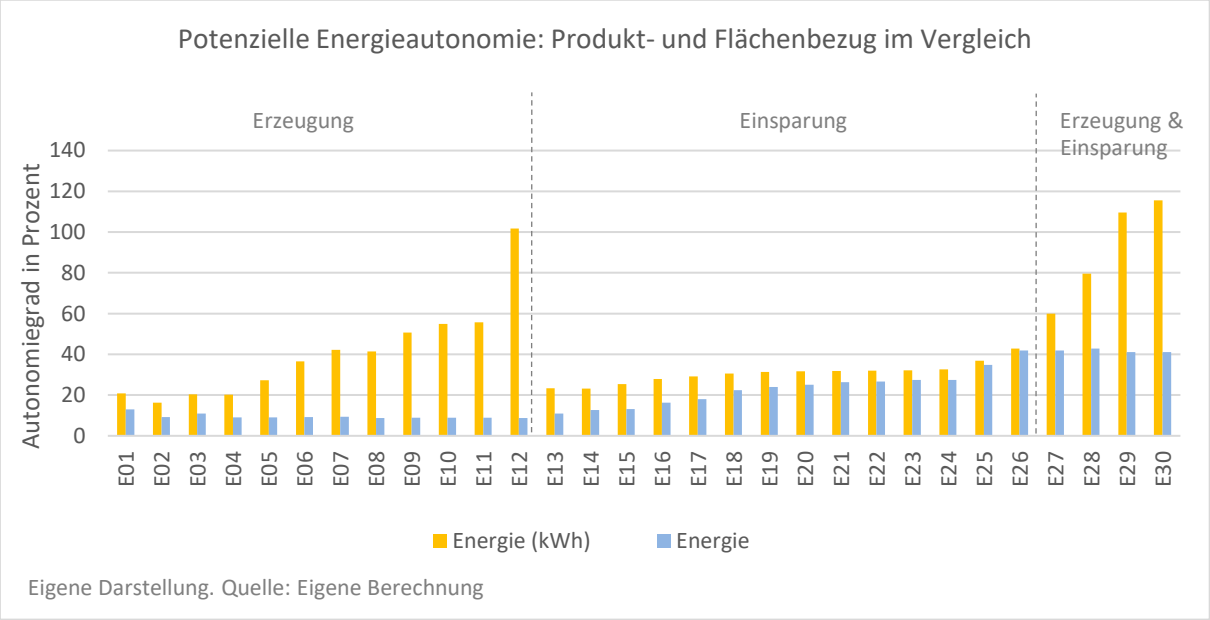


Abbildung 40: Potenzielle Energieautonomie - Energiebedarfs- und Flächenbedarfsbezug im Vergleich

Jede Maßnahme, die zu einer weiteren Reduktion des Verbrauchs von Flüssigbrennstoffen beiträgt, führt daher direkt zu relevanten Zugewinnen bei der flächenbezogenen Energieautonomie. Wenn der Ölverbrauch gar auf null reduziert werden kann, sind sogar flächenbezogene Energieautonomiegrade von mehr als 100 Prozent möglich, sofern 100 Prozent der Ackerfläche mit Energiepflanzen belegt werden. Das bedeutet, dass im Landkreis Konstanz bei einer Begrenzung der Energiepflanzenfläche auf 15 Prozent der Ackerfläche flächenbezogene Energieautonomiegrade von über 66 Prozent erreicht werden können. Überträgt man dieses optimierte Szenario auf die übrigen vier Landkreise, können die fünf Landkreise gemeinsam

sogar eine flächenbezogene Energieautonomie von deutlich über 100 Prozent erreichen und insgesamt zu Netto-Flächenexporteuren werden.

6.4.3 Potenzielle Rohstoffautonomie

Anders als in den Sektoren Nahrung und Energie, wo mit dem Kalorien- bzw. Energiegehalt eine allen Produkten gemeinsame Vergleichsgrundlage vorhanden ist, können die verschiedenen Rohstoffe der unterschiedlichen Produktsegmente nicht direkt miteinander verrechnet werden, da Produkte wie Papier, Öl oder Konstruktionsholz einander nicht ersetzen können. Aufgrund der geringen Vergleichbarkeit der Produktsegmente besitzt der produktbezogene Gesamtautonomiegrad im Rohstoffsektor nur eine begrenzte Aussagekraft, weshalb im Folgenden vor allem jene produktbezogenen Autonomiegrade betrachtet werden, die in den einzelnen Produktsegmenten erzielt werden können. Der produktbezogene Gesamtautonomiegrad im Rohstoffsektor ist lediglich ein Orientierungswert, der eine sektorenübergreifende Einschätzung des produktbezogenen Gesamtautonomiegrades ermöglicht. Wird der Rohstoffsektor jedoch alleine betrachtet, ist der flächenbezogene Autonomiegrad aufgrund seiner wesentlich höheren Aussagekraft der entscheidende Kennwert für den Sektor. Im Jahr 2017 lag der Anteil der Rohstoffpflanzen an der Ackerflächennutzung in Deutschland bei ca. 0,24 Prozent. Mit diesen Flächenanteilen ließe sich bei den heutigen Konsumgewohnheiten und einer vollständig regenerativen Rohstoffbereitstellung ein flächenbezogener Rohstoffautonomiegrad von ca. 47 Prozent erreichen. Zurückzuführen ist dies hauptsächlich auf die forstwirtschaftliche Produktivität. Folglich sind die Autonomiepotenziale in den einzelnen Produktsegmenten sehr unterschiedlich. Für den Vergleich der Maßnahmen zur Erhöhung der Rohstoffautonomie wurde zunächst, entsprechend der Vorgehensweise in den Sektoren Nahrung und Energie, eine vollständige Nutzung der Ackerfläche für die Rohstoffproduktion unterstellt. Anhand von 14 Szenarien wurde anschließend untersucht, wie sich Änderungen bei den Verbrauchsgewohnheiten (Szenarien R01 – R08) und bei der Auswahl der Rohstoffpflanzen (R09 – R15) auf die Rohstoffautonomie auswirken, um jene Bereiche zu identifizieren, in denen durch gezielte Maßnahmen die größten Effekte bewirkt werden können.

6.4.3.1 Produktbezogene Rohstoffautonomiepotenziale

6.4.3.1.1 Auswirkungen von Veränderungen des Verbrauchs

Bei unverändertem Konsum (Status Quo) ermöglicht die heutige Flächennutzung im Landkreis Konstanz beim gewählten Rohstoffpflanzenmix lediglich in zwei der sieben betrachteten Produktsegmente produktbezogene Rohstoffautonomiegrade von mehr als 100 Prozent. Der höchste Autonomiegrad kann mit 124 Prozent im Segment der Baustoffe für Wohngebäude erreicht werden. Kaum geringer ist das Potenzial im Segment Möbel für Wohngebäude. Diese Potenziale bestehen größtenteils in Form forstwirtschaftlicher Produkte sowie in kleinerem Umfang in Form landwirtschaftlicher Nebenprodukte. Da bisher nur rund 0,24 Prozent der

Ackerfläche gezielt für den Anbau von Rohstoffpflanzen für die stoffliche Nutzung verwendet werden, sind in den übrigen Segmenten nur sehr geringe Autonomiegrade zwischen 1 und 13 Prozent möglich.

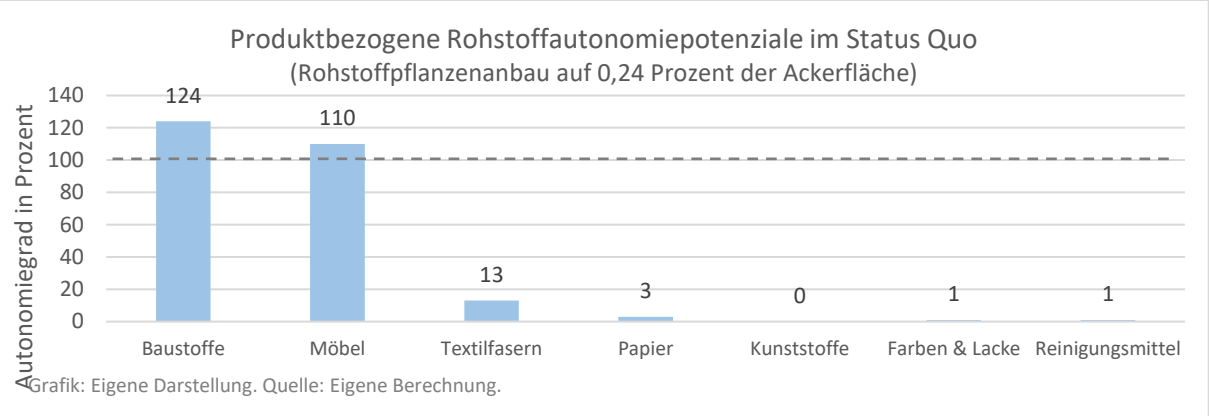


Abbildung 41: Produktbezogene Rohstoffautonomiepotenziale im Status Quo

Würde sich der Landkreis Konstanz vollkommen auf die Produktion nachwachsender Rohstoffe spezialisieren und hierfür 100 Prozent der Ackerfläche aufwenden, würden bei heutigem Konsum und dem gewählten Rohstoffpflanzenmix (ohne Rohstoffpflanzen der Kunststoffproduktion) trotzdem in drei Produktsegmenten produktbezogene Rohstoffautonomiegrade erreicht, die sich lediglich in der Nähe der Marke von 100 Prozent bewegen. Dabei handelt es sich um die Segmente Möbel, Textilfasern und Papier. Nur in den Segmenten Baustoffe, Farben & Lacke sowie Reinigungsmittel würde der Bedarf um das Zwei- bis Vierfache übertroffen (vgl. Szenario R01). Um den Bedarf in den Sektoren Möbel, Textilfasern und Papier ebenfalls deutlich zu übertreffen, müsste der Verbrauch dieser Produkte erheblich reduziert werden. Bei einer Reduktion des Gesamtverbrauchs um zwei Drittel würde der Bedarf in sechs von sieben Segmenten mindestens um den Faktor 2,5 übertroffen (Szenario R08).

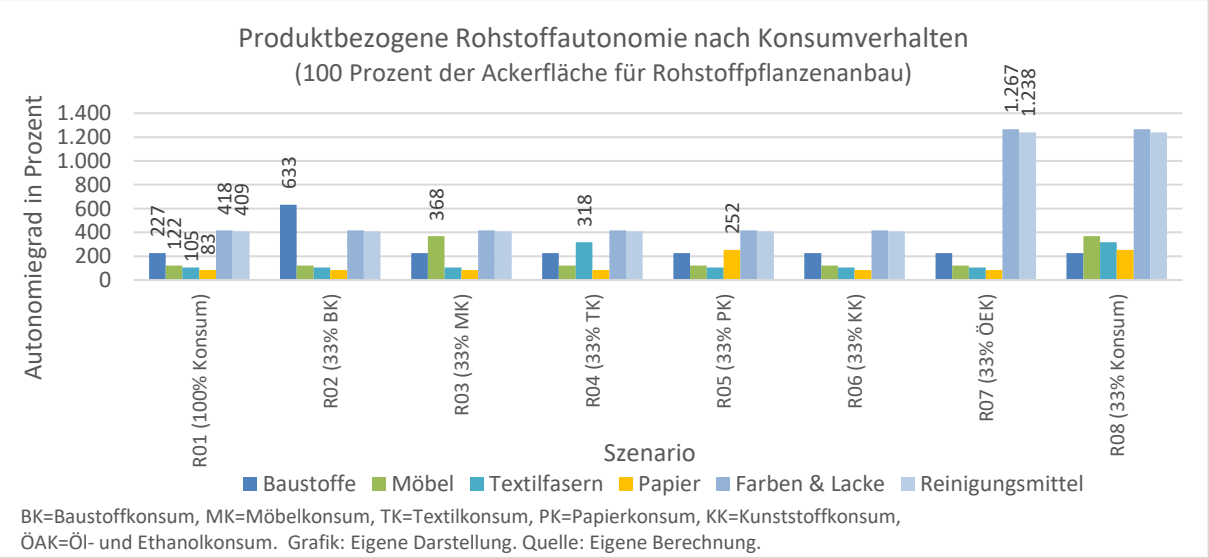
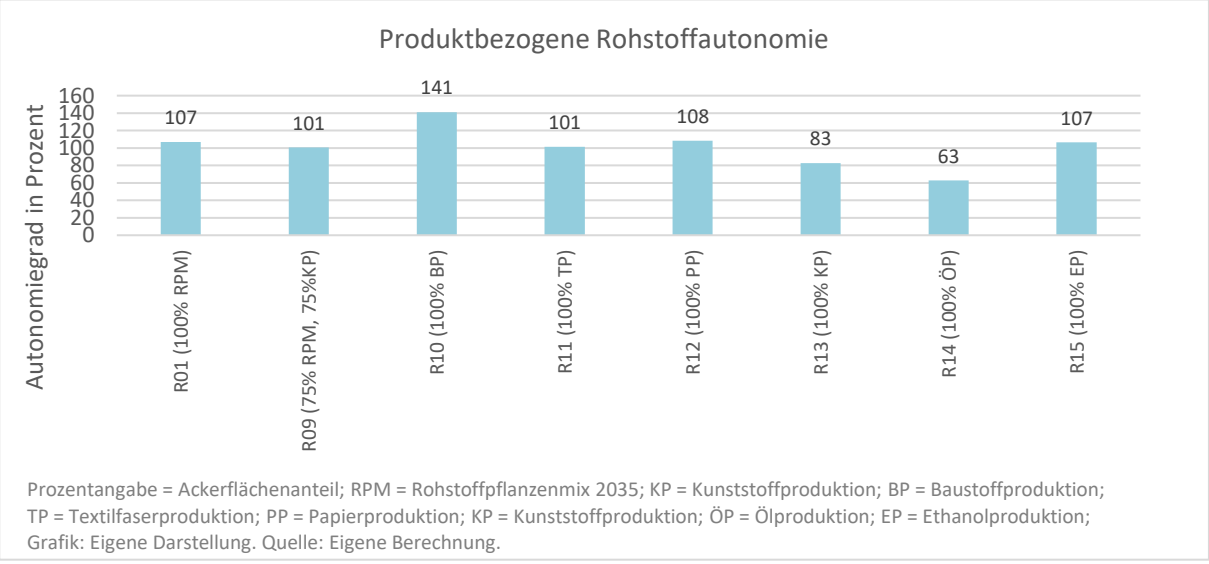


Abbildung 42: Produktbezogene Rohstoffautonomie des Landkreises Konstanz nach Konsumverhalten in den Szenarien R01 bis R08

Die Szenarien R01 bis R08 machen deutlich, dass eine deutliche Reduktion des Rohstoffverbrauchs unerlässlich ist, wenn auf Basis nachwachsender Rohstoffe und angesichts geringer Flächenverfügbarkeit hohe Rohstoffautonomiegrade möglich werden sollen.

6.4.3.1.2 Auswirkungen von Veränderungen der Flächennutzung

In den Szenarien R09 bis R15 wurde untersucht, wie sich unterschiedliche Schwerpunktsetzungen bei der Ackerflächennutzung auf die Autonomiepotenziale auswirken. Mit Blick auf die ökologischen Effekte zeigt sich, wie im Folgenden noch dargestellt wird, dass derartige Schwerpunktsetzungen erheblichen Einfluss auf den Bodenhaushalt oder das Insektenweidepotenzial haben können (vgl. Abbildung 54), auch wenn sie in der Praxis in wesentlich geringerem Umfang erfolgen und nicht die gesamte Ackerfläche betreffen. Ihre Auswirkungen auf produktbezogene Gesamtautonomiegrade sind jedoch aus bereits genannten Gründen nur bedingt aussagekräftig. Diese Auswirkungen der Szenarien R01 und R09 bis R15 sind in Abbildung 43 dargestellt. Die Konsumgewohnheiten entsprechen jeweils denen des Jahres 2017 (Status Quo), die Ackerfläche wird in diesen Szenarien stets zu 100 Prozent für den Anbau von Rohstoffpflanzen für die stoffliche Nutzung genutzt. Die Szenarien unterscheiden sich lediglich in der Wahl der Rohstoffpflanzengruppen. So wurde in Szenario R01 der bereits beschriebene Rohstoffpflanzenmix ohne Rohstoffpflanzen der Kunststoffproduktion angewendet. In Szenario R09 wurde derselbe Rohstoffpflanzenmix auf 75 Prozent der Ackerfläche verwendet, während die übrigen 25 Prozent für die Kunststoffproduktion aufgewendet wurden. Der Autonomiegrad sinkt in diesem Szenario infolge der lokalen Polymerproduktion bei gleichem Konsumverhalten um 6 Prozentpunkte auf 101 Prozent. In den Szenarien R10 bis R15 wurde jeweils nur eine einzige Rohstoffpflanzengruppe für ein bestimmtes Produktsegment auf 100 Prozent der Ackerfläche genutzt.

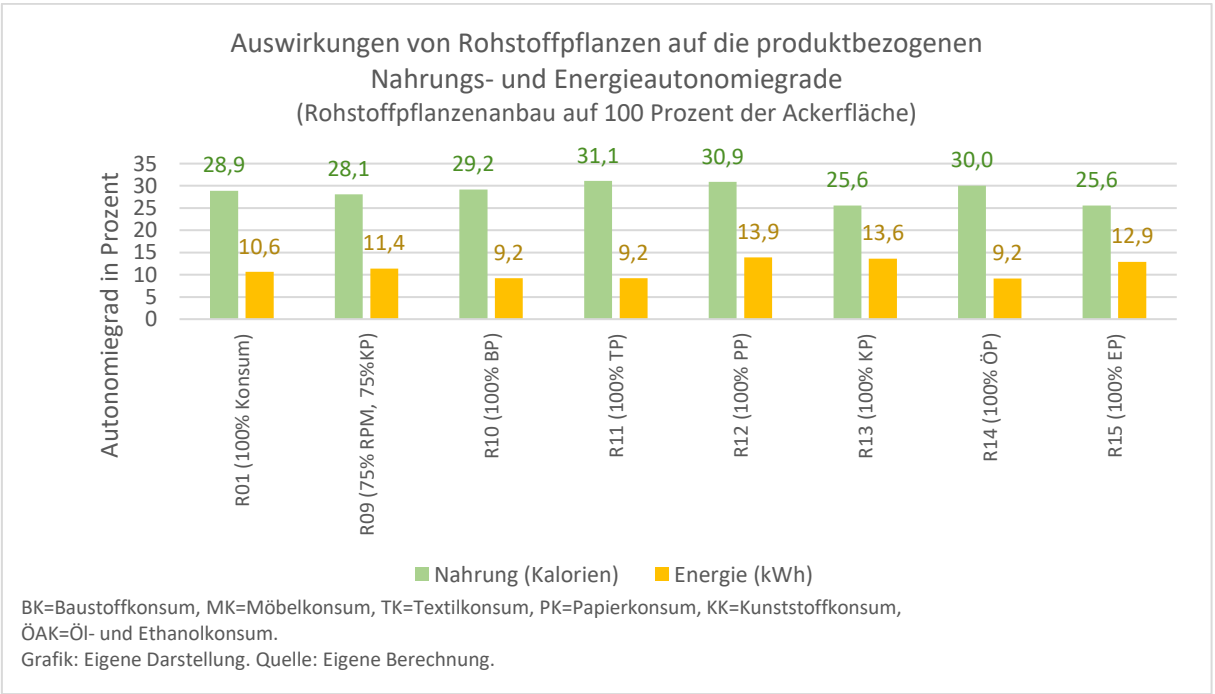


Prozentangabe = Ackerflächenanteil; RPM = Rohstoffpflanzenmix 2035; KP = Kunststoffproduktion; BP = Baustoffproduktion; TP = Textilfaserproduktion; PP = Papierproduktion; KP = Kunststoffproduktion; ÖP = Ölproduktion; EP = Ethanolproduktion; Grafik: Eigene Darstellung. Quelle: Eigene Berechnung.

Abbildung 43: Potenzielle produktbezogene Rohstoffautonomie bei unverändertem Konsum nach Ackerflächennutzung

Eine solche Spezialisierung auf bestimmte Pflanzengruppen für ausgewählte Produktsegmente bewirkt nur im Falle der Baustoffproduktion eine relevante Erhöhung der produktbezogenen Rohstoffautonomie. Dies ist vor allem auf die Rohstoffpflanzen Miscanthus und Faserhanf zurückzuführen, die überdurchschnittlich große Mengen an Biomassen liefern, welche sich für eine stoffliche Nutzung eignen.

Spezialisierungen auf Pflanzen für die Öl- oder Kunststoffproduktion führen dagegen zu erheblichen Einbußen bei der Rohstoff-Gesamtautonomie, was darauf zurückzuführen ist, dass diese beiden Pflanzengruppen geringere Biomasseerträge liefern, die sich für eine stoffliche Nutzung eignen. Dieser Umstand schlägt sich in den geringeren Rohstoffautonomiegraden sichtbar nieder. Rohstoffpflanzen für die Kunststoffproduktion liefern jedoch, ebenso wie Pflanzen der Zellstoff- und Ethanolproduktion, erhebliche Mengen an energetisch nutzbaren Koppelprodukten. Wie in Abbildung 44 dargestellt, führt dies dazu, dass diese drei Pflanzengruppen sich deutlich positiver auf die Energieautonomiegrade auswirken als die übrigen Pflanzengruppen. Zugleich haben Rohstoffpflanzen der Kunststoffproduktion aber auch den negativsten Effekt auf die produktbezogene Nahrungsautonomie. Es erscheint daher sinnvoll, speziell in den Segmenten Textilfasern, Papier und Kunststoffe bevorzugt heimisches Holz und Reststoffe der Holznutzung als Rohstoffe für die stoffliche Nutzung zu verwenden. Kunststoffe könnten z. B. entweder direkt durch Holz oder durch Kunststoffe auf Ligninbasis ersetzt werden.



BK=Baustoffkonsum, MK=Möbelkonsum, TK=Textilkonsum, PK=Papierkonsum, KK=Kunststoffkonsum, ÖAK=Öl- und Ethanolkonsum.
Grafik: Eigene Darstellung. Quelle: Eigene Berechnung.

Abbildung 44: Auswirkungen von Rohstoffpflanzen auf die produktbezogenen Nahrungs- und Energieautonomiegrade

Beispiel-Szenario “2035”

Wie sich Veränderungen der Flächennutzung in einem realitätsnäheren Szenario auswirken, zeigt sich am Beispiel des Szenarios 2035 im Vergleich zum Status Quo. In diesem Szenario wurde der Anteil der Rohstoffpflanzen an der Ackerfläche gegenüber dem Status Quo um den Faktor 12,5 von 0,24 Prozent auf 3,0 Prozent erhöht. Während auch im „Szenario 2035“ deutliche Überschüsse in den Segmenten Baustoffe und Möbel erreicht werden, liegen die Segmente Textilfasern, Papier, Farben & Lacke sowie Reinigungsmittel lediglich in einem Bereich zwischen 37 und 47 Prozent – obwohl auf den Anbau von Rohstoffpflanzen für die Kunststoffproduktion von vornherein verzichtet wurde.

Um auch in diesen vier Segmenten mehr als 100 Prozent Autonomie zu erreichen, muss der Anteil der Rohstoffpflanzen an der Ackerfläche auf 9 Prozent erhöht werden. Zudem müssen die Anteile der Textil- und Papierproduktion an der Rohholzverwendung vergrößert werden. Letzteres geht zwar zulasten der Baustoff- und Möbelproduktion, ist aber angesichts der großen Überschüsse in diesen Bereichen unproblematisch. Die Ausdehnung des ackerbaulichen Rohstoffpflanzenanbaus reduziert allerdings das Nahrungsautonomiepotenzial im Szenario 2035 produktbezogen um 4 Prozentpunkte von 73 Prozent auf 69 Prozent und flächenbezogen um 3 Prozentpunkte von 83 auf 80 Prozent, wenn sie zulasten der Nahrungsproduktionsflächen geht. Auf die Autonomiepotenziale im Energiesektor hat die Vergrößerung der Rohstoffpflanzenanbaufläche in diesem Fall einen geringen positiven Effekt.

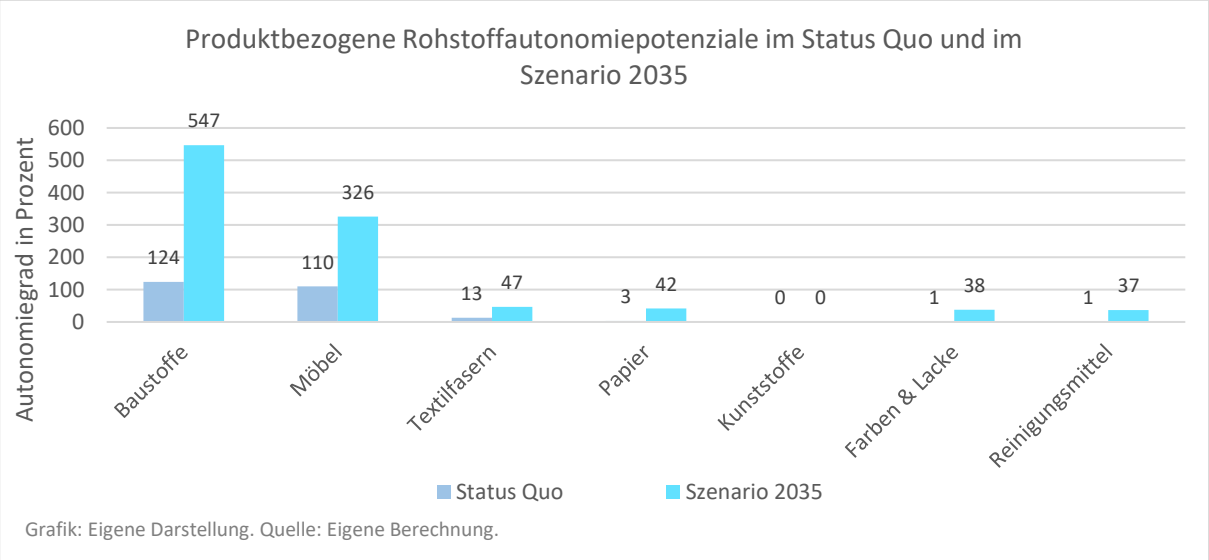


Abbildung 45: Produktbezogene Rohstoffautonomiepotenziale des Landkreises Konstanz im Status Quo und im Szenario 2035

6.4.3.1.3 Produktbezogene Rohstoff-Gesamtautonomie

Für die Berechnung des sektorenübergreifenden produktbezogenen Gesamtautonomiegrades stellt der produktbezogene Rohstoffautonomiegrad einen unverzichtbaren Kennwert dar, auch wenn dieser nicht die gleiche Aussagekraft besitzt, wie dies mit Blick auf die Sektoren Nahrung und Energie der Fall ist. Zudem macht er – trotz gewisser Ungenauigkeiten – ersichtlich, dass Effizienz und Suffizienz im Umgang mit Rohstoffen von entscheidender Bedeutung für die Rohstoffautonomie in Südwestdeutschland sind, während die Flächeneffizienz der Rohstoffproduktion oder eine Ausweitung der Rohstoffpflanzenanbaufläche im Vergleich dazu deutlich geringere Effekte bewirken. So lässt sich durch eine Ausweitung der Rohstoffpflanzenfläche von 0,24 Prozent (Status Quo) auf 100 Prozent der Ackerfläche (Szenario R01) die produktbezogene Rohstoffautonomie bei unverändertem Konsum lediglich von 42 Prozent auf knapp über 100 Prozent steigern. Wird dagegen der Rohstoffverbrauch durch Effizienz und/oder Suffizienz um zwei Drittel reduziert, genügen bereits Ackerflächenanteile im einstelligen Prozentbereich, um Rohstoffautonomiegrade von ca. 150 Prozent zu erreichen. Wie in Abbildung 45 und Abbildung 46 dargestellt, bleiben im Szenario 2035 jedoch (einschließlich des Kunststoffsegmentes) 5 von 7 Produktsegmenten immer noch deutlich unter der Schwelle von 100 Prozent. Im „Szenario 2035“ werden rund 3 Prozent der Ackerfläche für die Rohstoffproduktion aufgewendet. In einem optimierten Szenario für 2035 müssen dagegen ca. 9 Prozent der Ackerfläche aufgewendet werden, um in weiteren Segmenten über die Schwelle von 100 Prozent zu gelangen. Der produktbezogene Gesamtautonomiegrad steigt hierdurch nicht, weil es unter anderem zu deutlichen Einbußen bei den Stroherträgen diverser Nahrungspflanzen kommt, welche sich z. B. für die Produktion von Baustoffen oder von Zellstoff für die Papierproduktion eignen.

Zudem ist eine gewisse Umverteilung bei der Rohholzverwendung erforderlich, wodurch der Autonomiegrad im Segment Möbel von 326 auf 177 Prozent sinkt. Für die Produktion von gewerblich genutzten Möbeln dürfte dies jedoch immer noch deutlich ausreichen. Beim Vergleich des Szenarios 2035 mit dem optimierten Szenario 2035 zeigt sich unter anderem, dass Viskose zumindest mit Blick auf mögliche Flächenkonkurrenzen erhebliche Vorteile gegenüber Lein-, Hanf- oder Nesselfasern aufweist. Mit aus Holz gewonnenen Fasern können die Versorgungslücken in den Segmenten Textilfasern und Papier geschlossen werden, ohne in Konkurrenz zur Nahrungsproduktion treten zu müssen. Aus Reststoffen der Faserproduktion kann zudem Lignin für die Produktion bestimmter Kunststoffe gewonnen werden. Im Gegensatz zur Faser- Papierproduktion lässt sich eine Konkurrenz mit der Nahrungsproduktion bei Produkten, die auf Ölen oder Alkoholen basieren, nicht vermeiden.

Bemerkenswert ist, dass der Energieautonomiegrad durch die vom „Szenario 2035“ ausgehende Optimierung der Rohstoffversorgung produktbezogen um 0,5 Prozentpunkte und flächenbezogen um 0,3 Prozentpunkte steigt.

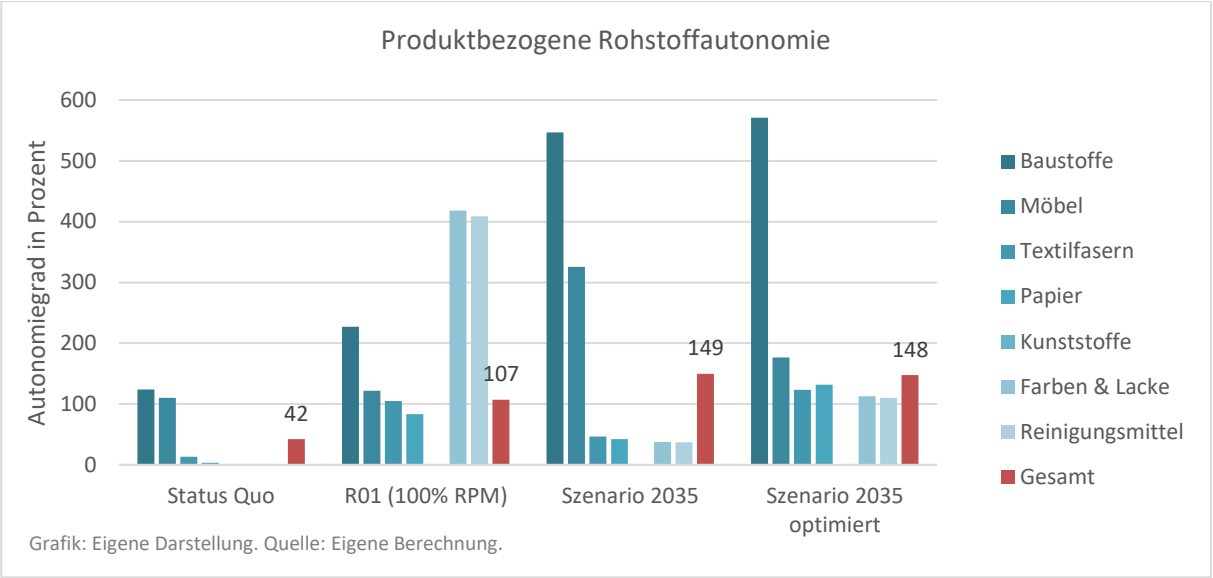
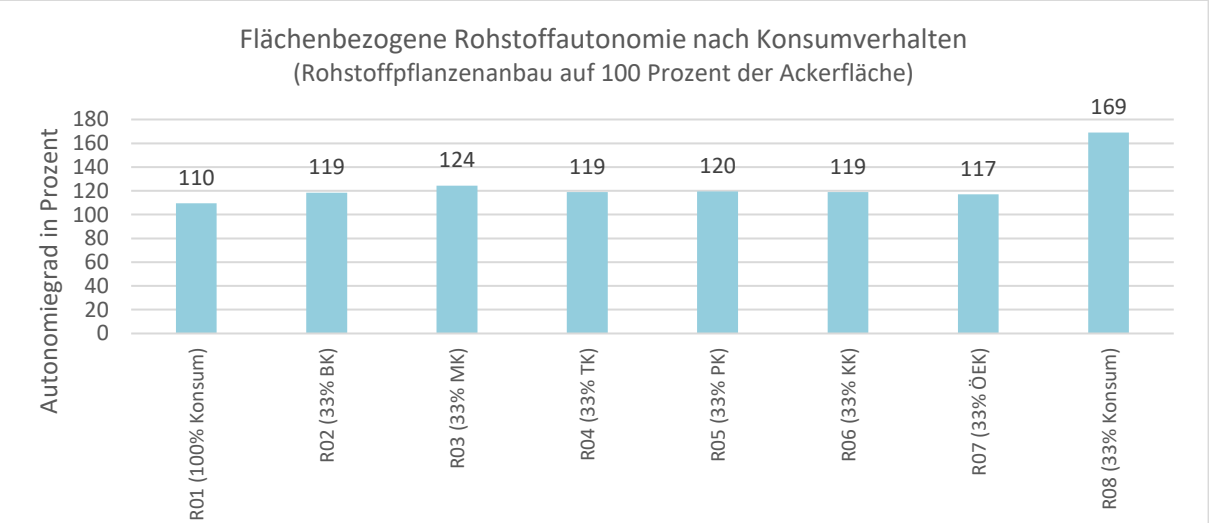


Abbildung 46: Produktbezogene Rohstoff-Gesamtautonomie des Landkreises Konstanz im Status Quo und in verschiedenen Szenarien

6.4.3.2 Flächenbezogene Rohstoffautonomie

6.4.3.2.1 Auswirkungen von Veränderungen des Verbrauchs

Für die Beurteilung der Gesamtautonomie im Rohstoffsektor ist der flächenbezogene Autonomiegrad im Vergleich zu seinem produktbezogenen Pendant, wie bereits erläutert, der wichtigere und wesentlich aussagekräftigere Kennwert, da er auch segmente- und sektorenübergreifend nicht an Genauigkeit verliert. Im Jahr 2017 wäre im Landkreis Konstanz bei den vorherrschenden Verbrauchsgewohnheiten und den für die Rohstoffproduktion genutzten Flächen (Status Quo) eine flächenbezogene Rohstoffautonomie von ca. 52 Prozent möglich gewesen, wenn sämtliche Koppelprodukte effizient genutzt worden wären. Würde die gesamte Ackerfläche für die Rohstoffproduktion genutzt, ließe sich der flächenbezogene Rohstoffautonomiegrad bei unverändertem Verbrauch auf 110 Prozent steigern (Szenario R01). Reduziert man zudem den Konsum in einem der Segmente um zwei Drittel, kann der Autonomiegrad dadurch jeweils um 9 bis 14 Prozentpunkte erhöht werden. Den größten Effekt hat die Verbrauchsreduktion im Segment Möbel. Sie führt zu einem flächenbezogenen Autonomiegrad von 124 Prozent. Den zweitgrößten Effekt hat eine Reduktion des Papierkonsums, die den Autonomiegrad auf ca. 120 Prozent steigen lässt. Die Effekte der Einsparungen in den Segmenten Baustoffe (Szenario R02), Möbel (Szenario R03) und Kunststoffe (Szenario R06) führen jeweils zu einer Steigerung auf 119 Prozent. Den geringsten Effekt hat die Verbrauchsreduktion bei Ölen und Alkoholen (Szenario R07), die den Autonomiegrad auf 117 Prozent steigen lässt. Damit bewirken die Veränderungen in den einzelnen Segmenten jeweils nur relativ geringe Effekte. Wird der Konsum allerdings in allen Segmenten gleichzeitig um zwei Drittel reduziert, steigt der flächenbezogene Rohstoffautonomiegrad auf ca. 169 Prozent.

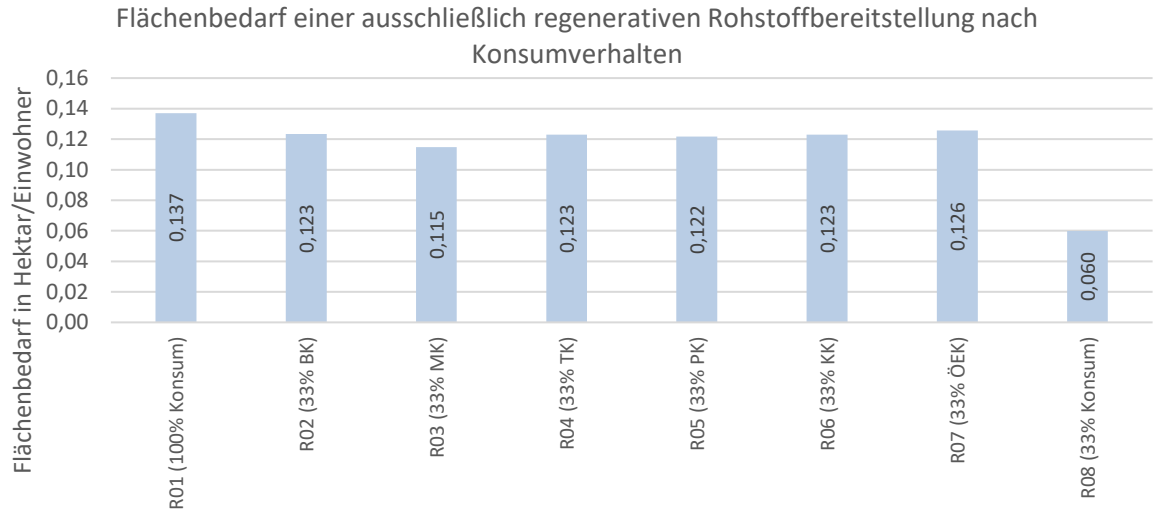


BK=Baustoffkonsum, MK=Möbelkonsum, TK=Textilkonsum, PK=Papierkonsum, KK=Kunststoffkonsum, ÖAK=Öl- und Ethanolkonsum.
Grafik: Eigene Darstellung. Quelle: Eigene Berechnung.

Abbildung 47: Flächenbezogene Rohstoffautonomiegrade nach Konsumverhalten

Insgesamt lässt sich an den Autonomiegraden der Szenarien R01 bis R08 ablesen, dass sich die Effekte einer Verbrauchsreduktion in den betrachteten Segmenten in einer ähnlichen Größenordnung bewegen. Einziger Ausreißer nach oben ist der Effekt eines reduzierten Möbelkonsums, während sich im Segment der flächenintensiven auf Öl- und Ethanol basierenden Produkte der einzige deutlich unterdurchschnittliche Effekt zeigt. Dies ist auf die relativ geringen Verbrauchsmengen zurückzuführen.

Dementsprechend ist auch die pro Person für die Rohstoffproduktion in Anspruch genommene Fläche in den Szenarien R02, R04, R05 und R06 nahezu gleich groß und um ca. 10 bis 11 Prozent geringer als bei unverändertem Konsum. Eine Reduktion des Möbelkonsums um zwei Drittel in Szenario R03 senkt den Flächenbedarf um 16 Prozent. Insgesamt lässt sich der Flächenbedarf durch eine Reduktion des gesamten Rohstoffverbrauchs um zwei Drittel von 0,137 Hektar pro Person auf 0,060 Hektar pro Person verringern. Dies entspricht einer Einsparung von 56 Prozent.

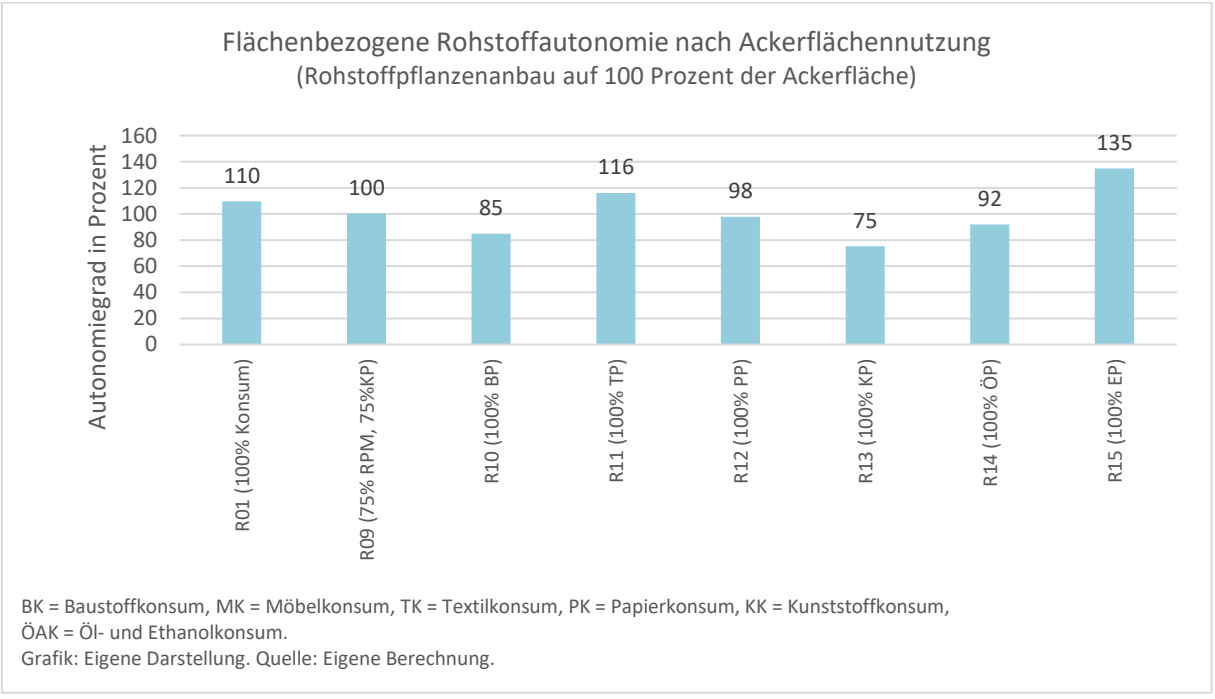


BK=Baustoffkonsum, MK=Möbelkonsum, TK=Textilkonsum, PK=Papierkonsum, KK=Kunststoffkonsum, ÖAK=Öl- und Ethanolkonsum.
Grafik: Eigene Darstellung. Quelle: Eigene Berechnung.

Abbildung 48: Flächenbedarf einer ausschließlich regenerativen Rohstoffbereitstellung nach Konsumverhalten

6.4.3.2.2 Auswirkungen von Veränderungen der Flächennutzung

Eine Spezialisierung auf Pflanzen zur Produktion bestimmter Rohstoffe führt, im Vergleich zum Anbau eines Rohstoffpflanzenmixes (Szenario R01), in zwei von sechs untersuchten Fällen zu einer Steigerung des flächenbezogenen Rohstoffautonomiegrades. Lediglich durch eine Spezialisierung auf Pflanzen der Ethanolproduktion ergibt sich rechnerisch ein deutlicher Anstieg von 110 auf 135 Prozent (Szenario R15). Im Falle der Textilproduktion steigt das flächenbezogene Autonomiepotenzial noch auf 116 Prozent (Szenario R011). Alle übrigen Spezialisierungen senken die flächenbezogene Rohstoffautonomie mehr oder weniger deutlich: Der Anbau von Pflanzen für die Zellstoff- bzw. Papierproduktion führt zu einem Rückgang der Autonomie von 110 auf 98 Prozent (Szenario R12). Die ausschließliche Nutzung von Pflanzen für die Produktion von Ölen (Szenario R14) lässt den Autonomiegrad auf 92 Prozent sinken. Die Spezialisierung auf Pflanzen für die Produktion von Baustoffen führt zu deutlichen Einbußen und einem Rückgang auf 85 Prozent (Szenario R10). Die größten Einbußen ergeben sich aus einer ausschließlichen Nutzung von Pflanzen für die Produktion von Kunststoffen (Szenario R13). In diesem Fall werden 35 Prozentpunkte Autonomie eingebüßt.



BK = Baustoffkonsum, MK = Möbelkonsum, TK = Textilkonsum, PK = Papierkonsum, KK = Kunststoffkonsum, ÖAK = Öl- und Ethanolkonsum.
Grafik: Eigene Darstellung. Quelle: Eigene Berechnung.

Abbildung 49: Potenzielle flächenbezogene Rohstoffautonomie nach Ackerflächennutzung

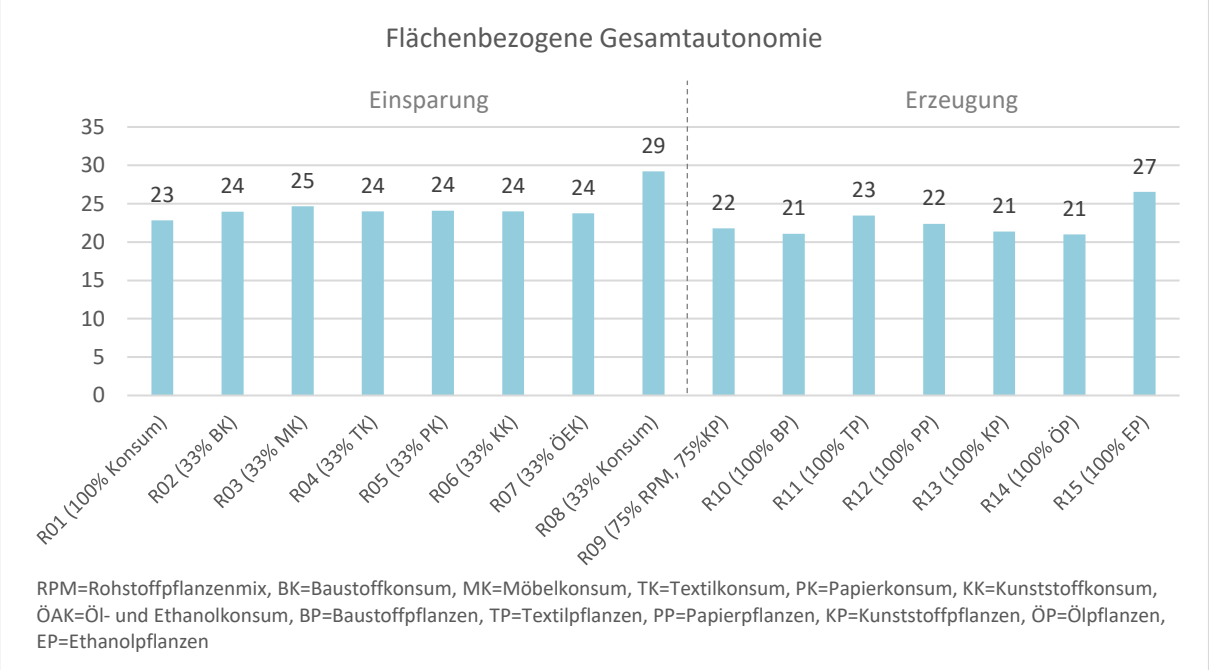
Kunststoffe weisen zwar eine geringe Flächeninanspruchnahme auf, wenn die Koppelprodukte beispielsweise für die Energiegewinnung genutzt werden. Dennoch werden sehr große Flächen benötigt, um den heutigen Bedarf an Polymeren zu decken. Nutzt man im Landkreis Konstanz die gesamte Ackerfläche für die Erzeugung von Rohstoffen für die Kunststoffproduktion, lässt sich dort beim heutigen Kunststoffverbrauch ein produktbezogener Kunststoffautonomiegrad von ca. 200 Prozent erreichen. Das heißt, man bräuchte ungefähr die Hälfte der

Ackerfläche, um den heutigen Kunststoffbedarf zu decken. Als Koppelprodukte erhält man dabei vor allem Energie. Die Konkurrenz zur Nahrungsproduktion ist daher größer als etwa bei der Textilfaserproduktion oder der Erzeugung von Ölen. Denn Textilfasern werden nicht nur in deutlich geringeren Mengen pro Person benötigt, welche in einem günstigeren Verhältnis zu den Ertragspotenzialen stehen. Textilfaser- und Ölpflanzen können darüber hinaus relevante Mengen an Nahrungs- oder Futtermitteln als Koppelprodukte liefern.

6.4.3.2.3 Bedeutung des Rohstoffsektors für das Gesamtautonomiepotenzial

Die Erzeugung von nachwachsenden Rohstoffen ist weniger flächenintensiv als die Bereitstellung erneuerbarer Energien. Sofern jedoch der gesamte heutige Bedarf Deutschlands an Baustoffen, Möbeln, Textilfasern, Zellstoff, Kunststoffen, Ölen und Alkoholen mit nachwachsenden Rohstoffen gedeckt werden soll, wird dafür pro Person mit knapp 0,14 Hektar fast die gleiche Fläche benötigt, wie bei heutigen Ernährungsgewohnheiten mindestens für die Ernährung benötigt wird. Im Landkreis Konstanz entspricht dies ungefähr zwei Dritteln der produktiven Land- und Forstwirtschaftsflächen.

Aufgrund des großen Flächenbedarfs des Energiesektors fallen Maßnahmen im Rohstoffsektor trotzdem nicht sehr ins Gewicht, sofern der Flächenbedarf der Energieversorgung nicht deutlich reduziert wird. Die erreichten flächenbezogenen Gesamtautonomiegrade bleiben in allen Szenarien, deren Priorität die Rohstofferzeugung ist, unterhalb der Marke von 29 Prozent. Im Szenario 2035 bewirkt die Reduktion des gesamten Rohstoffverbrauchs um zwei Drittel einen Anstieg der flächenbezogenen Gesamtautonomie um ca. 8 Prozentpunkte



RPM=Rohstoffpflanzenmix, BK=Baustoffkonsum, MK=Möbelkonsum, TK=Textilkonsum, PK=Papierkonsum, KK=Kunststoffkonsum, ÖAK=Öl- und Ethanolkonsum, BP=Baustoffpflanzen, TP=Textilpflanzen, PP=Papierpflanzen, KP=Kunststoffpflanzen, ÖP=Ölpflanzen, EP=Ethanolpflanzen

Abbildung 50: Flächenbezogene Gesamtautonomiegrade der Szenarien mit der Priorität Rohstoffproduktion

6.4.3.2.4 Auswirkungen der Rohstoffszenarien auf die Sektoren Nahrung und Energie

Zahlreiche Koppelprodukte von stofflich verwendeten nachwachsenden Rohstoffen können als Nahrungsmittel, Futtermittel oder Energieträger verwendet werden. Ihre Aufkommen sind jedoch nicht so groß, dass sie sich erheblich auf die Sektoren Nahrung und Energie auswirken. Lediglich bei einer Spezialisierung auf den Textilpflanzenanbau (Szenario R11) und Papierpflanzen (Szenario R12) steigt der Nahrungsautonomiegrad im Vergleich zum Rohstoffpflanzenmix um rund 2 Prozentpunkte auf 31 Prozent an, da in diesen Fällen größere Mengen an Öl und Presskuchen als Koppelprodukte anfallen können. Beim Anbau von Pflanzen für die stoffliche Ölnutzung fallen dagegen nur Presskuchen als Futtermittel an, weshalb der Nahrungsautonomiegrad in diesem Szenario (R14) lediglich 30 Prozent beträgt. Die ausschließliche Baustoffproduktion führt im Vergleich zum Rohstoffpflanzenmix RPM zu keiner größeren Veränderung. Der ausschließliche Anbau von Pflanzen für die Kunststoff- (R13) oder Ethanolproduktion (R15) senkt die Nahrungsautonomie dagegen auf Werte unter 26 Prozent.

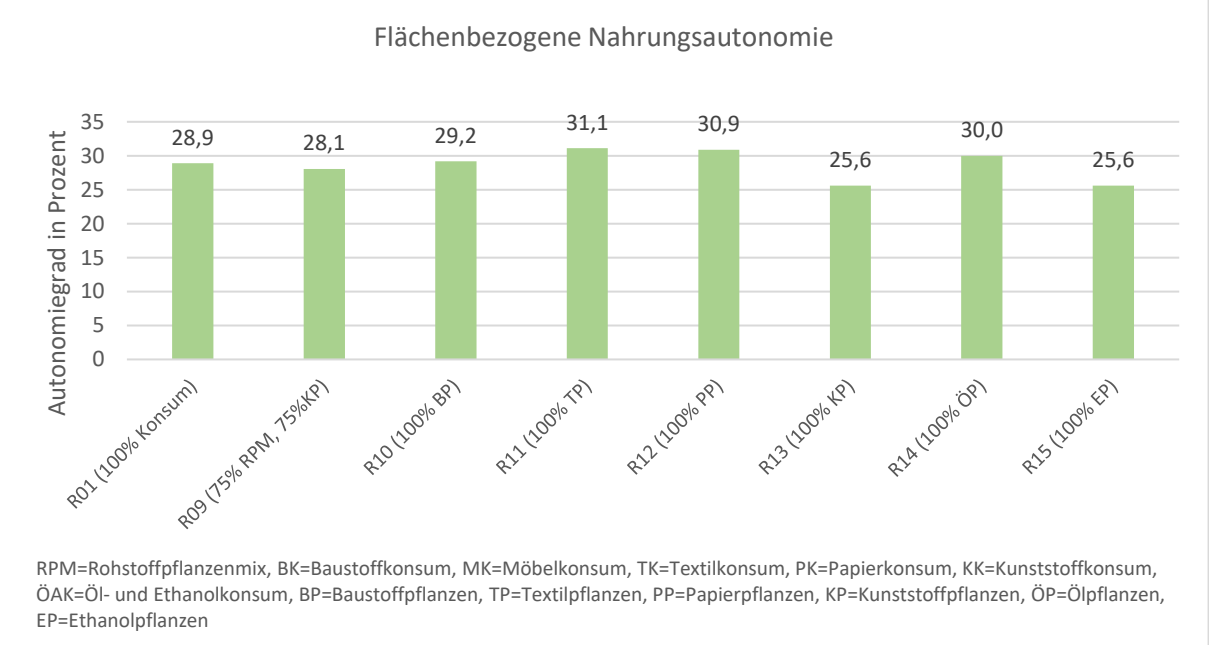


Abbildung 51: Flächenbezogene Nahrungsautonomie in den Rohstoffszenarien

Im Gegensatz zum Aufkommen an Nahrungsmitteln ist das Aufkommen energetisch nutzbarer Koppelprodukte je nach Rohstoffpflanzensegment recht unterschiedlich. Im Vergleich zu der Pflanzenkombination RPM, die alle Segmente außer dem Kunststoffsegment beliefert (Szenario R01), sinkt der flächenbezogene Energieautonomiegrad bei einer ausschließlichen Nutzung von Pflanzen, die vorrangig der Baustoff-, Textil- oder Ölproduktion dienen (vgl. Abbildung 52). Pflanzen, die vorrangig der Papier-, Kunststoff- und Ethanolproduktion dienen, leisten, wie in Abbildung 52 dargestellt, mit ihren Koppelprodukten einen überdurchschnittlichen Beitrag zur Energieversorgung. Der Effekt der energetisch nutzbaren Koppelprodukte aus der

Rohstofferzeugung ist allerdings angesichts der vollständigen Nutzung der Ackerflächen vergleichsweise gering.

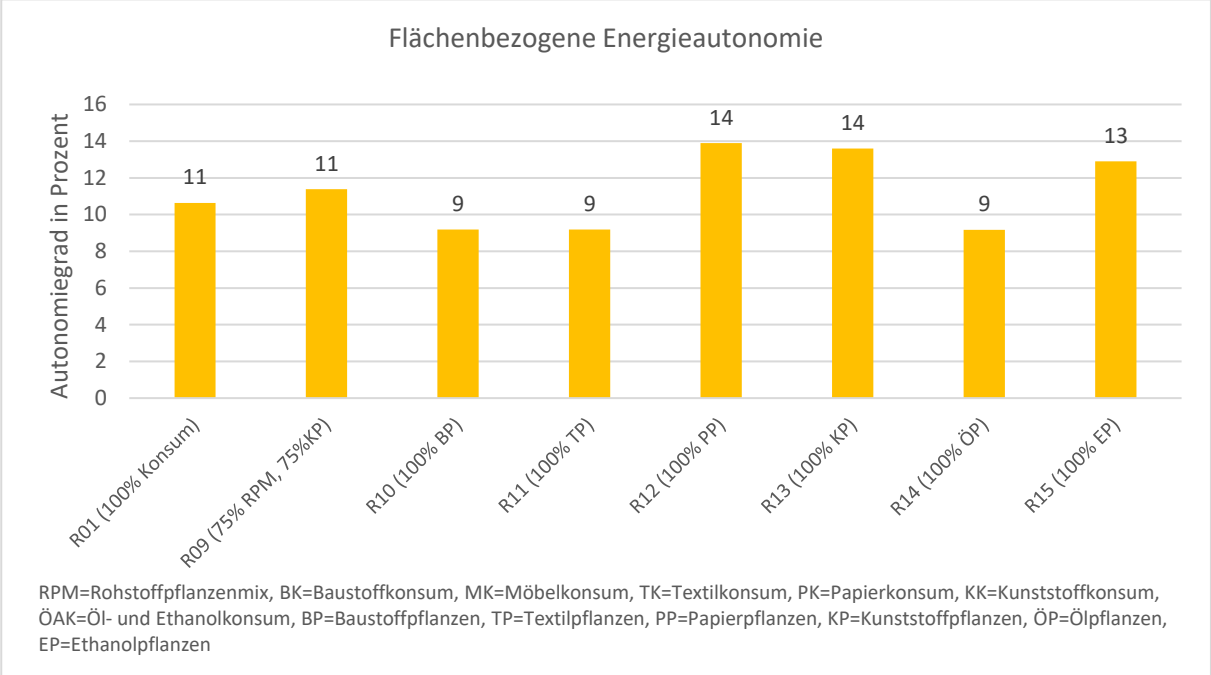


Abbildung 52: Flächenbezogene Energieautonomiegrade der Szenarien mit Priorität Rohstoffproduktion.

6.4.4 Ökologische Kennwerte

6.4.4.1 Potenzielle Insektenweidefläche

Die potenzielle Insektenweidefläche, auf der Insekten Pollen oder Nektar finden können, hängt von zahlreichen Faktoren ab. In den folgenden Ausführungen wurden ausschließlich die potenziellen Insektenweideflächen innerhalb der verfügbaren Ackerflächen betrachtet. Blühendes Grünland und blühende Ackerrandstreifen blieben somit unberücksichtigt.

Die wichtigsten Einflussgrößen sind die Flächenanteile von Futter-, Energie- und Rohstoffpflanzen sowie die gewählte Generation der Energiepflanzen. Die Anteile der Futterpflanzen lassen sich an die Ernährungsweise anpassen und gehen bei einer rein veganen Lebensweise gegen Null. Dies erscheint jedoch eher eine rein theoretische Option darzustellen, da beispielsweise auch Nutztiere und Haustiere, die nicht der menschlichen Ernährung dienen, Futtermittel benötigen. Dennoch zeigt diese theoretische Option den nutzbaren Spielraum auf. Im Folgenden wird dargestellt, wie sich die verschiedenen Einflussgrößen auf die Insektenweidepotenziale auswirken.

6.4.4.1.1 Insektenweidepotenziale nach Ernährungsweise und Flächennutzung

Im Bestand (Status Quo) sind heute ca. 3 bis 4 Prozent der Ackerfläche mit Blühpflanzen belegt, die Nektar spenden. Dabei handelt es sich vor allem um Raps, der für die Speiseölproduktion verwendet und zu beträchtlichen Teilen energetisch genutzt wird. Daher würde eine Reduktion der Energiepflanzenanbaufläche zugunsten der Nahrungsmittelproduktion den Anteil der Nektarpflanzen nur erhöhen, wenn der Anteil der Futterpflanzen deutlich reduziert würde. Bei einem unveränderten Verhältnis von Nahrungs- zu Futterpflanzen ginge ein Verzicht auf Energiepflanzen mit einer Reduktion der Insektenweidefläche einher, wahrscheinlich um ein knappes Drittel. Je höher der Anteil pflanzlicher Nahrungsmittel an der Nahrungsproduktionsfläche ist, desto wahrscheinlicher ist ein Zuwachs der Insektenweidefläche, insbesondere, wenn Rapsöl oder Sonnenblumenöl genutzt werden, um den Pflanzenölbedarf zu decken. Bei einer vegetarischen oder veganen Ernährung ist der Anteil der Insektenweidepflanzen daher potenziell am höchsten, da hier die geringsten Futterflächen benötigt werden.

Wie in Abbildung 53 dargestellt, werden in den berechneten Szenarien aber auch bei veganer Ernährung und einem vollständigen Verzicht auf Futter-, Energie und Rohstoffpflanzen höchstens Nektarpflanzenanteile von ca. 5 Prozent erreicht. Von 3 oder 4 Prozent auf rund 6,6 Prozent würde die Nektarpflanzenfläche dagegen anwachsen, wenn die heutigen Energiepflanzen auf 18,5 Prozent der Ackerfläche durch Energiepflanzen der zweiten Generation ersetzt würden.

Ähnliche Werte werden bei einem reinen Nahrungspflanzenanbau nur erreicht, wenn die Anteile von Raps und Sonnenblumen überproportional erhöht werden. Bei einer am Nahrungsbedarf orientierten Verteilung der Anbauflächen werden in der Nahrungsproduktion aber in der Regel geringere Blühpflanzenanteile erreicht als bei einer Kombination von Nahrungspflanzen mit Energiepflanzen der zweiten Generation. Zudem ist das Nektarangebot im Jahresverlauf ungünstiger verteilt, da der Raps am Ende seiner Blütezeit als Insektennahrungsquelle nicht gleichwertig ersetzt wird. Eine pauschale Kritik an Energiepflanzen mit Blick auf den Arten- und Insektenschutz ist der Sachlage daher nicht angemessen. Denn zu bedenken ist auch, dass Energiepflanzen der zweiten Generation fast keinen Pflanzenschutz benötigen.

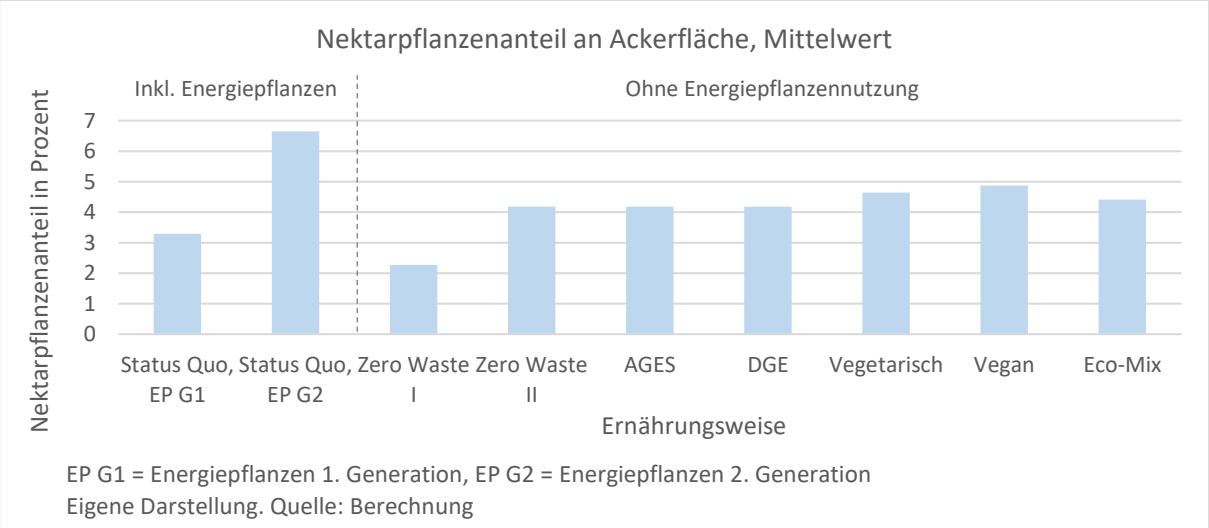
In Tabelle 77 sind die hier verglichenen Szenarien nach Ernährungsweise zusammengefasst. In Abbildung 53 sind die Anteile der Nektar spendenden Nutzpflanzen an der Ackerfläche im Landkreis Konstanz dargestellt, die sich aus diesen Szenarien ergeben. Die Szenarien sind nach der jeweiligen Ernährungsweise benannt.

Tabelle 77: Beschreibung der Szenarien zu möglichen ernährungsbedingten Ackerflächennutzungen

Szenario	Kürzel	Energiepflanzen-anteil	Anteil Nachwachsen-der Rohstoffe	Futterpflanzenanteil
Status Quo, EP G1	-	18,5% EP G1	0,24% NawaRo	46% Futterpflanzen
Status Quo, EP G2	-	18,5% EP G2	0,24% NawaRo	46% Futterpflanzen
Zero Waste I	N1	keine EP	keine NawaRo	57% Futterpflanzen
Zero Waste II	N3	keine EP	keine NawaRo	15% Futterpflanzen
AGES	N5	keine EP	keine NawaRo	15% Futterpflanzen
DGE	N7	keine EP	keine NawaRo	15% Futterpflanzen
Vegetarisch	N9	keine EP	keine NawaRo	5% Futterpflanzen
Vegan	N11	keine EP	keine NawaRo	keine Futterpflanzen
Eco-Mix	N15	keine EP	keine NawaRo	10% Futterpflanzen

EP G1 = Energiepflanzen 1. Generation, EP G2 = Energiepflanzen 2. Generation,

Die grafische Darstellung macht die Bedeutung deutlich, die dem Futterflächenanteil mit Blick auf das Insektenweidepotenzial zukommt, wenn auf einen Energiepflanzenanbau verzichtet wird. Mit zunehmendem Futterflächenanteil sinkt das Insektenweidepotenzial. Die Nutzung von Energiepflanzen der zweiten Generation wirkt sich dagegen positiv auf das Insektenweidepotenzial aus. Die jahreszeitliche Verteilung des Insektenweideangebots wird im Abschnitt 6.4.4.1.3 ausführlicher dargestellt.



EP G1 = Energiepflanzen 1. Generation, EP G2 = Energiepflanzen 2. Generation
Eigene Darstellung. Quelle: Berechnung

Abbildung 53: Anteil der Nektarpflanzen an der Ackerfläche nach Ernährungsweise und Energiepflanzennutzung

6.4.4.1.2 Insektenweidepotenzial von Energie- und Rohstoffpflanzen (Flächenanteil)

Als wichtiges Insektenweidepotenzial wird hier der Anteil der nektarspendenden Pflanzen an der Ackerfläche betrachtet. Es bezieht sich nicht auf die Nektarerträge pro Hektar und Jahr. Dieses flächenbezogene Insektenweidepotenzial von Energie- und Rohstoffpflanzen hängt in hohem Maße von der gewählten Pflanzenkombination und den ihnen zugewiesenen Anteilen

an der Ackerfläche ab. Nachfolgend werden daher beispielhaft die Nektarpflanzenanteile an der gesamten Ackerfläche beschrieben, die sich aus den zuvor definierten Szenarien und Pflanzenkombinationen ergeben. Dabei wurde jeder Pflanze einer Pflanzengruppe der gleiche Anteil an der Fläche der jeweiligen Pflanzengruppe zugewiesen. Der in Abbildung 54 dargestellte Anteil an der Ackerfläche stellt den Durchschnitt über die gesamte Vegetationsperiode dar.

Im heutigen Bestand (Status Quo) trägt Raps den größten Teil zum Insektenweidepotenzial auf den Ackerflächen bei. Da es nach dem Ende der Rapsblüte an Blühpflanzen mangelt, liegt der Durchschnittswert der gesamten Vegetationsphase von ca. 3,3 Prozent jedoch deutlich unter dem Flächenanteil des Rapsanbaus. Ähnlich verhält es sich im Szenario E01, in dem die gesamte Ackerfläche für den Anbau von Energiepflanzen der ersten Generation genutzt wird. Auch hier stellt Raps fast das gesamte Insektenweidepotenzial bereit. Insgesamt ergibt sich jedoch mit 7,5 Prozent ein Insektenweidepotenzial, das den Wert des Status Quo um mehr als 100 Prozent übertrifft. Bei einer Nutzung von Energiepflanzen der zweiten Generation, wie in Szenario E03 beschrieben, steigt der Anteil der Nektarpflanzen auf 25,6 Prozent, was im Vergleich zum Status Quo fast dem achtfachen Wert entspricht. Die Blütezeit der Energiepflanzen zweiter Generation erstreckt sich über die gesamte Vegetationsperiode von März bis Oktober (vgl. Abbildung 57). Ein noch höherer Wert als mit Energiepflanzen der zweiten Generation wird nur mit einem ausschließlichen Anbau von Ölpflanzen erreicht. Da jedoch auch in diesem Fall Raps den größten Anteil des Insektenweidepotenzials stellt, ist die Verfügbarkeit der Insektennahrung über den Verlauf der Vegetationsperiode im Vergleich zu den Energiepflanzen der zweiten Generation sehr ungleich verteilt.

Wie anhand der Szenarien R10 und R11 dargestellt ist, weisen Baustoffpflanzen und Textilfaserpflanzen zwar ein erhebliches Potenzial als Insektenweide auf, doch ist auch in diesen beiden Fällen die Zahl der Pflanzen vergleichsweise gering. Besonders relevant ist die Fasernessel, die wertvollen Lebensraum und Nahrung für Schmetterlinge, Spinnen und eine große Zahl sonstiger Kleinlebewesen bietet, jedoch keinen Nektar spendet. Nektar produzieren unter den Baustoff- und Textilfaserpflanzen der Blauglockenbaum und der Faserlein. Die Mengen sind jedoch vergleichsweise gering. Keinerlei Nektar produzieren die Pflanzen der Papierproduktion (PP) sowie der Kunststoff- und Ethanolproduktion (KP und EP). Ihr Insektenweidepotenzial ist daher, wie in den Szenarien R12, R13 und R15 dargestellt, sehr gering.

Die jeweiligen Anteile der Nektarpflanzen an den verschiedenen Energie- und Rohstoffpflanzengruppen sind in Abbildung 54 in einer Übersicht dargestellt.

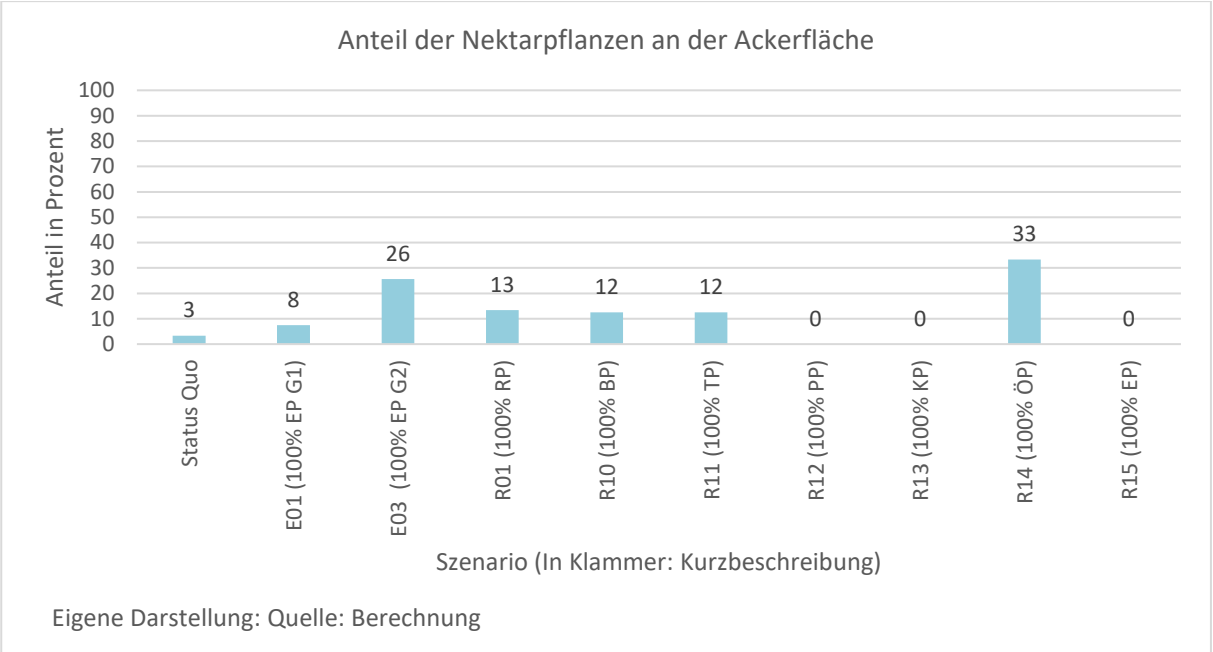


Abbildung 54: Anteil der Nektarpflanzen an der Ackerfläche nach Energie- und Rohstoffpflanzennutzung

6.4.4.1.3 Blühkalender

Die im Folgenden als Blühkalender bezeichneten Darstellungen geben den Flächenanteil der Blühpflanzen an der Ackerfläche im Jahresverlauf wieder. Diese Darstellung macht ersichtlich, in welchen Monaten Insekten ein Pollen- oder Nektarangebot auf den Ackerflächen vorfinden und welche Größe die blühenden Flächen in den einzelnen Monaten haben. Zudem sind die Darstellungen nach den einzelnen Blühpflanzen differenziert, sodass sich auch die Menge und die Art des Nahrungsangebots abschätzen lässt.

So ist in Abbildung 55 ersichtlich, dass bei einer Weiterentwicklung des Status Quo in den Monaten April und Mai ein besonders großes Nektarangebot vorhanden ist, während die Insekten im Juni mit einem deutlichen Rückgang des Angebotes zurechtkommen müssen. Als Weiterentwicklung wurde hier ein zunehmender Umstieg auf eine lokale Produktion der benötigten Lebensmittel angenommen. Dadurch kam es zu einer Veränderung der Nahrungspflanzenzusammensetzung. Die jeweiligen Anteile der Sektoren Nahrungs-, Energie- und Rohstoffproduktion an der gesamten Ackerflächennutzung wurden jedoch beibehalten.

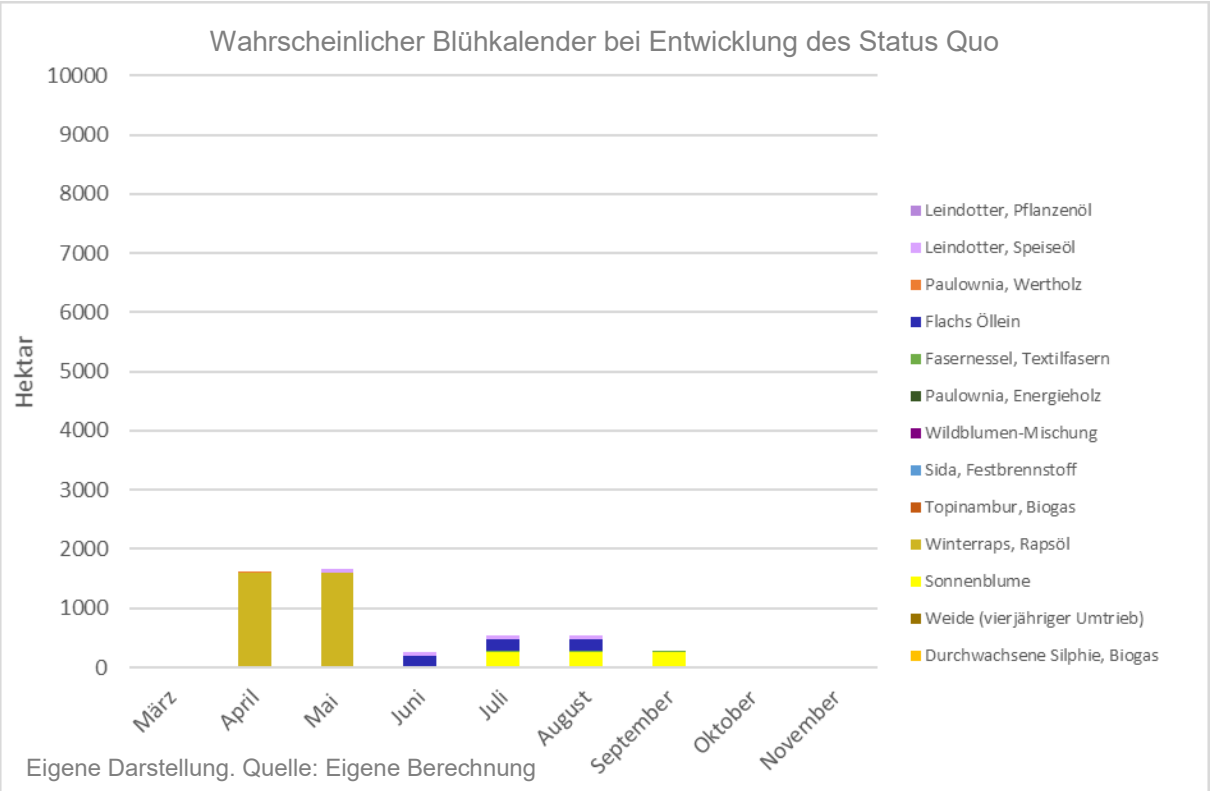


Abbildung 55: Wahrscheinlicher Blühkalender bei Entwicklung des Status Quo

In Szenario E01, in dem ausschließlich Energiepflanzen der ersten Generation angebaut werden, entfällt das Nahrungsangebot für Insekten nach dem Ende der Rapsblüte praktisch vollständig. Dieses Szenario ist in Abbildung 56 abgebildet. Ganz anders stellt sich die Entwicklung im Szenario E03 dar, in dem ausschließlich Energiepflanzen der zweiten Generation angebaut werden. In diesem Szenario gibt es bereits im März ein gewisses Nahrungsangebot, das im Sommer deutlich zunimmt und erst im Zeitraum Oktober/November endet. Dieses Szenario ist in Abbildung 57 dargestellt.

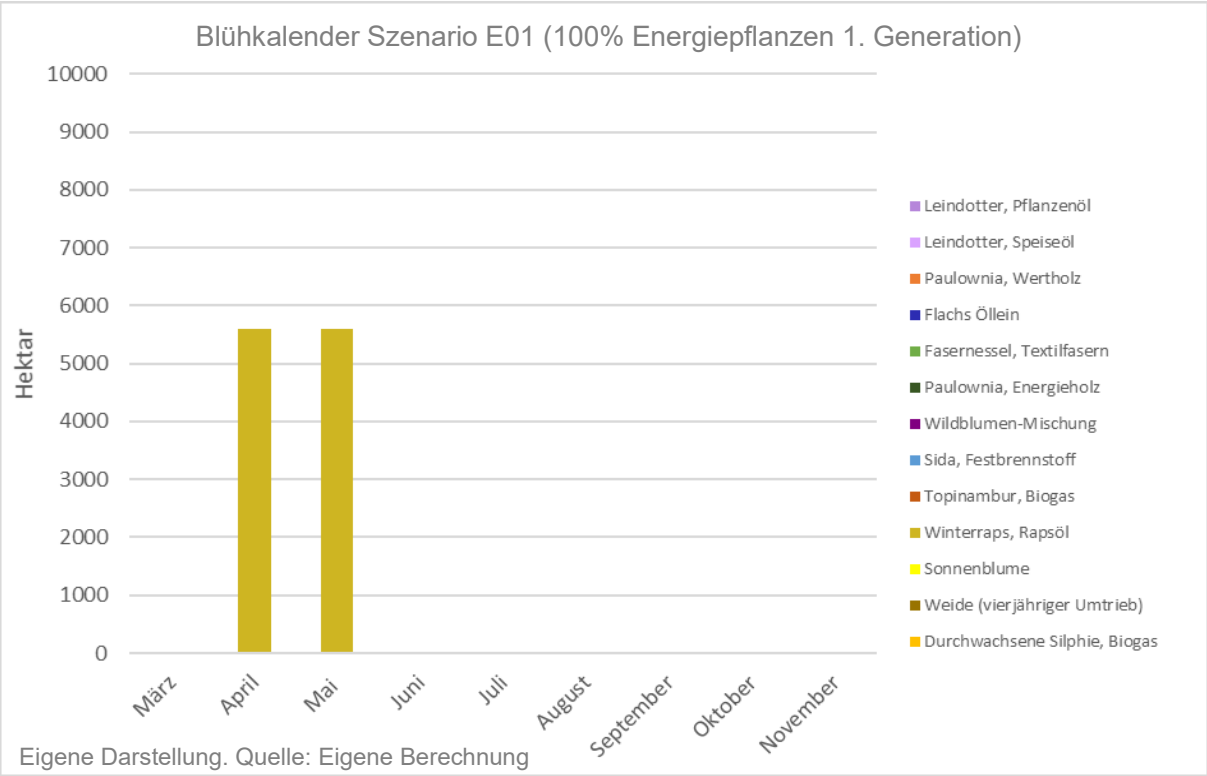


Abbildung 56: Blühkalender im Szenario E01 (100% Energiepflanzen der 1. Generation)

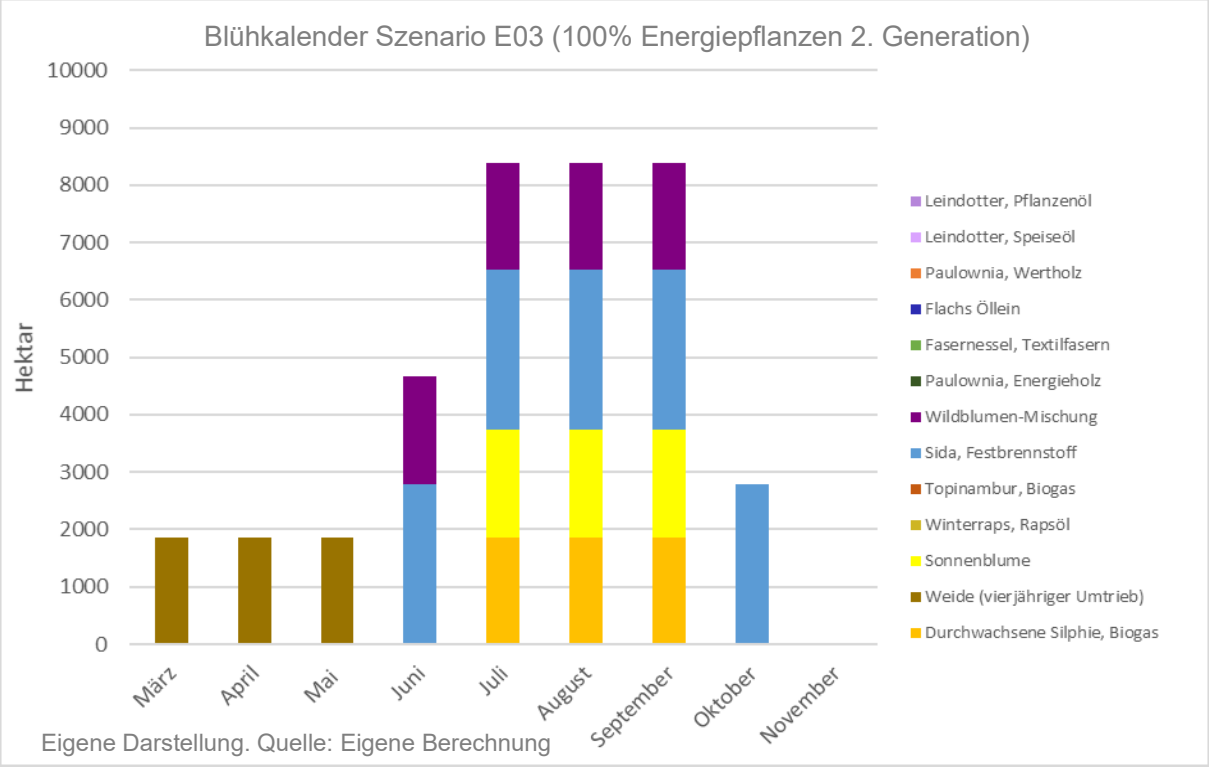


Abbildung 57: Blühkalender im Szenario E03 (100% Energiepflanzen der 2. Generation)

In Abbildung 58 ist die Entwicklung der blühenden Fläche im Jahresverlauf dargestellt, die sich aus einem ausschließlichen Anbau von Rohstoffpflanzen ergeben könnte. In diesem Fall, dem

Szenario R01, nimmt die blühende Fläche im Laufe des Sommers ebenfalls zu. Sie bleibt jedoch deutlich kleiner als im Fall der Energiepflanzen zweiter Generation. Zudem zeigt sich eine Verschiebung von nektarspendenden Pflanzen hin zum Pollenlieferanten Fasernessel. Die Fasernessel bietet jedoch erhebliche Vorteile für Schmetterlinge, Spinnen und Insekten, die nicht oder in geringerem Maße auf Nektar angewiesen sind.

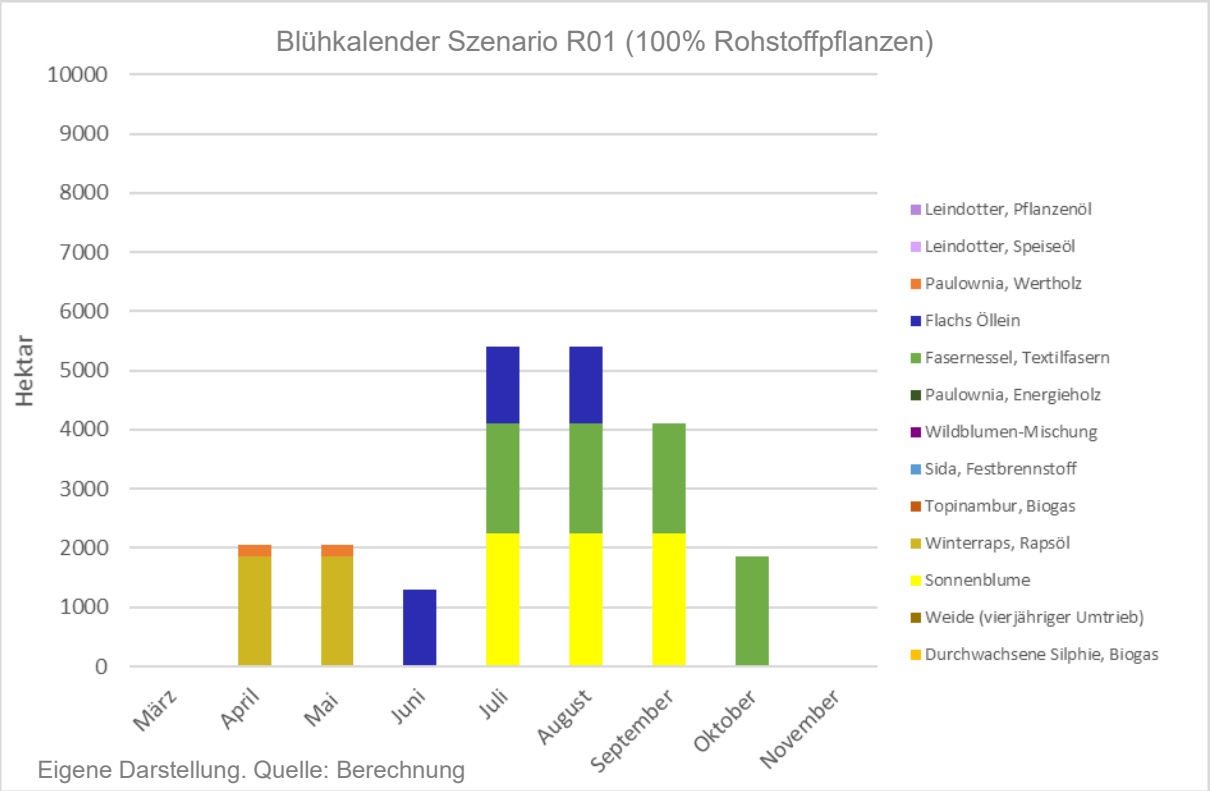


Abbildung 58: Blühkalender im Szenario R01 (100% Rohstoffpflanzen)

In Abbildung 59 ist der wahrscheinliche Blühkalender dargestellt, der sich ergibt, wenn die Ackerflächenanteile der Energie- und Rohstoffpflanzen dem Status Quo entsprechend beibehalten werden, aber auf der Energiepflanzenfläche ausschließlich Energiepflanzen der zweiten Generation angebaut werden.

Im Vergleich zu einem nahezu unverändert fortgesetzten Status Quo (Abbildung 55) bricht das Nahrungsangebot hier nicht nach Ende der Rapsblüte stark ein, sondern wird durch Pflanzen fortgesetzt, die ebenfalls reichlich Nektar spenden. Hier sind besonders Sida, Silphie, Sonnenblumen und Wildblumenmischungen zu nennen. Sie liefern zwar pro Hektar geringere Mengen an Nektar, kompensieren dies aber zu guten Teilen durch deutlich größere Flächenanteile. In April und Mai steht allerdings ein deutlich geringeres Nektarangebot als im Falle des Status Quo zur Verfügung.

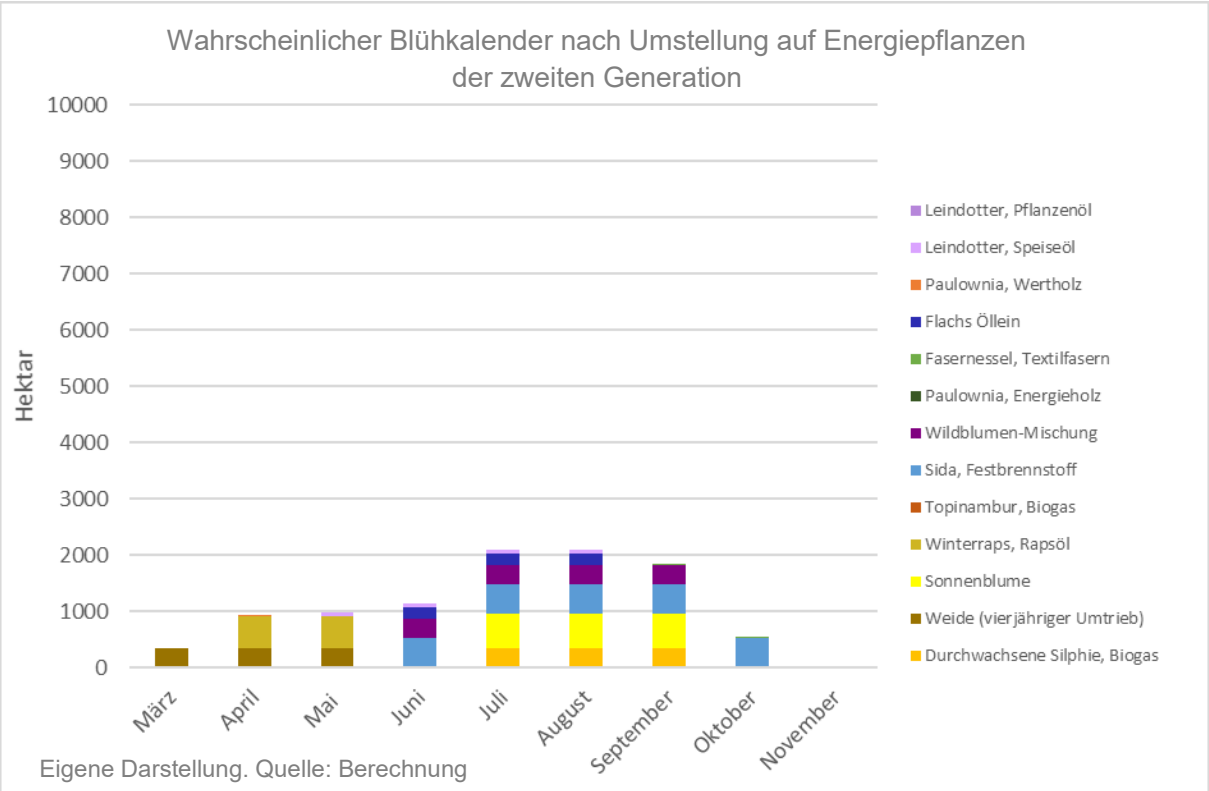


Abbildung 59: Wahrscheinlicher Blühkalender nach Umstellung auf Energiepflanzen der zweiten Generation bei Fortbestand der Sektorenanteile des Status Quo (18,5 Prozent Energiepflanzen, 0,2 Prozent Rohstoffpflanzen)

In Abbildung 60 sind die Anteile der blühenden Flächen dargestellt, die sich im Jahresverlauf ergeben, wenn neben der Umstellung auf Energiepflanzen der zweiten Generation auch eine Umstellung der Ernährung vollzogen wird. In diesem Fall wurde die Ernährungsweise Eco-Mix gewählt und eine reduzierte Verschwendung angenommen. Die Flächenbelegung mit Nahrungspflanzen wurde an dem Bedarf an Nahrungsmitteln orientiert, der sich aus dieser Ernährungsweise ergibt. Der Anteil von Energiepflanzen (15 Prozent) und Rohstoffpflanzen (3 Prozent) ist dabei zusammengenommen nicht höher als im Status Quo (Stand 2017). Aufgrund des geringeren Flächenbedarfs dieser Ernährungsweise können anstelle von Futterpflanzen, die für die Viehhaltung benötigt werden, auf größerer Fläche Pflanzen angebaut werden, die der Speiseölproduktion, der Energiegewinnung oder Rohstoffbereitstellung dienen. Diese Annahmen entsprechen dem Szenario 2035. Verglichen mit einem Szenario, in dem die Ernährungsgewohnheiten und Flächenanteile von Nahrungs-, Energie- und Rohstoffpflanzen beibehalten werden und lediglich ein Umstieg auf Energiepflanzen der zweiten Generation vollzogen wird (Weiterentwicklung des Status Quo), wächst in dieser Konstellation die blühende Fläche in den Monaten Juli und August noch einmal um ein Viertel an. Zudem nimmt auch die Vielfalt der Pflanzen weiter zu.

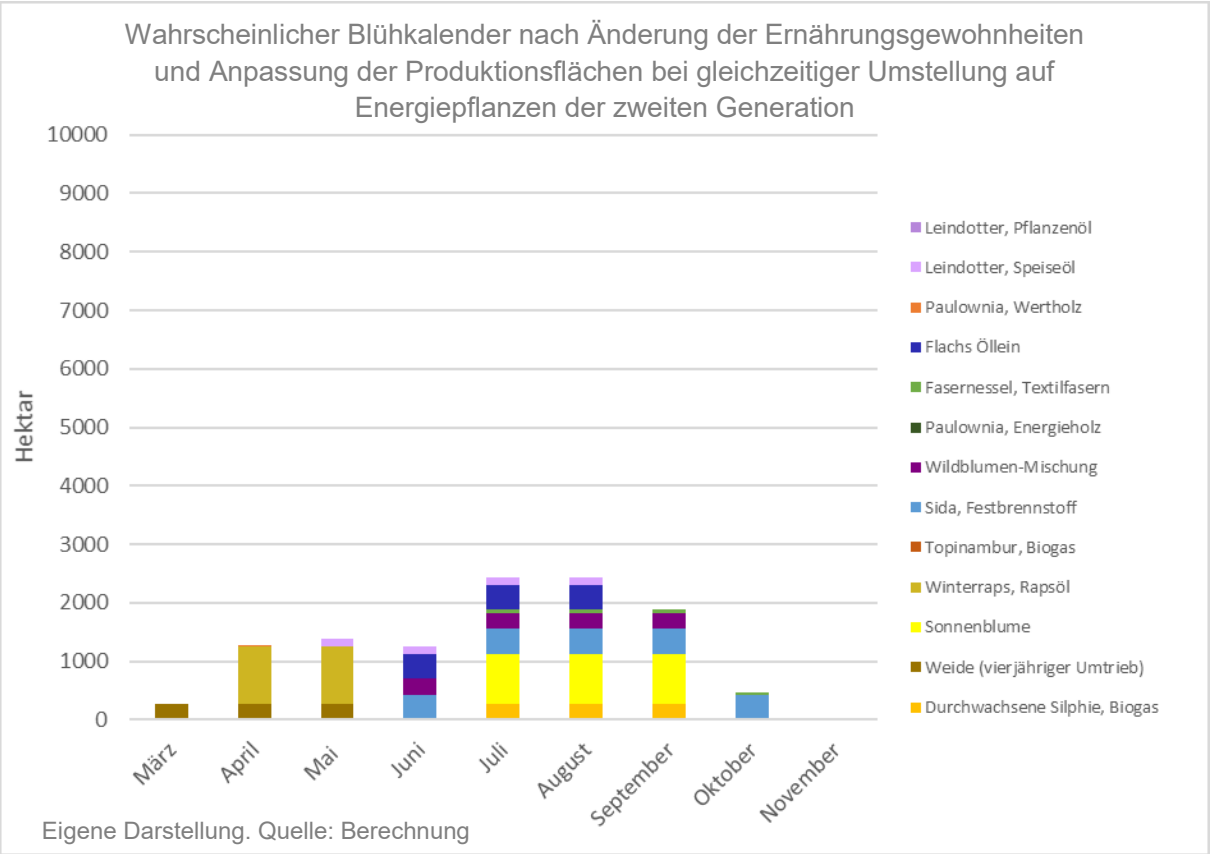
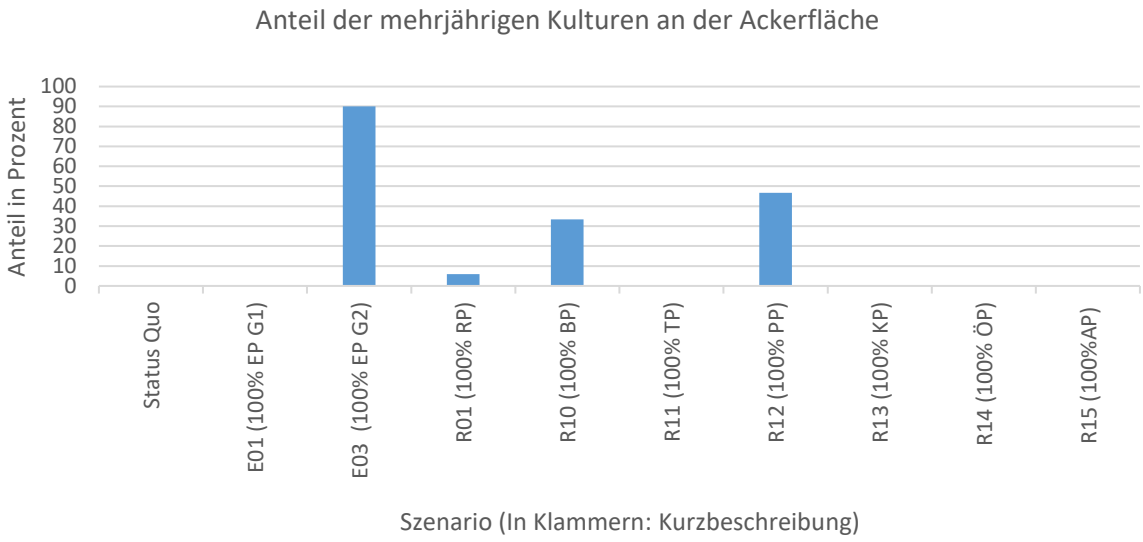


Abbildung 60: Wahrscheinlicher Blühkalender nach Änderung der Ernährungsgewohnheiten und Anpassung der Produktionsflächen bei gleichzeitiger Umstellung auf Energiepflanzen der zweiten Generation (Szenario 2035).

6.4.4.2 Bodenschutz durch Mehrjährigkeit

Mehrjährige Pflanzen schützen den Boden aufgrund der ganzjährigen Durchwurzelung besser vor Erosion als einjährige Pflanzen. Heute (Status Quo) haben mehrjährige Pflanzen nur einen sehr geringen Anteil an der Ackerfläche. Unter Energiepflanzen der zweiten Generation ist der Anteil mehrjähriger Pflanzen dagegen besonders hoch – in der gewählten Pflanzenkombination liegt er bei 90 Prozent. Wesentlich geringer ist er unter den Rohstoffpflanzen. Bei einer Nutzung von Pflanzen für die Papierproduktion (Szenario R12) und für die Baustoffproduktion (Szenario R10) sind jedoch ebenfalls relativ hohe Anteile wahrscheinlich. In einer weitgehend an den Rohstoffbedarf angepassten Rohstoffpflanzenkombination, wie sie in Szenario R01 zusammengestellt wurde, bleibt ihr Anteil jedoch deutlich unterhalb des zweistelligen Prozentbereichs. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass mehrjährige Pflanzen unter den Pflanzen für die Textil-, Kunststoff-, Öl- und Ethanolproduktion bisher keinerlei Bedeutung haben. Dies könnte sich ändern, wenn z. B. Stroh von mehrjährigen Gräsern für die Ethanolproduktion genutzt werden könnte[33]. Eine gezielte Auswahl mehrjähriger Energie- und Rohstoffpflanzen kann daher dem Ziel des Erosionsschutzes sehr zuträglich sein.



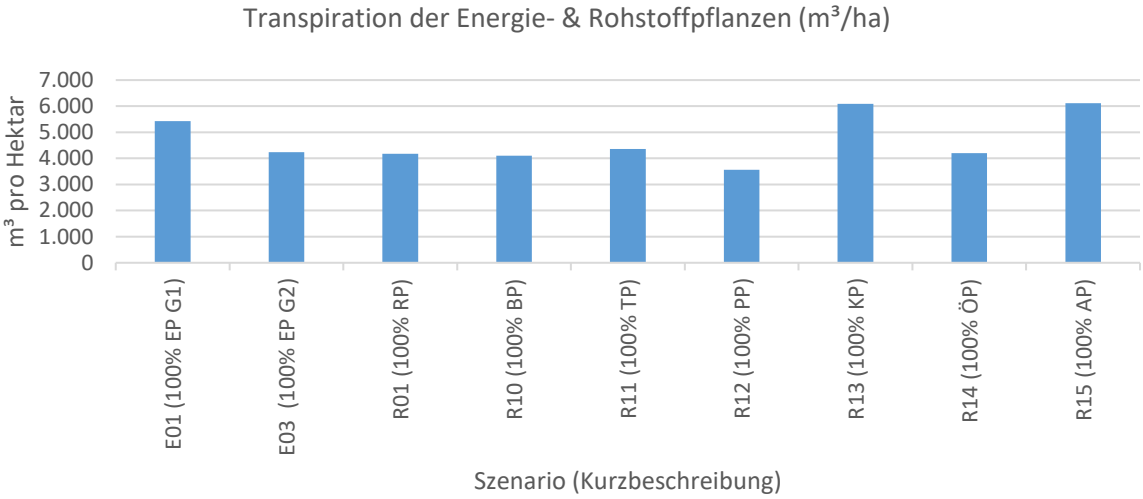
EP=Energiepflanzen, G=Generation, RP=Rohstoffpflanzen, BP=Pflanzen für Baustoffproduktion, TP=Pflanzen für Textilproduktion, PP=Pflanzen für Papierproduktion, KP=Pflanzen für Kunststoffproduktion, ÖP=Pflanzen für Ölproduktion, AP=Pflanzen für Alkoholproduktion
Eigene Darstellung. Quelle: Berechnung

Abbildung 61: Anteile mehrjähriger Pflanzen unter Energie- und Rohstoffpflanzen nach Szenario

[33] Miscanthusstroh für die Produktion von Lignocellulosezucker und Ethanol zu nutzen, wurde bereits erfolgreich getestet. (Clairant, 2019)

6.4.4.3 Wasserhaushalt: Transpiration der Energie- und Rohstoffpflanzen

Der Einfluss der Energie- und Rohstoffpflanzen auf den Wasserhaushalt kann, wie bereits in Abschnitt 13.2.8 beschrieben nur näherungsweise geschätzt werden, da es insbesondere an Daten zur Verdunstung von Niederschlagswasser auf den Blattoberflächen der Pflanzen mangelt. Die vorliegenden Daten zur Transpiration, die anhand der süddeutschen Hektarerträge auf die Fläche umgerechnet wurden, deuten jedoch darauf hin, dass eine Umstellung auf Energiepflanzen der zweiten Generation den Wasserverbrauch der Landwirtschaft reduzieren könnte. Im Szenario E03 liegt ihre Transpiration pro Hektar um 22 Prozent unterhalb des Referenzwertes aus dem Szenario E01, das einer ausschließlichen Nutzung von Energiepflanzen der ersten Generation entspricht. Ähnliche Transpirationswerte ergaben sich für das Szenario R01, in dem ausschließlich Rohstoffpflanzen berücksichtigt und ihre Flächenzuweisungen am Rohstoffbedarf orientiert wurden. Im Vergleich der einzelnen Rohstoffpflanzengruppen weisen vor allem die Pflanzen zur Produktion von Papier, Baustoffen, Ölen und Textilien niedrige Transpirationswerte pro Hektar auf. Deutlich über den Durchschnittswerten liegen dagegen die Pflanzengruppen, die für die Produktion von Kunststoffen und Ethanol genutzt werden. Sie liegen um ca. 46 Prozent über dem Durchschnitt der Rohstoffpflanzen und um ca. 12 Prozent über dem Durchschnittswert der Energiepflanzen erster Generation. Die Durchschnittswerte aller Energie- und Rohstoffpflanzengruppen sind in Abbildung 62 abgebildet.



EP=Energiepflanzen, G=Generation, RP=Rohstoffpflanzen, BP=Pflanzen für Baustoffproduktion, TP=Pflanzen für Textilproduktion, PP=Pflanzen für Papierproduktion, KP=Pflanzen für Kunststoffproduktion, ÖP=Pflanzen für Ölproduktion, AP=Pflanzen für Alkoholproduktion
Eigene Darstellung. Quelle: Berechnung

Abbildung 62: Transpiration der Energie- und Rohstoffpflanzen nach Szenario pro Hektar (m³/ha)

Die berechneten absoluten Mengen der Transpiration, die durch Energiepflanzen im Landkreis Konstanz erfolgt, wenn diese dem deutschen Durchschnitt entsprechend auf 18,5 Prozent der

Ackerfläche angebaut werden, sind in Abbildung 63 dargestellt. Durch einen ökologischen Anbau von Energiepflanzen der ersten Generation würden die Erträge soweit sinken, dass die Transpiration im Vergleich zum konventionellen Anbau um 34 Prozent reduziert würde. Damit würde die Transpiration zugleich um 13 Prozent unter den Wert fallen, der sich bei einem ausschließlichen Anbau von Energiepflanzen der zweiten Generation ergeben würde. Energiepflanzen der zweiten Generation stellen damit einen Kompromiss zwischen geringem Wasserverbrauch durch Transpiration und hohen Energieerträgen aufgrund hoher Biomasseerträgen dar.

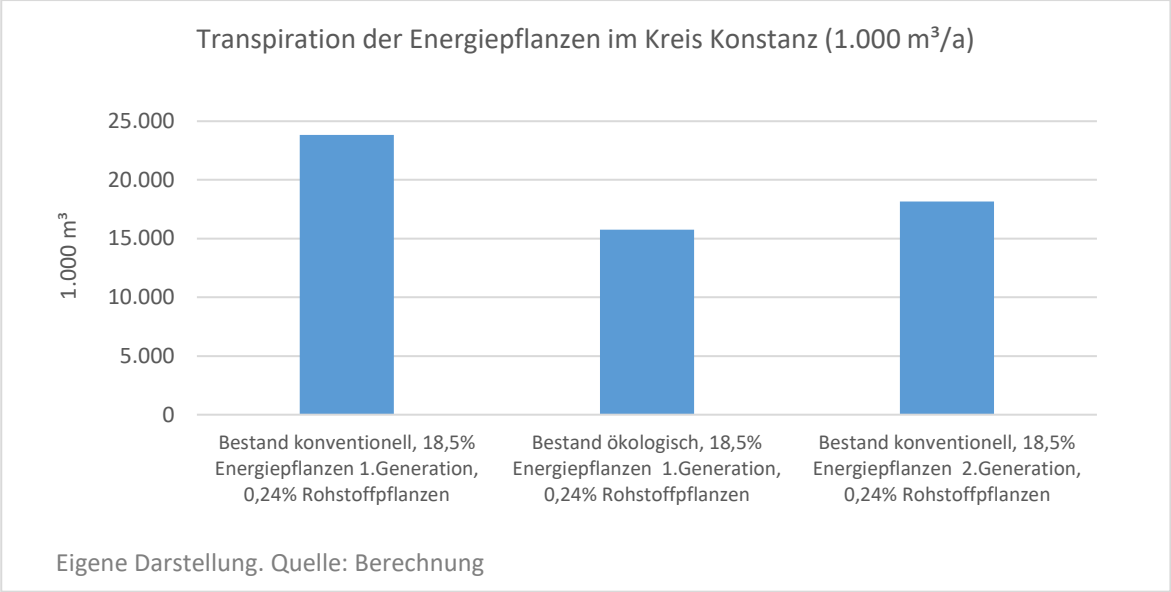
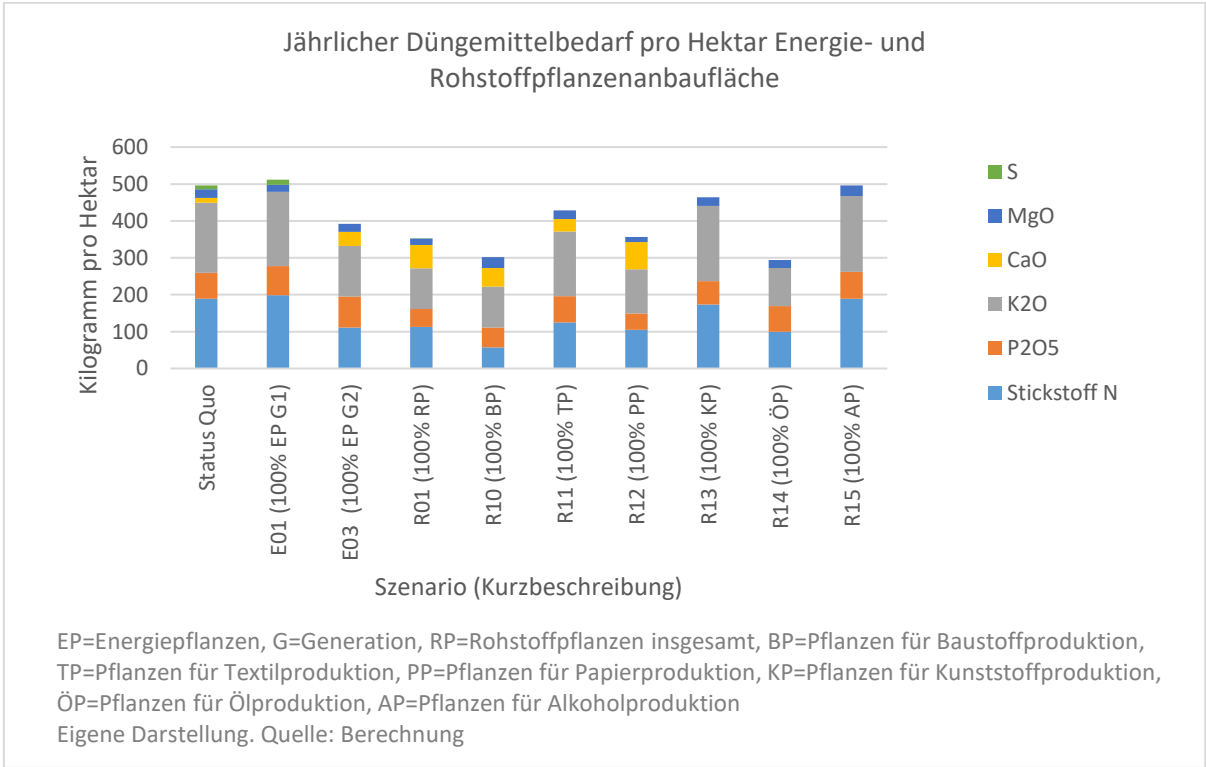


Abbildung 63: Transpiration von Energiepflanzen im Landkreis Konstanz (1.000 m/a)

6.4.4.4 Düngemittelbedarf von Energie- und Rohstoffpflanzen

Der Düngemittelbedarf von Energiepflanzen der ersten Generation beträgt mehr als 500 kg pro Hektar und Jahr (vgl. Szenario E01). Mit jeweils rund 200 kg/ha*a haben K_2O und Stickstoff daran die größten Anteile. In Kombination mit den stofflich genutzten Rohstoffpflanzen, die aktuell nur auf ca. 0,24 Prozent der Ackerfläche angebaut werden, dürften beide Werte im Durchschnitt nur etwas niedriger ausfallen (vgl. Status Quo). Da Stickstoff sowohl für den Schutz von Gewässern und Grundwasser als auch für den Klimaschutz von erheblicher Bedeutung ist, gilt ihm bei einem Vergleich mit den Energiepflanzen der zweiten Generation besonderes Interesse. Mit rund 110 kg pro Hektar und Jahr liegt der Wert hier um 44 Prozent unterhalb des Durchschnitts der Energiepflanzen erster Generation. Der Bedarf an K_2O liegt bei der zweiten Energiepflanzengeneration um 32 Prozent unter dem der ersten Energiepflanzengeneration. Dafür benötigt die zweite Generation im Gegensatz zur ersten Generation beachtliche Mengen an CaO. Der Bedarf an P_2O_5 ist bei beiden Generationen nahezu gleich. (Vgl. Abbildung 64)

Noch etwas geringer ist der Düngemittelbedarf im Durchschnitt der Rohstoffpflanzen ohne Pflanzen der Kunststoffproduktion (Szenario R01). Sie benötigen im Vergleich zu den Energiepflanzen deutlich geringere Mengen an K_2O und an P_2O_5, dafür jedoch mehr CaO. Besonders gering ist der Bedarf an Düngemitteln insgesamt sowie an Stickstoff im Speziellen bei jenen Pflanzen, die zur Baustoffproduktion genutzt werden. Ähnlich gering ist der Gesamtbedarf nur in der Gruppe der Ölpflanzen, die jedoch einen höheren Anteil von Stickstoff am Gesamtbedarf aufweisen. Die größten Bedarfsmengen weist unter den Rohstoffpflanzen die Gruppe der Ethanolpflanzen auf, gefolgt von der Pflanzengruppe, die für die Produktion von Kunststoffen genutzt wird. Beide Gruppen liegen deutlich über dem Durchschnitt der Rohstoffpflanzen und dem Durchschnitt der Energiepflanzen zweiter Generation. Nur die Gruppe der Energiepflanzen erster Generation hat einen noch höheren Bedarf als Pflanzen der Kunststoffproduktion und Pflanzen der Ethanolproduktion. Dies gilt sowohl für den Gesamtbedarf als auch für den Bedarf an Stickstoff. Die Durchschnittswerte aller Energie- und Rohstoffpflanzengruppen, die in diesem Vergleich betrachtet wurden, sind in Abbildung 64 dargestellt.



EP=Energiepflanzen, G=Generation, RP=Rohstoffpflanzen insgesamt, BP=Pflanzen für Baustoffproduktion, TP=Pflanzen für Textilproduktion, PP=Pflanzen für Papierproduktion, KP=Pflanzen für Kunststoffproduktion, ÖP=Pflanzen für Ölproduktion, AP=Pflanzen für Alkoholproduktion
Eigene Darstellung. Quelle: Berechnung

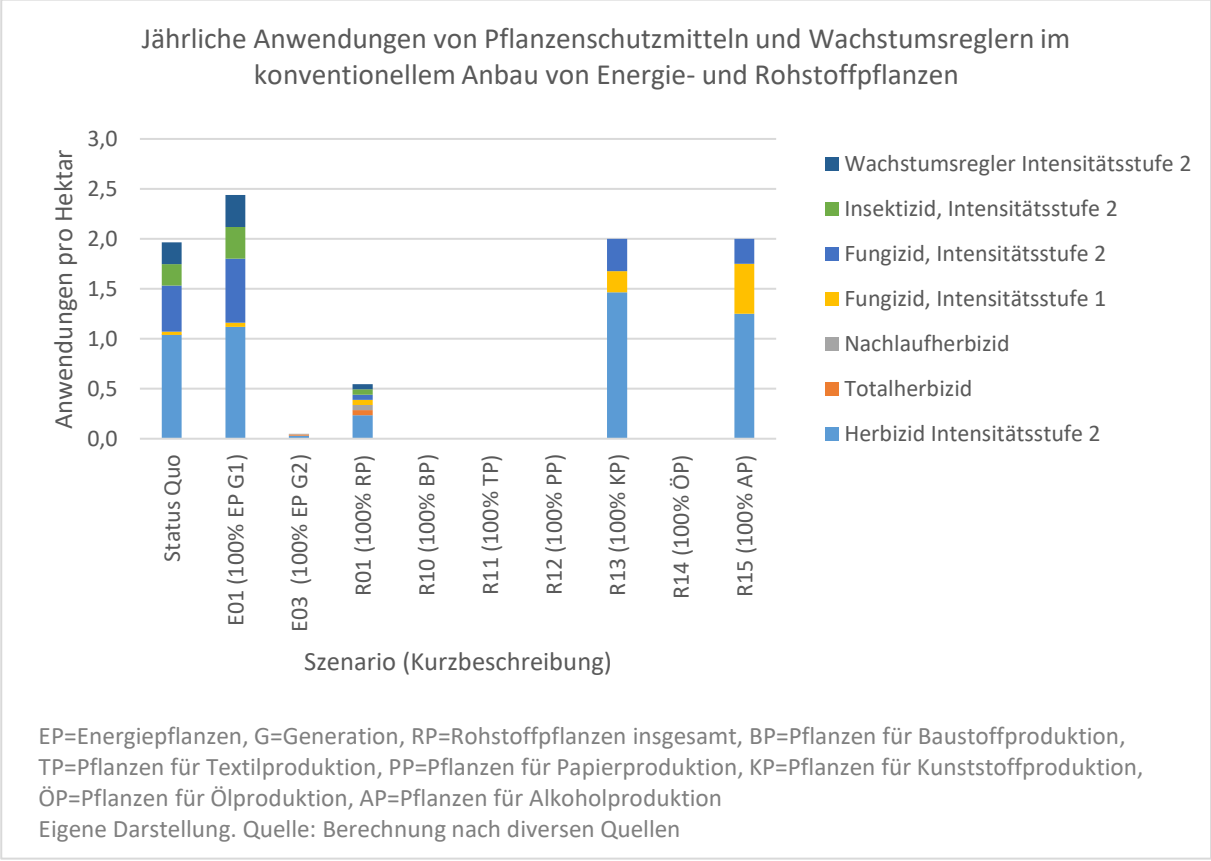
Abbildung 64: Düngemittelbedarf pro Hektar Energie- und Rohstoffpflanzenanbaufläche

6.4.4.5 Anwendungen chemischer Pflanzenschutzmittel

Im Vergleich der verschiedenen Energie- und Rohstoffpflanzengruppen zeigen sich neben dem Kriterium der Mehrjährigkeit die wohl größten Unterschiede bei der Anzahl der Pflanzenschutzmittelanwendungen im konventionellen Anbau. Mit fast 2,5 Anwendungen pro Hektar und Jahr ist ihre Zahl bei Energiepflanzen der ersten Generation am größten. Auch in Kombi-

nation mit weniger empfindlichen Rohstoffpflanzen liegt der Durchschnitt daher auf einem vergleichsweise hohen Niveau, wenn der Status Quo ansonsten erhalten bleibt (Flächenanteile von Energie- und Rohstoffpflanzen etc.). Mit Blick auf den Rückgang der Insekten ist auch der relativ hohe Bedarf der Energiepflanzen erster Generation an Insektiziden kritisch zu betrachten. Im Vergleich dazu ist der Pflanzenschutzbedarf in der Gruppe der Energiepflanzen zweiter Generation sehr gering. Selbst im konventionellen Anbau (Szenario E01) liegt er unter 0,1 Anwendungen pro Hektar und Jahr und damit um ca. 96 Prozent unter dem Wert, der sich in der Gruppe der Energiepflanzen erster Generation ergibt. Insektizide werden beim Anbau von Energiepflanzen der zweiten Generation nicht benötigt. Im Vergleich zu der Gesamtgruppe der Rohstoffpflanzen ohne Rohstoffpflanzen der Kunststoffproduktion ist die Anzahl der Pflanzenschutzanwendungen bei Energiepflanzen der zweiten Generation um 82 Prozent geringer (Szenario R01).

Unter den Rohstoffpflanzen kommen chemische Pflanzenschutzmittel vor allem in den Gruppen der Pflanzen zum Einsatz, die für die Produktion von Kunststoffen (Szenario R13) und Ethanol (Szenario R15) verwendet werden. Die Pflanzengruppen, die für die Produktion von Baustoffen (R10), Textilfasern (R11), Papier (R12) und Öl (R15) genutzt werden, benötigen auch im konventionellen Anbau praktisch keinen chemischen Pflanzenschutz.



EP=Energiepflanzen, G=Generation, RP=Rohstoffpflanzen insgesamt, BP=Pflanzen für Baustoffproduktion, TP=Pflanzen für Textilproduktion, PP=Pflanzen für Papierproduktion, KP=Pflanzen für Kunststoffproduktion, ÖP=Pflanzen für Ölproduktion, AP=Pflanzen für Alkoholproduktion
Eigene Darstellung. Quelle: Berechnung nach diversen Quellen

Abbildung 65: Anwendungen von Pflanzenschutzmitteln und Wachstumsreglern im konventionellen Anbau von Energie- und Rohstoffpflanzen pro Hektar und Jahr

6.4.4.6 Mögliche Veränderungen der Umweltkennwerte 2017 bis 2035 (Szenario)

Um die Auswirkungen einer weitgehenden Umstellung auf nachwachsende Rohstoffe und Energiepflanzen der zweiten Generation abzuschätzen, wurden die berechneten Durchschnittswerte des Status Quo (Stand 2017) mit dem Szenario für das Jahr 2035 verglichen. Im Status Quo haben Energiepflanzen (1. Generation) einen Anteil von 18,5 Prozent und Rohstoffpflanzen einen Anteil von 0,24 Prozent an der Ackerfläche. Im Szenario 2035 wurde dem Energiepflanzenanbau (2. Generation) ein Anteil von 15 Prozent und dem Rohstoffpflanzenanbau ein Anteil von 3 Prozent zugewiesen. Im Land Baden-Württemberg könnte dadurch in den ein flächenbezogener Rohstoffautonomiegrad (bezogen auf die betrachteten Produktsegmente) von bis zu 135 Prozent erreicht werden, wenn der Verbrauch auf ein Drittel des heutigen Verbrauchs (Stand 2017) reduziert würde. Die fünf hier betrachteten Landkreise würden einen flächenbezogenen Rohstoffautonomiegrad von bis zu 125 Prozent erzielen. Zu den Auswirkungen dieser Umstellung auf die umweltbezogenen Kennwerte zählt ein Rückgang der Transpiration durch Energie- und Rohstoffpflanzen um ca. 17 Prozent (vgl. Abbildung 66). Angesichts tendenziell häufigerer Trockenphasen und Dürren könnte sich dies positiv auf die Gewässer und die Grundwasserneubildung auswirken.

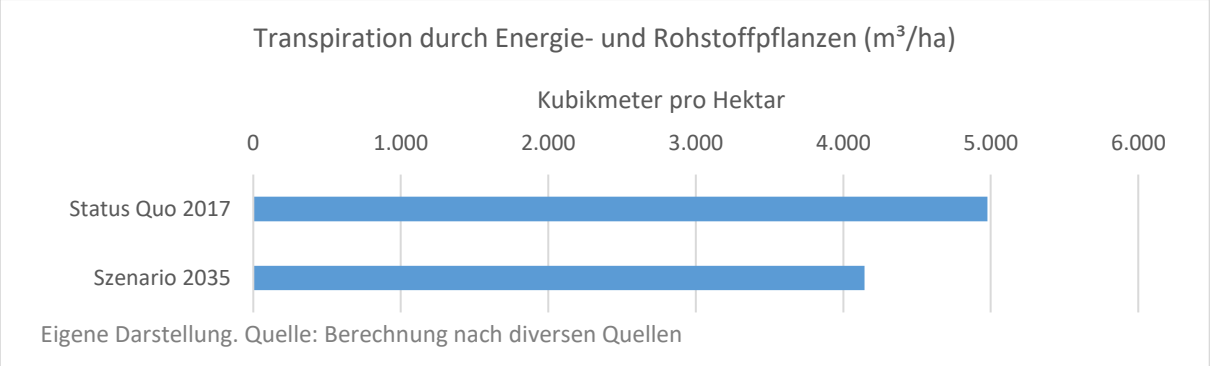


Abbildung 66: Mögliche Veränderung der Transpiration der Energie- und Rohstoffpflanzen 2017 – 2035

In Verbindung mit der ganzjährigen Durchwurzelung auf großen Teilen der Energiepflanzenfläche könnte zugleich der Schutz vor Erosion bei häufiger werdenden Starkregenereignissen auf 14 Prozent der Ackerfläche verbessert werden (vgl. Abbildung 67).

Damit könnte auch der Stoffeintrag in die Gewässer reduziert werden. Bodenbearbeitung mit dem Pflug ist zwar auch bei einjährigen Kulturen keine Notwendigkeit. In der Praxis wird sie jedoch immer noch häufig angewendet, nicht zuletzt, weil sie zur Reduktion des Pflanzenschutzmitteleinsatzes beitragen kann. Bei den meisten mehrjährigen Nutzpflanzen entfällt der Bedarf an einem solchen Pflanzenschutz.

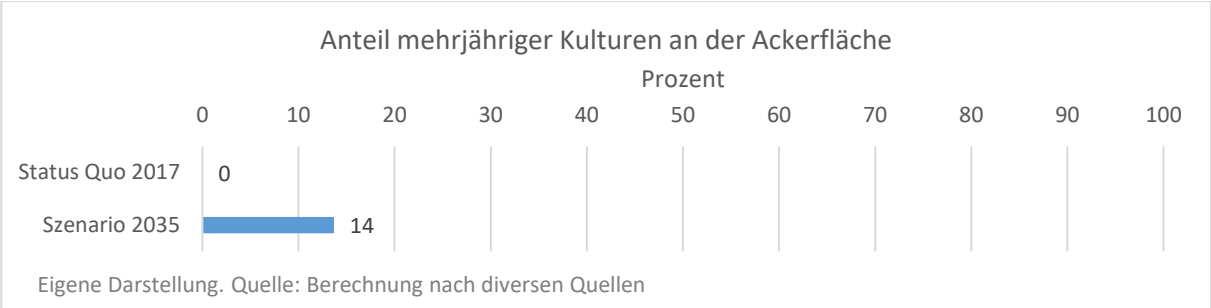


Abbildung 67: Mögliche Entwicklung des Anteils mehrjähriger Kulturen an der Ackerfläche 2017 – 2035

Durch die Umstellung auf überwiegend mehrjährige Pflanzen kann deshalb die Zahl der gravierenden Störungen für Boden und Wildtiere um mehr als ein Drittel reduziert werden (vgl. Abbildung 68). Tiere und Böden hätten damit auf der Energie- und Rohstoffpflanzenfläche deutlich weniger Störungen hinzunehmen als auf den für die Nahrungs- und Futterproduktion genutzten Flächen.

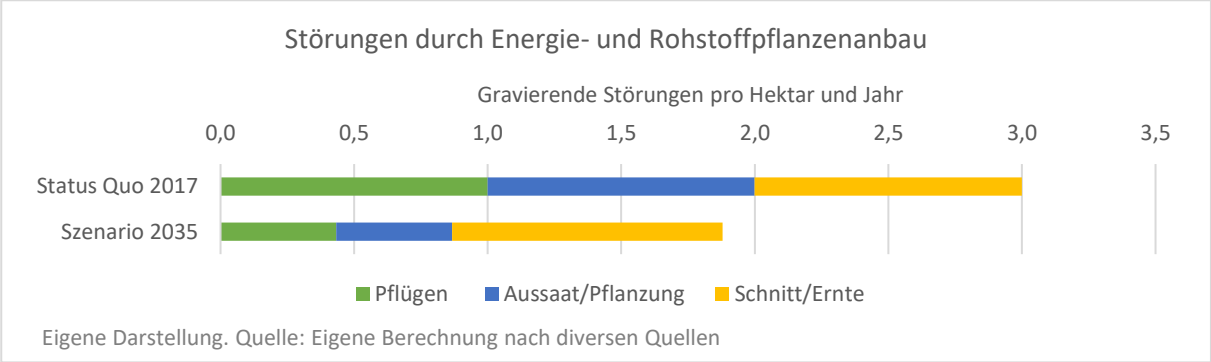


Abbildung 68: Mögliche Entwicklung der Störungen durch den Energie- und Rohstoffpflanzenanbau 2017 - 2035

Mit einer Einsparung von rund 31 Prozent kann der Düngemittelbedarf durch die Umstellung in einer ähnlichen Größenordnung reduziert werden wie die Zahl der Störungen. Dabei wird vor allem der Bedarf an Stickstoff (ca. -47 Prozent) und Kaliumoxid (ca. - 38 Prozent) und Schwefel reduziert, der Bedarf an Magnesium könnte um ca. ein Sechstel sinken. Allerdings würde der Bedarf an Kalk deutlich zunehmen (ca. +160 Prozent). (Vgl. Abbildung 69)

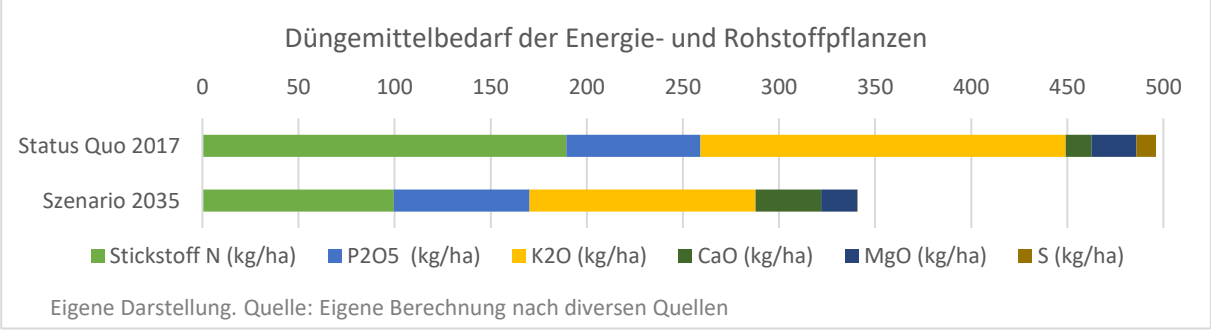


Abbildung 69: Mögliche Entwicklung des Düngemittelbedarfs im Energie- und Rohstoffpflanzenanbau 2017 - 2035

Besonders deutlich wären die Auswirkungen der Umstellung im Bereich des Pflanzenschutzes. So konnte die Anzahl der Anwendungen chemischer Pflanzenschutzmittel bei konventionellem Anbau der Energie- und Rohstoffpflanzen um 95 Prozent von 1,96 Anwendungen auf rund 0,10 Anwendungen pro Hektar und Jahr sinken. Die potenzielle Reduktion ist in Abbildung 70 dargestellt. Besonders deutlich ist der Rückgang beim Einsatz von Herbiziden, Fungiziden und Insektiziden der Intensitätsstufe 2. Insektizide kommen bei Energiepflanzen der zweiten Generation gar nicht zum Einsatz. Allerdings wird bei der Etablierung mehrjähriger Kulturen die Anbaufläche nicht selten mithilfe von Totalherbiziden vorbereitet, sofern diese während der Etablierung ansonsten nicht über ausreichende Konkurrenzfähigkeit verfügen.

Insektizide werden dagegen bei Bedarf zum Schutz einiger Rohstoffpflanzen eingesetzt, die für die Produktion von Ölen, Ethanol oder Kunststoffen genutzt werden. Dies betrifft z. B. Raps, Kartoffeln, Mais und Getreide. Bei Pflanzen, die für die Herstellung von Rohstoffen für die Baustoff-, Textil- und Papierproduktion genutzt werden, wie z. B. Hanf, Fasernessel, Miscanthus, Switchgrass, Lein und Wiesengras, kommen sie nicht bzw. nur in Ausnahmefällen zum Einsatz.

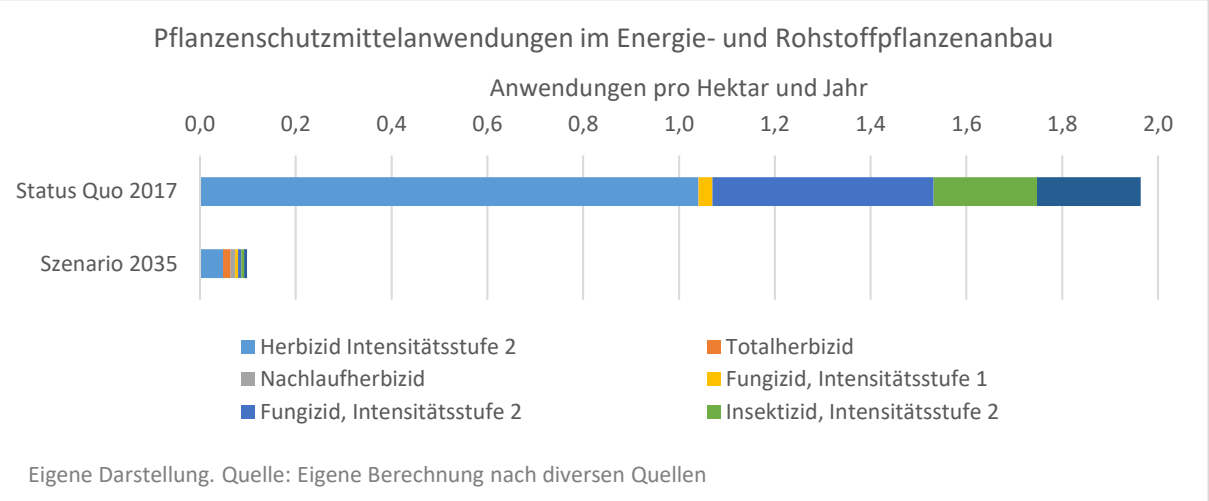


Abbildung 70: Mögliche Entwicklung der Anwendungen von Pflanzenschutzmitteln im Energie- und Rohstoffpflanzenanbau 2017 - 2035

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass ein Umstieg auf die überwiegend mehrjährigen Energie- und Rohstoffpflanzen zweiter Generation auch in einer weitgehend am Bedarf ausgerichteten Kombination überwiegend ökologische Vorteile mit sich bringt. Diese betreffen vor allem den Schutz von Böden, Gewässern und Artenvielfalt. Mit Blick auf die geringere Transpiration der Pflanzen pro Hektar Anbaufläche, wird vermutet, dass er in Zeiten des Klimawandels außerdem positive Effekte hinsichtlich der Ertragssicherheit/Wirtschaftlichkeit und des Grundwasserneubildungspotenzials haben dürfte.

6.4.5 Vergleich der Landkreise im Status Quo und im „Szenario 2035“

Im Folgenden werden die Potenziale der Landkreise Bodenseekreis, Esslingen, Konstanz, Ravensburg und Sigmaringen verglichen, ihre Autonomie durch die Maßnahmen im „Szenario 2035“ trotz des Umstiegs auf ökologische Wirtschaftsweise, nachwachsende Rohstoffe und erneuerbare Energien zu steigern. Diese fünf Landkreise wurden aus den folgenden Gründen ausgewählt:

- Geografische Nähe und kurze Transportwege beim Güteraustausch
- Deutliche Unterschiede hinsichtlich der Merkmale Bevölkerungsdichte, Wohnfläche, Jahresfahrleistung, Freiflächenpotenziale, Flächennutzung, Dachflächenphotovoltaik-Potenziale und Windenergiepotenziale.
- Gute Repräsentativität: Gemeinsam kommen die Landkreise dem Durchschnitt in Baden-Württemberg nahe.

6.4.5.1 Eigenschaften der Landkreise

6.4.5.1.1 Bevölkerungsdichte

Der Landkreis Konstanz liegt in Baden-Württemberg bezüglich Einwohnerdichte und Flächenpotenziale im Mittelfeld der Landkreise. Er wurde mit vier anderen Landkreisen verglichen, die sich an anderen Stellen der Skala einsortieren, aber gemeinsam mit dem Landkreis Konstanz dem Durchschnitt in Baden-Württemberg nahekommen. So handelt es sich beim Landkreis Esslingen um einen der am dichtesten besiedelten Landkreise Deutschlands, dessen Bevölkerungsdichte pro Hektar LNF dreimal so hoch liegt, wie die des Landkreises Konstanz. In Baden-Württemberg weisen nur die Stadtkreise eine noch höhere Bevölkerungsdichte als der Kreis Esslingen auf. Der Landkreis Sigmaringen ist dagegen der Landkreis mit der zweitgeringsten Bevölkerungsdichte in Baden-Württemberg. Der Bodenseekreis ähnelt dem Kreis Konstanz, unterscheidet sich aber hinsichtlich der Flächennutzung, während der Kreis Ravensburg eine relativ geringe Bevölkerungsdichte aufweist. So unterschieden sich die fünf Landkreise in mindestens einem Merkmal deutlich von jedem der anderen vier Landkreise. Dies zeigt sich nicht zuletzt an der Zahl der Einwohner die pro Hektar landwirtschaftlichen Nutzfläche versorgt werden müssen (vgl. Abbildung 71).

Dennoch kommen auch ihre pro Einwohner verfügbaren Flächenpotenziale in der Summe dem Landesdurchschnitt in Baden-Württemberg nahe. Zudem stellen sie 13 Prozent der Bevölkerung des Bundeslandes. Die fünf Landkreise sind somit durchaus repräsentativ für Baden-Württemberg.

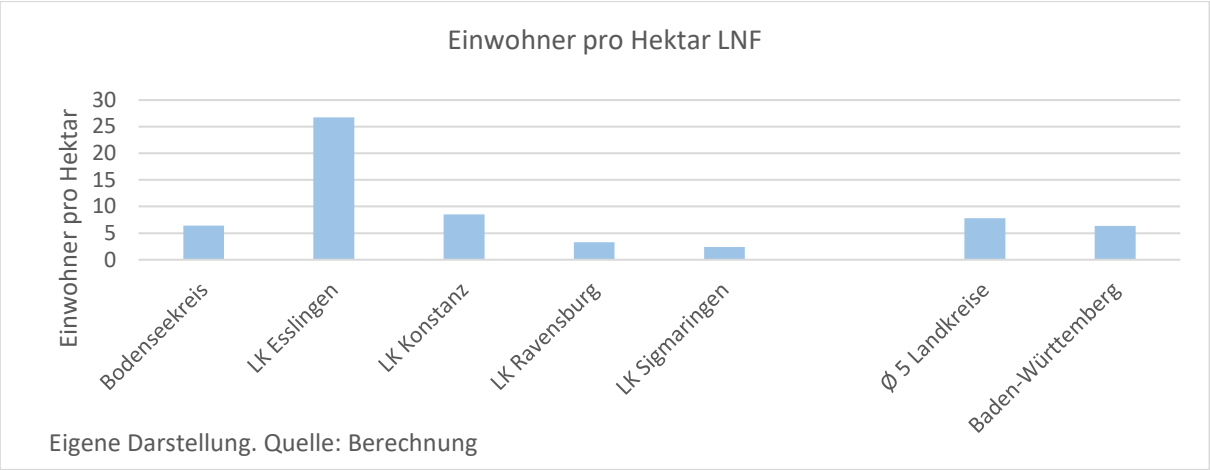


Abbildung 71: Bevölkerungsdichte - Einwohner pro Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche

6.4.5.1.2 Wohnen

Die in den Landkreisen vorhandene Wohnfläche wurde im Rahmen des Zensus 2011 ermittelt. Auf Basis des im Jahr 2011 erhobenen Bestandes (öffentliche Zensusdatenbank) und des Zubaus der folgenden Jahre (STL BW, 2019) wurde der Wohnflächenbestand des Jahres 2017 geschätzt. Nach dieser Schätzung liegt die pro Person genutzte Wohnfläche der fünf Landkreise zwischen 42,5 m² im Landkreis Esslingen und 48,3 m² im Landkreis Sigmaringen. Zusammen entsprechen die fünf Landkreise mit 44,1 m²/Person fast exakt dem Landesdurchschnitt von 44,2 m²/Person.

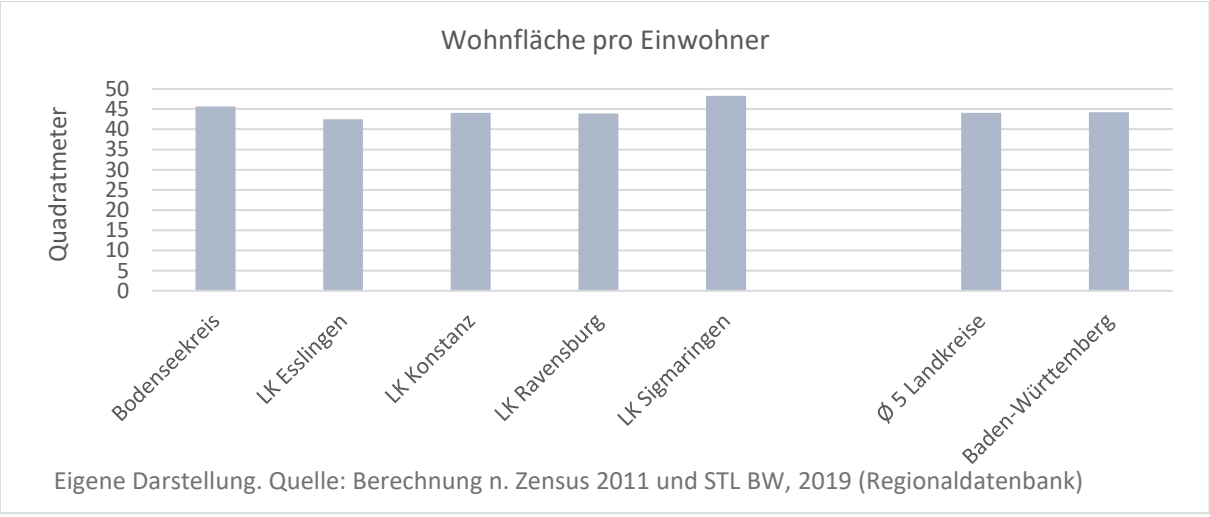


Abbildung 72: Wohnfläche pro Einwohner

6.4.5.1.3 Verkehr

Die Jahresfahrleistungen aller Kfz reichen von 6.950 km/Ea im Landkreis Konstanz bis 9.720 km/Ea im Landkreis Ravensburg. Die Jahresfahrleistung der Pkw im Landkreis Ravensburg (8.340 km/Ea) übersteigt den Vergleichswert des Landkreises Konstanz (5.990) um 39 Prozent.

Im Durchschnitt der fünf Landkreise liegt die Pkw-Fahrleistung um 4,4 Prozent unter dem Durchschnitt des Landes Baden-Württemberg. Die Fahrleistung der schweren Nutzfahrzeuge und Busse liegt um ein Viertel unter dem Landesdurchschnitt. Dies liegt vor allem am geringen Schwerlastverkehr in den Kreisen Konstanz und Bodenseekreis.

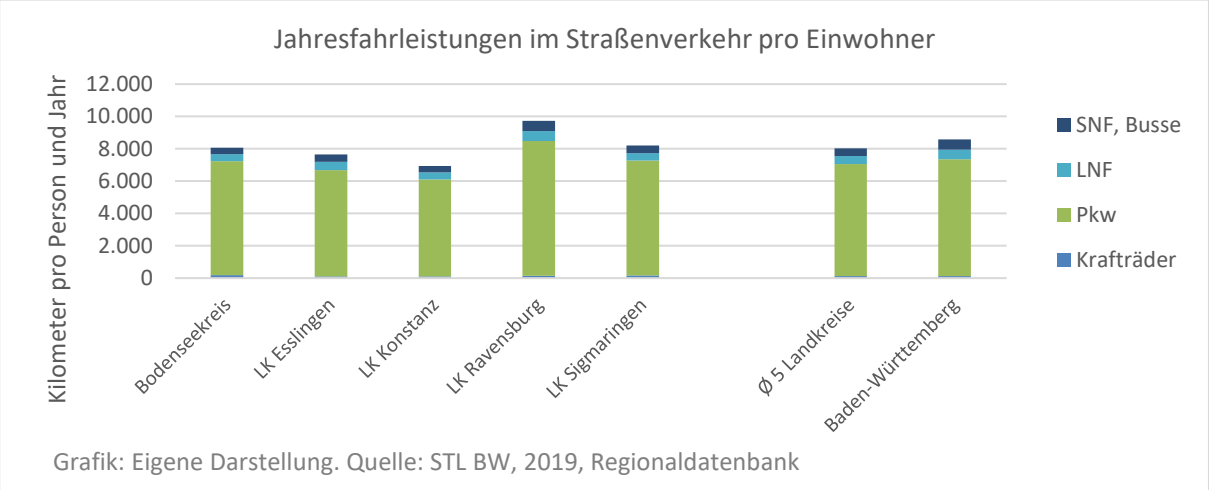


Abbildung 73: Jahresfahrleistungen im Straßenverkehr pro Einwohner

6.4.5.1.4 Endenergieverbrauch

Im Vergleich weisen die fünf betrachteten Landkreise überwiegend ähnliche Energieverbrauchsdaten auf. Lediglich der Landkreis Ravensburg übertrifft die anderen Landkreise in diesem Punkt deutlich. Im Schnitt der fünf Landkreise liegt der Verbrauch bei knapp 24,7 (23,0 – 27,7) MWh pro Einwohner und Jahr. Der Verbrauch setzt sich wie in Abbildung 74 abgebildet zusammen. Etwas weniger als ein Viertel der Summe entfällt im Status Quo (Stand 2017) auf den Stromverbrauch.

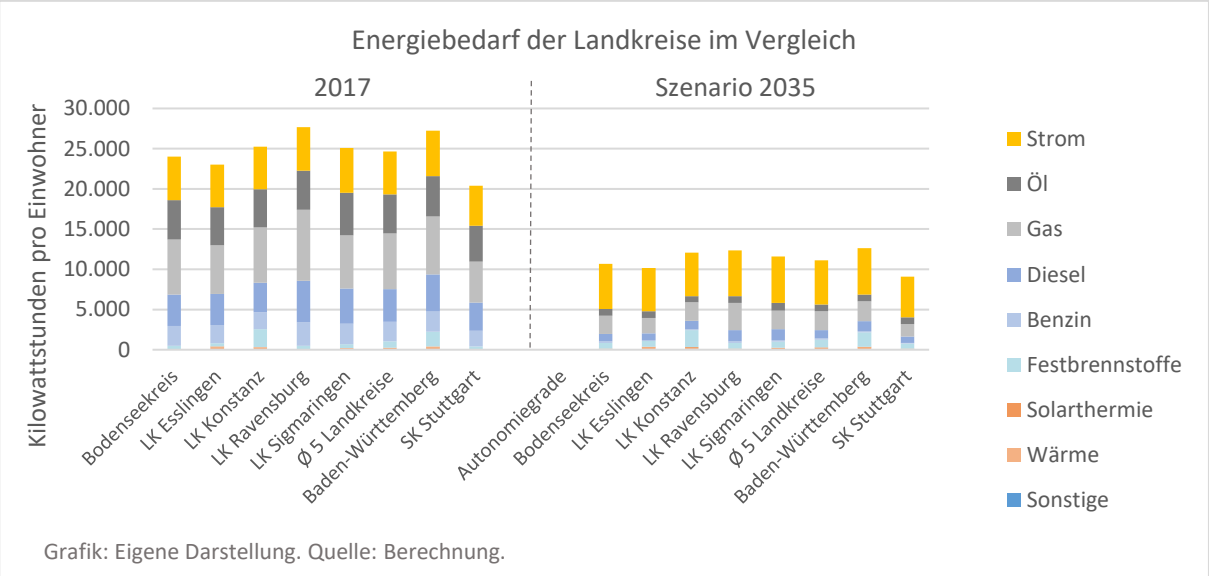


Abbildung 74: Mögliche Entwicklung des Endenergieverbrauchs der Landkreise 2017 bis 2035 im Vergleich

Eine Reduktion des Endenergieverbrauchs um mindestens 50 Prozent, wie sie von der Landesregierung Baden-Württembergs angestrebt wird, führt in den Landkreisen durchschnittlich zu einer Senkung des Verbrauchs auf ca. 11 MWh pro Einwohner und Jahr. Die fünf Landkreise liegen damit um ca. 16 Prozent unter dem Landesdurchschnitt.

Mit mehr als der Hälfte hat Strom den größten Anteil am verbleibenden Energiebedarf im „Szenario 2035“. Ursächlich hierfür ist die notwendige Elektrifizierung großer Teile des Verkehrs und der Wärmebereitstellung in den Gebäuden.

6.4.5.1.5 Flächenpotenziale

Die in den Landkreisen verfügbaren land- und forstwirtschaftlichen Flächen liegen zwischen 0,127 und 1,348 Hektar pro Einwohner. Der Bodenseekreis weist als einziger Kreis einen hohen Anteil von Obstanlagen auf, während im Kreis Ravensburg ein überdurchschnittlicher Anteil auf Grünlandflächen entfällt. Somit unterschieden sich die fünf betrachteten Landkreise deutlich, entweder hinsichtlich der pro Einwohner verfügbaren Flächen oder mit Blick auf die Zusammensetzung der Flächen.

Im Durchschnitt liegt das Flächenpotenzial der fünf Landkreise mit 0,499 ha/EW um 17 Prozent über dem Landesdurchschnitt. Dabei stehen im Vergleich zum Land Baden-Württemberg vor allem größere Grünflächen zur Verfügung. Die pro Person verfügbare Ackerfläche umfasst rund 97 Prozent des Landesdurchschnitts, die Forstfläche rund 88 Prozent. Die nutzbaren produktiven Flächen außerhalb von Siedlungen sind in Abbildung 75 in der Übersicht dargestellt.

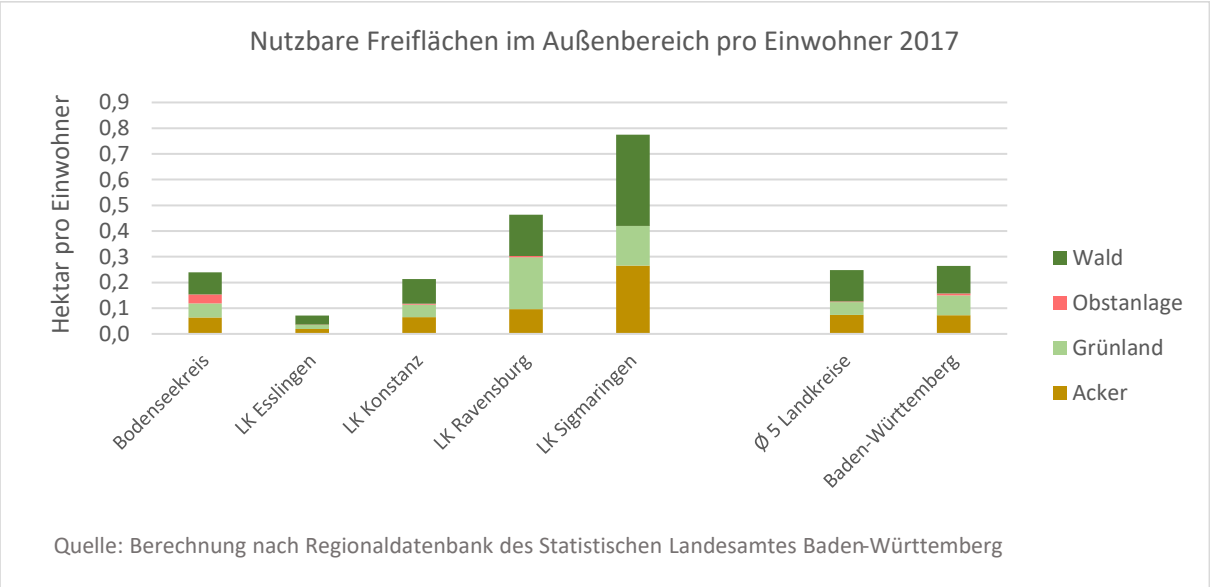


Abbildung 75: Nutzbare Freiflächen im Außenbereich pro Einwohner 2017

Die Eignungsfläche für Photovoltaikanlagen auf Dachflächen liegt im Durchschnitt der Landkreise nach Daten des Energieatlas der LUBW (2019a) bei 23,8 m² pro Einwohner und entspricht damit genau dem durchschnittlichen Flächenpotenzial in Baden-Württemberg. Die Spanne reicht dabei von 20,1 m² pro Person im Landkreis Konstanz bis 35,8 m² pro Einwohner im Landkreis Sigmaringen (vgl. Abbildung 76).

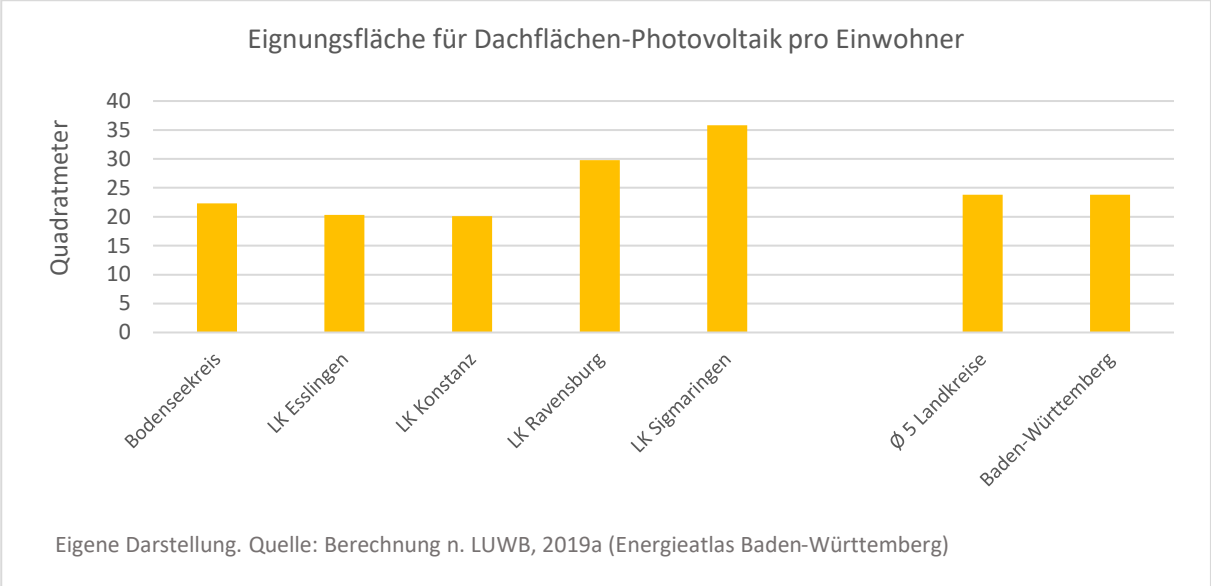


Abbildung 76: Eignungsfläche für Dachflächen-Photovoltaik pro Einwohner

6.4.5.2 Autonomiepotenziale der Landkreise im Vergleich

Auf Basis der in den vorhergehenden Kapiteln dargestellten Kennwerte wurden, den Berechnungen zum Landkreis Konstanz entsprechend, die Autonomiepotenziale der Landkreise Esslingen, Bodenseekreis, Ravensburg und Sigmaringen im „Szenario 2035“ berechnet. Die Ergebnisse der Berechnungen werden im Folgenden vergleichend dargestellt.

Dabei bezieht sich der angegebene Autonomiegrad ausschließlich auf Nahrungsmittel und die potenziell aus regenerativen Quellen zu deckenden Güter Energie, Baustoffe, Möbel, Textilien, Papier, Kunststoffe, Öle und Ethanol. Andere Güter, die bisher fast ausschließlich aus sonstigen Rohstoffen (fossil oder mineralisch) hergestellt werden können, wurden nicht berücksichtigt. Die Segmente Baustoffe und Möbel umfassen den Wohnbau, nicht aber gewerbliche Neubauten und gewerblich genutzte Möbel. Der Autonomiegrad gibt an, welcher Anteil des Bedarfs aus lokalen regenerativen Quellen gedeckt werden kann.

6.4.5.3 Produktbezogene Autonomiepotenziale der Landkreise in den Sektoren Nahrung, Energie und Rohstoffe

Insgesamt weisen die Landkreise sehr unterschiedliche Gesamtautonomiepotenziale auf. Zudem unterscheiden sich auch die Autonomiepotenziale, über welche die einzelnen Landkreise jeweils in den verschiedenen Sektoren verfügen, sehr deutlich. Insgesamt können die fünf Landkreise mit ihrer aktuellen Flächennutzung und überwiegend konventionellen Landbewirtschaftung bei den Konsumgewohnheiten des Jahres 2017 gemeinsam produktbezogene Autonomiegrade von 85 Prozent im Nahrungssektor, 17 Prozent im Energiesektor und 55 Prozent im Rohstoffsektor erzielen (Status Quo). Bildet man aus diesen Werten einen Durchschnitt, kommen die fünf Landkreise auf ein Gesamtautonomiepotenzial von 52 Prozent.

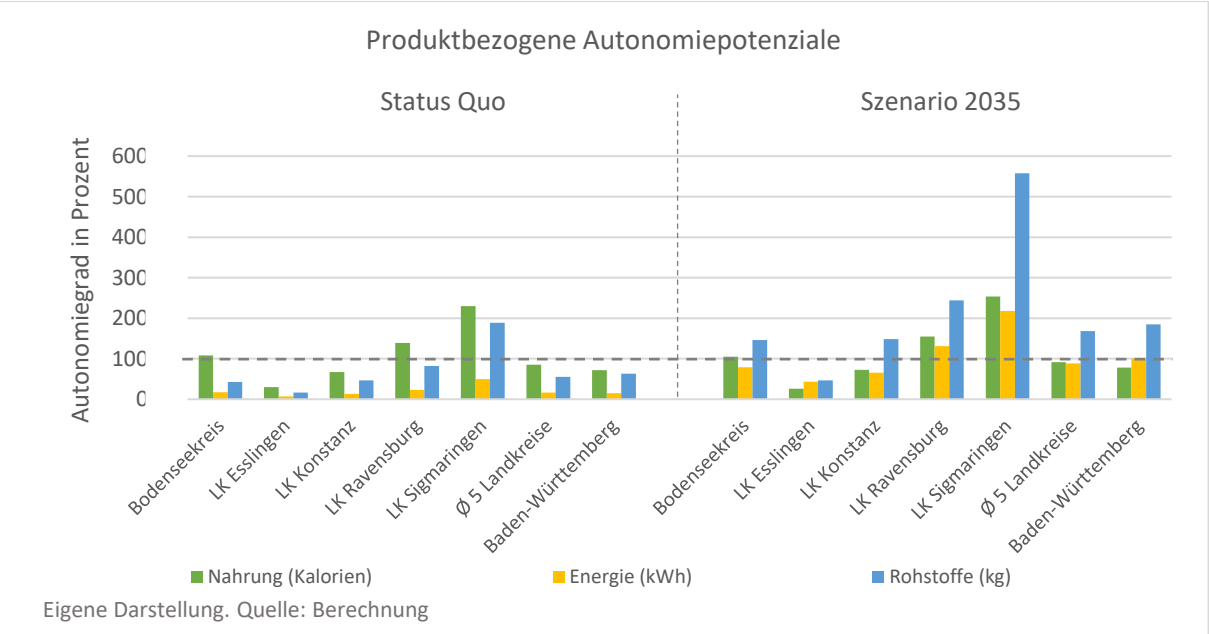


Abbildung 77: Produktbezogene Autonomiepotenziale der Landkreise in den Sektoren Nahrung, Energie und Rohstoffe

Das Nahrungsautonomiepotenzial liegt damit um rund 13 Prozentpunkte über dem Landesdurchschnitt Baden-Württembergs, das Energieautonomiepotenzial übersteigt den Landesdurchschnitt um 2 Prozentpunkte und das Rohstoffautonomiepotenzial liegt um 8 Prozentpunkte unterhalb des Vergleichswertes des Bundeslandes Baden-Württemberg. Im Durchschnitt aller drei Sektoren liegen die fünf Landkreise im Status Quo um 2 Prozentpunkte über dem Landesdurchschnitt. Im „Szenario 2035“ können die fünf Landkreise ihre Autonomiegrade deutlich steigern, auf 95 Prozent im Nahrungssektor, 89 Prozent im Energiesektor und 168 Prozent im Rohstoffsektor. Im Durchschnitt ergibt dies ein Autonomiepotenzial von 117 Prozent. Das Nahrungsautonomiepotenzial liegt damit um rund 14 Prozentpunkte über dem Landesdurchschnitt Baden-Württembergs. Das Energieautonomiepotenzial liegt dagegen um 11 Prozentpunkte unterhalb des Vergleichswertes des Bundeslandes Baden-Württemberg, das Rohstoffautonomiepotenzial um 17 Prozentpunkte. Im Durchschnitt aller drei Sektoren liegen die fünf Landkreise um 5 Prozentpunkte unter dem Landesdurchschnitt. Die fünf Landkreise fallen somit im Vergleich zum Landesdurchschnitt etwas zurück, was unter anderem auf das geringere Windenergiepotenzial zurückzuführen ist. Auffällig ist, dass der Landkreis Sigmaringen im „Szenario 2035“ als einziger mehr Energie regenerativ erzeugen kann als er benötigt.

Nachfolgend werden die drei Sektoren im Einzelnen genauer dargestellt.

6.4.5.3.1 Produktbezogene Nahrungsautonomie

Mit den Kreisen Bodenseekreis, Ravensburg und Kreis Sigmaringen weisen drei der fünf Kreise bereits im Status Quo das Potenzial auf, im Nahrungssektor einen Exportüberschuss bei der Kalorienproduktion zu erzielen. Die Defizite bzw. Importbedarfe der Kreise Konstanz und Esslingen können sie mit ihren Exportpotenzialen dennoch nicht vollständig kompensieren. Somit verbleibt ein Importbedarf von ca. 15 Prozent des Nahrungsverbrauchs. Die Spanne reicht von 30 Prozent Nahrungsautonomie im Landkreis Esslingen bis 230 Prozent im Landkreis Sigmaringen. Im „Szenario 2035“ beträgt das gemeinsame Defizit der fünf Landkreise, trotz der Umstellung auf die ökologische Wirtschaftsweise, nur noch rund 5 Prozent. Entscheidend für die Steigerung des Autonomiepotenzials ist die gleichzeitige Umstellung auf die Ernährungsweise „Eco-Mix“. Bemerkenswert ist, dass drei der fünf Landkreise ihre kalorienbezogene Nahrungsautonomie durch die Umstellungen steigern können, während die Autonomie im Bodenseekreis unverändert bleibt und im Landkreis Esslingen abnimmt. Die Spanne der Autonomiepotenziale reicht im „Szenario 2035“ daher, wie in Abbildung 78 dargestellt, von 27 Prozent im Kreis Esslingen bis zu 264 Prozent im Kreis Sigmaringen.

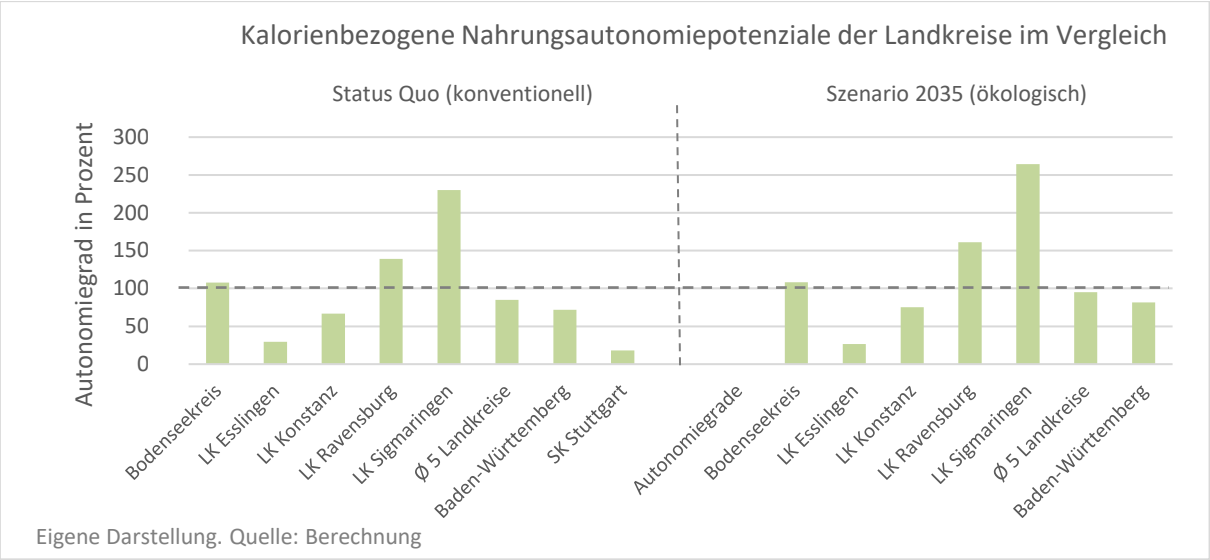


Abbildung 78: Kalorienbezogene Nahrungsautonomiepotenziale der Landkreise im Status Quo und im Szenario 2035

Sehr unterschiedlich stellen sich auch die Autonomiepotenziale in den einzelnen Segmenten des Nahrungssektors dar, wie in Abbildung 80 dargestellt. So weist sogar der am dichtesten bevölkerte Landkreis Esslingen das Potenzial auf, seinen Bedarf an Milchprodukten im „Szenario 2035“ selbst zu decken (vgl. Abbildung 79). In den übrigen Segmenten (Pflanzliche Nahrungsmittel, Fleisch und Futtermittel) ist der Kreis jedoch zu rund drei Vierteln auf Importe angewiesen und kann diese Importabhängigkeit auch in einem auf Nachhaltigkeit ausgerichteten „Szenario 2035“ nur in geringem Umfang reduzieren. Die Landkreise Ravensburg und Sigmaringen weisen zwar große Exportpotenziale auf, diese liegen jedoch ebenfalls überwiegend in den Segmenten „Fleisch“ und „Sonstige tierische Nahrungsmittel“. Das bedeutet, dass es sich bei den potenziellen Überschüssen, die insbesondere bei Milchprodukten möglich sind, um Exportpotenziale handelt, die in den anderen Landkreisen im „Szenario 2035“ kaum benötigt werden.

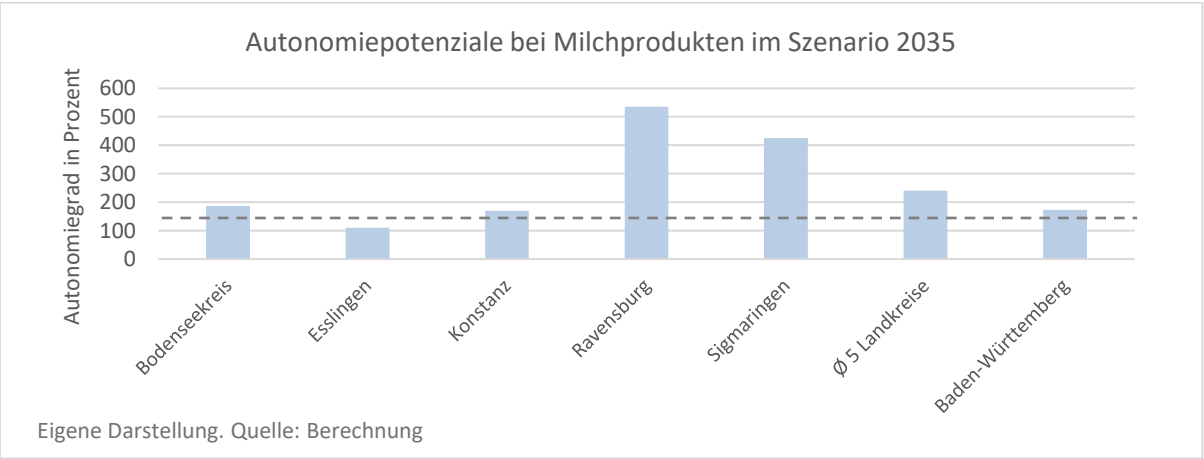


Abbildung 79: Autonomiepotenziale der Landkreise bei Milchprodukten im Szenario 2035

Hohe Exportpotenziale einzelner Landkreise sind somit nicht unbedingt geeignet, die Importbedarfe anderer Landkreise zu decken. Daher gilt es abzuwägen, wie die überschüssigen Flächenpotenziale am besten eingesetzt werden können. Mögliche Alternativen zum Export von Milchprodukten bestehen in der energetischen Nutzung sowie in der Rohstoffproduktion. Ein größeres Defizit verbleibt im „Szenario 2035“ bei ackerbaulich erzeugten Futtermitteln. Aufgrund des relativ geringen Gesamtbedarfs von 77 kg/Ea ist dieses jedoch gut zu kompensieren und mit einem vergleichsweise geringeren Transportgewicht verbunden. Zum Vergleich: Der Gesamtbedarf an pflanzlichen Nahrungsmitteln liegt im „Szenario 2035“ bei ca. 635 kg/Ea.

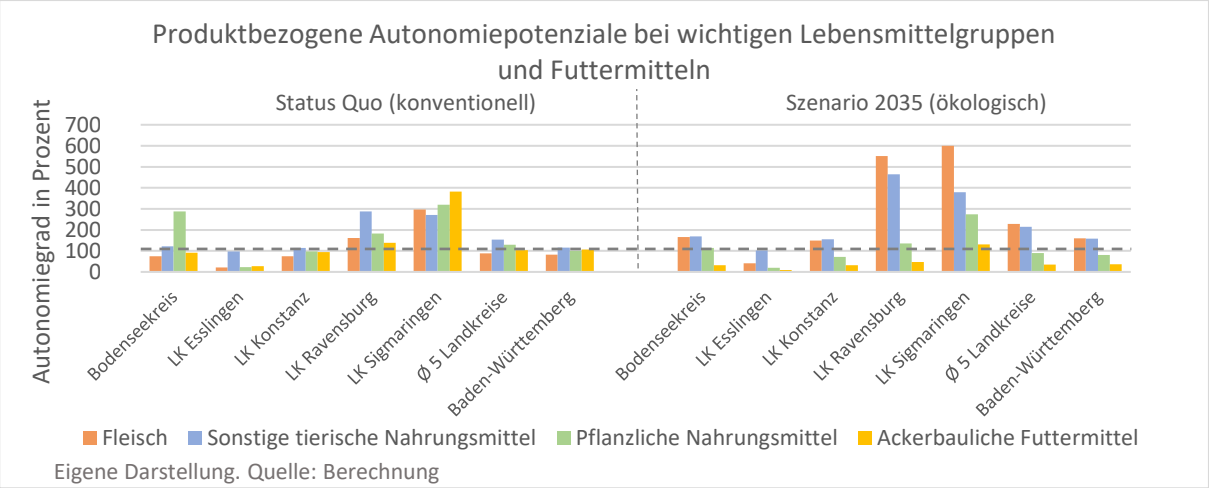


Abbildung 80: Produktbezogene Autonomiepotenziale bei wichtigen Lebensmittelgruppen und Futtermitteln 2017 und 2035

Setzt man die Fleischproduktion nicht ins Verhältnis zum Fleischkonsum nach der gewählten Ernährungsweise (hier Status Quo und Eco-Mix), sondern zu dem aus gesundheitlichen Gründen empfohlenen Maximalverzehr, so zeigt sich, dass die potenzielle Produktion im Status Quo den Maximalverzehr deutlich übertrifft. Dieser beträgt bei erwachsenen Männern ca. 30 kg/a, bei allen übrigen Bevölkerungsgruppen ist der Wert niedriger. Im „Szenario 2035“ erreichen die fünf Landkreise ein Produktionspotenzial von rund 24 kg/Ea.

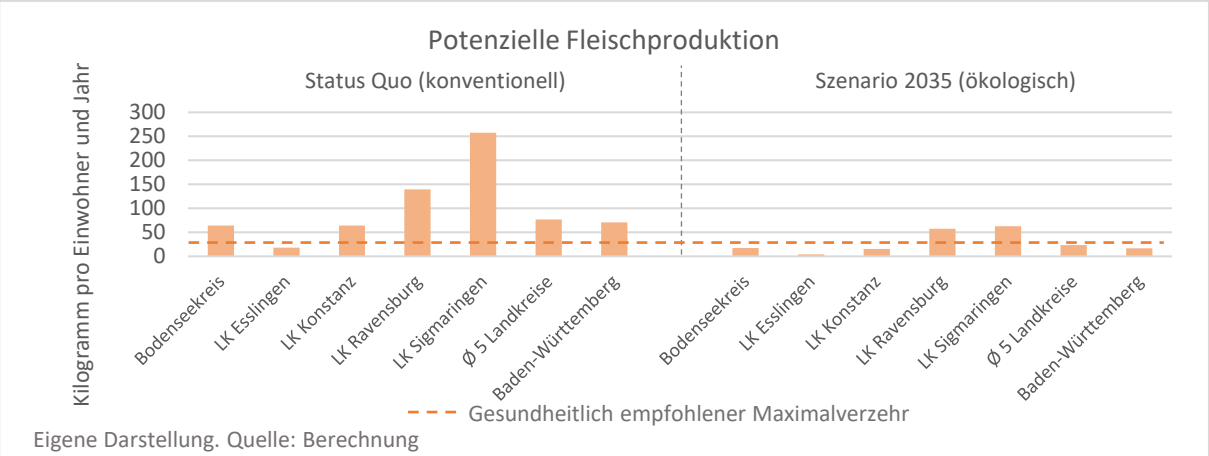
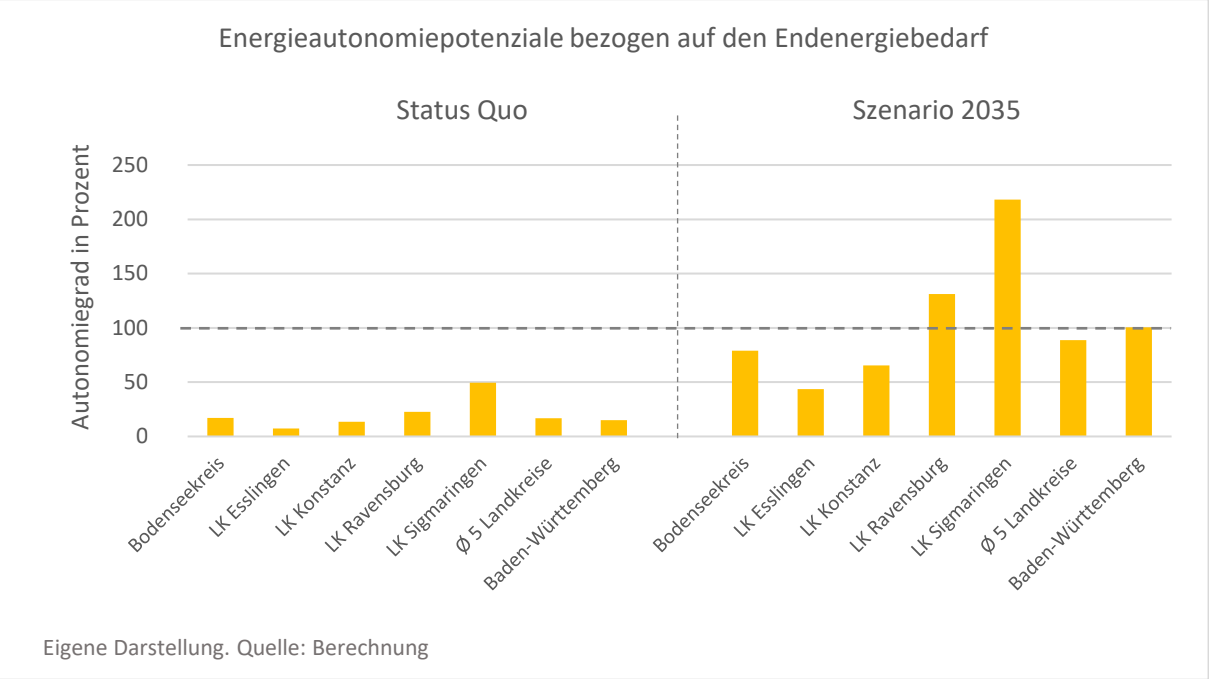


Abbildung 81: Potenzielle Fleischproduktion im Status Quo und im Szenario 2035

6.4.5.3.2 Produktbezogene Energieautonomie

Im Energiesektor weisen alle Landkreise geringere Autonomiepotenziale auf als in den anderen beiden Sektoren. Gemeinsam erreichen sie heute (Status Quo) lediglich ein Autonomiepotenzial von 17 Prozent. Durch eine Reduktion des Bedarfs um mindestens 55 Prozent und den Ausbau der erneuerbaren Energien, wie er in „Szenario 2035“ angenommen wurde, können die fünf Landkreise ihr Energieautonomiepotenzial im „Szenario 2035“ auf rund 89 Prozent steigern. Dabei ergibt sich in den Landkreisen Ravensburg (131 Prozent) und Sigmaringen (218 Prozent) jeweils ein potenzieller Überschuss.



Eigene Darstellung. Quelle: Berechnung

Abbildung 82: Produktbezogene Energieautonomiepotenziale der Landkreise 2017 und im Szenario 2035

Die im „Szenario 2035“ berücksichtigten Maßnahmen reichen folglich nicht aus, die betrachteten fünf Landkreise vollständig autonom mit Energie zu versorgen. Da aber auch das Energieautonomiepotenzial des Landes Baden-Württemberg im „Szenario 2035“ mit 100 Prozent nur knapp eine vollständige Autonomie ermöglicht und keine Speicherverluste kompensiert, müssten die nötigen Importe durch die fünf Landkreise immer noch zumindest teilweise aus Quellen außerhalb des Landes Baden-Württemberg bezogen werden. Höhere Energieautonomiegrade sind nur durch eine weitergehende Elektrifizierung des Straßenverkehrs, der Landmaschinen, der Gebäudebeheizung, der industriellen Produktion und/oder den weiteren Ausbau von Freiflächenphotovoltaikanlagen (z. B. Agrophotovoltaik) erreichbar.

Nach Energieträgern betrachtet, können alle fünf Landkreise ihre Autonomiepotenziale im „Szenario 2035“ insbesondere bei Strom und Festbrennstoffen deutlich steigern. Trotz der weitgehenden Elektrifizierung von Gebäudebeheizung und Verkehr kommen die fünf Land-

kreise bei Strom auf einen Autonomiegrad von 131 Prozent. Unter Berücksichtigung von Speicherverlusten müssen aber auch deutlich über hundert Prozent erzielt werden, um eine vollständige Stromautonomie zu erreichen. Mehr als hundert Prozent erreichen die 5 Landkreise im Szenario 2035 ansonsten lediglich bei Festbrennstoffen - obwohl in diesem Szenario der Anteil der Festbrennstoffe an der Wohngebäudebeheizung im Vergleich zum Status Quo von 6 auf 20 Prozent erhöht wurde. Eine lokale Produktion von Biodiesel und Bioethanol findet im Szenario 2035 nicht statt.[34] Der Zugewinn an Treibstoffautonomie im Szenario 2035 ist daher gering und vor allem auf die Steigerung der Energieeffizienz und den höheren Anteil von Pkw mit Gasantrieb zurückzuführen.

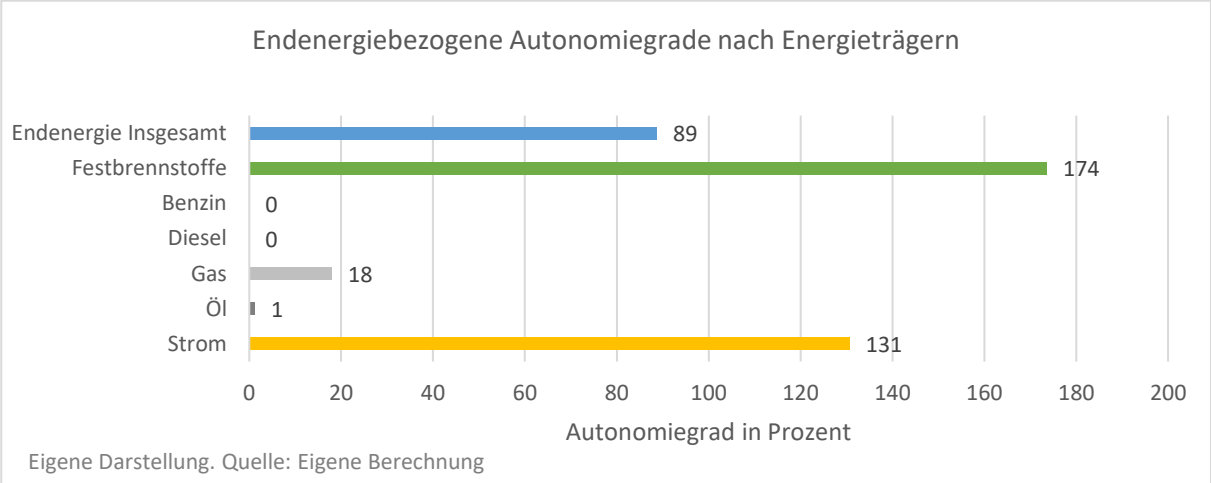


Abbildung 83: Autonomiepotenziale bei wichtigen Energieträgern im Szenario 2035

Der Überschuss an Festbrennstoffen könnte beispielsweise genutzt werden, um Teile des Wärmebedarfs im Sektor GHD zu decken. Insgesamt kann auf diese Weise im Wärmesektor ein Brennstoffautonomiegrad von ca. 63 Prozent erreicht werden. So können unter Einbezug der Wärmebereitstellung aus Wärmepumpen und Solarthermie rund 78 Prozent des Nutzenergiebedarfs im Wärmesektor von lokalen Energiequellen gedeckt werden. Die Kombination der verschiedenen Maßnahmen des Szenarios 2035 führt insgesamt zu einem endenergiebedarfsbezogenen Autonomiepotenzial von 89 Prozent. Dies entspricht, wie in Abbildung 84 dargestellt, einem um den Faktor 5,2 erhöhten Energieautonomiepotenzial im Vergleich zum Status Quo.

Um noch höhere Autonomiegrade zu erreichen, stehen vor allem drei Möglichkeiten zur Wahl:

- Die weitergehende Elektrifizierung des Verkehrs.
- Eine möglichst weitgehende Elektrifizierung des Sektors GHD
- Ein weiterer Ausbau der Freiflächenphotovoltaik.

[34] Der verbleibende Importbedarf liegt bei rund 152 Litern Biodiesel und 15 Litern Bioethanol pro Einnohner.

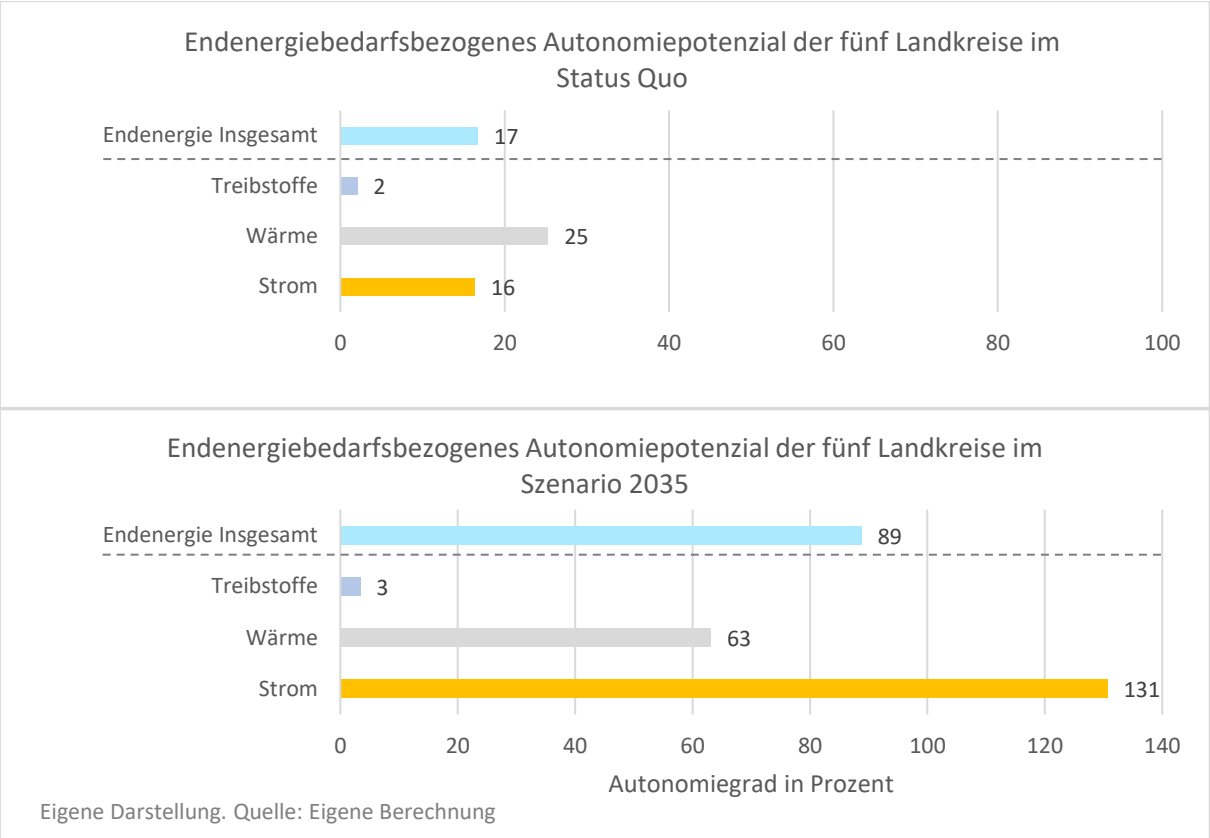


Abbildung 84: Energiebedarfsbezogene Autonomiegrade der fünf Landkreise im Status Quo und im Szenario 2035 nach Energiesektoren

6.4.5.3.3 Produktbezogene Rohstoffautonomie

Legt man das Gewicht als maßgebliche Einheit für die Berechnung eines produktbezogenen Rohstoffautonomiegrads an, weist unter den Verhältnissen des Jahres 2017 keiner der Landkreise in mehr als zwei Produktsegmenten ein Gesamtautonomiepotenzial von mehr als 100 Prozent auf. In den Segmenten Textilien, Papier, Öle, Ethanol und Kunststoffe wird nur in zwei von 25 Fällen ein Autonomiegrad über 50 Prozent erreicht.

Durch eine Reduktion des Rohstoffbedarfs der Konsumgüterproduktion um zwei Drittel und die Ausweitung der ackerbaulichen Produktionsflächen auf 3 Prozent, wie im „Szenario 2035“ angenommen, können die fünf Landkreise ihre Autonomiepotenziale deutlich steigern, mehr als 100 Prozent Rohstoffautonomie werden von den fünf Landkreisen jedoch nur im Bereich der Baustoff- und Möbelproduktion erreicht. In den Segmenten Textilien, Papier, Öle, Ethanol und Kunststoffe wird nun in 12 von 25 Fällen ein Autonomiegrad über 50 Prozent erreicht, in sechs von 25 Fällen werden 100 Prozent oder mehr erreicht. Ausreichende Potenziale bietet vor allem die Forstwirtschaft. Für Möbel steht etwa das Dreieinhalbfache der benötigten Rohstoffmenge zur Verfügung, für Dämmstoffe etwa das Dreieinhalbfache, für Bauholz etwa das Vierfache und für Verbundplatten (Spanplatten, OSB, etc.) ein Vielfaches der benötigten

Menge. Neben einer weitergehenden Reduktion des Verbrauchs, wie z. B. im Segment „Papier“, ist daher z. B. auch eine vermehrte Nutzung von Holz für die Textilfaserproduktion oder die Herstellung anderer Produkte in Erwägung zu ziehen. In den Produktsegmenten „Reinigungsmittel“ und „Farben und Lacke“ dürfte dagegen eine Vergrößerung der Ethanol- und Ölpflanzenanbaufläche von einem auf zwei Prozent der Ackerfläche eine Option sein, zu der es wenige Alternativen gibt, sofern der Bedarf nicht noch einmal halbiert und somit auf ein Sechstel des heutigen Verbrauchs reduziert werden kann. Die gemeinsamen Rohstoffautonomiepotenziale der fünf Landkreise in wichtigen Produktgruppen sind in Tabelle 78 jeweils im Vergleich zum landesweiten Durchschnitt in Baden-Württemberg dargestellt.

Tabelle 78: Rohstoffautonomiepotenziale* der fünf Landkreise in wichtigen Produktgruppen im Vergleich zum Landesdurchschnitt im Status Quo und im Szenario 2035 (Prozent)

Produktgruppe	Durchschnitt der 5 Landkreise 2017	Durchschnitt der 5 Landkreise 2035	Land Baden-Württemberg 2017	Land Baden-Württemberg 2035
Baustoffe & Möbel	133	445	165	489
Baustoffe	154	584	201	597
Möbel	115	341	138	406
Werkstoffe Fahrzeugbau	1	36	1	33
Textilfasern	18	62	16	56
Papier	16	67	9	51
Kunststoffe	0	0	0	0
Farben & Lacke	1	39	1	40
Reinigungsmittel	1	38	1	39

* Die Potenziale bilden ab, welche Autonomiegrade im Bezugsjahr möglich gewesen wären oder sein können. Sie geben nicht wieder, wie hoch ihr Anteil am Verbrauch im Jahr 2017 tatsächlich war.
Quelle: Eigene Berechnung

In Tabelle 79 sind die Autonomiepotenziale der einzelnen Landkreise nach wichtigen Produktgruppen im Einzelnen dargestellt.

Tabelle 79: Rohstoffautonomiepotenziale der einzelnen Landkreise nach wichtigen Produktgruppen im Szenario 2035 (Prozent)

Produktgruppe	Bodenseekreis	LK Esslingen	LK Konstanz	LK Ravensburg	LK Sigmaringen
Baustoffe & Möbel	420	129	415	582	1.470
Baustoffe	661	153	545	695	1.990
Möbel	279	112	326	488	1.048
Werkstoffe Fahrzeugbau	31	7	43	59	158
Textilfasern	49	14	46	100	240
Papier	48	5	39	185	176
Kunststoffe	0	0	0	0	0
Farben & Lacke	35	10	36	53	147
Reinigungsmittel	34	10	35	51	143

Quelle: Eigene Berechnung

6.4.5.3.4 Produktbezogenes Gesamtautonomiepotenzial

Aufgrund der geringen Vergleichbarkeit von Nahrungsmitteln, Energieträgern und sonstigen Konsumprodukten wurde davon abgesehen, einen produktbezogenen Gesamtautonomiegrad nach derselben Vorgehensweise zu ermitteln, nach welcher die Autonomiegrade innerhalb der einzelnen Sektoren bestimmt wurden. Anstatt einzelne Produktgruppen auf Basis einer gemeinsamen Grundeinheit miteinander ins Verhältnis zu setzen, wurde in diesem Fall ein Durchschnitt aus den Autonomiegraden gebildet, die in den drei Sektoren Nahrung, Energie und Rohstoffe erreicht werden. Diesen Durchschnitt können die fünf Landkreise mehr als verdoppeln, von 52 auf 116 Prozent. Damit entsprechen die Durchschnittswerte fast exakt dem Landesdurchschnitt, der von 50 auf 122 Prozent gestiegen ist.

Dabei ist bemerkenswert, dass dieser Effekt trotz Umstellung von der konventionellen auf die ökologische Wirtschaftsweise erreicht wurde, durch Einsparungen von 31 Prozent des Kalorienverbrauchs im Nahrungssektor, 55 Prozent des Endenergieverbrauchs und 67 Prozent des Rohstoffverbrauchs.

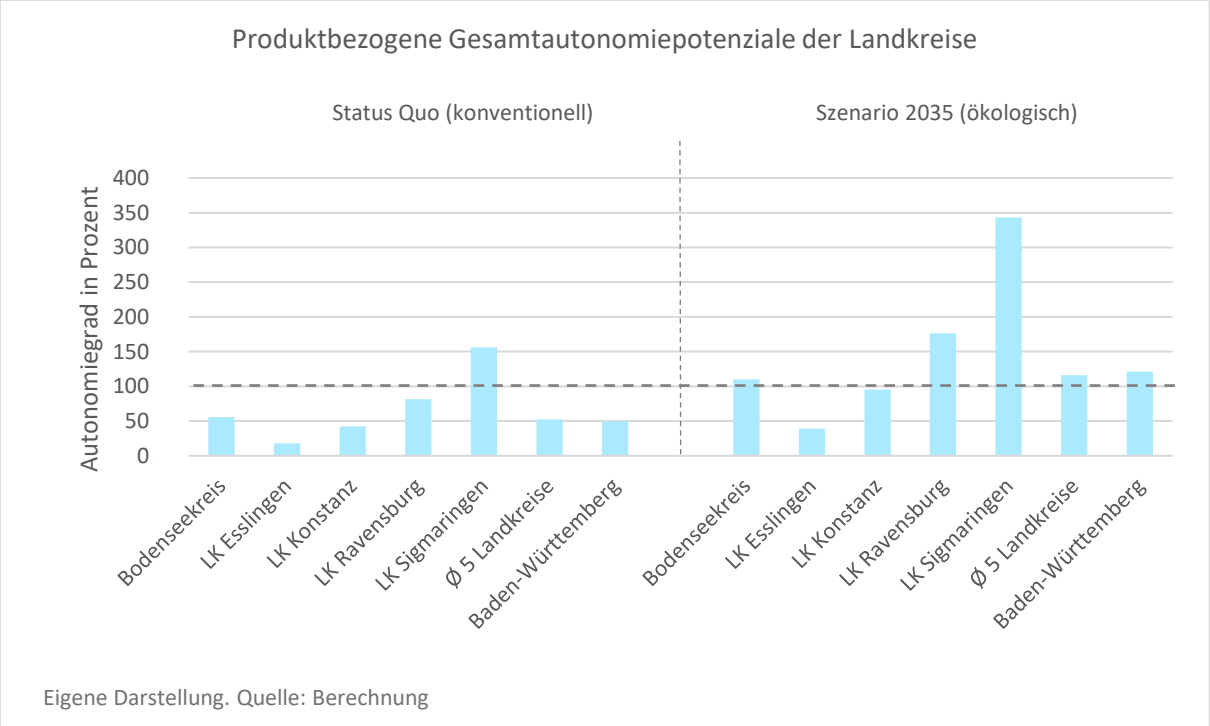


Abbildung 85: Produktbezogene Gesamtautonomiepotenziale der Landkreise im Status Quo und im Szenario 2035

Anders als bei der Berechnung des produktbezogenen Gesamtautonomiegrades steht bei der Bestimmung der flächenbezogenen Gesamtautonomie mit dem jeweiligen Flächenbedarf eine allen Produkten gemeinsame Berechnungseinheit zur Verfügung. Mit Blick auf die Gesamtautonomie ist daher der flächenbezogene Autonomiegrad der aussagekräftigere Kennwert.

6.4.5.4 Flächenbezogene Autonomiepotenziale

Flächenbezogene Autonomiegrade geben nicht nur genaueren Aufschluss über das Potenzial, sich im Bedarfsfall selbst versorgen zu können, sondern ermöglichen im Gegensatz zur Berechnung produktbezogener Autonomiegrade auch die Einbeziehung unterschiedlichster Produktgruppen, die ansonsten nicht miteinander verglichen oder durch einander ersetzt werden können, wie beispielsweise Nahrungsmittel, Textilien und Baustoffe. Zu bedenken ist allerdings, dass die flächenbezogenen Autonomiegrade maßgeblich davon abhängen, welche Durchschnittserträge in den Regionen erzielt werden, mit denen der Austausch der Produkte erfolgt. Geht man von einem ausschließlich innerdeutschen Austausch aus, fallen die Autonomiegrade der fünf Landkreise im „Szenario 2035“ deutlich geringer aus als im Falle eines globalen Warenaustauschs. Da die globalen Durchschnittserträge vieler Produkte deutlich unterhalb der deutschen bzw. mitteleuropäischen Erträge liegen, wirken sich bei einem globalen Warenaustausch Defizite stärker negativ und Exporte stärker positiv auf die Autonomiegrade aus als im Falle eines rein innerdeutschen Warenaustauschs. Ein überwiegend innerdeutscher Austausch von Nahrungsmitteln, regenerativen Energien und nachwachsenden Rohstoffen weist einige ökologische Vorteile auf (z. B. kurze Transportwege und geringe Transportverluste), möglich ist er aber nur bei hohen Autonomiegraden Gesamtdeutschlands. Berechnet wurden daher sowohl mögliche Autonomiegrade, die aus einem ausschließlich innerdeutschen Güteraustausch folgen, als auch mögliche Autonomiegrade, die sich bei einem globalen Güterhandel ergeben. Ein Verzicht auf jeglichen Außenhandel ist in der Regel mit einem deutlichen Verlust an Effizienz verbunden, da diverse Überschüsse nicht effizient genutzt werden können. Anzumerken ist allerdings mit Blick auf den Vergleich beider Ergebnisse, dass die Datenbasis auf nationaler Ebene detaillierter und von etwas geringeren Unsicherheiten gekennzeichnet ist.

6.4.5.4.1 Flächenbezogene Nahrungsautonomie

Im Status Quo ist ein rein innerdeutscher Güteraustausch für Landkreise in Südwestdeutschland, wie bereits erläutert, nur theoretisch möglich. In diesem theoretischen Fall weisen die fünf betrachteten Landkreise gemeinsam ein Autonomiepotenzial von ca. 88 Prozent auf. Besonders gering ist das Potenzial mit 24 Prozent im dicht besiedelten Kreis Esslingen. Mehr als den eigenen Bedarf zu decken, ist aktuell nur in den Kreisen Ravensburg und Sigmaringen möglich, die flächenbezogene Nahrungsautonomiepotenziale von 138 und 152 Prozent aufweisen. Durch eine Umstellung auf ökologische Landwirtschaft würde das Autonomiepotenzial in den fünf betrachteten Landkreisen auf ca. 57 Prozent sinken, im Land Baden-Württemberg würde noch ein Autonomiepotenzial von 45 Prozent erreicht. Eine Ernährungsumstellung auf die Ernährungsweise „Eco-Mix“ in Verbindung mit einer Reduktion vermeidbarer Verluste könnte die Ertragsminderung infolge der Umstellung auf ökologische Landwirtschaft jedoch

mehr als kompensieren. Im „Szenario 2035“ erreichen deshalb vier der betrachteten fünf Landkreise ebenso wie das gesamte Land Baden-Württemberg höhere Autonomiepotenziale als im Status Quo. Lediglich im Kreis Esslingen würde das flächenbezogene Nahrungsautonomiepotenzial um 1 Prozentpunkt sinken. Im Bodenseekreis wird dagegen ein Autonomiezugewinn von 12 Prozent erreicht. In den Kreisen Ravensburg und Sigmaringen sind mit 26 und 15 Prozentpunkten sogar noch größere Zugewinne möglich. Diese Steigerungen sind umso beachtlicher, da im „Szenario 2035“ nicht nur auf ökologische Wirtschaftsweise umgestellt wurde, sondern auch weniger Fläche zur Verfügung steht[35], eine größere Bevölkerung ernährt werden muss, auf die Haltung von Zweinutzungshühnern umgestellt wurde und zudem großflächige Agrophotovoltaikanlagen die Nahrungsmittelerträge reduzieren. Trotz all dieser Faktoren, die die Autonomiegrade senken, könnten die fünf Landkreise im Szenario 2035 einen flächenbezogenen Nahrungsautonomiegrad von 103 Prozent erreichen. Das Land Baden-Württemberg käme auf einen Wert von 78 Prozent[36].

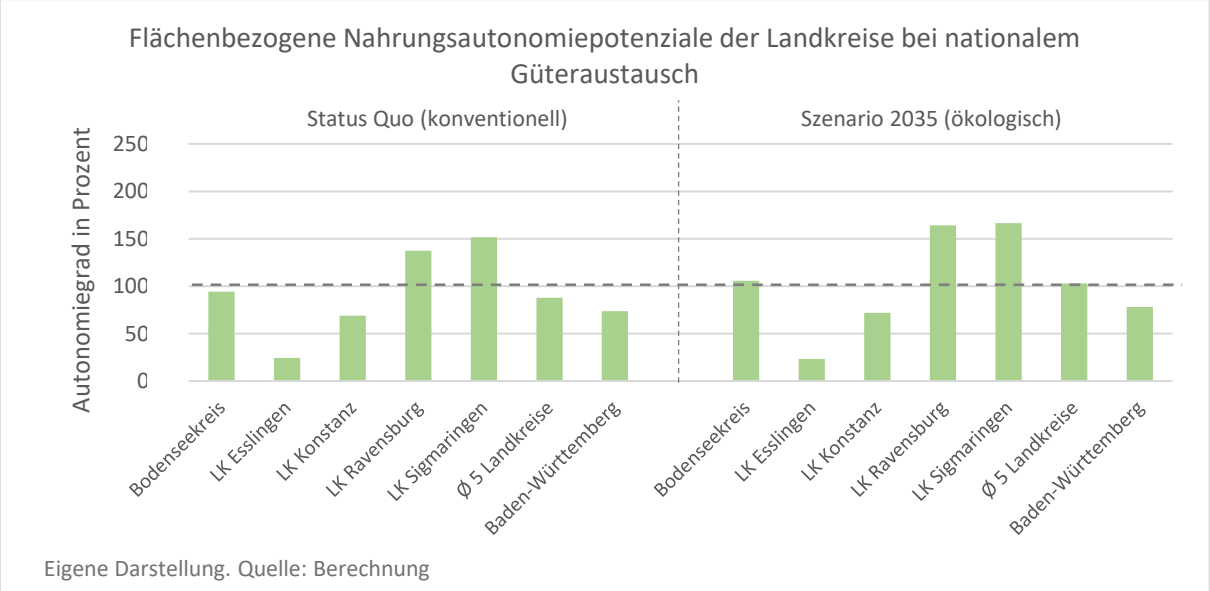


Abbildung 86: Autonomiepotenziale der Landkreise bei nationalem Güteraustausch im Status Quo und im Szenario 2035

[35] Angenommen wurde, dass der Flächenverbrauch sich bis 2035 fortsetzt, im Durchschnitt der 15 Jahre aber nur noch die Hälfte des heutigen Niveaus erreicht.

[36] Das Land Baden-Württemberg ist bei innerdeutschem Handel - im Unterschied zu den fünf betrachteten Landkreisen - nur noch dann in der Lage, seinen Nahrungsbedarf vollständig ökologisch und autonom zu decken, wenn es auf den ackerbaulichen Anbau von Energie- und Rohstoffpflanzen vollständig verzichtet und zugleich den Anbau von Futterpflanzen (auf ca. 10 Prozent der Ackerfläche), die Verschwendung von Nahrungsmitteln und den Konsum tierischer Nahrungsmittel deutlich reduziert. In diesem Fall kann das Land mit einer annähernd vegetarischen Ernährungsweise bei einer ökologischen Erzeugung einen flächenbezogenen Nahrungsautonomiegrad von 102 Prozent erreichen. Die Produktion tierischer Nahrungsmittel beinhaltet in diesem Fall knapp 12 kg Fleisch, 8 kg Eier, ca. 20 kg Käse und über 100 Liter Milch pro Person und Jahr. Importiert würden in diesem Fall vor allem Reis, Kaffee, Tee und Kakao. Erfolgt der Warenaustausch im Nahrungssektor global, steigen die Autonomiepotenziale dagegen deutlich. In diesem Fall kann das Land Baden-Württemberg durch die genannten Optimierungsmaßnahmen seine flächenbezogene Autonomie von über 130 Prozent steigern.

Bei globalem Handel fällt der Unterschied zwischen dem Status Quo und dem Szenario 2035 noch deutlicher aus als bei einem ausschließlich innerdeutschen Warenaustausch. In diesem Fall steigt der Nahrungsautonomiegrad der fünf betrachteten Landkreise nicht von 88 auf 103 Prozent, sondern von 89 auf 140 Prozent. Das Land Baden-Württemberg kann sein Autonomiepotenzial in diesem Fall von 66 auf 93 Prozent steigern. Trotz der Umstellung auf ökologische Wirtschaftsweise und der Nutzung von Agrophotovoltaikanlagen kann also auch bei einer wachsenden Bevölkerung in einem dicht besiedelten Bundesland ein deutlich höherer Autonomiegrad als im Status Quo erreicht werden - und damit sogar nahezu eine vollständige flächenbezogene Nahrungsautonomie. Bei der Berechnung wurde allerdings angenommen, dass die globalen Hektarerträge bis 2035 auf dem heutigen Niveau bleiben.

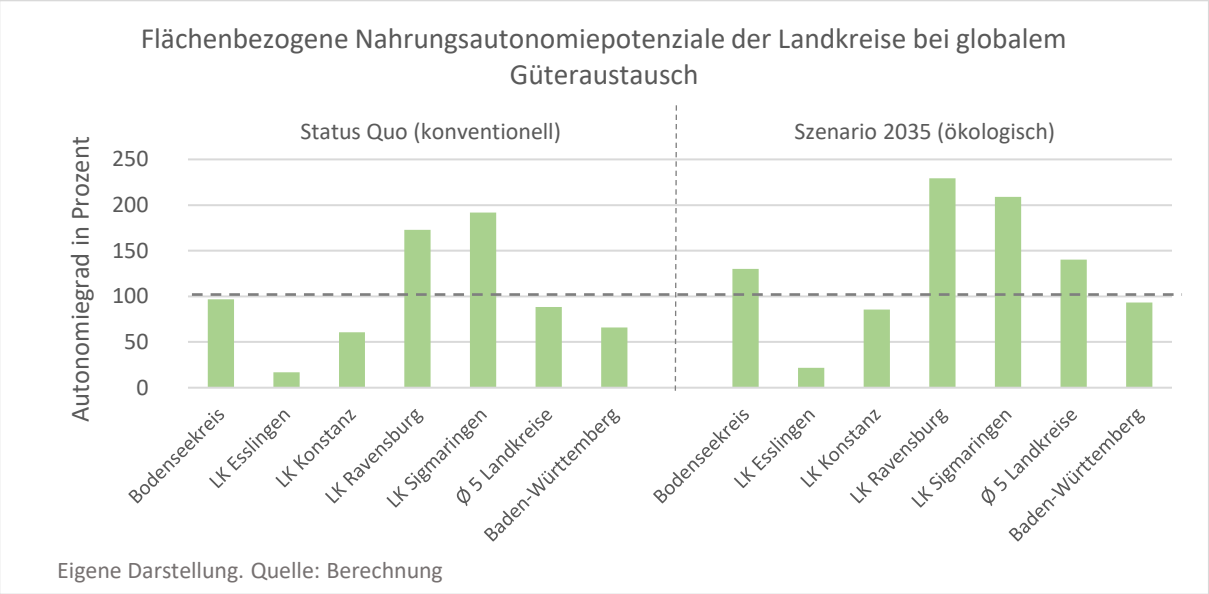
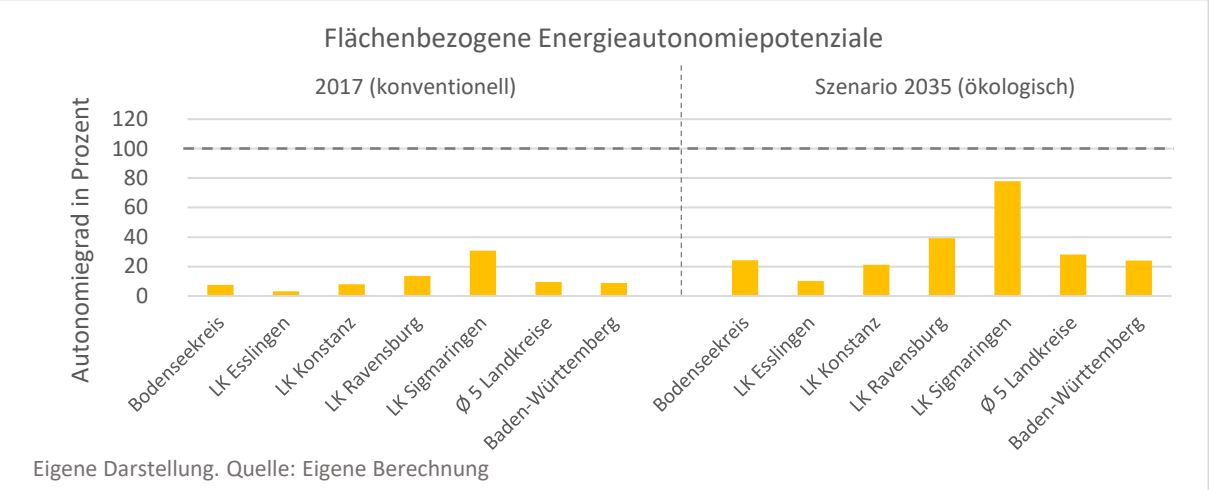


Abbildung 87: Flächenbezogene Nahrungsautonomiepotenziale bei globalem Warenaustausch

6.4.5.4.2 Flächenbezogenes Energieautonomiepotenzial

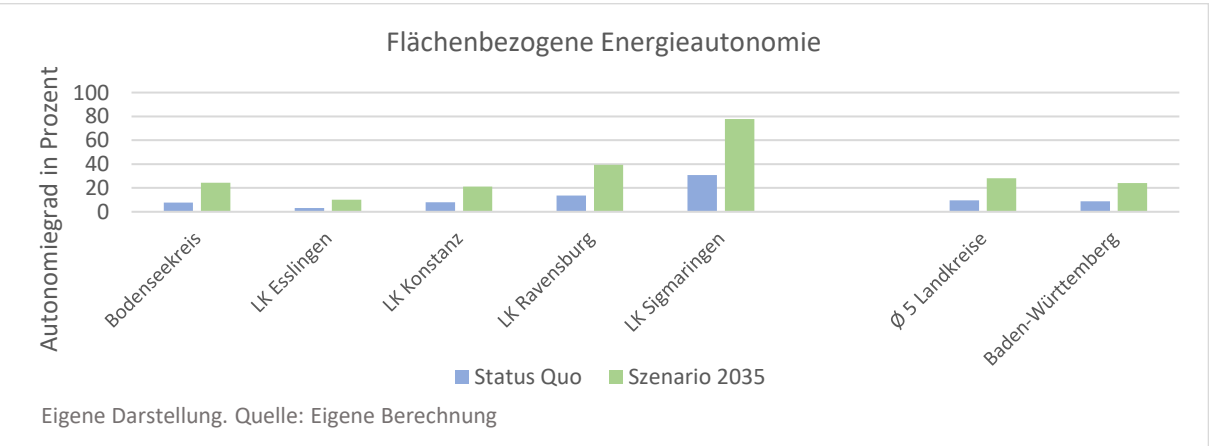
Flächenbezogen können die fünf betrachteten Landkreise heute gemeinsam eine Energieautonomie von ca. 9 Prozent erreichen (Status Quo). Dabei weist der Landkreis Sigmaringen mit 37 Prozent ein deutlich höheres Autonomiepotenzial auf als jeder der übrigen vier Landkreise, deren Autonomiegrade zwischen 3 und 14 Prozent liegen. Insgesamt liegen die fünf Landkreise damit etwa im Landesdurchschnitt, der rund 9 Prozent beträgt. Durch die Maßnahmen im „Szenario 2035“ können die fünf Landkreise gemeinsam ein flächenbezogenes Energieautonomiepotenzial von 28 Prozent erreichen und liegen damit um 4 Prozentpunkte über dem Landesdurchschnitt. Die Spanne reicht im Szenario 2035 von 10 Prozent im Kreis Esslingen bis 78 Prozent im Kreis Sigmaringen.



Eigene Darstellung. Quelle: Eigene Berechnung

Abbildung 88: Flächenbezogene Energieautonomie der Landkreise 2017 (Status Quo) und im Szenario 2035

Die für das Szenario 2035 angenommenen Maßnahmen führen somit, wie in Abbildung 89 gut zu erkennen ist, zu einer Verdreifachung des Autonomiegrades. Eine vollständige flächenbezogene Energieautonomie der fünf Landkreise ist damit jedoch bei weitem noch nicht erreicht.



Eigene Darstellung. Quelle: Eigene Berechnung

Abbildung 89: Steigerung der flächenbezogenen Energieautonomie im Szenario 2035

Damit zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den produktbezogenen und den flächenbezogenen Energieautonomiepotenzialen der Landkreise, der in Abbildung 90 grafisch dargestellt ist. In den fünf Landkreisen beträgt das flächenbezogene Autonomiepotenzial nur ein Drittel des Autonomiegrades, der sich produktbezogen ergibt. Im gesamten Land Baden-Württemberg ist die Differenz zwischen beiden Werten sogar noch größer.

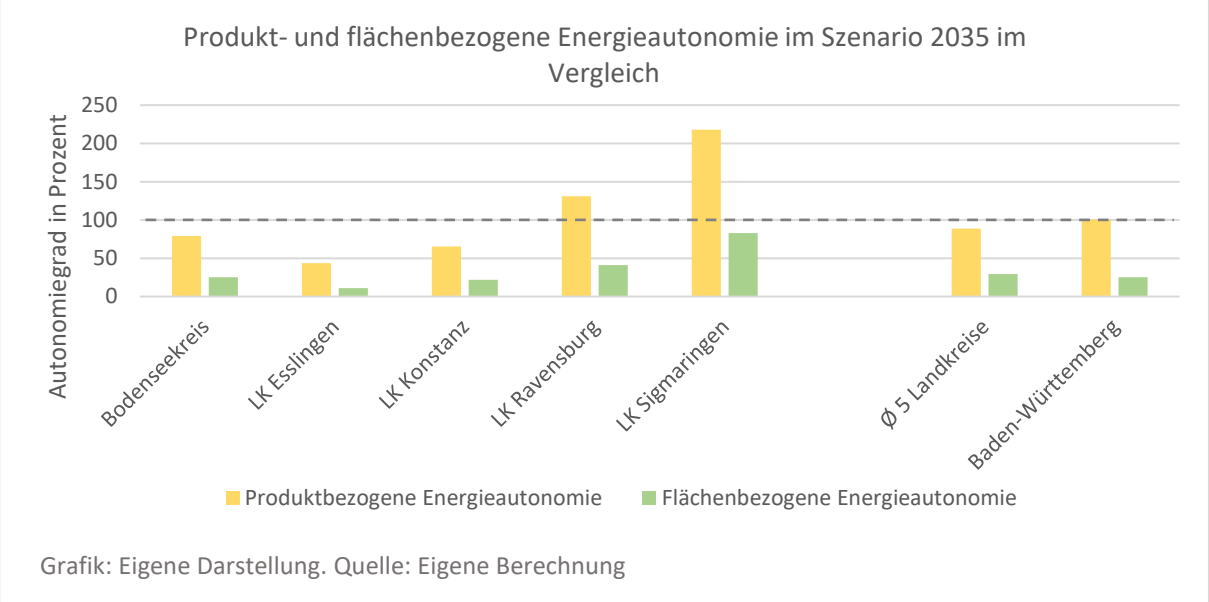


Abbildung 90: Produkt- und flächenbezogene Energieautonomiepotenziale 2035 im Vergleich

Um die Lücke, die sich im „Szenario 2035“ zwischen den beiden Werten zeigt, zu schließen, ist neben einer nahezu vollständigen Elektrifizierung von Verkehr, Landmaschinen und Gebäudebeheizung auch ein möglichst weitgehender Umstieg der Sektoren Gewerbe und Industrie von Gas und Öl auf Strom erforderlich. Zudem muss eine effiziente Nutzung der vorhandenen Festbrennstoffpotenziale erfolgen, um möglichst weitgehend auf Gas und insbesondere auf Flüssigbrennstoffe verzichten zu können.

Die vollständige Elektrifizierung des Verkehrs und der Landmaschinen lässt beispielsweise die produktbezogene Energieautonomie nur um rund 7 Prozentpunkte von 89 auf 96 Prozent steigen. Gleichzeitig steigt aber das flächenbezogene Energiepotenzial durch diese Maßnahme um 18 Prozentpunkte von 28 auf 46 Prozent. Ein Ersatz der verbleibenden Öl- und Gasheizungen (6 Prozent der Heizungen) in den Wohngebäuden durch Wärmepumpen steigert das Energiepotenzial produktbezogen nur minimal, erhöht aber den flächenbezogenen Energieautonomiegrad um rund zwei Prozentpunkte auf mehr als 48 Prozent.

Das verbleibende Flächendefizit von rund 52 Prozent ist hauptsächlich auf den verbliebenen Gas- und Ölbedarf der Sektoren GHD und Industrie zurückzuführen. Um diese Lücke zu schließen, muss auch hier nahezu vollständig auf Öl als Energieträger verzichtet werden. Zudem muss auch der Gasverbrauch deutlich reduziert werden.

6.4.5.4.3 Flächenbezogenes Rohstoffautonomiepotenzial

Die flächenbezogenen Rohstoffautonomiepotenziale der fünf Landkreise liegen im Status Quo, je nach Außenhandelspartner, mit 47 – 59 Prozent etwas unterhalb des Landesdurchschnitts von 55 – 66 Prozent. Das geringste Potenzial weist im Status Quo der Landkreis Esslingen mit 14 – 21 Prozent auf, über das größte Potenzial verfügt der Landkreis Sigmaringen mit 132 - 149 Prozent. Mit deutlichem Abstand folgen der Kreis Ravensburg mit 74 – 82 Prozent, der Kreis Konstanz mit 41 – 52 Prozent und der Bodenseekreis mit 37 – 48 Prozent.

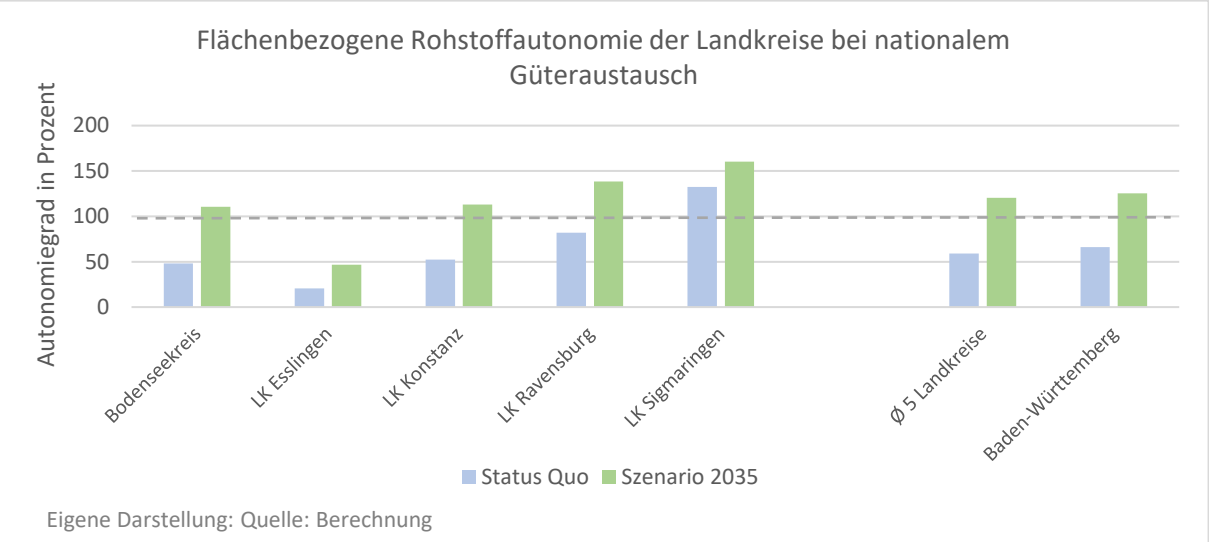


Abbildung 91: Flächenbezogene Rohstoffautonomie der Landkreise bei nationalem Güteraustausch

Vergleicht man die Autonomiegrade, die sich bei inländischem Güteraustausch ergeben, mit den Autonomiegraden, die aus einem globalen Rohstoffhandel resultieren, so zeigt sich auch hier erneut, dass Defizite sich bei globalem Handel verstärkt negativ auswirken, während Exporte sich verstärkt positiv auswirken. Die überdurchschnittliche Qualität der Produktionsflächen hat somit erhebliche Bedeutung für den globalen Flächenfußabdruck Deutschlands.

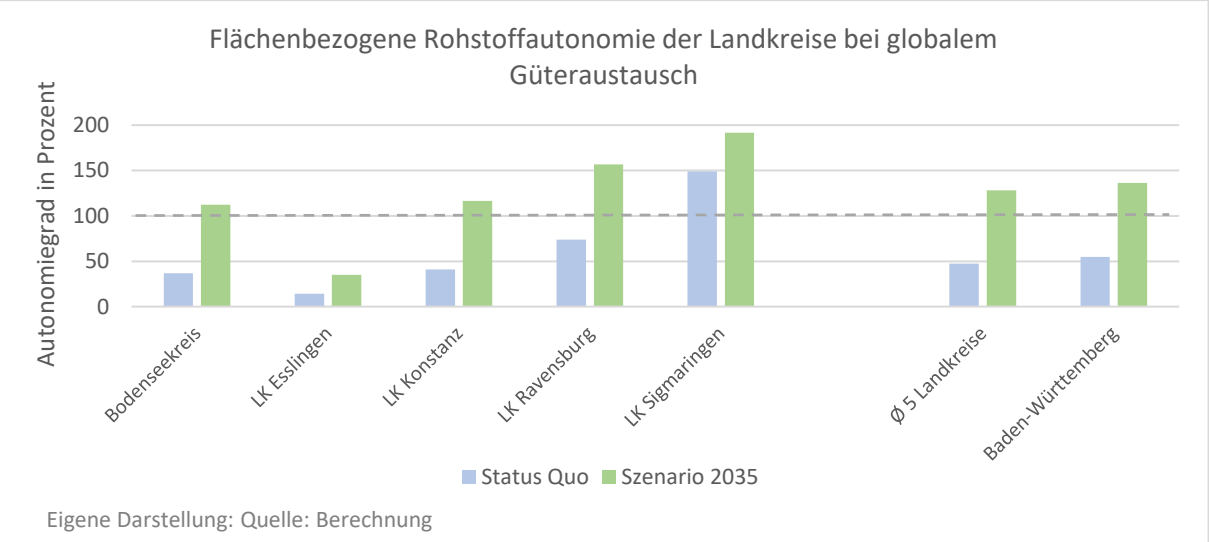


Abbildung 92: Flächenbezogene Rohstoffautonomie der Landkreise bei globalem Güteraustausch

Insgesamt sind die Potenziale der fünf betrachteten Landkreise etwas geringer als im Durchschnitt des Landes Baden-Württemberg. Dass eine Reduktion des Rohstoffbedarfs in allen Produktsegmenten um zwei Drittel und eine deutliche Ausweitung der Rohstoffpflanzenfläche im Vergleich zum Status Quo lediglich zu einem Autonomiepotenzial von 121 bis 129 Prozent führen, zeigt wie weit der heutige Verbrauch über das Maß hinausgeht, bei dem eine weitestgehend regenerative Rohstoffbereitstellung möglich ist. Wie in Abbildung 93 dargestellt, bestehen aber auch bei einer positiven Gesamtflächenbilanz in vielen Produktsegmenten noch große Defizite. Exportpotenziale bestehen ausschließlich in den Segmenten Baustoffe, Dämmstoffe und Möbel. Diese führen zu Flächenüberschüssen, die sich bei inländischem Handel auf etwa 76.000 Hektar und bei globalem Handel auf 117.000 Hektar belaufen. Ihnen stehen große Defizite in den übrigen Produktsegmenten gegenüber, die sich bei inländischem Handel auf rund 44.700 Hektar und bei globalem Handel auf rund 74.000 Hektar summieren.

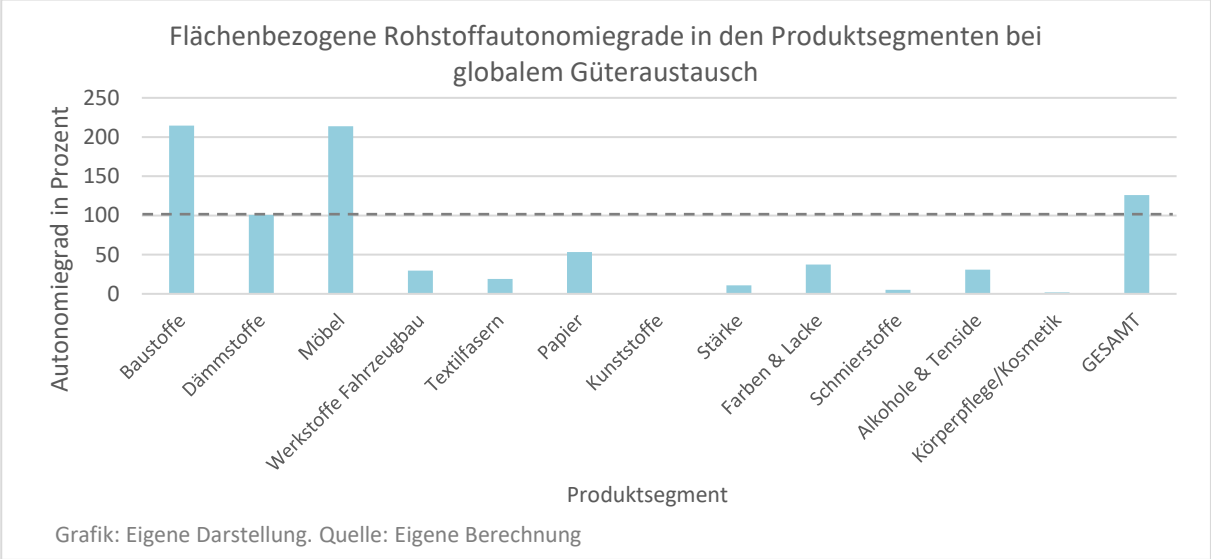


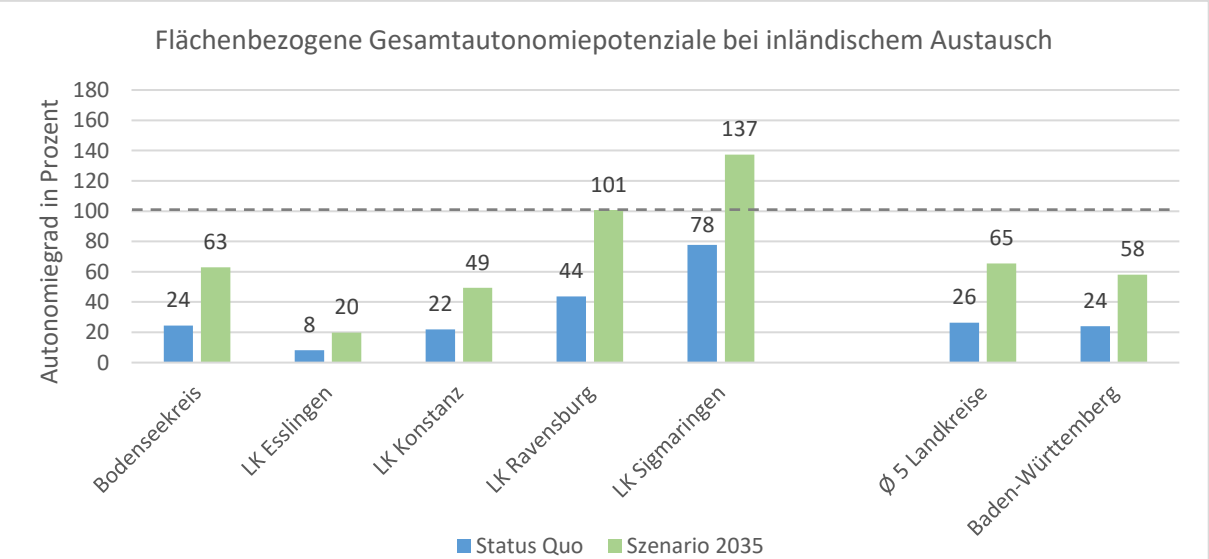
Abbildung 93: Flächenbezogene Rohstoffautonomie in den Produktsegmenten im Szenario 2035

Die großen Überschüsse im Bereich forstwirtschaftlich erzeugter Rohstoffe zeigen jedoch, dass eine Anpassung der Produktion an die Rohstoffpotenziale in verschiedenen Produktsegmenten möglich wäre. So könnten beispielsweise nicht benötigte forstwirtschaftliche Potenziale genutzt werden, die Defizite bei Textilfasern, Papier und Kunststoffen zu reduzieren. Ob die Produktion von holzbasierten Textilfasern und Kunststoffen (z. B. auf Ligninbasis) der Produktion von Hanf-, Nessel- oder Leinfasern aus ökologischer Sicht insgesamt vorzuziehen ist, kann hier nicht beurteilt werden. Hierfür müssten neben der Ökobilanz der Produktion auch indirekte Folgen berücksichtigt werden, wie z. B. indirekte Landnutzungsänderungen und ihre Folgen für Artenvielfalt und Treibhausgasausstoß. Insbesondere für den Verbrauch von Kunststoffen, Ölen und Ethanol müssten jedoch größere Flächen importiert werden, sofern der Konsum nicht weiter reduziert und die Anbaufläche der entsprechenden Rohstoffpflanzen nicht vergrößert werden soll.

6.4.5.4.4 Flächenbezogenes Gesamtautonomiepotenzial

Das flächenbezogene Gesamtautonomiepotenzial der fünf Landkreise beträgt im Status Quo bei überwiegend konventioneller Erzeugung und heutigen Verbrauchsgewohnheiten, je nach Handelspartner, ca. 21 – 26 Prozent. Das größte Potenzial besitzt im Status Quo der Landkreis Sigmaringen mit 78 – 80 Prozent, das geringste der Landkreis Esslingen mit 6 – 8 Prozent. Die Landkreise Ravensburg (41 – 44 Prozent), Bodenseekreis (20 – 24 Prozent) und Konstanz (17 – 22 Prozent) sind bei weitem nicht so dicht besiedelt wie der Kreis Esslingen, aber mit Autonomiegraden zwischen 17 und 44 Prozent ebenfalls in hohem Maße von Flächenimporten abhängig.

Mit den Veränderungen, die im Szenarios 2035 angenommen wurden, kann das Gesamtautonomiepotenzial der Landkreise trotz weitreichender Einsparungen beim Verbrauch von Nahrung, Energie und Rohstoffen insgesamt nur auf 65 – 70 Prozent gesteigert werden. Damit ist das Steigerungspotenzial zwar größer als im Landesdurchschnitt (im Bundesland Baden-Württemberg ergibt sich nur eine Steigerung auf 56 – 58 Prozent), dennoch bleiben auch die fünf betrachteten Landkreise mit einem Defizit von etwa einem Drittel noch in hohem Maße von Flächen außerhalb ihres eigenen Gebietes abhängig. Nur der Landkreis Sigmaringen erreicht mit 137 – 155 Prozent ein Autonomiepotenzial deutlich über jenem Maß, welches zur Deckung des eigenen Bedarfs nötig wäre. Der Kreis Ravensburg erreicht mit 101 – 113 Prozent ebenfalls eine vollständige Autonomie. Die Kreise Bodenseekreis, Konstanz und Esslingen bleiben dagegen weit davon entfernt. Die Potenziale des Status Quo und des Szenarios 2035 sind in Abbildung 94 (inländischer Handel) und Abbildung 95 (internationaler Handel) im direkten Vergleich dargestellt.



Eigene Darstellung. Quelle: Berechnung

Abbildung 94: Flächenbezogene Gesamtautonomiepotenziale der Landkreise im Status Quo und im Szenario 2035 bei inländischem Güteraustausch

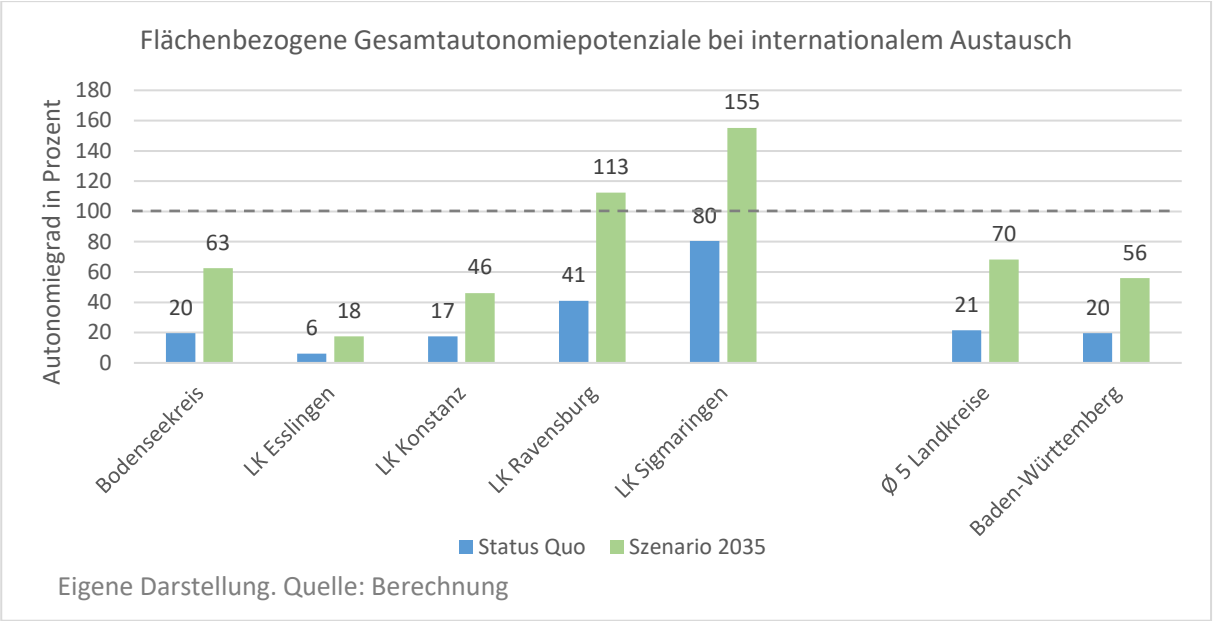


Abbildung 95: Flächenbezogene Gesamtautonomiepotenziale der Landkreise im Status Quo und im Szenario 2035 bei internationalem Güteraustausch

6.4.5.5 Transportaufwand 2017 und 2035

Würde die Versorgung heute so weit wie möglich auf regenerative Energie- und Rohstoffquellen umgestellt, ergäbe sich trotz eines erhöhten Anteils lokaler Rohstoffe immer noch ein erheblicher Transportaufwand. Im Durchschnitt der fünf Landkreise wird er ohne abiotische Rohstoffe (z. B. Metalle, Steine, Sande etc.) auf ca. 3,1 Tonnen pro Einwohner und Jahr geschätzt, wenn der Konsum auf dem heutigen Niveau verbleibt. Bei den zu transportierenden Gütern würde es sich im Status Quo überwiegend um Importe handeln. Durch die im „Szenario 2035“ angenommenen Maßnahmen würde sich das Transportaufkommen, wie in Abbildung 96 dargestellt, erheblich verändern. Im „Szenario 2035“ sind die verbleibenden Importmengen (gelb) deutlich reduziert. Allerdings nehmen auch die potenziellen Exportmengen (blau) etwas ab. Gemeinsam können die fünf Landkreise im „Szenario 2035“ daher bei den betrachteten Gütern (Nahrung, Energie, nachwachsende Rohstoffe) mit einer Reduktion der Transportmengen um ca. 63 Prozent auf rund 1,2 t/Ea rechnen. Die größten Anteile am Exportpotenzial der fünf Landkreise haben in diesem Szenario Nahrungsmittel (60 Prozent) und Rohstoffe (38 Prozent). Energieträger können nicht exportiert werden. Bei den Importen entfallen im „Szenario 2035“ mit 46 Prozent die größten Anteile auf Nahrungsmittel, während und Energieträger noch 38 Prozent der Fracht ausmachen. Mit 15 Prozent haben nachwachsende Rohstoffe ebenfalls einen erheblichen Anteil am Import land- und forstwirtschaftlich erzeugter Produkte. Vergleichsweise gering ist in beiden Fällen der Transportbedarf bei Futtermitteln. Insgesamt stehen Importe und Exporte im „Szenario 2035“ in einem deutlich ausgewogeneren Verhältnis.

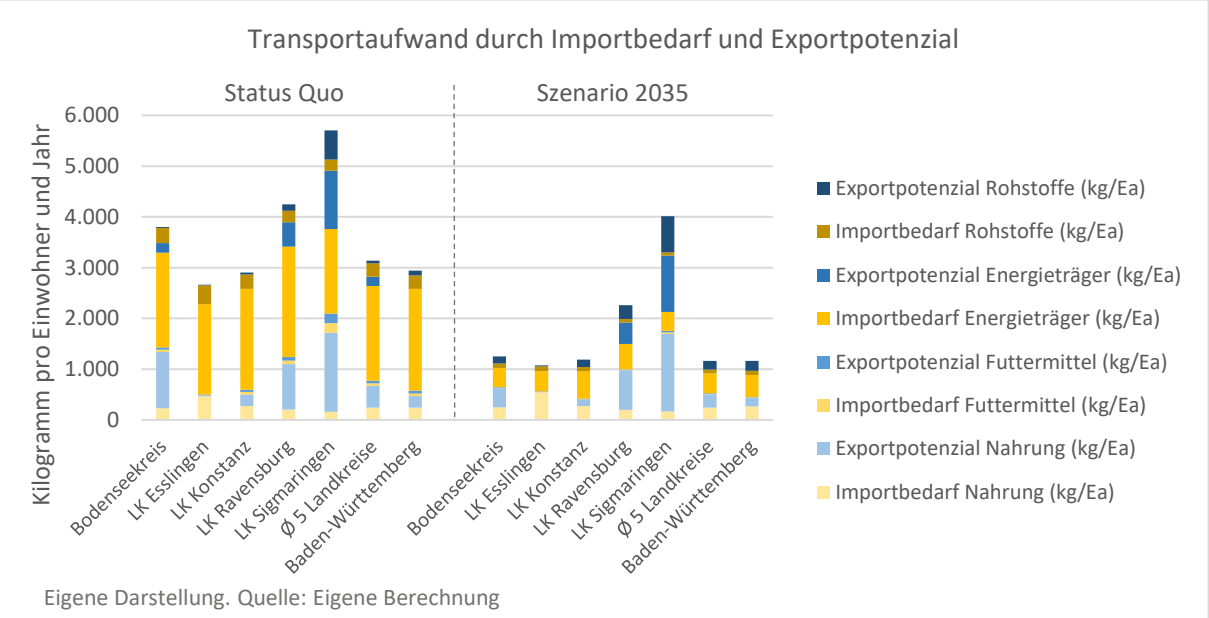


Abbildung 96: Transportaufwand infolge des Importbedarfs und der Exportpotenziale

6.4.5.6 Auswirkungen urbaner Nahrungsproduktion auf die flächenbezogenen Autonomiegrade

Das Ernährungspotenzial von beheizten Gewächshäusern mit reiner Pflanzenproduktion ist theoretisch groß, da schon ein Quadratmeter Anlagenfläche pro Einwohner das Nahrungsautonomiepotenzial um ca. 1,0 bis 1,6 Prozent erhöhen kann. Allerdings deuten erste Schätzungen, wie bereits dargestellt, daraufhin, dass das nutzbare Dachflächenpotenzial nicht groß genug ist, um den Nahrungsautonomiegrad eines Landkreises auch in der Praxis wesentlich zu erhöhen. Da zudem auch das Energieautonomiepotenzial durch großflächige Dachgewächshäuser deutlich sinkt, führen beheizte Gewächshäuser in der Summe zu einem Rückgang des flächenbezogenen Gesamtautonomiepotenzials, wenn die benötigte Energie aus regenerativen Quellen gewonnen wird. Im Gegensatz zu Dachgewächshäusern mit reiner Pflanzenproduktion wirkt sich Aquaponik auch auf das Nahrungsautonomiepotenzial nicht positiv aus, denn sie lässt neben dem Flächenbedarf der Energiegewinnung auch den der Futtermittelproduktion merklich steigen. Damit tritt sie mit der klassischen Viehhaltung in Konkurrenz um Futterflächen. Der berechnete flächenbezogene Gesamtautonomiegrad der fünf Landkreise sinkt deshalb mit der Nutzung von 2,0 m² Aquaponik pro Einwohner deutlicher stärker (-6,8 Prozentpunkte) als mit der Nutzung von Gewächshäusern mit reiner Pflanzenproduktion auf der gleichen Anlagenfläche (-0,7 Prozentpunkte). Die unbeheizte, nicht überdachte urbane Landwirtschaft dürfte in durchschnittlichen süddeutschen Städten angesichts des berechneten Zugewinns von 0,1 bis 0,2 Prozentpunkten keine relevanten Auswirkungen auf das Ernährungspotenzial haben. 10 bis 20 Quadratmeter pro Person, die für einen Zugewinn von einem Prozentpunkt Nahrungsautonomie benötigt würden, dürften in Städten kaum verfügbar sein. Die berechneten Auswirkungen auf die flächenbezogenen Autonomiepotenziale der fünf Landkreise in den drei Sektoren sowie auf ihr Gesamtautonomiepotenzial sind in Tabelle 80 abzulesen. Insgesamt führt keines der Systeme zu einer Erhöhung der flächenbezogenen Gesamtautonomie. Die Steigerungen des Autonomiegrades im Nahrungssektor werden durch Einbußen im Energiesektor mehr als kompensiert, die aus dem hohen Energiebedarf der Gewächshäuser oder Aquaponikanlagen resultieren. Der Verlust der zwei Quadratmeter potenzieller Photovoltaikfläche wirkt sich allerdings auf die flächenbezogenen Autonomiegrade kaum aus, wie das Berechnungsergebnis für das Szenario mit offenen Dachfarmen zeigt.

Tabelle 80: Auswirkungen verschiedener Systeme der urbanen Nahrungsproduktion auf die flächenbezogenen Autonomiegrade bei globalem Güteraustausch

Sektor	Szenario ohne Urban Farming	Szenario mit Dachgewächshäusern (UDF) (2 m²/Einwohner)	Szenario mit Aquaponik (AqP) (2 m²/Einwohner)	Szenario mit offenen Dachfarmen (2 m²/Einwohner)
Nahrung	140,1%	143,4%	118,8%	140,3%
Energie	29,6%	28,7%	28,1%	29,6%
Rohstoffe	129,3%	129,3%	129,3%	129,3%
Insgesamt	70,4%	69,7%	63,6%	70,4%

Quelle: Eigene Berechnung

6.4.5.7 Auswirkungen von Anpassungen der Flächennutzung am Beispiel des Grünlandes

Im „Szenario 2035“ benötigen die fünf Landkreise nur ca. 33 Prozent des Grünlandes für die Deckung ihres Bedarfs an Milch und Milchprodukten. Da insgesamt rund 65 Prozent des Grünlandes für die Milchviehhaltung vorgesehen sind und weitere 10 Prozent für die Haltung von Mastrindern, Schafen und Ziegen, werden deutliche Überschüsse bei Milchprodukten und Fleisch produziert. Da sich die übrigen Teile Deutschlands im „Szenario 2035“ ebenfalls gut selbst mit diesen Produkten versorgen können, besteht eine Alternative zum Export von Milch und Fleisch in der Anpassung der Grünlandnutzung an den Eigenbedarf. Dabei ist jedoch unter anderem zu berücksichtigen, wie sich dies auf den globalen Landfußabdruck insgesamt auswirkt:

Bei globalem Nahrungsmittelaustausch ergibt sich für die fünf Beispiellandkreise im „Szenario 2035“ ein flächenbezogener Nahrungsautonomiegrad von 140 Prozent. Nutzt man nur das für den Eigenbedarf benötigte Grünland für die Milchviehhaltung und verzichtet auf einen Grünlandexport in Form von Milchprodukten und Fleisch, sinkt der flächenbezogene Nahrungsautonomiegrad um rund 60 Prozentpunkte auf 80 Prozent. Wird das freiwerdende Grünland daraufhin vollständig für die Energiegewinnung genutzt, steigt der flächenbezogene Energieautonomiegrad lediglich um ca. 3 Prozentpunkte. Das flächenbezogene Gesamtautonomiepotenzial fällt dagegen durch die genannten Änderungen um 11 Prozentpunkte auf 59 Prozent (vgl. Tabelle 81). Der Landfußabdruck ist in diesem Fall (ohne Grünlandexport in Form von Milch und Fleisch) deutlich größer als im „Szenario 2035“ mit Grünlandexport. Im Vergleich zum unveränderten „Szenario 2035“ beträgt der Unterschied ca. 8 Prozent, bei einer weiteren Reduktion des Verbrauchs von flüssigen und gasförmigen Brennstoffen liegt der Unterschied sogar in einem deutlich zweistelligen Bereich.

Tabelle 81: Einfluss der Grünlandnutzung auf die flächenbezogenen Autonomiegrade (Prozent)

Sektor	Szenario 2035		Szenario 2035 ohne Milch-/Fleischexport	
	Anteil am Grünlandüberschuss*	Flächenbezogener Autonomiegrad	Anteil am Grünlandüberschuss*	Flächenbezogener Autonomiegrad
Nahrung	**75	140	***10	80
Energie	15	30	80	33
Rohstoffe	10	129	10	129
Insgesamt	100	70	100	59

* Grünland, das nicht für die Deckung des Eigenbedarfs mit Milch und Milchprodukten benötigt wird
** 50 Prozent Milchvieh, 10 Prozent Rindermast, 10 Prozent Streuobst, 5 Prozent Schaf- und Ziegenhaltung
*** Streuobst ohne Viehfutterproduktion
Quelle: Eigene Berechnung

Eine möglichst genaue Anpassung der Flächennutzung an den Eigenbedarf und die Vermeidung von Überschüssen kann also, wie das Beispiel der Grünlandnutzung zeigt, zu einem deutlich größeren globalen Landfußabdruck führen.

6.4.5.8 Auswirkungen eines Verzichts auf Energiepflanzen zugunsten der Rohstoffproduktion

Häufig diskutiert und empfohlen (u. a. durch den WBGU) wird auf mittel- bis langfristige Sicht ein Verzicht auf Energiepflanzen zugunsten der Produktion von Nahrungsmitteln und stofflich nutzbare Rohstoffe. In Deutschland haben Energiepflanzen mit 100 bis 120 TWh/a ein beachtliches umsetzbares Potenzial, das etwa 50 bis 60 Prozent des technischen Potenzials der Dachflächenphotovoltaik entspricht. Die Brutto-Stromerzeugung der Photovoltaikanlagen in Deutschland lag im Jahr 2017, einschließlich Freiflächenanlagen, bei 39,4 TWh, was ca. 18 Prozent des technischen Potenzials der Dachflächenphotovoltaik entspricht. Das umsetzbare Potenzial dürfte zumindest um einige Prozent unter dem technischen Potenzial liegen. Ob das umsetzbare Potenzial der Dachflächenphotovoltaik wiederum rechtzeitig vollständig ausgeschöpft werden kann, ist bisher nicht absehbar. Bioenergie aus Anbaubiomasse liefert daher auf absehbare Zeit noch einen bedeutenden Beitrag zu einer regenerativen Energiebereitstellung. In den betrachteten 5 Landkreisen ist die verfügbare Ackerfläche jedoch insgesamt sehr gering. Mit rund 0,07 Hektar pro Einwohner entspricht sie nur 51 Prozent des bundesweiten Durchschnitts. Dementsprechend ist ihr Energiepotenzial hier deutlich geringer. Wird deshalb auf eine Nutzung von Energiepflanzen zugunsten des Anbaus von Rohstoffpflanzen verzichtet, so steigt das flächenbezogene Autonomiepotenzial der fünf Landkreise im „Szenario 2035“ – je nach Grad der Elektrifizierung – um insgesamt 1 bis 3 Prozent. Der flächenbezogene Energieautonomiegrad sinkt dabei um bis zu 14 Prozent.

Tabelle 82: Auswirkungen von Energie- und Rohstoffpflanzen auf die Autonomiepotenziale

Sektor	Pflanzenmix NER: Nahrung, Energie und Rohstoffe	Pflanzenmix N&R: Nahrung und Rohstoffe
Flächenbezogene Autonomiegrade in den Sektoren im Szenario 2035		
Flächennutzung	82% Nahrungsproduktion 15% Energiepflanzen 3% Rohstoffpflanzen	82% Nahrungsproduktion 0% Energiepflanzen 18% Rohstoffpflanzen
Nahrung	140,1%	142,6%
Energie	29,6%	27,1%
Rohstoffe	129,3%	146,0%
Insgesamt	70,4%	73,4%
Flächenbezogene Autonomiegrade in den Sektoren im optimierten Szenario 2035		
Flächennutzung	76% Nahrungsproduktion 15% Energiepflanzen 9% Rohstoffpflanzen	76% Nahrungsproduktion 0% Energiepflanzen 24% Rohstoffpflanzen
Nahrung	138,4%	140,9%
Energie	106,9%	94,5%
Rohstoffe	123,2%	140,8%
Insgesamt	126,5%	129,1%

Quelle: Eigene Berechnung

Weiterhin benötigte biogene Energieträger müssen in diesem Fall zu höheren Anteilen importiert werden.

Deutlicher sind die negativen Effekte des Verzichts auf Energiepflanzen der zweiten Generation im Hinblick auf die Ökologie: Der Anteil der Nektar spendenden Pflanzen an der Ackerfläche sinkt um 26 Prozent, während die Schwankungen im Nektarangebot zunehmen und die Vielfalt der Blühpflanzen reduziert wird. Einen positiven Effekt hat, wie in Abbildung 97 dargestellt, lediglich die Zunahme der Fasernesselflächen, die jedoch keinen Nektar liefern.

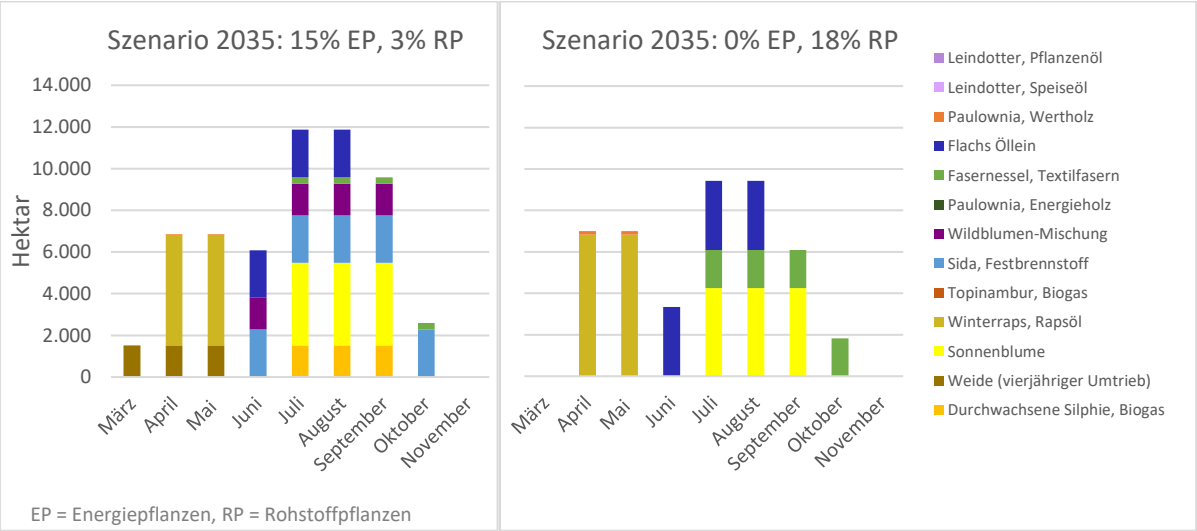


Abbildung 97: Insektenweidefläche im Jahresverlauf nach Energie- und Rohstoffpflanzennutzung

Sehr deutlich ist der Unterschied mit Blick auf die Zahl der Pflanzenschutzanwendungen pro Hektar Energie- und Rohstoffpflanzenanbaufläche sowie auf den Anteil der geschützten Bodenfläche durch mehrjährige Nutzpflanzen. Auf den betroffenen 18 Prozent der Ackerfläche steigt die Zahl der Pflanzenschutzanwendungen um den Faktor 4,6 von 0,12 auf 0,55 pro Hektar und Jahr (Abbildung 98).

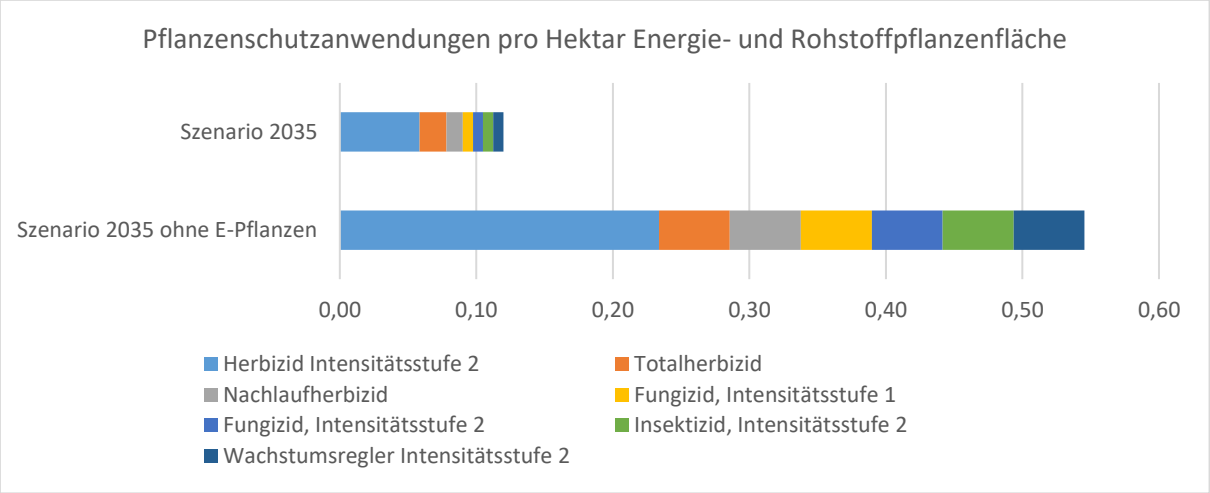


Abbildung 98: Pflanzenschutzanwendungen pro Hektar Energie- und Rohstoffpflanzenfläche nach Energiepflanzennutzung im Szenario 2035

Der Anteil der mehrjährigen Kulturen, die aufgrund der dauerhaften Durchwurzelung der Böden zum Humusaufbau beitragen und vor Erosion schützen, sinkt durch den Verzicht auf Energiepflanzen der zweiten Generation zugunsten von Rohstoffpflanzen von ca. 13,5 Prozent auf ca. 1,1 Prozent der gesamten Ackerfläche (vgl. Abbildung 99).

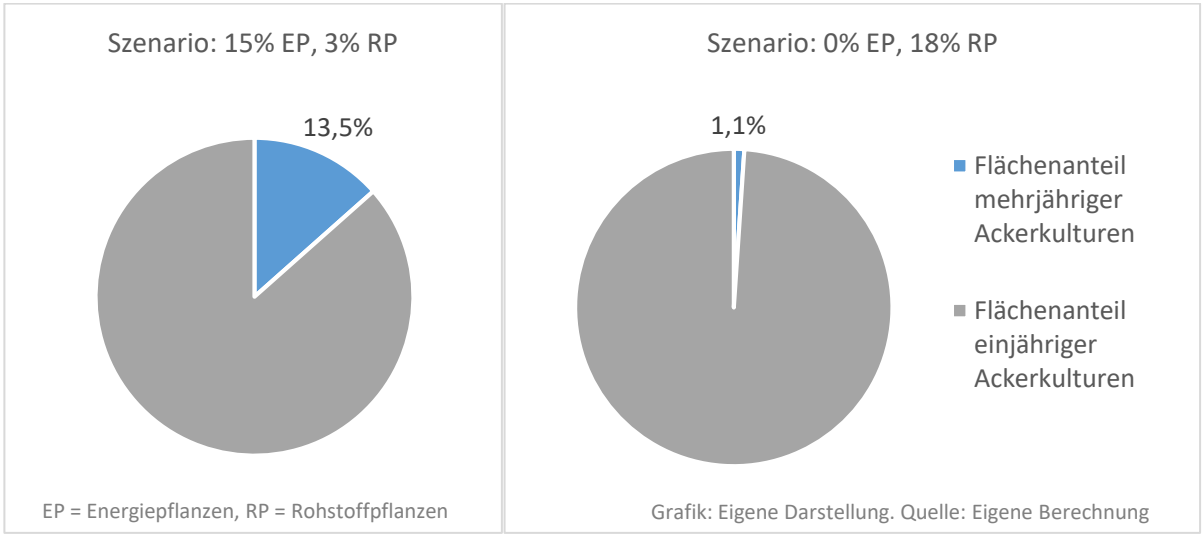


Abbildung 99: Erosionsschutz durch mehrjährige Kulturpflanzen im Szenario 2035 nach Energiepflanzennutzung

6.4.5.9 Auswirkungen von Power-to-X-Technologien auf die Autonomiepotenziale

Der Einsatz von Batterien als Stromspeicher gilt im Vergleich zu grünem Wasserstoff als ressourcenaufwendiger und umweltschädlicher. Allerdings ist der Energieaufwand der Wasserstoffproduktion hoch: „Dieselbe Strommenge, mit der ein batterieelektrisches E-Auto 100 km weit kommt, reicht bei einem Brennstoffzellenauto nur für 48 km, also für weniger als die Hälfte der Strecke“ (VCD, 2020). Noch höher sind die Umwandlungsverluste bei der Produktion von gasförmigen oder flüssigen Treibstoffen, sogenannten E-Fuels, in Power-to-X-Verfahren: Die Reichweite, die mit derselben Strommenge möglich ist, „beträgt gerade einmal 15 Kilometer“ (VCD, 2020). Der Verkehrsclub Deutschland VCD sieht daher in „E-Fuels keine wirkliche Alternative zum E-Auto“ (VCD, 2020). Denkbare künftige Einsatzgebiete werden vor allem bei Verkehrsmitteln gesehen, „die nicht mit Elektro-Antrieb ausgestattet werden können“ (VCD, 2020). Zumindest würde der Einsatz von grünem Wasserstoff oder grünen E-Fuels den Bedarf an Energieimporten deutlich erhöhen, wenn ein massiver Ausbau von Freiflächenphotovoltaikanlagen vermieden werden soll. Werden beispielsweise 100 Prozent des Pkw-Verkehrs bei der angenommenen Fahrleistung (70 Prozent des Status Quo) mithilfe von Wasserstoff und Brennstoffzellen angetrieben, führt dies in den fünf betrachteten Landkreisen im „Szenario 2035“ zu einem um ca. 8 Prozentpunkte geringeren produktbezogenen Energieautonomiegrad, als wenn dieselbe Fahrleistung vollständig durch Elektroautos mit Batteriespeichern erbracht wird. Wird die gesamte Pkw-Fahrleistung von Pkw mit Verbrennungsmotoren unter dem Einsatz von E-Fuels erbracht, sinkt das Autonomiepotenzial im Vergleich zu batteriebetriebenen Pkw um bis zu 25 Prozentpunkte von ca. 91 auf ca. 66 Prozent. Wird die Pkw-Fahrleistung zu gleichen Teilen zwischen Elektroautos, wasserstoffbetriebenen Autos und mit E-Fuels betriebenen Pkw aufgeteilt, so liegt der Energieautonomiegrad um ca. 12 Prozentpunkte unter der 1. Variante, in der ausschließlich Batterie-Elektroautos genutzt werden. Sollen auch Busse und Nutzfahrzeuge mithilfe von Wasserstoff oder E-Fuels angetrieben werden, sinkt der Energieautonomiegrad noch einmal deutlich. Dementsprechend muss für die Nutzung von Power-to-X-Technologien im Verkehr jeweils deutlich mehr Strom andernorts erzeugt werden, wenn nicht zusätzliche Freiflächenphotovoltaikanlagen vor Ort errichtet werden.

Tabelle 83: Auswirkungen von Power-to-X-Technologien im Verkehr auf die Autonomiepotenziale

Kennwert	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
JFL-Anteil von Elektroautos mit Batterie	100%	0%	0%	33%
JFL-Anteil von Autos mit Wasserstoff-Brennstoffzelle	0%	100%	0%	33%
JFL-Anteil von Verbrennern mit E-Fuels	0%	0%	100%	33%
Produktbezogener Energieautonomiegrad	**91%**	**83%**	**66%**	**79%**

Quelle: Eigene Berechnung

6.4.5.10 Flächenbedarf pro Einwohner 2017 und 2035

6.4.5.10.1 Flächenbedarf bei innerdeutschem Güteraustausch

Der Flächenbedarf, der sich aus einer Umstellung auf regenerative Energien und Rohstoffe für die betrachteten Landkreise ergibt, beträgt knapp 1,22 Hektar land- und forstwirtschaftliche Nutzfläche pro Einwohner, sofern die heutigen Verbrauchsgewohnheiten und die konventionelle Wirtschaftsweise beibehalten werden und der gesamte Bedarf (abgesehen von Reis, Tee und Kaffee) von Flächen in Süddeutschland gedeckt wird. Davon entfallen, wie in Abbildung 100 dargestellt, mit 0,90 Hektar rund 74 Prozent auf die Energiegewinnung. Für die Ernährung wird eine Fläche von mehr als 0,15 (0,14 – 0,18) Hektar pro Einwohner benötigt, auf die Rohstoffproduktion entfallen rund 0,17 (0,15 – 0,22) Hektar pro Einwohner.

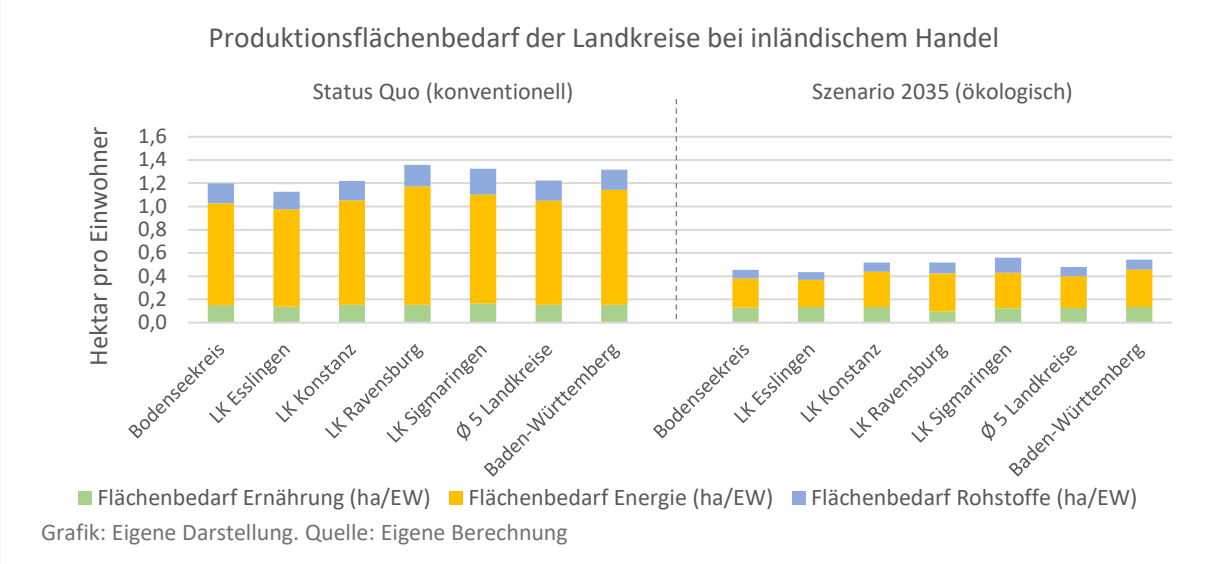


Abbildung 100: Produktionsflächenbedarf der Landkreise pro Einwohner bei inländischem Handel

Verfügbar sind in den fünf betrachteten Landkreisen aktuell maximal 0,29 Hektar forst- und landwirtschaftliche Fläche pro Einwohner. In Baden-Württemberg stehen weniger als 0,25 Hektar pro Einwohner zur Verfügung, in Deutschland insgesamt etwa 0,34 Hektar pro Person. Bis zum Jahr 2035 dürfte dieser Wert in den betrachteten Landkreisen aufgrund der erwarteten Bevölkerungsentwicklung auf ca. 0,26 Hektar pro Einwohner sinken, in Baden-Württemberg dürfte er auf einen Wert deutlich unter 0,24 fallen. Damit stehen langfristig höchstens 20 Prozent der Fläche zur Verfügung, die bei heutigem Konsum für eine vollständig regenerative Versorgung mit Nahrung, Energie und Rohstoffen benötigt würde. Mit den im „Szenario 2035“ berücksichtigten Maßnahmen, die u. a. eine Ernährungsumstellung und eine Halbierung des Energiebedarfs beinhalten, lässt sich der Flächenbedarf trotz einer Umstellung auf ökologische Landbewirtschaftung um 58 Prozent auf ca. 0,48 (0,43 – 0,54) Hektar pro Einwohner

senken. Mit 0,27 Hektar entfallen im „Szenario 2035“ aber noch immer 56 Prozent des Flächenbedarfs auf die Energiegewinnung. Etwa 0,13 Hektar (27 Prozent) werden für die Ernährung und 0,08 Hektar (17 Prozent) für die Rohstoffbereitstellung benötigt[37].

Verzichtet man auf die Umstellung auf eine ökologische Wirtschaftsweise, verbleibt bei konventionell integrierter Landbewirtschaftung ein Flächenbedarf von 0,38 (0,33 – 0,45) Hektar. Dies entspricht eines um rund 21 Prozent geringeren Flächenbedarfs im Vergleich zur ökologischen Wirtschaftsweise. Mit 0,21 Hektar entfallen auch in diesem Fall rund 56 Prozent des Flächenbedarfs auf die Energiegewinnung. Rund 0,09 Hektar (24 Prozent) werden für die Ernährung und knapp 0,8 Hektar (20 Prozent) für die Rohstoffbereitstellung benötigt. (Vgl. Abbildung 101)

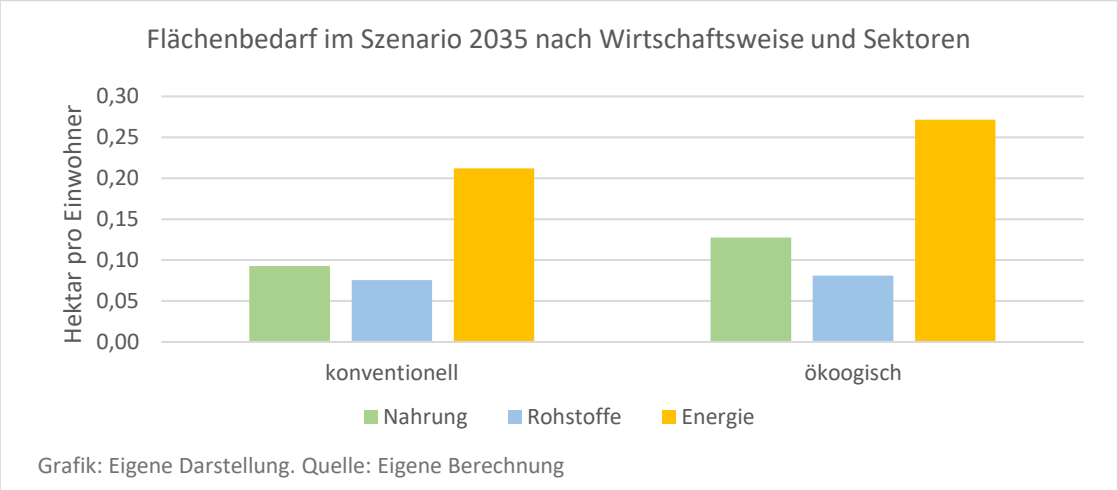


Abbildung 101: Flächenbedarf der fünf Landkreise im Szenario 2035 nach Wirtschaftsweise und Sektoren (Hektar pro Einwohner)

Ein Gesamtflächenbedarf für Nahrung, Energie und Rohstoffe von weniger als 0,3 Hektar ist nur zu erreichen, wenn über die Annahmen des Szenarios 2035 hinausgehend der Endenergiebedarf auf weniger als 9 MWh/Ea gesenkt werden kann, der Verkehr und die Landmaschinen nahezu vollständig elektrifiziert werden, insgesamt weitestgehend auf Öl und Gas als Energieträger verzichtet und zugleich der Konsum von Papier (Frischfasern) und Kunststoffen auf weniger als ein Fünftel des heutigen Verbrauchs gesenkt wird.

Für die hier genannten Flächenbedarfswerte gilt, dass sie bei gleichem Verbrauch für den größten Teil Süddeutschlands und mit Abstrichen auch für das gesamte Bundesgebiet übernommen werden können, sofern der Güteraustausch innerhalb Deutschlands erfolgt. Aufgrund

[37] Dass sich der Flächenbedarf der Rohstoffproduktion im Vergleich zum Status Quo nicht um zwei Drittel reduziert, obwohl der Konsum im Szenario 2035 auf ein Drittel gesenkt wurde, ist vor allem auf den Bausektor zurückzuführen, da die neu zu errichtende Wohnfläche pro Neubürger und die Sanierungsrate nicht in einem demensprechenden Umfang reduziert wurden. Andernfalls würde die Neubauwohnfläche lediglich 15 m² statt 45 m² pro Person betragen, was kaum realistisch sein dürfte. Angenommen wurde im „Szenario 2035“ eine Neubauwohnfläche von 40 m² pro Neubürger. Die Sanierungsrate sollte zudem auf über 2 Prozent pro Jahr erhöht und nicht gesenkt werden.

geringerer Obsterträge im Norden Deutschlands ist der Flächenbedarf der Ernährung im gesamtdeutschen Durchschnitt um ca. 4 m² (konventionell) bzw. 7 m² (ökologisch) höher. Im Ackerbau sowie in der grünlandbasierten Viehhaltung sind die geringen Ertragsunterschiede zwischen Baden-Württemberg und Gesamtdeutschland vernachlässigbar[38].

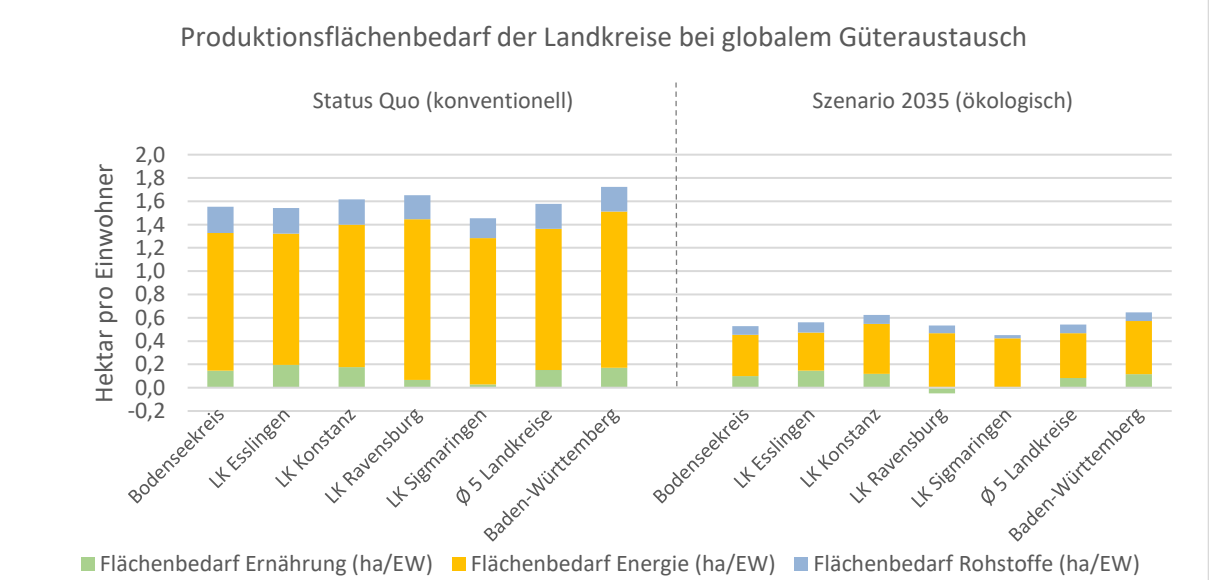
6.4.5.10.2 Flächenbedarf bei internationalem Güteraustausch

Die Schätzung der sektorenübergreifenden Flächeninanspruchnahme bei internationalem Güteraustausch ist nur eingeschränkt möglich, da auf globaler Ebene nur wenige Daten zu den Ertragspotenzialen des ökologischen Anbaus vorliegen. Welche Auswirkungen eine globale Umstellung auf eine vollständig ökologische Landbewirtschaftung haben würde, lässt sich daher nicht mit Sicherheit abschätzen. Verschiedene Studien deuten aber darauf hin, dass die Auswirkungen nicht in allen Ländern und Produktsegmenten so ertragsmindernd sein werden, wie es in Deutschland der Fall ist. Wahrscheinliche Einbußen in Industrieländern könnten zumindest zu erheblichen Teilen durch Ertragssteigerungen in ärmeren Ländern kompensiert werden, die bisher kaum Zugang zu teuren Produktionsmitteln haben und deshalb von den Methoden des ökologischen Landbaus profitieren können. Es wurde daher vereinfachend angenommen, dass die globalen Durchschnittserträge des Jahres 2035 sich noch nicht wesentlich von den heutigen Erträgen unterscheiden werden. Daraus ergibt sich bei globalem Güteraustausch ein merklich höherer Flächenbedarf als bei einem ausschließlich inländischen Handel: Wenn die Ernährungsgewohnheiten des Status Quo bis zum Jahr 2035 beibehalten werden und der Außenhandel im Nahrungssektor mit dem globalen Ausland erfolgt, beträgt der berechnete Flächenbedarf der fünf Landkreise für Ernährungsgüter bei konventioneller Wirtschaftsweise mindestens 0,17 Hektar und bei ökologischer Wirtschaftsweise ca. 0,28 Hektar LNF pro Einwohner. Zur Verfügung stehen im deutschen Inland rund 0,20 Hektar LNF pro Einwohner (Stand 2019), die im Vergleich zum globalen Durchschnitt das Ertragspotenzial von ca. 0,30 Hektar der globalen LNF aufweisen. Wenn die Verluste von Nahrungsmitteln auf 10 Prozent des Bedarfs reduziert werden und sich die Ernährungsweise „Eco-Mix“ durchsetzt, die einem Mittelwert zwischen den Empfehlungen nach AGES und einer vegetarischen Ernährung entspricht, beträgt die Flächeninanspruchnahme der fünf Landkreise für die Erzeugung von Ernährungsgütern bei konventioneller Produktion 0,05 Hektar/Einwohner und bei ökologischer Produktion 0,08 Hektar/Einwohner. In diesem Szenario wirken sich die Exportpotenziale positiv auf die Bilanz der fünf Landkreise aus, wie etwa die möglichen Überschüsse der grünlandbasierten Milchviehhaltung.

[38] Leichte Unterschiede bei einzelnen Feldfrüchten gleichen sich weitgehend aus. Die Durchschnittserträge der wichtigsten Feldfrüchte (Getreide, Mais, Kartoffeln, Zuckerrüben, Raps) sowie von Wiesen und Weiden betrugen in Baden-Württemberg zwischen 2008 und 2016 im Durchschnitt rund 100 (90 – 109) Prozent des gesamtdeutschen Durchschnitts. (Vgl. Regionaldatenbank des Statistischen Landesamtes Baden-Württemberg; Statistisches Bundesamt, GENESIS-Datenbank)

Werden auch Energieträger und nachwachsende Rohstoffe bzw. aus ihnen hergestellte biobasierte Produkte international ausgetauscht, wirken sich Überschüsse im Vergleich zu einem rein innerdeutschen Austausch ebenfalls stärker reduzierend auf den Flächenbedarf aus, während Defizite den Flächenbedarf deutlich anwachsen lassen. Dies ist auf die deutlichen Unterschiede zwischen den deutschen und den globalen Hektarerträgen zurückzuführen. Global werden, je nach Produktgruppe, nur zwischen 50 und 84 Prozent der deutschen Durchschnittserträge erzielt. Der Flächenbedarf des Energiesektors wächst überproportional, da hier die geringsten Autonomiegrade erreicht werden. Im Status Quo ergibt sich ein Flächenbedarf des Energiesektors von 1,21 Hektar pro Person, im „Szenario 2035“ werden pro Person noch 0,38 Hektar benötigt, um den Energiebedarf regenerativ zu decken. Der Flächenbedarf des Rohstoffsektors ist im Vergleich dazu gering: Bei heutigem Verbrauch müssten pro Person etwa 0,15 Hektar in Anspruch genommen werden. Im „Szenario 2035“ liegt der Bedarf noch bei 0,8 Hektar pro Person.

Der gesamte Flächenbedarf der fünf Landkreise im „Szenario 2035“ liegt bei internationalem Güteraustausch somit um ein Fünftel höher als bei einem rein innerdeutschen Güteraustausch. Lediglich der Landkreis Sigmaringen kann in diesem Szenario seinen Flächenbedarf dank seiner großen Überschüsse reduzieren. Im Mittel liegt der globale Landfußabdruck der fünf Landkreise im „Szenario 2035“ bei ca. 0,54 (0,44 – 0,62) Hektar pro Person. Damit liegen die fünf Landkreise unter dem errechneten Landesdurchschnitt von 0,65 Hektar pro Person. Die Bedarfe liegen damit auch im „Szenario 2035“ immer noch deutlich über den pro Person verfügbaren lokalen Produktionsflächen.



Grafik: Eigene Darstellung. Quelle: Eigene Berechnung

Abbildung 102: Flächenbedarf der fünf Landkreise im Status Quo und im Szenario 2035 bei globalem Güteraustausch (ha/Ea)

6.4.5.11 Optimierungspotenziale des Szenarios 2035

Trotz der weitreichenden Maßnahmen des „Szenarios 2035“ bleibt der Energiesektor sowohl produkt- als auch flächenbezogen deutlich unter der Schwelle von 100 Prozent Autonomie. Mit Blick auf die produktbezogene Nahrungsautonomie wird die Schwelle knapp verfehlt und im Rohstoffsektor wird sie nur in zwei von sieben Produktsegmenten überschritten. Daher wurden verschiedene Optionen zur Optimierung auf ihre Wirkung untersucht, um schließlich ein insgesamt optimiertes Szenario für das Jahr 2035 zu entwickeln. Als effektivste Mittel, die sowohl den Sektor Ernährung als auch den Sektor Energie betreffen, haben sich in den vorhergehenden Untersuchungen eine Umstellung der Ernährung, der Einsatz beheizter Dachgewächshäuser, die Errichtung von Agrophotovoltaikanlagen und die Elektrifizierung von Verkehr und Wärmebereitstellung herausgestellt. Im Sektor Rohstoffe bietet neben der effizienten Nutzung sämtlicher Koppel- oder Nebenprodukte vor allem eine gezielte wechselseitige Abstimmung von Rohstofferzeugung und Rohstoffverbrauch ein erhebliches Potenzial, Flächenbedarf und Flächenpotenziale miteinander in Einklang zu bringen.

6.4.5.11.1 Nahrung

Beheizte Dachgewächshäuser wirken sich, wie bereits dargestellt, mit einem Zugewinn von rund einem Prozentpunkt pro Quadratmeter genutzter Dachfläche auf den produktbezogenen Nahrungsautonomiegrad aus. Bei globalem Güteraustausch ist der Zugewinn der fünf Landkreise beim flächenbezogenen Autonomiegrad sogar noch etwas größer. Bei einer Anlagenfläche von 2,0 m²/Ea steigt er um rund drei Prozentpunkte. Dies geht jedoch mit einem Rückgang der Energieautonomie einher. Produktbezogen sinkt die Energieautonomie um vier Prozentpunkte, flächenbezogen beträgt der Verlust rund 1 Prozentpunkt. Angesichts des geringen Energieautonomiegrades fällt dieser Rückgang durchaus ins Gewicht.

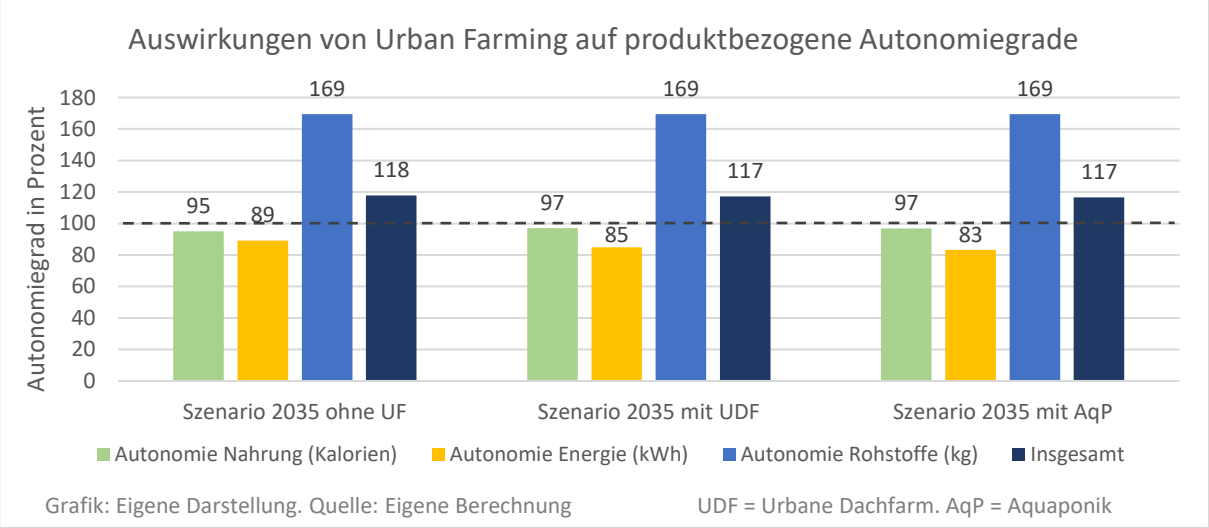


Abbildung 103: Auswirkungen von Urban Farming auf produktbezogene Autonomiegrade der fünf Landkreise im Szenario 2035

Betrachtet man die relativen Veränderungen, wird flächenbezogen ein Anstieg der Nahrungsautonomie um 2,1 Prozent durch eine Einbuße an Energieautonomie von 3,3 Prozent ermöglicht (Rückgang von 30 auf 29 Prozentpunkte). Aquaponik (mit einer Fläche von 2,0 m²/EW) wirkt sich sogar negativ auf die flächenbezogene Nahrungsautonomie aus.

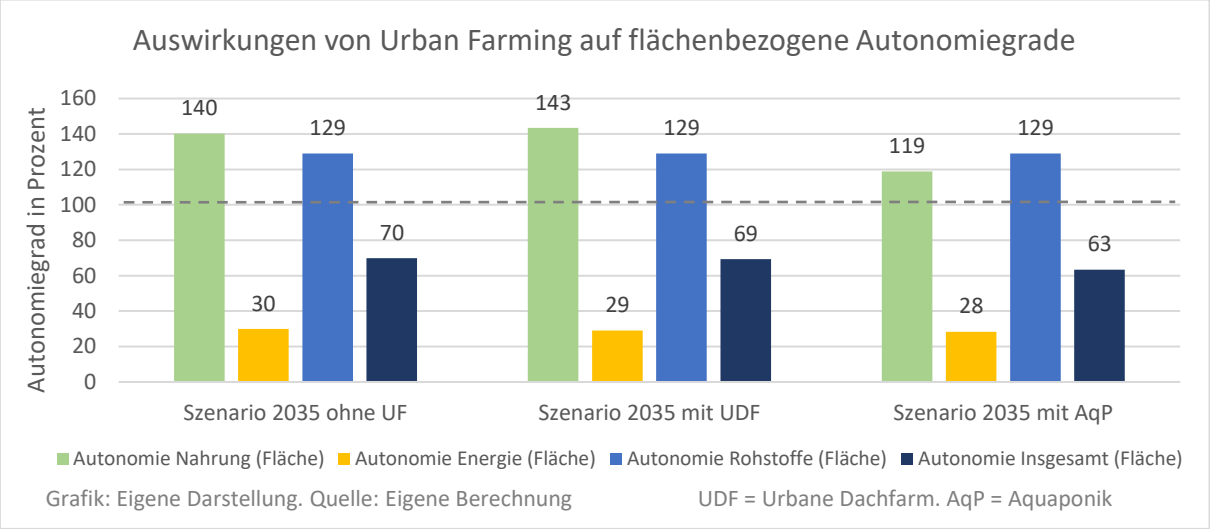


Abbildung 104: Auswirkungen von Urban Farming auf flächenbezogene Autonomiegrade der fünf Landkreise im Szenario 2035

6.4.5.11.2 Energie

Eine Möglichkeit, die Energieautonomie deutlich zu erhöhen, bieten, wie bereits dargestellt, vor allem Freiflächenphotovoltaikanlagen. Sofern hierfür keine Flächen genutzt werden können, die nicht für die landwirtschaftliche Produktion benötigt werden, bietet sich die Agrophotovoltaik an, die eine landwirtschaftliche Nutzung unterhalb der Solaranlagen zulässt. Allerdings geht auch die Agrophotovoltaik mit Einbußen einher, die sowohl den Nahrungssektor als auch den Rohstoffsektor betreffen: Durch die im „Szenario 2035“ angenommene Agro-PV-Nutzung auf 5 Prozent der landwirtschaftlichen Nutzflächen ergeben sich produktbezogen Verluste von 0,5 Prozentpunkten Nahrungsautonomie und 0,3 Prozentpunkten Rohstoffautonomie. Mit 89 Prozent wird jedoch ein hoher Grad an Energieautonomie erreicht. Verzichtet man auf Anlagen über Ackerland, ist der Verlust in den Sektoren Nahrung und Rohstoffe deutlich geringer. Dem steht jedoch, wenn nur auf 5 Prozent des Grünlandes Agrophotovoltaik genutzt wird, ein Energieautonomiegrad von nur noch 71 Prozent gegenüber. Strebt man mindestens 100 Prozent produktbezogene Energieautonomie (ohne Berücksichtigung von Speicherverlusten) an, muss die Agrophotovoltaikfläche der fünf Landkreise im „Szenario 2035“ von 5 Prozent auf rund 7 Prozent ihrer landwirtschaftlichen Nutzflächen ausgedehnt werden. Dies reduziert die produktbezogene Nahrungsautonomie von 96 auf 95 Prozent. Insgesamt kostet das Erreichen einer hundertprozentigen Energieautonomie also etwas mehr als 1 Prozentpunkt kalorienbezogene Nahrungsautonomie. Der sektorenübergreifende durchschnittliche produktbezogene Autonomiegrad steigt daher um knapp 16 Prozentpunkte.

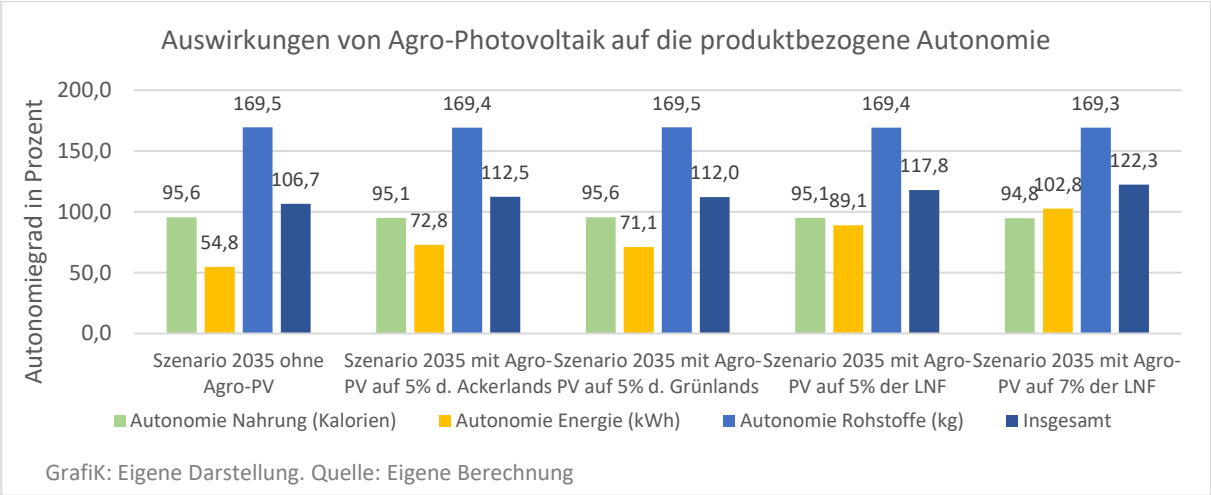


Abbildung 105: Auswirkungen von Agrophotovoltaik auf produktbezogene Autonomiegrade der fünf Landkreise im Szenario 2035

Deutlich anders sind die Effekte der Agrophotovoltaik auf die flächenbezogenen Autonomiegrade: So steigert ein Flächenanteil der Agrophotovoltaik von 7 Prozent die flächenbezogene Energieautonomie um nur einen Prozentpunkt, während die flächenbezogene Nahrungsautonomie um 1,1 Prozentpunkt sinkt. Die Gesamtautonomie nimmt daher mit nur 1 Prozentpunkt bei weitem nicht so deutlich zu, wie die produktbezogene Autonomie (vgl. Abbildung 106).

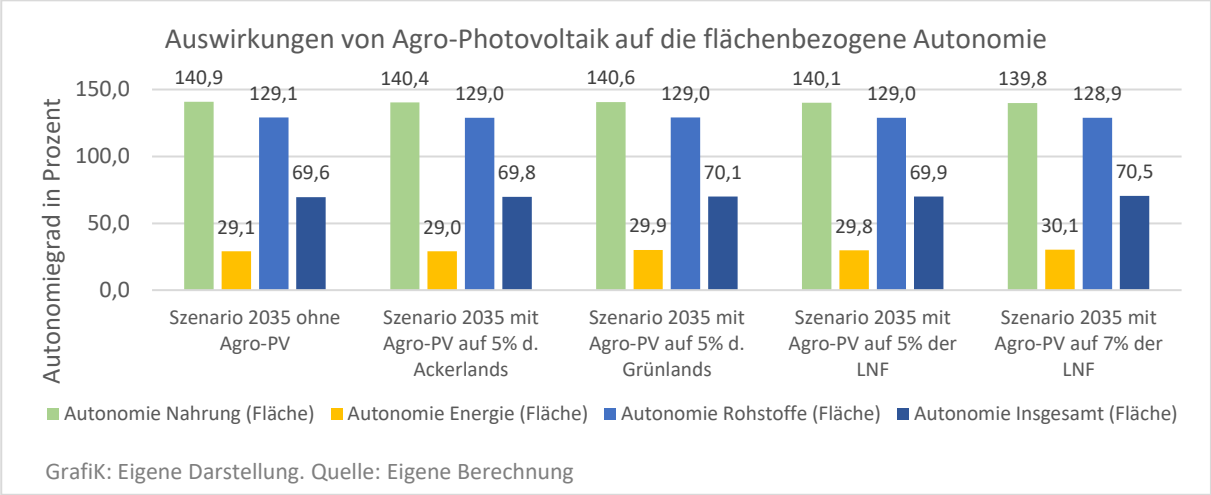


Abbildung 106: Auswirkungen von Agrophotovoltaik auf flächenbezogene Autonomiegrade der fünf Landkreise im Szenario 2035

Da Verluste im Nahrungssektor zudem schwerer wiegen, wird ersichtlich, dass Agrophotovoltaik keine ganz unproblematischen Effekte auf die Versorgung hat, wenn sie nicht mit einer Elektrifizierung von Verkehr und Gebäudebeheizung verbunden wird. Ohne eine solche Elektrifizierung kann sie keine landwirtschaftlichen Flächen, die ansonsten für die Bioenergieproduktion verwendet werden müssen, für den Nahrungssektor freisetzen. In diesem Fall wirkt sich Agrophotovoltaik über Ackerland bei heutigen klimatischen Verhältnissen in Deutschland eher negativ auf die globale Nahrungsversorgung aus.

Zudem zeigt sich, dass die großflächige Nutzung der Agrophotovoltaik zu einem großen Stromüberschuss führt, während bei drei der übrigen fünf Energieträger weiterhin größere Defizite bestehen. Die verbleibenden Importbedarfe betragen rund 1,9 MWh/Ea bei Gas, 1,0 MWh/Ea bei Diesel und 0,8 MWh/Ea bei Heizöl. Zudem müssen auch pro Einwohner noch rund 0,2 MWh Benzin oder Bioethanol importiert werden

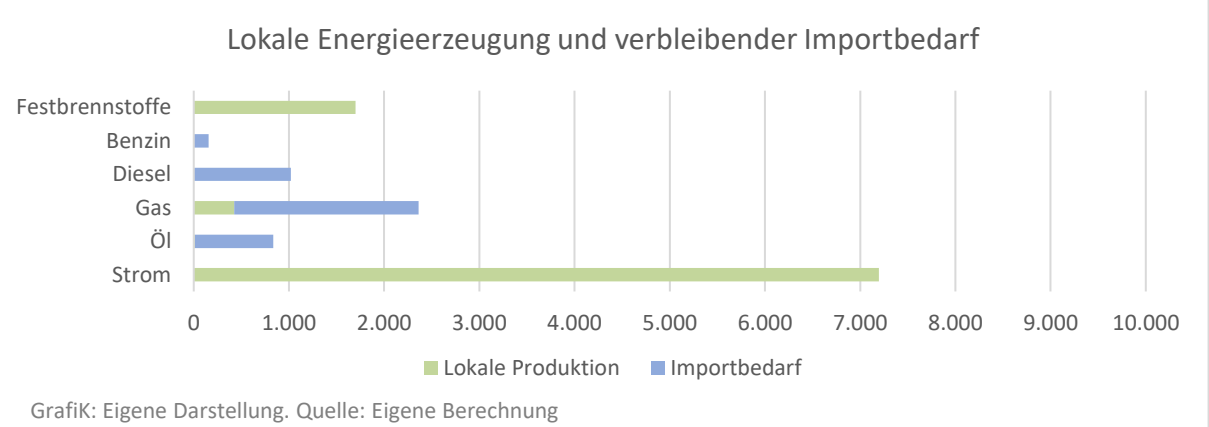


Abbildung 107: Lokale Energieerzeugung und verbleibender Importbedarf der fünf Landkreise im Szenario 2035

Dementsprechend gering sind die erreichten Autonomiegrade bei Öl, Gas, Diesel und Benzin – sowohl produkt- als auch flächenbezogen. Überschüsse werden im „Szenario 2035“ abgesehen vom Stromsektor (+31 Prozent) lediglich bei Festbrennstoffen (+74 Prozent) erzielt. (vgl. Abbildung 108)

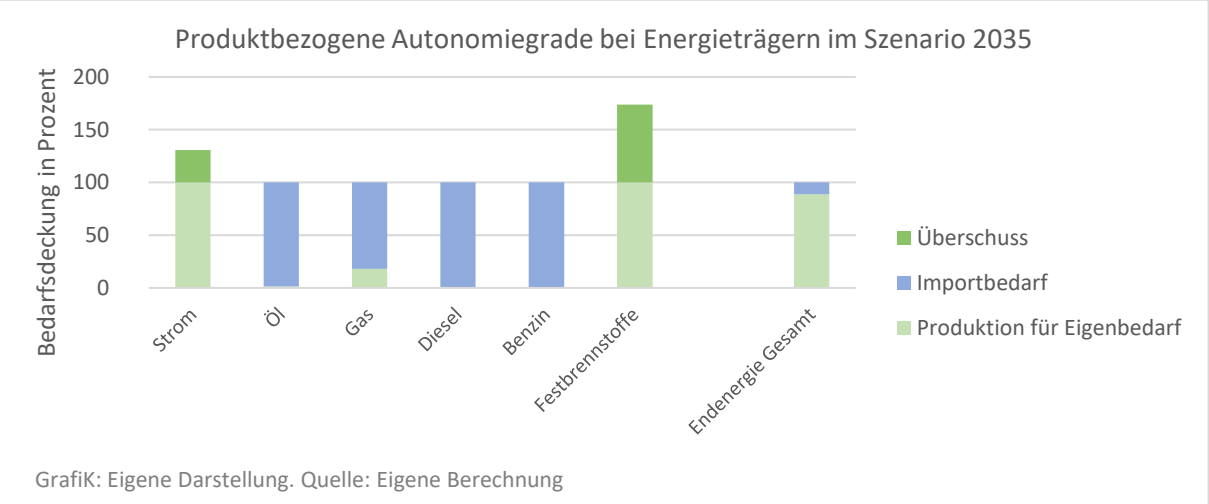


Abbildung 108: Autonomiegrade der fünf Landkreise bei Energieträgern im Szenario 2035

Durch eine Ausweitung der Agrophotovoltaik auf 7 Prozent der LNF kann der Stromüberschuss auf 64 Prozent des Eigenbedarfs erhöht werden.

Im „Szenario 2035“ mit optimierter Produktion beträgt der Endenergieverbrauch noch ca. 11,5 MWh pro Einwohner und Jahr. Um im Energiesektor bei den einzelnen Produktsegmenten einer hundertprozentigen Autonomie möglichst nah zu kommen oder sie gar zu übertreffen,

müssen hier auch auf Seite des Verbrauchs weitere Maßnahmen ergriffen werden, die vor allem den Verbrauch von Flüssigbrennstoffen minimieren und den Gasbedarf weiter deutlich reduzieren. So könnten etwa der Antrieb von leichten Nutzfahrzeugen, Bussen und Landmaschinen vollständig und der Antrieb schwerer Nutzfahrzeuge bis zu 50 Prozent elektrifiziert werden. Zudem müsste auch die Wärmebereitstellung im Sektor GHD und im Sektor Industrie weitgehend elektrifiziert werden, etwa durch die Nutzung von Wärmepumpen im GHD-Sektor. Im auf diese Weise optimierten Szenario 2035 liegt der Endenergieverbrauch noch bei ca. 10,3 MWh/Ea, was etwa 42 Prozent des heutigen Verbrauchs (Stand 2017) entspricht. Dabei wurde der Ölverbrauch beinahe auf null minimiert (nur ein Prozent der Wohngebäude wird noch mit Öl beheizt) und auch der Gasverbrauch wurde auf 500 kWh/Ea reduziert. Der Dieselverbrauch beträgt noch knapp 300 kWh/Ea. Von diesem abgesehen kann der verbleibende Energiebedarf nahezu vollständig mit lokal erzeugten Energieträgern gedeckt werden.

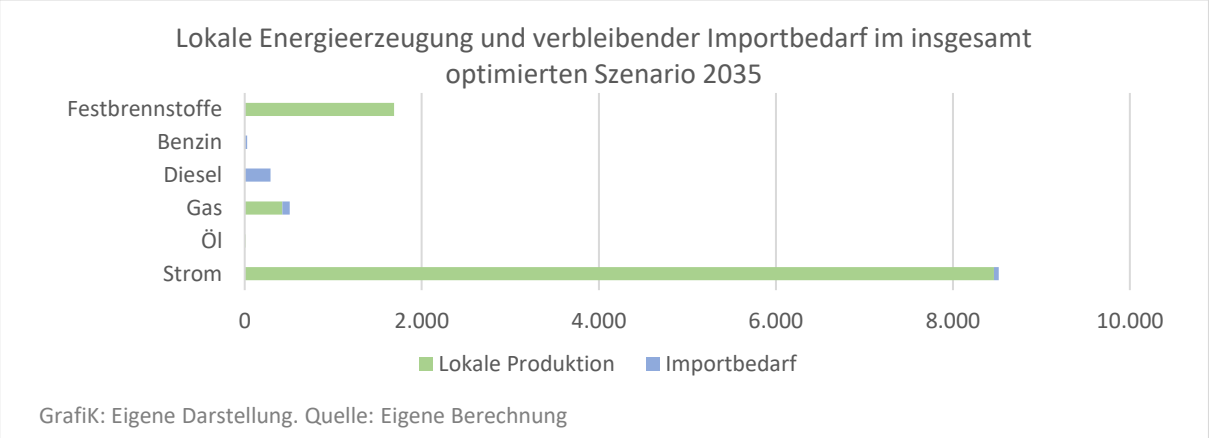


Abbildung 109: Lokale Energieerzeugung und verbleibender Importbedarf im insgesamt optimierten Szenario 2035

So kann bei vier der fünf weiterhin genutzten Energieträger der Eigenbedarf nahezu vollständig gedeckt und insgesamt eine hundertprozentige Energieautonomie erreicht werden.

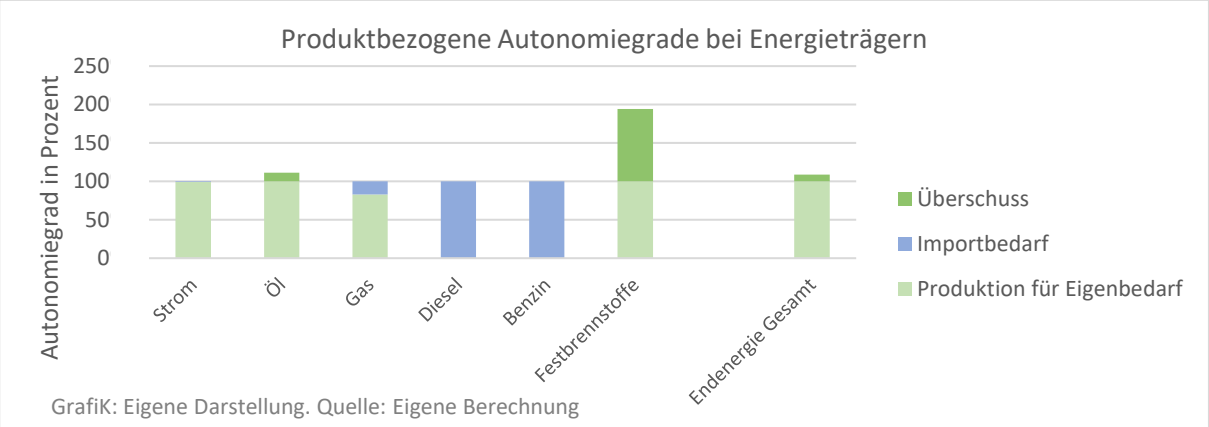


Abbildung 110: Produktbezogene Autonomiegrade bei Energieträgern im insgesamt optimierten Szenario 2035

6.4.5.11.3 Rohstoffe

Deutlich einfacher als im Energiesektor ist eine Anpassung der Produktion an den im „Szenario 2035“ verbleibenden Rohstoffbedarf möglich: Um die Rohstoffautonomie in sechs der sieben betrachteten Produktsegmente auf über 100 Prozent zu erhöhen, muss der Rohstoffpflanzenanbau von 3 auf rund 9 Prozent der Ackerfläche ausgeweitet werden. Zudem müssen Teile des Rohholzes, welches bisher für die Produktion von Baustoffen und Möbeln vorgesehen war, für die Produktion von Textilfasern (Viskose) und Papier verwendet werden. Hierdurch sinkt der Möbelautonomiegrad von 341 auf 144 Prozent. Bei den Baustoffen werden die Verluste der forstwirtschaftlichen Rohstoffe durch zusätzliche ackerbaulich erzeugte Rohstoffe mehr als kompensiert. Folglich können die Überschüsse im Baustoffsegment auch anderen Verwendungen zugeführt oder als Energieträger genutzt werden, sofern sie nicht für gewerbliche Neubauten benötigt werden. Durch die Ausweitung der Rohstoffpflanzenfläche sinkt jedoch die Nahrungsautonomie produktbezogen von 95 auf 91 Prozent und flächenbezogen von 140 auf 139 Prozent, sofern der Güteraustausch global erfolgt.

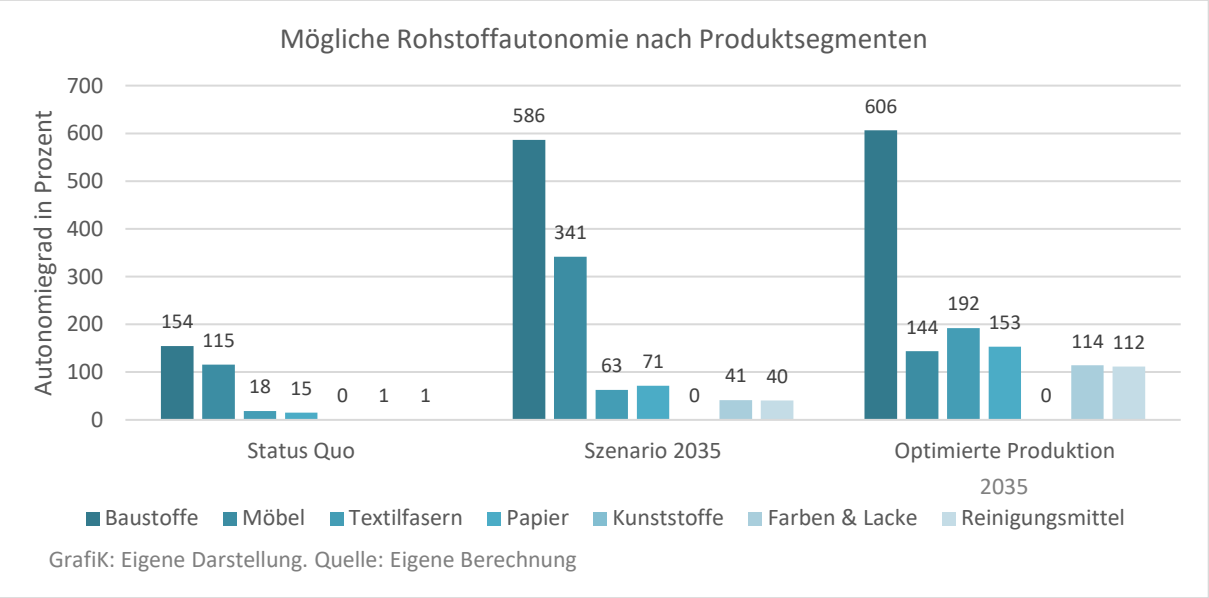


Abbildung 111: Produktbezogene Autonomiegrade bei Energieträgern im Szenario 2035 bei optimierter Produktion

6.4.5.11.4 Sektorenübergreifendes Optimierungspotenzial

Könnten die dargestellten Optimierungsmaßnahmen und die angenommene Veränderung der Energienutzung mit einer weiteren Einsparung von 1,2 MWh/Ea realisiert werden, hätte dies erhebliche Auswirkungen auf die flächenbezogene Autonomie der fünf Landkreise: Sie würde im Energiesektor von 29 auf 107 Prozent steigen, wodurch auch insgesamt ein Anstieg der Autonomie von 70 auf 122 Prozent erreicht werden könnte. Somit werden im optimierten Szenario 2035 in allen drei Sektoren flächenbezogene Autonomiegrade von deutlich über 100

Prozent erreicht. Einzig beim produktbezogenen Nahrungsautonomiegrad wird, wie in Abbildung 112 dargestellt, die Marke von 100 Prozent nicht übertroffen. Dies lässt darauf schließen, dass in Deutschland insgesamt aufgrund der geringeren Besiedlungsdichte noch höhere Autonomiegrade möglich sind. Voraussetzung dafür sind jedoch, wie dargestellt, weitreichende Anpassungen des Verbrauchs an die Erzeugungspotenziale, die vor allem eine weitgehende Elektrifizierung des Energiesektors einschließen.

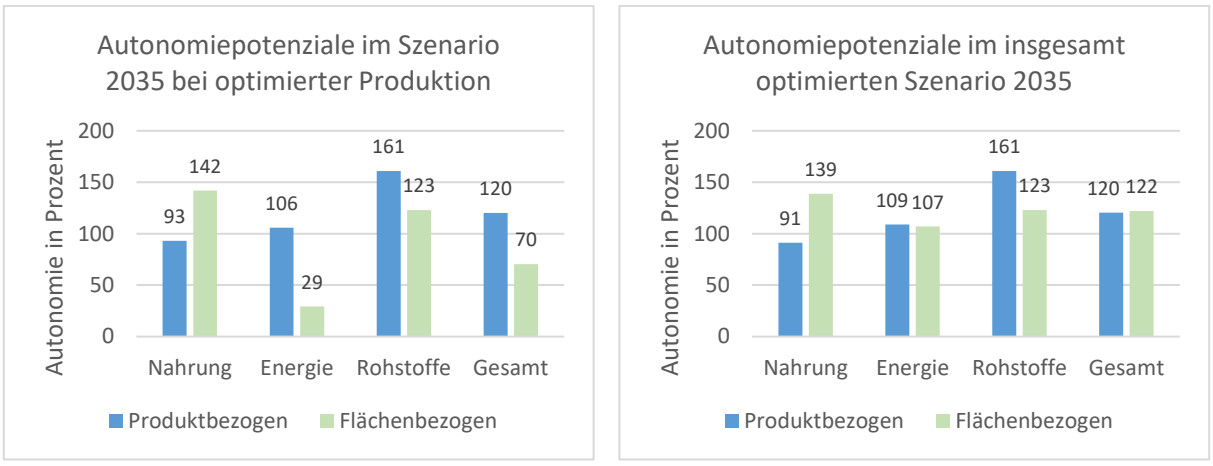


Abbildung 112: Produkt- und flächenbezogene Autonomiegrade im optimierten Szenario 2035 in den Sektoren Nahrung, Energie und Rohstoffe sowie insgesamt.

7 Diskussion der Ergebnisse

7.1 Mögliche Autonomiegrade

Hohe Gesamtautonomiegrade, die bei einer regenerativen Versorgung meistens gleichbedeutend mit einem geringen Flächenbedarf sind, lassen sich, ausgehend vom Status Quo auf dem Stand des Jahres 2017 nur durch die Kombination zahlreicher Maßnahmen erreichen. Bei innerdeutschem Güteraustausch können die fünf Landkreise gemeinsam ihre Autonomie flächenbezogen von 26 Prozent im Status Quo auf mehr als 65 Prozent im „Szenario 2035“ erhöhen. Bei internationalem Güteraustausch steigt das Autonomiepotenzial von 21 auf 70 Prozent. Der Flächenbedarf, der sich aus einer weitestgehend regenerativen Versorgung ergibt, beträgt im „Szenario 2035“ noch rund 0,54 Hektar pro Person und Jahr. Dies sind rund 34 Prozent des Wertes, der sich bei einer weitestgehend regenerativen Versorgung ergäbe, wenn die heutigen Konsumgewohnheiten (Status Quo) und Verbräuche weiterhin beibehalten würden. Trotz der sehr weitreichenden Maßnahmen des Szenarios 2035 bleiben die fünf Landkreise damit aber noch in hohem Maße von Flächen außerhalb ihres eigenen Gebietes abhängig. Dabei ist das Defizit fast vollständig auf den Energiesektor zurückzuführen, der zu rund zwei Dritteln auf externe Flächen angewiesen bleibt, während im Sektor Nahrung zwischen rund 103 und 140 Prozent Autonomie erreicht werden können[39] und im Rohstoffsektor je nach Handlespartner ein flächenbezogener Überschuss von 21 - 29 Prozent möglich ist. Der Überschuss im Rohstoffsektor bezieht sich allerdings hauptsächlich auf forstwirtschaftlich erzeugte Rohstoffe und nicht auf solche, die nur ackerbaulich erzeugt werden können. Defizite im Energiesektor fallen auch insofern besonders ins Gewicht, da hier pro Person vermeidbare Transportgewichte erheblicher Größenordnung anfallen und längere Transportwege die Energie- und Klimabilanzen der meisten biogenen Energieträger erheblich verschlechtern.

Die fünf Landkreise, die gemeinsam dem Durchschnitt Baden-Württembergs nahekommen, unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Gesamtautonomiepotenziale aufgrund ihrer strukturellen Unterschiede erwartungsgemäß sehr deutlich voneinander. Zudem sind auch die Autonomiegrade, die von den einzelnen Landkreisen in den verschiedenen Sektoren jeweils erreicht werden können, sehr unterschiedlich. Daraus folgen diverse Herausforderungen, denn sofern im „Szenario 2035“ Überschüsse möglich sind, eignen sich diese Exportpotenziale oftmals nicht dazu, die Defizite der übrigen Landkreise zu decken. Dies liegt vor allem darin begründet, dass Überschüsse überwiegend in Produktsegmenten anfallen, in denen sich auch die übrigen

[39] Erfolgt der Austausch von Ernährungsgütern mit dem globalen Ausland, wird im Nahrungssektor ein Autonomiegrad von 140 Prozent erreicht. Bei nationalem Güteraustausch werden rund 103 Prozent erreicht.

Landkreise überdurchschnittlich gut selbst versorgen können. Ein Beispiel dafür sind grünlandbasierte Milchprodukte, bei denen im „Szenario 2035“ alle fünf Landkreise hohe Autonomiegrade erreichen.

Die Ergebnisse machen ersichtlich, welch große Bedeutung der Kooperation und der wechselseitigen Abstimmung mehrerer Landkreise zukommt. Dabei stellt sich vor allem die Frage, welche Prioritäten bei der Nutzung von Grünland zu setzen sind, da im Segment der tierischen Nahrungsmittel (v. a. Fleisch und Milchprodukte) deutlich mehr Potenzial besteht, als im „Szenario 2035“ für die Bedarfsdeckung erforderlich ist, die Überschüsse aber, wie in Abschnitt 6.4.5.7 dargestellt, benötigt werden, um im Nahrungssektor insgesamt einen hohen flächenbezogenen Autonomiegrad und damit einen geringeren globalen Landfußabdruck erreichen zu können. Die Flächen, die rechnerisch nicht zur Deckung des eigenen Bedarfs an tierischen Nahrungsmitteln benötigt werden, können daher nicht ohne Weiteres der Energie- oder Rohstoffproduktion zur Verfügung gestellt werden, wenn negative Effekte auf den globalen Landfußabdruck vermeiden werden sollen. Es muss daher im Einzelfall geprüft werden, ob jene Flächen, die im Nahrungssektor nicht für die Deckung des Eigenbedarfs benötigt werden, den anderen Sektoren zur Verfügung gestellt werden können. Diese Problematik dürfte Baden-Württemberg insgesamt in ähnlicher Weise betreffen.

Eine mögliche Schlussfolgerung könnte daher sein, den Anteil tierischer Nahrungsmittel an der Ernährung doch höher anzusetzen, als dies mit der gewählten Ernährungsweise „Eco-Mix“ geschehen ist. Dies würde paradoxerweise den Flächenbedarf für Ernährung innerhalb des Landkreises vergrößern und trotzdem den Autonomiegrad im Nahrungssektor erhöhen, verbunden mit positiven Effekten für den globalen Landfußabdruck.

Eine weitere Herausforderung ergibt sich aus dem Umstand, dass Produkte aus Holz (z. B. Dämmstoffe, Papier oder Textilfasern) zum Teil, eine geringere Flächeneffizienz aufweisen als vergleichbare Produkte aus ackerbaulich kultivierten Rohstoffpflanzen, aber in einer deutlich geringeren Flächenkonkurrenz stehen. Bei Baustoffen (Bauholz, Spanplatten und Dämmstoffen) und Möbeln sind im „Szenario 2035“ daher Autonomiegrade möglich, die einem Mehrfachen des Bedarfs im Wohnbau entsprechen. Trotzdem lassen sich die Flächenpotenziale nicht ohne Weiteres an die Bedarfe anpassen. Ein wichtiger Grund hierfür ist die begrenzte Möglichkeit, landwirtschaftliche Produkte durch forstwirtschaftliche Produkte zu ersetzen. Ein anderer besteht in der Tatsache, dass eine Umwandlung von Forst- in Ackerflächen aus diversen Gründen (z. B. standortbedingt) häufig nicht realistisch ist und zudem klimapolitisch kontraproduktiv wäre. Ackerflächen können dagegen Rohstoffe für nahezu jedes Produktsegment liefern, werden aber vorrangig zur Produktion von Nahrung und flüssigen Rohstoffen (Öle und Alkohole) für die stoffliche Nutzung benötigt.

Die Nutzung von Koppelprodukten ist daher von großer Bedeutung, sowohl für die Steigerung der Flächeneffizienz als auch für eine erfolgreiche Umstellung auf regenerative Energien und Rohstoffe. Die Strohaufkommen von Getreide und Raps sind hierfür Paradebeispiele, da ihre Potenziale heute noch zu großen Teilen ungenutzt bleiben. Oftmals handelt es sich bei möglichen Koppelprodukten jedoch um Produkte, für die bisher kaum geeignete Abnahmestrukturen existieren. Solche Strukturen müssten daher neu geschaffen werden.

Den größten Effekt auf die Autonomiegrade dürfte eine gute wechselseitige Abstimmung von Bedarfen und Flächenpotenzialen haben, wobei sich die Bedarfsseite häufig deutlich einfacher an die Flächenpotenziale anpassen lässt, als dies im umgekehrten Fall möglich ist.

7.2 Möglichkeit der ökologischen Selbstversorgung

Eine vollständige Umstellung auf ökologische Landwirtschaft ist möglich, führt jedoch zu einer deutlichen Minderung der Autonomiepotenziale. Im Vergleich zur konventionell integrierten Wirtschaftsweise kann man im Pflanzenbau bei einer ausgewogenen Ernährungsweise im Mittel des gesamten Warenkorbes von einem Minderertrag von ca. 30 Prozent ausgehen. Bei den einzelnen Nutzpflanzen liegen die Einbußen zwischen Null und 50 Prozent. Nüsse weisen die geringsten Einbußen auf. Von den höchsten Ertragseinbußen im Pflanzenbau sind Getreide, Kartoffeln und Raps betroffen. Da Mais ebenfalls erhebliche Ertragseinbußen erfährt, sinken durch die Umstellung auf ökologische Produktion nicht nur die Erträge der wichtigsten Nahrungspflanzen, sondern auch die Erträge der bisher wichtigsten Energiepflanzen (Weizen, Mais und Raps). Bei tierischen Produkten sind die Einbußen infolge einer Umstellung der Wirtschaftsweise sehr unterschiedlich. Bei grünlandbasierten Milch- und Fleischprodukten nehmen die Hektarerträge kaum ab. Ackerlandbasierte Fleisch- und Wurstwaren weisen dagegen hinsichtlich der Hektarerträge unter allen Nahrungsmitteln die größten Einbußen auf.

Durch eine Umstellung auf eine nachhaltige Ernährungsweise, die sich vor allem durch geringe Verschwendung und einen deutlich reduzierten Verbrauch tierischer Produkte auszeichnet, können die Ertragseinbußen der Nahrungsproduktion, die aus einer Umstellung auf Ökolandbau folgen, jedoch mehr als kompensiert werden. Infolge des reduzierten Verbrauchs tierischer Produkte und der reduzierten Verluste liegt der Flächenbedarf bei ökologischer Wirtschaftsweise im „Szenario 2035“ zwischen 0,08 und 0,15 Hektar pro Person und damit um 12 bis 44 Prozent unter dem Flächenbedarf, der sich bei konventioneller Erzeugung aus den heutigen Verbrauchsgewohnheiten ergibt. Durch die Umstellung auf eine stärker pflanzenbasierte Ernährung sinkt die Differenz zur konventionellen Wirtschaftsweise aber auch im direkten Vergleich, also bei gleicher Ernährungsweise: Bei der heutigen Ernährungsweise liegt der Flä-

chenbedarf der konventionellen Landwirtschaft um 32 Prozent unter dem Bedarf der ökologischen Landwirtschaft. Bei der Ernährungsweise „Eco-Mix“ beträgt die Differenz nur noch knapp 26 Prozent.

In der ökologischen Landwirtschaft ist der Ressourcenverbrauch pro Hektar geringer. Die konventionelle Wirtschaftsweise kann dagegen Vorteile beim Ressourcenverbrauch pro Kilogramm Endprodukt aufweisen. Diese kommen jedoch nur als Vorteile zum Tragen, wenn nicht über den eigentlichen Bedarf hinaus produziert wird, sondern tatsächlich die in Anspruch genommene Produktionsfläche reduziert wird. Heute sind jedoch in allen Sektoren hohe Ausmaße an Ineffizienz und Verschwendung festzustellen, die alle Effizienzvorteile der konventionellen Produktionsweise zunichtemachen. Angesichts der heutigen Potenziale der Landwirtschaft ist eine Umstellung auf ökologische Landwirtschaft ohne weiteres möglich, sofern auch eine Umstellung der Ernährung und eine Reduktion der Verschwendung erfolgt.

Im Bereich der Energiegewinnung bieten Energiepflanzen der zweiten Generation zudem eine Alternative, die auch bei einem ökologischen Anbau hohe Energieerträge pro Hektar ermöglicht, welche sich beinahe auf dem Niveau bewegen, das mit Energiepflanzen der ersten Generation im konventionellen Anbau erreicht werden kann. In der Praxis geht der Vorteil von Energiepflanzen der ersten Generation ohnehin häufig dadurch verloren, dass Pflanzenreste (z. B. Raps- und Körnermaisstroh) bisher weitgehend ungenutzt bleiben. Zudem bieten Energiepflanzen der zweiten Generation mit Blick auf den Schutz von Artenvielfalt, Klima, Böden und Gewässern erhebliche Vorteile. Auch ihr energetischer Erntefaktor ist in der Regel höher als der von Energiepflanzen erster Generation. Aus ökologischer Sicht wird ihre Nutzung daher grundsätzlich als vorteilhaft angesehen. Bei einer vollständigen Umstellung auf ökologische Landwirtschaft ist die Nutzung von Energiepflanzen daher nur bei einem Umstieg auf Energiepflanzen der zweiten Generation sinnvoll. Eine Reduktion der Nahrungsmittelverschwendung, die eine Nutzung von Energiepflanzen der zweiten Generation erlaubt, ist einem Verzicht auf Energiepflanzen zugunsten einer unverminderten Verschwendung ohne Zweifel vorzuziehen.

7.3 Flächeneffizienz als Entscheidungskriterium

Die Flächeneffizienz ist nur eines von mehreren Entscheidungskriterien bei der Wahl geeigneter Energie- und Rohstoffquellen. Angesichts ihrer Bedeutung für eine nachhaltige Wirtschaft ist sie jedoch ein besonders wichtiger Kennwert, der bisher offensichtlich kaum berücksichtigt wurde. So lagen bisher nur in Ausnahmefällen vollständige Datensätze zu Hektarerträgen, Biomasseanteilen und Konversionsfaktoren vor, die auch eine Berücksichtigung der möglichen Koppelprodukte erlaubten. Grundsätzlich ermöglichen die vollständigen Kennwerte aber sowohl den Vergleich des Flächenbedarfs einzelner Produkte als auch den Vergleich komplexer Szenarien mit ganz unterschiedlichen Warenkörben.

Die wichtigsten Kennwerte zur Beurteilung der Flächeneffizienz in den drei Sektoren werden jeweils als Flächeninanspruchnahme durch die jeweilige Produkteinheit erfasst. Im Sektor Nahrung ist dies beispielsweise die benötigte Fläche zur Bereitstellung von 1.000 kcal, im Sektor Energie die Fläche zur Produktion von einer Kilo- oder Megawattstunde. Im Sektor Rohstoffe bietet sich meist das Verhältnis von Flächenaufwand und Produktgewicht an. Über diese Kennwerte, die für die Flächeneffizienz in den jeweiligen Sektoren maßgeblich sind, lassen sich mittels entsprechender Flächengutschriften auch Koppelprodukte, die ansonsten kaum miteinander vergleichbar sind, in die Berechnung der Flächeneffizienz einbeziehen. Einige Koppelprodukte, wie etwa stofflich genutzte Stärke aus Kartoffelschalen, weisen in der Folge eine außerordentlich hohe Flächeneffizienz auf, die sich auf diese Weise auch rechnerisch belegen lässt.

Welche Nutzung der Produktionsreste/Nebenprodukte am besten geeignet ist, sollte dennoch nicht allein anhand der Flächeneffizienz entschieden werden. Zu berücksichtigen sind auch andere Faktoren, wie die speziellen Eigenschaften der Produkte, vorhandene Verarbeitungsbetriebe, nötige Transportwege und die Wirtschaftlichkeit der Nutzung. Je dezentraler die Verarbeitung möglich ist (kurze Transportwege zwischen Produzenten, Verarbeitungsbetrieben und Nutzern), desto mehr Gewicht kann der Flächeneffizienz als Entscheidungskriterium gegeben werden. Ideal wäre daher eine Situation, die die Verarbeitung vom Rohstoff zum Endprodukt jeweils in derselben Region ermöglicht.

Des Weiteren ist auch die Konkurrenzsituation bereits auf lokaler Ebene zu berücksichtigen. So kann ein Produkt trotz einer eher geringen Flächeneffizienz einem Vergleichsprodukt mit einer außergewöhnlich hohen Flächeneffizienz vorzuziehen sein, wenn das Produkt, das die geringere Flächeninanspruchnahme aufweist, in einer wesentlich größeren Konkurrenz um Produktionsflächen steht. Dies gilt etwa für Fasern und Zellstoffe aus Hanf und Miscanthus, die zwar sehr hohe Netto-Erträge pro Hektar liefern, aber für ihren Anbau Ackerflächen benötigen, während Zellstoff und Viskose aus Holz zumindest in einigen der betrachteten Landkreise einer deutlich geringeren Flächenkonkurrenz ausgesetzt sind. Produktionstechnisch ist die Gewinnung von Textilfasern aus Hanf oder Flachs wiederum lokal einfacher möglich als die von Viskose aus Holz.

Dass die Flächeneffizienz nicht immer als alleiniges Entscheidungskriterium genutzt werden sollte, zeigen auch die Effekte, die Agrophotovoltaikanlagen auf die Autonomiegrade haben. Die Ertragseinbußen des Ackerbaus von 15 bis 20 Prozent unterhalb der Agrophotovoltaikanlage scheinen zwar im Vergleich zu den zusätzlichen Stromerträgen gering. Um die Ertragseinbußen des Ackerbaus durch einen Hektar Agrophotovoltaik zu kompensieren, müssen jedoch global ca. 0,22 – 0,29 Hektar Ackerfläche zusätzlich für die Nahrungsproduktion in An-

spruch genommen werden. Ihre hohe Flächeneffizienz sollte daher nicht darüber hinwegtäuschen, dass Agrophotovoltaik in Deutschland nur eine Ergänzung zur Dachflächenphotovoltaik und kein Ersatz sein kann.

7.4 Maßnahmen zur Effizienzsteigerung

Neben der effizienten Nutzung von Koppelprodukten erwiesen sich nur wenige Maßnahmen als geeignet, die Flächeneffizienz wesentlich zu erhöhen. Als wirksame Maßnahmen sind vor allem Flächennutzungssysteme zu nennen, die Flächen auf mehreren Ebenen nutzen, wie etwa die Agrophotovoltaik, Agrothermie oder Gewächshäuser auf Gebäudedächern mit darunter gelegener Wohn- oder Gewerbenutzung. Agrophotovoltaik reduziert jedoch unter den bisherigen klimatischen Verhältnissen die Nahrungsmittelerträge. Dies gilt sowohl für Anlagen über Ackerland als auch für Anlagen über Grünland. Die Frage, ob Anlagen vorzugsweise auf Acker- oder Grünland erreichtet werden sollten, lässt sich daher nicht pauschal beantworten. Entscheidend ist vielmehr der potenzielle Kalorienertrag der Nahrungsproduktion: Je höher der potenzielle Kalorienertrag einer Fläche ist, desto mehr fällt ein Ernterückgang um 5 bis 20 Prozent unterhalb der PV-Anlage ins Gewicht. Die grünlandbasierte Milchviehhaltung zählt, im Gegensatz zu anderen Grünlandnutzungen, zu den ertragreichen Flächennutzungen und eignet sich daher weniger für eine Kombination mit Agrophotovoltaik. Extensivere Grünlandnutzungen eignen sich dagegen unter den heutigen klimatischen Bedingungen besser für eine Kombination mit Agrophotovoltaik als die meisten ackerbaulich kultivierten Kulturen. Agrophotovoltaik bietet vor allem bei hohen Temperaturen und Trockenheit beachtliche Vorteile. Der Gewinn für die Autonomiepotenziale durch Agrophotovoltaik auf Ackerflächen ist daher in trockenen Regionen mit hoher Sonnenscheindauer größer, weil die PV-Anlage dort vor Austrocknung schützen kann.

Nicht unterschätzt werden sollte die Flächeneffizienz von Streuobstwiesen. Sie ist auch im Vergleich zu anderen Produktionssystemen beachtlich, sofern nicht nur alle Produkte der Obstbäume genutzt werden, sondern auch das darunter wachsende Gras extensiv genutzt als Futtermittel verwendet oder einer stofflichen Nutzung zugeführt wird. Zudem weisen solche extensiv aber effizient genutzten Streuobstwiesen, im Gegensatz zu anderen Produktionssystemen, einen hohen ökologischen Nutzen auf.

Ökologische Vorteile bieten auch Agroforstsysteme auf Ackerflächen sowie gebäudeintegrierte Aquaponik. Agroforstsysteme erhöhen die Vielfalt der landwirtschaftlichen Produkte ebenso wie die Lebensraumqualität für Wildtiere. Zu dieser ökonomischen und ökologischen Diversifizierung kommen weitere Vorteile, wie der verbesserte Schutz vor Austrocknung und Erosion. Auf die flächenbezogenen Gesamtautonomiepotenziale wirken sich Agroforstsysteme jedoch kaum aus.

Die Vorteile der Aquaponik bestehen vor allem in der Schonung freilebender Fischbestände, dem relativ niedrigen Bedarf an Wasser und tierischem Fischfutter, dem geringen Einsatz von Pflanzenschutzmitteln und Medikamenten sowie in der weitgehenden Unabhängigkeit von zugeführten Düngemitteln. Auf die flächenbezogenen Gesamtautonomiepotenziale wirkt sich Aquaponik jedoch eher nachteilig aus. Die Aquaponik benötigt durch ihren hohen Bedarf an Energie und Futtermitteln nicht weniger Fläche als die herkömmliche Landwirtschaft. Zudem wirkt sie sich nachteilig auf den Energieautonomiegrad und den Flächenbedarf der Energieversorgung aus. Insgesamt sinkt daher der flächenbezogene Autonomiegrad durch die Aquaponiknutzung deutlich. Wenn der Energiebedarf der Anlagen deutlich reduziert werden kann, kann die Aquaponik künftig von größerem Nutzen sein als heute. Trotzdem handelt es sich bei Aquaponik mehr um eine Maßnahme zum Schutz von Natur und Umwelt (v. a. Schutz maritimer Ökosysteme) als um eine Maßnahme zur Steigerung der globalen Ernährungssicherheit.

Eine wirkungsvolle Maßnahme zur Steigerung der Flächeneffizienz ist die anhand der Kennwerte aufeinander abgestimmte Nutzung der Potenziale von Siedlungs-, Wald- und Landwirtschaftsflächen. Sie bietet die Möglichkeit, in allen Sektoren und Produktsegmenten gezielt Prioritäten bei der Erreichung hoher Autonomiegrade zu setzen. Zudem können Koppelprodukte effizienter genutzt werden, wenn die Sektoren enger verknüpft werden. Sofern jedoch die vollständige Nutzung aller Koppelprodukte nicht gewährleistet ist, kann die wechselseitige Abstimmung den Flächenbedarf nicht weiter reduzieren und somit auch die Autonomiegrade nicht erhöhen. Der Flächenbedarf hängt letztlich vor allem vom Konsumverhalten und der Effizienz der Rohstoffnutzung ab. Ansonsten kompensieren sich Importbedarf und Exportpotenziale weitgehend, sodass sich der Flächenbedarf durch die lokale Variation der Flächennutzungen insgesamt kaum verändert. Eine Möglichkeit, die flächenbezogenen Autonomiegrade zu steigern, besteht jedoch in der bevorzugten Nutzung von Pflanzen und Technologien, deren lokale Ertragspotenziale über dem internationalen Durchschnittsertrag liegen.

Die wirksamste Maßnahme zur Steigerung der Autonomie ist die Reduktion des Verbrauchs durch gesteigerte Effizienz bei der Produktion sowie vermehrte Effizienz und Suffizienz auf Seite der Verbraucher (z. B. Reparatur- und Kreislaufwirtschaft). Keine technologische Maßnahme zur Flächeneffizienzsteigerung bietet ein Potenzial, das diese Einsparpotenziale auf Seiten von Verarbeitern und Endverbrauchern annähernd aufwiegen kann. Das größte technische Potenzial bieten aber sicherlich Freiflächen- und Agrophotovoltaik. Allerdings ist die Frage der Umsetzbarkeit einer großflächigen Photovoltaiknutzung auf Freiflächen noch nicht hinreichend beantwortet. Dies gilt insbesondere mit Blick auf die gesellschaftliche Akzeptanz.

7.5 Urbane Landwirtschaft

Urbane Landwirtschaft ist eine sinnvolle Ergänzung der herkömmlichen Nahrungsproduktion. Dies gilt besonders für Stadtkreise und sehr dicht besiedelte Landkreise, denn sie weist zahlreiche ökologische Vorteile auf und kann sich zudem vorteilhaft auf das Stadtklima und den Hochwasserschutz auswirken, wenn mit ihr zusätzliche Grünflächen im Siedlungsgebiet entstehen. Als nachteilig erweist sich jedoch der hohe Energiebedarf von beheizten Gewächshäusern und Aquaponikanlagen. Pauschale Aussagen zur Flächeneffizienz sind daher nicht möglich, weil hierfür nicht nur die Nahrungsmittelproduktion im Verhältnis zur Anlagenfläche entscheidend ist, sondern auch der Energiebedarf und die Energiequelle. Bei einer auf erneuerbaren Energien basierenden Energieversorgung kann der Flächenbedarf von Gewächshäusern und Aquaponikanlagen sehr hoch sein. Dies gilt insbesondere, wenn für Aquaponikanlagen auch noch ackerbaulich produziertes Fischfutter benötigt wird. In diesem Fall kann der Flächenbedarf insgesamt dem der herkömmlichen Landwirtschaft sehr nahekommen. Allerdings ist der Flächenbedarf der Energiegewinnung unabhängig von Ackerflächen zu decken, sodass sich mit urbaner Landwirtschaft der Druck auf die Ackerflächen reduzieren lässt. Anstelle der Konkurrenz um Ackerflächen tritt die energieintensive urbane Landwirtschaft damit jedoch in eine Konkurrenz um Dach- oder Freiflächen ein, die z. B. für die Energiegewinnung benötigt werden. Zudem sind die bisher absehbaren Dachflächenpotenziale mit ca. 4 m² pro Einwohner relativ gering und erlauben keine deutliche Verbesserung der Nahrungsautonomie.

Urbane Landwirtschaft kann daher auf dem heutigen Stand der Technik und angesichts der Flächenpotenziale nur eine Ergänzung sein. Den anhaltenden Flächenverbrauch und die Verschwendung von Lebensmitteln kann sie jedoch nicht annähernd kompensieren. Auf die flächenbezogenen Gesamtautonomiegrade hat die Urbane Landwirtschaft aus den genannten Gründen keinen positiven Effekt. Die Vermeidung von Verschwendung bietet im Vergleich wesentlich größere Potenziale, den Bedarf an Ackerflächen für die Ernährung einer Person zu reduzieren.

7.6 Stoffliche Nutzung oder Energiegewinnung?

Die Frage, ob die stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe der energetischen vorzuziehen ist, lässt sich ebenfalls nicht pauschal beantworten. Die Berechnungen zeigen vielmehr, dass viele unterschiedliche Aspekte zu berücksichtigen sind, die nicht ohne Weiteres miteinander zu vergleichen sind. Dies betrifft etwa Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Artenvielfalt oder den Bodenschutz. Energiepflanzen der zweiten Generation weisen in diesen Bereichen im Durchschnitt deutliche Vorteile gegenüber den stofflich genutzten Rohstoffpflanzen auf. Mit Blick auf die flächenbezogene Autonomie führt die Nutzung von Rohstoffpflanzen jedoch zu etwas höheren Gesamtautonomiepotenzialen als die Nutzung von Energiepflanzen.

Da allerdings das Erreichen hoher Autonomiegrade im Rohstoffsektor für die betrachteten Landkreise wesentlich einfacher ist als im Energiesektor, lässt sich daraus nicht ohne Weiteres ableiten, dass die stoffliche Nutzung der energetischen Nutzung vorzuziehen wäre. Vielmehr stellt sich die Frage, ob der Bedarf an Rohstoffen für die stoffliche Nutzung nicht deutlich einfacher an die begrenzten Flächenpotenziale angepasst werden kann als der Energiebedarf. Zum einen bietet ein bewusster Konsum große Einsparpotenziale, wie sich etwa an den Beispielen der Kleider-, Papier- und Möbelnutzungen zeigt. Zum anderen könnte das Schließen der Rohstoffkreisläufe den Gesamtflächenbedarf der Rohstoffversorgung auf einen kleinen Bruchteil des heutigen Flächenbedarfs senken. Nicht zuletzt das Prinzip Cradle to Cradle bietet Möglichkeiten, die Effizienz der Rohstoffnutzung um ein Vielfaches zu erhöhen.

Aus den hohen Autonomiepotenzialen bei stofflich genutzten Produkten aus Holz ergibt sich zudem die Frage, ob die höhere Flächeneffizienz eine ausreichende Begründung für eine stoffliche Nutzung ist, wenn zugleich große Defizite bei der Versorgung mit erneuerbarer Energie bestehen. Eine Kaskadennutzung wirkt hier zwar zunächst wie die sinnvollste Antwort auf diese Frage. Wenn der hohe Bedarf an Holz des Bausektors und der Möbelindustrie sich allerdings eher aus gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Trends als aus einem hohen Materialverschleiß ergibt, erscheint der Energieverbrauch der Verarbeitung des Holzes zu Baustoffen und Möbeln vermeidbar. Schließlich ist die vorteilhafte CO_2-Absorption durch die Nutzung als Baustoff bei einer Kaskadennutzung und immer kürzeren Nutzungsdauern nur vorübergehend und daher möglicherweise von geringerer Bedeutung als in bisherigen CO_2-Bilanzen häufig unterstellt wird.

Ähnlich wie bei der Bauholz- und Möbelproduktion stellt sich auch im Fall der Kunststoffe die Frage, ob die Nutzung einiger Produkte nicht sogar auf das wirklich notwendige Maß beschränkt werden sollte, das sich beispielsweise aus hygienischen Notwendigkeiten und einem Mangel an Alternativen ergibt. Da der Bedarf an Ackerflächen in nahezu allen Produktsegmenten aller drei Sektoren hoch ist, ist eine Minimierung des Verbrauchs hier wohl noch dringlicher als bei den zuvor genannten Produkten. Die Flächeninanspruchnahme durch ein Produkt pro Kilogramm ist hier jedenfalls kein ausreichendes Entscheidungskriterium. Die Flächeninanspruchnahme durch Biokunststoffe ist, sofern eine Kaskadennutzung erfolgt, so gering, dass sie praktisch vernachlässigbar ist. Bei einer thermischen Verwertung nach dem Ende der stofflichen Nutzung liefert der Anbau von Pflanzen für die Biokunststoffproduktion sogar so viel Energie, dass der gesamte Energieertrag pro Hektar nicht geringer ausfällt, als bei einer direkten energetischen Verwertung ihrer Ausgangsrohstoffe, bei denen es sich in der Regel um Getreide, Mais, Kartoffeln oder Zuckerrüben handelt. Trotzdem besteht eine erhebliche Konkurrenz zur Nahrungsproduktion, wenn der heutige Verbrauch an Kunststoffen auch nur annähernd mithilfe von Polymeren gedeckt werden sollte, die aus Kartoffeln, Weizen oder Mais-

korn hergestellt werden. Eine Alternative dazu stellen Kunststoffe aus Abfällen und Nebenprodukten der Nahrungs- und Zellstoffproduktion (z. B. Lignin, Stärke aus Kartoffelschalen, usw.) dar. Die Behauptung, dass ihre Verwendung für die Kunststoffproduktion nicht mit einer Konkurrenz um Flächenpotenziale verbunden sei, ist jedoch falsch. Nahezu jede Biomasse lässt sich auf vielfältige Weise nutzen. Deshalb wäre beispielsweise noch zu prüfen, ob die stoffliche Nutzung von Reststoffen einer Nutzung als Viehfutter oder Energieträger aus ökologischer und flächenökonomischer Sicht tatsächlich vorzuziehen ist. Die nun vorliegenden Daten könnten bei solchen Vergleichen möglicherweise nützlich sein.

7.7 Flächennutzungskonkurrenzen

Grundsätzlich stehen die Nahrungsmittelproduktion, die Nutzung von Energiepflanzen und die ackerbauliche Produktion von nachwachsenden Rohstoffen in einer direkten Konkurrenz um Ackerflächen. Angesichts der beachtlichen Flächenpotenziale Deutschlands und der globalen Flächenverknappung sollte Deutschland einen hohen Gesamtautonomiegrad anstreben. Sofern das Ziel darin besteht, lediglich die Produktion von Nahrungsmitteln, Energie und Rohstoffen ökologisch zu gestalten, ohne den Bedarf an die Flächenpotenziale anzupassen, so reichen die vorhandenen Ackerflächen in Baden-Württemberg nicht aus, das Land zu versorgen. Bei unveränderten Ernährungsgewohnheiten und Nahrungsmittelverlusten kann das Land seinen Kalorienbedarf mit ökologischer Landwirtschaft nur zu etwa 46 Prozent decken. Auch flächenbezogen wird bei einem in diesem Fall notwendigen globalen Güteraustausch nur ein Nahrungsautonomiegrad von rund 36 Prozent erreicht. In den betrachteten fünf Landkreisen sind die Autonomiepotenziale mit 54 Prozent (kalorienbezogen) und 49 Prozent (flächenbezogen) nur wenig größer. Auf den Anbau von Energie- oder Rohstoffpflanzen müsste in diesem Fall wohl verzichtet werden. Doch selbst bei einem Verzicht auf Energie- und Rohstoffpflanzen würden die Nahrungsautonomiegrade der Landkreise lediglich auf 61 Prozent kalorienbezogen und 53 Prozent flächenbezogen steigen. Durch eine Umstellung der Ernährung und die Minimierung von Verschwendung kann jedoch das Nahrungsautonomiepotenzial trotz Umstellung auf eine ökologische Landbewirtschaftung und fortgesetzter Energie- und Rohstoffpflanzennutzung kalorienbezogen auf 100 Prozent und flächenbezogen sogar auf 147 gesteigert werden. Im Land Baden-Württemberg lägen die entsprechenden Werte bei 86 und 103 Prozent. Pro Einwohner stehen in Baden-Württemberg 0,072 Hektar Ackerland und 0,049 Hektar Dauergrünland zur Verfügung. In den fünf Landkreisen stehen mit 0,074 Ackerland und 0,077 Hektar Grünland etwas größere Flächen zur Verfügung. In Deutschland liegen die entsprechenden Werte im Durchschnitt bei ca. 0,142 Hektar Ackerland und 0,056 Hektar Dauergrünland. Baden-Württemberg und die fünf betrachteten Landkreise sind damit wesentlich dichter besiedelt als Deutschland im bundesweiten Durchschnitt. Deutschland könnte bei einer

vergleichbaren Umstellung der Ernährung und einer Reduktion der Verschwendung einen kalorienbezogenen Nahrungsautonomiegrad von 147 Prozent und einen flächenbezogenen Nahrungsautonomiegrad von 158 Prozent erreichen. Bei konventioneller Landbewirtschaftung wären sogar Werte von 235 Prozent (kalorienbezogen) und 200 Prozent (flächenbezogen) erreichbar. Auch in diesen Fällen wurden 18 Prozent der Ackerfläche und 18 Prozent des Dauergrünlandes für die Energiegewinnung und die Rohstoffproduktion genutzt. Die Flächenkonkurrenz zwischen Nahrungsproduktion einerseits und Rohstoffgewinnung sowie Energiepflanzenanbau andererseits ergibt sich folglich nicht aus einem Mangel an Flächen, sondern aus den durchschnittlichen Konsumgewohnheiten, die sich bisher weder an Empfehlungen der Gesellschaften für Ernährung noch an ökologischen Kriterien orientieren.

Ähnliches gilt für die Konkurrenz zwischen Energie- und Rohstoffproduktion. Die regenerative Produktion von Energie und Rohstoffen an die heutigen Verbrauchsgewohnheiten anzupassen, ist aufgrund der vorhandenen Flächenpotenziale voraussichtlich nicht möglich. Durch eine Reduktion des heutigen Energieverbrauchs um 60 Prozent und des Rohstoffverbrauchs um zwei Drittel könnten die Bedarfe weitgehend von den eigenen Produktionsflächen gedeckt werden. Dabei ist eine bedarfsangepasste Kombination von Energie- und Rohstoffpflanzen eher geeignet, die Bedarfe zu decken, als ein vollständiger Verzicht auf Energiepflanzen zugunsten der Rohstoffproduktion. Die Energiepflanzenanbaufläche wird in einem solchen Szenario weder vom Ernährungssektor noch vom Rohstoffsektor in vollem Umfang benötigt, sondern nur zu kleineren Teilen. Eine besondere Herausforderung dürfte allerdings die Reduktion des Verbrauchs von stofflich genutzten Ölen und Alkoholen sein, da ihre Produktion vergleichsweise große Flächen in Anspruch nimmt, Nutzungskreisläufe hier aber kaum geschlossen werden können.

7.8 Ökologie

Für die Umweltauswirkungen der Flächennutzung sind die durchschnittliche Ernährungsweise, die Konsumgewohnheiten, das Ausmaß der Verschwendung, die Wirtschaftsweise, die Bodenbearbeitung, die Standortwahl von Energieanlagen und die Wahl der Nutzpflanzen entscheidend.

Ein Aspekt, der für die Ökologie als besonders wichtig eingeschätzt werden muss, ist die Flächeninanspruchnahme pro Person. Die ökologische, auf erneuerbaren Energien basierende Produktion von Nahrungsmitteln nimmt deutlich mehr Fläche in Anspruch als eine auf fossilen Energien basierende konventionell integrierte Produktionsweise. Wird mit der Wirtschaftsweise nicht zugleich Ernährung umgestellt, muss entweder weitgehend auf die Nutzung von Energie- und Rohstoffpflanzen verzichtet werden oder aufgrund der größeren Flächennach-

frage ein erhöhtes Risiko von unerwünschten Flächennutzungsänderungen in Kauf genommen werden. Denn unter Umständen kann ein wachsender Bedarf an Ackerfläche die Rodung von Waldflächen oder den Umbruch von Grünland nach sich ziehen. Dies würde den Nutzen der ökologischen Wirtschaftsweise zumindest zu erheblichen Teilen infrage stellen.

Eine vegane Ernährungsweise ist dabei nicht die Ernährungsweise mit den geringsten Umweltrisiken. Vergleicht man die vegane Ernährung nicht mit den heutigen Ernährungsgewohnheiten, sondern mit einer Ernährung, die sich an gesundheitlichen Empfehlungen und ökologischen Rahmenbedingungen orientiert, so weist die vegane Ernährung einen deutlich höheren Bedarf an Ackerflächen auf, da das Ernährungspotenzial des Dauergrünlandes ungenutzt bleibt. Führt dies zum Umbruch von Grünland oder zur Rodung naturnaher (Regen-)Wälder, kann auch der Nutzen einer veganen Ernährung für Klima- und Artenschutz deutlich reduziert werden. Die große Bedeutung von Landnutzungsänderungen für Artenvielfalt und Klima ist bereits in mehreren Studien belegt worden, z. B. von Hof et al. im Jahr 2018 (Hof, et al., 2018).

Die Analyse der flächenbezogenen Umweltkennwerte zeigt wiederum, dass pauschale Aussagen zur Umweltauswirkung von Energie- und Rohstoffpflanzen ebenso falsch sind, wie zu den Umweltauswirkungen von Wind- oder Freiflächensolaranlagen. Energiepflanzen der ersten Generation sind bei einer energetischen Nutzung im Anbau nicht schädlicher als im Falle einer Nutzung zur Nahrungs- oder Futterproduktion. Bei einem ökologischen Anbau sinken ihre Erträge jedoch deutlich, sodass sie mit Energiepflanzen der zweiten Generation aller Voraussicht nach nicht mehr konkurrieren können. Im Gegensatz zu Getreide, Mais oder Raps sind die überwiegend mehrjährigen Energiepflanzen der zweiten Generation großenteils Humusmehrer, die den Boden vor Erosion schützen, kaum Pflanzenschutz erfordern, weniger Wasser benötigen und die Lebensraumvielfalt erhöhen. Zudem eignen sich viele Energiepflanzen der zweiten Generation als Insektenweide. Für den Schutz von Artenvielfalt, Böden und Gewässern bieten sie damit größere Vorteile als die meisten Pflanzen, die für die Produktion von Nahrungsmitteln angebaut werden. Zudem eignen sie sich im Vergleich zu den Energiepflanzen der ersten Generation besser für die thermische Nutzung und sind daher mit einem geringeren Risiko hinsichtlich des Methanschlupfes verbunden, welches bei der Biogasproduktion immer gegeben ist. Mit Blick auf die Ökologie wird ihre Nutzung daher nicht als Risiko, sondern als Chance eingeschätzt, sofern ihre Nutzung nicht zu Grünlandumbruch oder Waldrodung führt. Legt man eine Obergrenze für ihre Nutzung fest, beispielsweise auf 20 Prozent der Ackerfläche, so dürfte dieses Risiko weitgehend gebannt sein. Geringere ökologische Chancen bietet dagegen die Nutzung von Pflanzen, die sich für die Produktion stofflich genutzter Rohstoffe eignen. Unter ihnen ist sowohl der Anteil unempfindlicher mehrjähriger Pflanzen als auch der Anteil der Blühpflanzen geringer. Mit Blick auf die stoffliche Nutzung stehen zu Mais, Kartoffeln, Raps und Getreide auch weniger mehrjährige und pflegeleichte Alternativen zur Verfügung als bei der energetischen Biomassenutzung.

7.9 Unsicherheiten

Die größten Unsicherheiten bestehen hinsichtlich der Auswirkungen des Klimawandels auf die Ertragspotenziale von Forst- und Landwirtschaft. Kann der Klimawandel nicht auf einen globalen Temperaturanstieg von maximal zwei Grad begrenzt werden, dürfte ein Großteil der in dieser Ausarbeitung genannten Ertragskennwerte nicht mehr zutreffend sein. Besonders deutlich zeichnet sich dies schon heute im Bereich der Forstwirtschaft ab, wo insbesondere die schnellwachsenden und ertragreichen Nadelhölzer von den Folgen des Klimawandels stark betroffen sind. Wie gut die heimischen Laubbäume und insbesondere die Buche mit den Veränderungen zurechtkommen werden, ist bisher nur in Ansätzen absehbar. Einiges deutet aber daraufhin, dass auch sie nicht unbeeinträchtigt bleiben.

Mit Blick auf die Datengrundlage dieser Ausarbeitung bestehen die größten Unsicherheiten im Bereich der stofflichen Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Dies gilt insbesondere für die globalen Ertragspotenziale von Energie- und Rohstoffpflanzen. Gründe hierfür sind neben Klimaänderungen auch die global sehr unterschiedlichen Arten und Entwicklungen der Landbewirtschaftung. So kann z. B. die Umstellung auf ökologische Landwirtschaft in Industrieländern zu Ertragseinbußen führen, während sie in weniger wohlhabenden Ländern Ertragssteigerungen möglich machen könnte. Für die Einschätzung solcher globalen Effekte lag jedoch noch keine ausreichende Datenbasis vor.

Mit gewissen Unsicherheiten behaftet sind auch die Potenziale, die sich aus Reststoffen oder Nebenprodukten ergeben. Betroffen sind davon vor allem Nebenprodukte wie z. B. Schwarz- und Braunlaugen oder Presskuchen. Die hier dargestellten Ertragspotenziale der auf ihnen basierenden Koppelprodukte basieren teilweise lediglich auf den Angaben einer einzelnen Quelle. Solche Einzelquellen wurden zwar nur berücksichtigt, wenn die Quelle als sehr zuverlässig eingeschätzt wurde, dennoch sollten auch diese nicht ungeprüft bleiben. Empfehlenswert erscheint insbesondere die genauere Erhebung von Konversionsfaktoren bei der Rohstoffverarbeitung. Insgesamt haben die beschriebenen Fälle jedoch einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Autonomiepotenziale.

Die Ertragspotenziale von Energiepflanzen der zweiten Generation sind insofern mit gewissen Unsicherheiten behaftet, da sie bisher überwiegend in Anbauversuchen ermittelt wurden, bei denen eine große fachliche Expertise zu vergleichsweise hohen Erträgen geführt haben dürfte. In der Praxis einer großflächigen Nutzung müssen jedoch erst noch Erfahrungen zum Anbau an unterschiedlichsten Standorten gesammelt werden, sodass die Erträge der noch relativ neuen Nutzpflanzen zumindest in der Einführungsphase hinter den Ergebnissen der Anbauversuche zurückbleiben könnten.

Gewisse Unsicherheiten bestehen zudem mit Blick auf die Entwicklung von ökologischer und urbaner Landwirtschaft. Viele Landwirte haben erst vor kurzer Zeit auf ökologische Wirtschaftsweise umgestellt und die Zahl der Betriebe mit ökologischer Weidehaltung ist noch vergleichsweise gering. Noch ganz am Anfang ihrer Entwicklung steht die urbane Landwirtschaft. Mit Blick auf weiter zunehmende Erfahrungswerte und eine Vereinheitlichung und Weiterentwicklung der Standards dürften hier deshalb eher Ertragssteigerungen als Ertragsrückgänge zu erwarten sein. Diese könnten allerdings durch einen ungebremsten Klimawandel wieder zunichtegemacht werden. In der urbanen Landwirtschaft ist wohl ebenfalls eine Erhöhung der Effizienz zu erwarten. Wichtig ist hierbei vor allem eine Steigerung der Energieeffizienz. Wie groß die möglichen Einsparungen sind, ist bisher jedoch noch unklar.

7.10 Datenlücken und Forschungsbedarf

Die vorliegende Datengrundlage ist ausreichend, um auf nationaler Ebene oder auch auf mitteleuropäischer Ebene Autonomiepotenziale sowohl bei konventioneller als auch bei ökologischer Wirtschaftsweise zu ermitteln. Auf globaler Ebene mangelt es jedoch noch an Daten zu den Ertragspotenzialen der ökologischen Wirtschaftsweise. Auch liegt auf globaler Ebene keine vergleichbare Datenbasis zu Energie- und Rohstoffpflanzen der zweiten Generation vor. Daher ist die Berechnung von Szenarien, die die Potenziale einer ökologischen und nachhaltigen Wirtschaftsweise auf globaler Ebene berücksichtigen, noch nicht mit gleicher Genauigkeit möglich, wie sie im Fall der konventionellen Wirtschaftsweise und mit Energiepflanzen der ersten Generation erreichbar ist. Der globale Landfußabdruck kann daher nur für den Status Quo mit hoher Genauigkeit berechnet werden - und dies auch nur ohne die Berücksichtigung zahlreicher Koppelprodukte, was auch in diesem Fall auf globaler Ebene zu einer deutlich geringeren Genauigkeit führt. Dass zu den meisten der wichtigen Energie- und Rohstoffpflanzen der zweiten Generation auf globaler Ebene noch keine ausreichenden Daten vorliegen, ist unter anderem auch auf ihre immer noch geringe Verbreitung zurückzuführen. In den Statistiken der FAO (FAOSTAT-Datenbank) werden viele dieser Pflanzen, wie z. B. die meisten schnellwachsenden Gräser, daher noch gar nicht erfasst. Der globale Landfußabdruck, der sich aus den verschiedenen möglichen Zukunftsszenarien ergibt, lässt sich daher nur mit dementsprechenden Unsicherheiten schätzen. Da die Potenziale mehrjähriger Energie- und Rohstoffpflanzen jedoch als groß eingeschätzt werden, wird hier dringender Forschungsbedarf gesehen, wenn die Bemühungen um Klimaschutz nicht nur im Bereich der Energieversorgung, sondern auch mit Blick auf den Schutz von Böden, Gewässern und Artenvielfalt möglichst nachhaltig sein sollen. Denn neben der Erforschung der Potenziale nehmen auch die Markteinführung neuer Energieträger und der Umbau des Energieanlagenbestandes mehrere Jahre bis Jahrzehnte in Anspruch, wie das Beispiel Deutschlands zeigt.

Für Deutschland sind jedoch die Stellschrauben, die auf dem Weg zu einem möglichst geringen Flächenbedarf die größten Effekte bewirken können, klar zu identifizieren. Datenlücken betreffen vor allem die Genauigkeit in den einzelnen Produktsegmenten. Dies gilt insbesondere für die stoffliche Nutzung nachwachsender Rohstoffe – und hier vor allem mit Blick auf Wasch- und Reinigungsmittel sowie Kosmetik und Körperpflege.

Neben den genannten Lücken in der Datengrundlage zur Berechnung der Autonomiepotenziale würden Datenlücken vor allem im Bereich der umweltbezogenen Kennwerte festgestellt. Datenlücken bei autonomierelevanten Kennwerten und bei Umweltkennwerten werden daher im Folgenden getrennt voneinander beschrieben:

Kennwerte für die Berechnung der Autonomiepotenziale

Mit Blick auf die Nahrungsproduktion wird die Datengrundlage als ausreichend aber verbesserungsfähig eingeschätzt:

- Empfehlenswert erscheint diesbezüglich vor allem eine getrennte Erfassung der Erträge von konventionell integriert und ökologisch wirtschaftenden Landwirtschaftsbetrieben, beispielsweise durch die Statistischen Landesämter. Bisher werden die Erträge nicht nach Wirtschaftsweise differenziert veröffentlicht.
- Auf globaler Ebene mangelt es an Daten zu den Potenzialen des ökologischen Landbaus sowie zu Potenzialen von mehrjährigen Energie- und Rohstoffpflanzen der zweiten Generation. Dies betrifft insbesondere mehrjährige schnellwachsende Gräser, aber auch Nektarpflanzen wie die Sida und die Durchwachsene Silphie.
- In der Viehhaltung rückt die Flächeneffizienz zwar zunehmend in den Fokus, aber die Datengrundlage ist bisher nur bedingt geeignet, die Flächeneffizienz verschiedener Haltungsformen zu beurteilen. Dies betrifft vor allem die Weidehaltung und dabei insbesondere die Haltung von Schweinen und Geflügel. Aber auch mit Blick auf die Stallhaltung sollte die Flächeninanspruchnahme von Futtermischungen mindestens in gleichem Maße beachtet werden wie Futterverwertung und Mastdauer. Bisher mangelt es oftmals an brauchbaren Angaben zur Zusammensetzung der Futtermischungen. Dies gilt sowohl für die herkömmliche Viehhaltung als auch für die Aquaponik.
- Angaben zur Energieeffizienz aquaponischer Systeme weisen in der Literatur eine bemerkenswerte Bandbreite auf, wobei die Ursachen für die teils enormen Unterschiede beim Energieverbrauch meist nicht nachvollziehbar sind. Hier besteht weiterhin Forschungsbedarf.
- Sehr heterogen ist die Studienlage zu Verlusten und Verschwendung im Nahrungssektor. Die bisherigen Studien kommen zu recht unterschiedlichen Ergebnissen sowohl bezüglich des Gesamtausmaßes der Verluste als auch bezüglich der Anteile der un-

vermeidbaren Verluste. Zudem ist die Vergleichbarkeit der Ergebnisse dadurch eingeschränkt, dass nicht alle Studien auch alle Glieder der Verarbeitungskette einschließen. Befragungen von Landwirten deuten darauf hin, dass insbesondere in der Produktion von Obst und Gemüse große Potenziale noch immer ungenutzt bleiben, weil die Nachfrage nach Produkten mit optischen Mängeln oder ungewünschter Größe zu gering ist. Zudem sind viele nachhaltige Futtermittel wirtschaftlich noch nicht konkurrenzfähig, da Umweltfolgen bisher kaum in die Preisbildung einbezogen werden. Das Ernährungspotenzial der vermeidbaren Verluste, die bereits bei der Ernte entstehen, kann bisher nur geschätzt werden. Gleiches gilt für den ungenutzten Beifang in der Fischerei. Neben einer verbesserten Erfassung scheint hier zudem ein erheblicher Forschungsbedarf hinsichtlich der Frage zu bestehen, wie diese Potenziale besser genutzt werden können. Oftmals sind die Hemmnisse, die einer Nutzung im Wege stehen, auch hier lediglich wirtschaftlicher Art. So mangelt es beispielsweise auch im Fall der süddeutschen Streuobstwiesen weniger an Flächeneffizienz und Nachhaltigkeit als an geeigneten Rahmenbedingungen für eine wirtschaftliche Nutzung.

Mit Blick auf die Ertragspotenziale von erneuerbaren Energien besteht eine solide Datengrundlage. Allerdings mangelt es hier noch an Erfahrungswerten aus der großflächigen Praxis. Dies betrifft etwa die Nutzung der Agrophotovoltaik und Agrothermie sowie den Anbau von Energiepflanzen der zweiten Generation. Auch werden Energiepflanzen bisher in aller Regel konventionell angebaut. Dies gilt sowohl für die erste als auch für die zweite Energiepflanzengeneration. Mit Blick auf die Erträge, die Klimabilanz und die Erntefaktoren der Energiepflanzen im ökologischen Anbau wird daher noch Forschungsbedarf gesehen. Als unzureichend wird die Datengrundlage zum Energieaufwand des Energiepflanzenanbaus angesehen. Dies betrifft sowohl den konventionellen als auch den ökologischen Anbau. Forschungsbedarf wird außerdem hinsichtlich der Markteinführung von Energiepflanzen der zweiten Generation gesehen, denn ihre ökologischen Vorteile können nur zum Tragen kommen, wenn Landwirte ausreichend zahlreiche Abnehmer für solche Produkte finden.

Deutlich anders als im Falle der Energiepotenziale stellt sich die Situation mit Blick auf die stoffliche Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen dar. Hier mangelt es an Angaben zum Rohstoffaufwand und den jeweiligen Konversionsfaktoren ebenso wie an der Erfassung der Aufkommen und Eigenschaften von Reststoffen, die sich für eine stoffliche oder energetische Nutzung eignen. Dies betrifft sowohl das Aufkommen von Reststoffen in der Landwirtschaft als auch in der Verarbeitung durch Handwerk und Industrie. So liegen beispielsweise zu Rohstoffbedarf, Konversionsfaktoren und Reststoffaufkommen bei der Herstellung von Kunststoffen, Farben und Lacken, Wasch- und Reinigungsmitteln sowie von Kosmetika bisher oftmals nur Daten einzelner Quellen vor. Insgesamt ist die Datenbasis in diesen Bereichen noch sehr ausbaufähig. Ähnliches gilt für den möglichen Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen im

Fahrzeugbau und dort speziell im Karosseriebau. Zudem können die Einsparpotenziale im Rohstoffsektor, die sich etwa aus einer effizienteren Nutzung oder einer verbesserten Kreislaufwirtschaft ergeben könnten, bisher nur geschätzt werden. Hier wird daher noch ein erheblicher Forschungsbedarf gesehen.

Ökologische Kennwerte

Für eine Einschätzung der ökologischen Auswirkungen, die sich aus einem Umstieg auf erneuerbare Energien und nachwachsende Rohstoffe ergeben, können etwa die in der Nahrungsproduktion etablierten Pflanzen mit den Energiepflanzen der ersten und der zweiten Generation sowie mit verschiedenen Rohstoffpflanzengruppen verglichen werden.

Die vorliegenden Daten zeigen beim Vergleich dieser verschiedenen Pflanzengruppen zwar eine recht klare Tendenz. Dennoch bestehen hier mitunter noch große Datenlücken. Dies betrifft etwa eine vollständige und nachvollziehbare Bilanzierung der Klimawirkung von Energiepflanzen, den kumulierten Energieaufwand und die Humusbilanz des Anbaus.

Größere Lücken weist auch die Datengrundlage zu den Auswirkungen von Nutzpflanzen auf den Wasserhaushalt auf. So sind noch bei einem relevanten Teil der Pflanzen die Transpirationskoeffizienten gänzlich unbekannt. Dies betrifft beispielsweise Fasernessel und Rutenhirse. Auch Hinweise zur Verdunstung von Niederschlagswasser auf den Blattflächen der Pflanzen sind nur in Einzelfällen vorhanden. Auf Basis der gesichteten Quellen wird diesbezüglich weiterhin Forschungsbedarf gesehen.

8 Zusammenfassung

Mithilfe der umfassenden Datenbasis, die im Rahmen der vorliegenden Studie erstellt wurde, ist es möglich, den Flächenbedarf aller betrachteten Nahrungsmittel, Energieträger und nachwachsenden Rohstoffe ebenso genau zu berechnen, wie den Flächenbedarf jedes Produktes, dass mit diesen Energieträgern und Rohstoffen hergestellt wird. Die gewählte Methodik erlaubt es zudem, dabei sowohl den Brutto-Flächenbedarf als auch die Netto-Flächeninanspruchnahme zu ermitteln, die sich unter Berücksichtigung der relevanten Koppelprodukte eines Produktes ergibt. Gleichzeitig kann auf diese Weise auch jedem Koppelprodukt eine spezifische Flächeninanspruchnahme zugeordnet werden. Zudem ist es möglich, auf dieser Grundlage auch den Flächenbedarf unterschiedlicher komplexer und sektorenübergreifender Warenkörbe zu berechnen und direkt zu vergleichen. Eine mögliche Anwendung ist die Berechnung nachhaltiger Autonomiepotenziale in den Sektoren Nahrung, Energie und Rohstoffe sowie der sektorenübergreifenden Gesamtautonomiegrade, die sich aus verschiedenen Versorgungssystemen ergeben.

Am Beispiel der Landkreise Bodenseekreis, Esslingen, Konstanz, Ravensburg und Sigmaringen wurde untersucht, ob sich ihr globaler Landfußabdruck durch eine nachhaltige Versorgungswirtschaft auf ein nachhaltiges Maß reduzieren lässt, das eine globale Ernährungssicherheit mit den Zielen des Pariser Klimaabkommens vereinbar macht. Diese erfordern einen Umstieg auf erneuerbare Energien und den weitgehenden Verzicht auf erdölbasierte Baustoffe und Konsumgüter. Gleichzeitig wurde untersucht, ob eine hohe Flächeneffizienz gleichbedeutend mit einem hohen Autonomiegrad ist und unter welchen Voraussetzungen in Baden-Württemberg mit einer ökologischen Wirtschaftsweise und einer regenerativen Energie- und Rohstoffgewinnung hohe Autonomiegrade in den Sektoren Nahrung, Energie und Rohstoffe erreicht werden können.

Die fünf Landkreise befinden sich in der südlichen Hälfte Baden-Württembergs. Ihre Flächenpotenziale und zahlreiche Verbrauchswerte kommen zusammengenommen den Durchschnittswerten des Bundeslandes sehr nah, sodass ein hohes Maß an Vergleichbarkeit besteht. Einzeln betrachtet weisen die Landkreise jedoch sehr unterschiedliche Voraussetzungen auf: Während der Landkreis Esslingen zu den am dichtesten besiedelten Landkreisen in Deutschland gehört, liegt die Bevölkerungsdichte im Landkreis Sigmaringen deutlich unter dem Landesdurchschnitt von Baden-Württemberg. Die anderen drei Landkreise liegen hinsichtlich der Bevölkerungsdichte zwischen diesen beiden Landkreisen und unterscheiden sich zudem in ihrer Flächenstruktur und ihren Verbrauchswerten voneinander.

Mithilfe der erstellten Datengrundlage, welche die wichtigsten flächenbezogenen Kennwerte der Erzeugung von Nahrung, Energie und Rohstoffen umfasst, wurde das Produktionspotenzial der fünf Landkreise sowohl zu ihrem aktuellen Verbrauch als auch zum angenommenen

Bedarf im Jahr 2035 ins Verhältnis gesetzt. Zudem wurde untersucht, welche Technologien für das Erreichen der Ziele besonders förderlich sind und wie sich die einzelnen Maßnahmen auf flächenbezogene Umweltkennwerte auswirken.

Flächenbedarf und mögliche Autonomiegrade

Würden die konventionelle Wirtschaftsweise und der heutige Verbrauch von Nahrung, Energie und Rohstoffen unverändert beibehalten, kämen die betrachteten Landkreise bei einem vollständigen Umstieg auf erneuerbare Energien und nachwachsende Rohstoffe im Durchschnitt auf flächenbezogene Autonomiegrade von 89 Prozent im Nahrungssektor, 10 Prozent im Energiesektor und 47 Prozent im Rohstoffsektor. Daraus ergibt sich ein möglicher Gesamtautonomiegrad von 23 Prozent und ein globaler Landfußabdruck von mindestens 1,58 Hektar pro Einwohner. 77 Prozent dieses Flächenbedarfs entfallen auf den Energiesektor.

Anhand von 59 Szenarien wurde verglichen, wie sich die wichtigsten bekannten Maßnahmen auf die Flächenbedarfe der drei Sektoren und wichtige Umweltkennwerte auswirken. Ausgehend von den Ergebnissen dieses Vergleichs wurde ein Maßnahmenpaket erstellt, das sich an Energieeinsparzielen der Landesregierung Baden-Württembergs orientiert und darüber hinaus hohe Autonomiegrade in den Sektoren Nahrung, Energie und Rohstoffe ermöglichen soll. Aus diesem Maßnahmenpaket wurde ein Szenario für das Jahr 2035 entwickelt, das durch folgende Veränderungen gekennzeichnet ist:

- Vollständige Umstellung auf ökologische Landwirtschaft.
- Umstellung auf eine an gesundheitlichen und ökologischen Kriterien orientierte Ernährung mit erheblich reduzierten Anteilen tierischer Produkte.
- Deutliche Reduktion der Nahrungsverluste auf 10 Prozent der Verzehrmenge.
- Reduktion des Verbrauchs von Möbeln, Textilien, Papier, Kunststoffen, Ölen und Alkoholen um jeweils 67 Prozent.
- Umstellung des Neubaus von Wohngebäuden auf nachwachsende Rohstoffe
- Nutzung des gesamten Dachflächenphotovoltaikpotenzials und Installation von Agrophotovoltaik auf 5 Prozent der landwirtschaftlichen Nutzflächen.
- Elektrifizierung von 70 Prozent der Gebäudebeheizung, 75 Prozent der Pkw, 50 Prozent der leichten Nutzfahrzeuge und 50 Prozent der Busse.
- Reduktion der Jahresfahrleistungen aller Kraftfahrzeuge um ein Drittel
- Endenergieeinsparung von 55 Prozent im Vergleich zum Jahr 2017.

Die angenommene Energieeinsparung liegt damit etwas über dem Ziel der Landesregierung von Baden-Württemberg, das eine Einsparung von 49 Prozent gegenüber dem Jahr 2010 vorsieht.

Die Berechnungen ergaben, dass der globale Landfußabdruck der fünf Landkreise bei einer ökologischen und auf regenerativen Quellen basierenden Versorgungswirtschaft trotz dieser weitreichenden Maßnahmen mit 0,54 Hektar pro Person immer noch ungefähr das Doppelte der eigenen Produktionsflächen umfasst. Zudem wird ein deutlicher Unterschied zwischen den produktbezogenen und den flächenbezogenen Autonomiegraden sichtbar, der im Energiesektor besonders groß ist. Angesichts der deutlichen Unterschiede zwischen produkt- und flächenbezogenen Autonomiegraden lässt sich schlussfolgern, dass stets beide Kennwerte betrachtet werden müssen, um die Autonomiepotenziale einer Region realistisch beurteilen zu können.

Zusammen erreichen die fünf Landkreise in diesem Szenario in den drei Sektoren durchschnittlich produktbezogene Autonomiegrade zwischen 89 und 168 Prozent. Die Klammern dargestellte Werte zeigen jeweils die große Spanne zwischen dem Landkreis mit der höchsten und dem Landkreis mit der geringsten Autonomie.

- 92 (26 – 254) Prozent im Sektor Nahrung,
- 89 (44 – 218) Prozent im Sektor Energie und
- 168 (47 – 557) Prozent im Rohstoffsektor.

Die flächenbezogenen Autonomiegrade der fünf Landkreise liegen im Durchschnitt bei

- 133 (22 – 221) Prozent im Sektor Nahrung,
- 30 (11 – 83) Prozent im Sektor Energie und
- 128 (35 – 192) Prozent im Rohstoffsektor.

Insgesamt ergibt sich daraus im Durchschnitt der drei Sektoren eine flächenbezogene Autonomie von 68 (18 — 155) Prozent. Dabei profitieren die betrachteten Landkreise im Außenhandel davon, dass ihre land- und forstwirtschaftlichen Flächen wesentlich ertragreicher sind als der globale Durchschnitt. Bemerkenswert ist hier vor allem, dass im Sektor Energie nur noch 11 Prozent der benötigten Energie importiert werden müssen. Für die Deckung dieser 11 Prozent fehlen den Landkreisen 70 Prozent der für die Energieversorgung benötigten Fläche.

Um in allen drei Sektoren sowohl produktbezogen als auch flächenbezogen einen Autonomiegrad von mindestens 100 Prozent zu erreichen, ist es erforderlich

- auf biogene Flüssigbrennstoffe nahezu vollständig zu verzichten und
- den Verbrauch von Biogas auf weniger als 0,5 MWh/Ea zu begrenzen.

Gase und Flüssigbrennstoffe, die mit Hilfe von Power-to-X-Technologien erzeugt werden, neh-

men weniger Fläche in Anspruch als Biogas und biogene Flüssigbrennstoffe, führen aber entweder zu einem deutlich reduzierten produktbezogenen Energieautonomiegrad oder zu einem erheblich größeren Bedarf an Agrophotovoltaikanlagen. Durch letztere treten auch Power-to-X-Brennstoffe in Konkurrenz zur Nahrungsproduktion und reduzieren die Autonomie im Nahrungssektor. Die effektivsten Mittel, den Flächenbedarf zu reduzieren, bestehen daher in einer Reduktion des Verbrauchs von Energie und Rohstoffen und einer möglichst weitgehenden Elektrifizierung des Energiesektors. Mit den vorhandenen Flächenpotenzialen können in Baden-Württemberg bei ökologischer Wirtschaftsweise etwa 45 Prozent des heutigen Energiebedarfs und etwa ein Drittel des heutigen Rohstoffbedarfs gedeckt werden.

Die Ergebnisse belegen, dass eine vollständige Umstellung auf ökologische Landwirtschaft auch im dicht besiedelten Baden-Württemberg hohen Autonomiegraden in den Sektoren Nahrung und Rohstoffe nicht im Wege stehen muss. Voraussetzungen hierfür sind jedoch

- eine Ernährungsumstellung, die sich an gesundheitlichen und ökologischen Kriterien orientiert, und
- eine Reduktion des Rohstoffverbrauchs um rund zwei Drittel im Vergleich zum Jahr 2017.

Ermöglichen lässt sich die nötige Reduktion durch das Schließen von Rohstoffkreisläufen und eine Verlängerung der Nutzungsdauer von Konsumgütern.

Bei unveränderten Verbrauchsgewohnheiten ist in keinem Sektor ein hoher Gesamtautonomiegrad erreichbar, völlig unabhängig von der Prioritätensetzung bei der Flächennutzung. Letztlich kann das höchstmögliche Autonomiepotenzial nur erreicht werden, wenn der Verbrauch an die nachhaltig nutzbaren Potenziale angepasst und alle drei Sektoren aufeinander abgestimmt werden.

Wenn es gelingt, die Einsparpotenziale auf Seite der Verbraucher zu nutzen, ist es aber auch in einem dicht besiedelten Land wie Baden-Württemberg möglich, trotz einer Umstellung auf ökologische Landwirtschaft, erneuerbare Energien und nachwachsende Rohstoffe in allen drei Sektoren hohe Gesamtautonomiegrade zu erreichen und den globalen Landfußabdruck auf ein nachhaltiges Maß zu reduzieren.

Maßnahmen zur Steigerung der Flächeneffizienz

Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass es nicht möglich ist, mithilfe der untersuchten Maßnahmen zur Steigerung der Flächenproduktivität erhebliche Verbrauchseinsparungen in den Sektoren Nahrung, Energie und Rohstoffe überflüssig zu machen. Veränderungen der Verbrauchsgewohnheiten und Maßnahmen zur Steigerung der Nutzungseffizienz bieten in allen drei Sektoren ungleich größere Potenziale als die Summe aller Maßnahmen zur Steigerung der Flächenproduktivität.

Allerdings haben sich auch auf der Seite der Erzeugung einige Maßnahmen als besonders wirksam erwiesen, die flächenbezogene Autonomie der fünf Landkreise zu erhöhen. Im Energiesektor sind hier an erster Stelle die Freiflächenphotovoltaik und die Agrophotovoltaik zu nennen. Dem Erreichen hoher flächenbezogener Autonomiegrade sind sie jedoch erst dann zuträglich, wenn sie in Verbindung mit einer umfangreichen Elektrifizierung von Verkehr und Gebäudebeheizung zu einer Reduktion des Verbrauchs von flüssigen und gasförmigen Energieträgern beitragen. Da die Agrophotovoltaik das Nahrungsautonomiepotenzial reduziert, kann die flächenbezogene Gesamtautonomie ansonsten sogar trotz erhöhter Flächeneffizienz abnehmen. Die Effekte zeigen sich jedoch erst bei großen Anlagenflächen.

Für den Sektor Nahrung lassen sich folgende Ergebnisse festhalten:

- Die effiziente Nutzung des Grünlandes ist von großer Bedeutung für die Autonomiepotenziale, weshalb eine vegane Ernährung nicht zu den höchstmöglichen Autonomiegraden und dem geringsten globalen Landfußabdruck führen kann.
- Agroforstsysteme führen zu einer vorteilhaften Diversifizierung und positiven ökologischen Effekten. Ihre Auswirkungen auf die Flächeneffizienz sind unter heutigen Witterungsbedingungen sehr gering.
- Die urbane Landwirtschaft ohne Fischzucht besitzt trotz einer hohen Flächeneffizienz nur ein geringes Potenzial, die flächenbezogene Autonomie in zu erhöhen.
- Die Aquaponik wirkt sich dagegen als einzige Maßnahme in relevantem Umfang negativ auf die flächenbezogenen Autonomiepotenziale aus. Allerdings führt sie mit der Fischzucht vielerorts ein tierisches Produkt ganz neu ein. Dabei weist die urbane Nahrungsproduktion mit Blick auf die Effizienz von Wasser- und Düngemitteleinsatz sowie hinsichtlich der Vermeidung von Schadstoffen beachtliche Vorteile auf. Zu einer Steigerung der Flächeneffizienz leistet die Aquaponik dagegen keinen positiven Beitrag.

Grundsätzlich handelt es sich bei der Produktion von tierischen Nahrungsmitteln um Veredelungsprodukte, deren Konsum immer mit einem erhöhten Flächenaufwand verbunden ist. Es müssen daher ganz unterschiedliche Effekte urbaner Produktionssysteme gegeneinander abgewogen werden, weshalb eine allgemeine Bewertung der urbanen Landwirtschaft kaum möglich ist. Je geringer der Flächenbedarf für Ernährung und Energieversorgung ausfällt, desto größer sind allerdings die Möglichkeiten, zugunsten von Natur- und Tierschutz Einbußen bei der Flächeneffizienz hinzunehmen.

Für hohe Autonomiegrade und einen geringen Landfußabdruck des Rohstoffsektors ist auf Seite der Erzeugung vor allem die effiziente Nutzung von Koppelprodukten eine entscheidende Voraussetzung. Ermöglicht werden könnte dies nur durch eine wechselseitige Abstimmung verschiedener Branchen bei der Produktion ihrer Rohstoffe. Grundsätzlich bieten vor

allem mehrjährige Rohstoffpflanzen und Hanf erhebliche Potenziale, eine hohe Flächenproduktivität mit positiven ökologischen Effekten zu verbinden.

Herausforderungen

Eine der größten Herausforderungen besteht in der landkreis- und sektorenübergreifenden Abstimmung zwischen Forstwirtschaft, Landwirtschaft und urbaner Landwirtschaft. So weisen alle Landkreise die größten Defizite im Energiesektor auf, weshalb hier nur geringe Exportpotenziale erkennbar sind. Zugleich werden auch die höchsten Autonomiegrade jeweils in den gleichen Produktsegmenten erreicht, sodass selbst in den Landkreisen mit geringeren Autonomiepotenzialen nur wenig Bedarf besteht, die Überschüsse der anderen Landkreise abzunehmen. Dies betrifft vor allem Milchprodukte und forstwirtschaftlich erzeugte Rohstoffe für die stoffliche Nutzung. Dabei bestehen nur begrenzte Möglichkeiten, die Erzeugung hier noch besser an den Bedarf anzupassen. Eine solche Option besteht etwa darin, die Produktion von Milchprodukten und holzbasierten Konsumgütern zugunsten der Energiegewinnung zu reduzieren. Der Verzicht auf einen Teil der Milchviehhaltung geht jedoch erheblich zulasten der Nahrungsautonomie und des globalen Landfußabdrucks. Wie mit dieser Problematik umzugehen ist und ob hier marktwirtschaftliche oder planerische Instrumente zielführend sind, wäre durch weitere Forschung zu klären.

Die entwickelte Berechnungsmethodik bietet die Möglichkeit, die Effekte verschiedener Maßnahmen auf alle drei Sektoren gleichzeitig abzubilden. Jedoch sind die Effekte verschiedener Maßnahmen auf die einzelnen Sektoren bei einer Abwägung in Relation zu sehen. Beispielsweise führt die großflächig eingesetzte Agrophotovoltaik sowohl in Kombination mit Ackerbau als auch mit grünlandbasierter Milchviehhaltung zu erheblichen Einbußen bei der flächenbezogenen Nahrungsautonomie. Da die Ernährungssicherheit stets Vorrang hat, können kleinere Effekte hier unter Umständen schwerer wiegen als größere Autonomiezugewinne im Energiesektor.

Konkurrenz zwischen Energie- und Rohstoffproduktion

Das Energiepotenzial der erneuerbaren Energien ist insgesamt zu gering, um auf die Nutzung von Anbaubiomasse ohne Weiteres verzichten zu können. Zudem bietet sie mit unterschiedlichsten gut speicherbaren Energieträgern wichtige Alternativen in jenen Bereichen, die besonders schwierig zu elektrifizieren sind. Energiepflanzen der zweiten Generation haben außerdem mehrere positive Effekte auf den Schutz von Artenvielfalt, Böden und Gewässern. Die Nutzung von Koppelprodukten ist in vielen Fällen entscheidend bezüglich der Frage, ob eine Rohstoffpflanze (z. B. Raps) mit einer hohen Flächeneffizienz genutzt werden kann. Biogene Abfälle oder Reststoffe bieten für die Energiewende dennoch nur ein begrenztes Potenzial. Zum einen nimmt mit den Möglichkeiten der stofflichen Nutzung auch die Konkurrenz um so-

genannte Reststoffe zu, zum anderen ist ihr Aufkommen sehr heterogen und damit im Einzelfall eher gering. Ihre energetische Nutzung ist daher mit einem erhöhten Aufwand für Logistik und Anlagentechnik verbunden. Sie ist in vielen Fällen sinnvoll, kann aber einen Verzicht auf Energiepflanzen oder Freiflächenphotovoltaik nicht kompensieren.

Grundsätzlich bietet die Kreislaufwirtschaft im Rohstoffsektor größere Anpassungsspielräume als im Energiesektor insgesamt vorhanden sind.

Ökologische Kennwerte

Die vorgenommene Verknüpfung der Autonomiepotenzialberechnung mit flächenbezogenen ökologischen Kennwerten bietet die Möglichkeit, stets parallel die Effekte verschiedener Versorgungsysteme auf den Schutz von Artenvielfalt, Böden, Gewässer, Wasserhaushalt und Klima zu berechnen und direkt miteinander zu vergleichen. So zeigen vor allem mehrjährige Energie- und Rohstoffpflanzen der zweiten Generation erhebliche ökologische Vorteile. Die Kombination von mehrjährigen Blühpflanzen und Gräsern bietet die Möglichkeit, auch bei ökologischer Bewirtschaftung weiterhin hohe Biomasseerträge zu erzielen und zugleich Verbesserungen hinsichtlich der genannten Schutzgüter zu erreichen. Besonders deutlich sind diese mit Blick auf die mögliche Insektenweidepotenziale, die Reduktion von chemischen Pflanzenschutzmitteln und den Schutz vor Erosion aufgrund ganzjähriger Durchwurzelung.

9 Fazit

Bisher wurden bei der Umstellung auf erneuerbare Energien und nachwachsende Rohstoffe in Deutschland vorwiegend Maßnahmen ergriffen, die vorrangig auf einen Sektor zielten ohne die Interdependenzen zwischen den Sektoren zu berücksichtigen. Da die drei Sektoren Nahrung, Energie und Rohstoffe jedoch um die gleichen Produktionsflächen konkurrieren, rücken zunehmend Technologien in den Fokus, die diese Konkurrenzsituation entschärfen sollen, indem sie beispielsweise auf Gebäudedächer ausweichen (z. B. Dachgewächshäuser) oder eine hohe Flächeneffizienz durch Mehrfachnutzungen ermöglichen (z. B. Agrophotovoltaik). Bisher ist jedoch in den meisten Fällen unklar, wie sich solche Einzelmaßnahmen sektorenübergreifend in das Versorgungssystem einfügen und auf den globalen Landfußabdruck auswirken. Klimaschutz- und Energiekonzepte betrachten daher meist allein den Energiesektor und müssen mögliche Wechselwirkungen zwischen den Sektoren weitgehend unberücksichtigt lassen. Das einzig erprobte Mittel, um mögliche Flächenkonkurrenzen zu minimieren, ist bislang die Begrenzung der Energiepflanzenanbaufläche. Eine wechselseitige Abstimmung der drei Sektoren aufeinander ist bisher aber aufgrund mangelnder Datengrundlage kaum möglich.

Die mit dieser Arbeit vorgenommene Erhebung flächenbezogener Kennwerte, die viele Koppelprodukte und einen großen Teil der möglichen Nutzungspfade umfassen, ermöglicht sowohl die Simulation der Effekte von Einzelmaßnahmen auf die drei verschiedenen Sektoren Nahrung, Energie und Rohstoffe, als auch eine genauere sektorenübergreifende Berechnung möglicher Autonomiegrade und des globalen Landfußabdrucks. Durch die gleichzeitige Simulation der Effekte auf die verschiedenen Sektoren und den globalen Landfußabdruck wird eine zielgerichtete Abwägung der Vor- und Nachteile von Einzelmaßnahmen und komplexer Maßnahmenkombinationen möglich. Die sektorenübergreifende Simulation zeigt deutlich, dass die isolierte Betrachtung von Einzelmaßnahmen nur wenig Aufschluss darüber geben kann, wie sie sich auf die Gesamtautonomiegrade oder den globalen Landfußabdruck einer Region auswirken.

Sichtbar wird unter anderem, dass eine hohe Flächeneffizienz einer Technologie nicht unbedingt zu höheren Gesamtautonomiegraden führt. Dies ist vor allem darin begründet, dass Zugewinne und Verluste in den Sektoren Nahrung, Energie und Rohstoffen nicht eins zu eins miteinander verrechnet werden können. Dies zeigt sich auch mit Blick auf einzelne Produktsegmente innerhalb eines Sektors. Zudem sind ackerbaulich erzeugte Produkte einem erheblich größeren Konkurrenzdruck ausgesetzt als grünlandbasierte oder forstwirtschaftlich erzeugte Produkte. Tatsächlich kann eine höhere Flächeneffizienz deshalb in nicht wenigen Fällen sogar zu einem größeren globalen Landfußabdruck führen. Ähnliches lässt sich auch über Bestrebungen sagen, die darauf abzielen, möglichst in jedem Produktsegment hohe Autonomiegrade zu erreichen. Denn die Optimierung der eigenen Autonomie kann zu erheblichen

Einbußen bei der flächenbezogenen Gesamtautonomie und einem größeren globalen Landfußabdruck führen.

- Die Ergebnisse der Autonomiepotenzialberechnungen machen deutlich, dass die Unterscheidung von produktbezogener und flächenbezogener Autonomie von entscheidender Bedeutung ist. Daher ist es erforderlich, stets beide Kennwerte gemeinsam zu betrachten, um die Versorgungsautonomie einer Region beurteilen zu können. Eine getrennte Betrachtung kann erhebliche Versorgungsdefizite und eine unnötige Vergrößerung des globalen Landfußabdrucks zur Folge haben. Erst die gemeinsame Betrachtung beider Kennwerte, die zudem sowohl die einzelnen Sektoren wie auch die sektorenübergreifende Gesamtautonomie und den globalen Landfußabdruck in den Blick nimmt, ermöglicht eine realistische Einschätzung eines regionalen Versorgungssystems. Deshalb kann keiner dieser Kennwerte isoliert als Nachhaltigkeitsindikator genutzt werden. Um darüber hinaus auch die ökologische Nachhaltigkeit eines Versorgungssystems zu gewährleisten, hat sich die Verknüpfung mit flächenbezogenen ökologischen Kennwerten als sehr aussagekräftig erwiesen. Auch hierbei zeigt sich, dass Kompromisse in Form ausgewogener Maßnahmenkombinationen zu deutlich besseren Ergebnissen führen als die Fokussierung auf die vermeintlich besten Technologien.
- Die durchgeführten Simulationen zeigen zudem, dass die von Region zu Region unterschiedlichen Ertragspotenziale land- und forstwirtschaftlicher Nutzflächen stärker berücksichtigt werden müssen. Die geringen Autonomiegrade der betrachteten Landkreise fallen aufgrund der Tatsache, dass Süddeutschland überdurchschnittlich ertragreiche Produktionsflächen besitzt, besonders stark ins Gewicht. Zudem zeigt sich deutlich, dass in Deutschland kein Mangel an Flächen für die Nahrungsproduktion besteht, sondern allein die heutigen Konsumgewohnheiten, die sich nicht an gesundheitlichen oder ökologischen Kriterien orientieren, sowie der fortschreitende Flächenverbrauch zu der aktuell problematischen Flächenkonkurrenz unter den Sektoren führen.
- Würde die Ernährung an ökologischen und gesundheitlichen Kriterien ausgerichtet, wäre nicht nur eine vollständige Umstellung auf ökologische Wirtschaftsweise möglich. Eine solche Ernährungsumstellung könnte zudem Flächen für den Anbau von ökologisch verträglichen Energie- und Rohstoffpflanzen freisetzen und darüber hinaus auch noch einen wesentlichen Beitrag zur globalen Versorgungssicherheit ermöglichen. Dieser Beitrag könnte deutlich über die Vermeidung von kritischen Flächenimporten hinausgehen.
- Für eine realistische Berechnung nachhaltiger Autonomiepotenziale bedarf es allerdings

einer vergleichbaren Datengrundlage in jedem der drei Sektoren, die die Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte ermöglicht. Auf nationaler Ebene lässt sich der Flächenbedarf der Versorgung daher noch wesentlich genauer bestimmen als dies global möglich ist. Mit der vorliegenden Arbeit wurden jedoch wichtige Kennwerte ermittelt und eine Methodik entwickelt, die nicht nur den direkten Vergleich unterschiedlicher Flächennutzungssysteme ermöglicht, sondern auch die sektorenübergreifende Berechnung von Autonomiepotenzialen unterschiedlichster Szenarien unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen und Synergieeffekten. Diese Methodik ermöglicht mit einer verbesserten Datengrundlage auch noch höhere Genauigkeiten und lässt sich auch außerhalb Deutschlands anwenden. Vor allem lassen sich auf Basis des zusammengestellten Datenbestandes auch wichtige Stellschrauben identifizieren, die eine relevante Reduktion des Flächenbedarfs ermöglichen. Mithilfe der flächenbezogenen Kennwerte ist es zugleich möglich, Effekte unterschiedlicher Szenarien auf einige der wichtigsten ökologischen Schutzgüter zu vergleichen.

Mit Blick auf die Maßnahmen zeigen die Berechnungsergebnisse, dass auf Seite der Produktion von Nahrung, Energie und Rohstoffen nur wenige der vieldiskutierten neuen Technologien das Potenzial besitzen, die Gesamtautonomiegrade in Süddeutschland deutlich zu steigern und den globalen Landfußabdruck signifikant zu reduzieren. Entscheidend sind daher eine Anpassung des Verbrauchs an die Erzeugungspotenziale anhand von gesundheitlichen und ökologischen Kriterien sowie eine hohe Effizienz im Umgang mit Nahrungsmitteln, Energie und Rohstoffen. Erforderlich sind eine umfassende Ernährungsumstellung, die Minimierung der Nahrungsverschwendung, die Einführung einer echten Kreislaufwirtschaft und eine erhebliche Steigerung der Energieeffizienz einhergehend mit einer weitgehenden Elektrifizierung. Ohne diese Maßnahmen ist eine weitestgehend regenerative Versorgung mit Energie und Rohstoffen bei einer gleichzeitigen Reduktion des globalen Landfußabdrucks Baden-Württembergs auf ein nachhaltiges Maß nicht möglich. Müsste der heutige Verbrauch an Nahrung, Energie und Rohstoffen möglichst vollständig aus regenerativen Quellen gedeckt werden, würde der Landbedarf mit mindestens 1,6 Hektar pro Person die lokalen Flächenpotenziale um den Faktor 5,3 übersteigen

.

Anhang I: Dokumentation der Datenermittlung

10 Nahrung

10.1 Bedarf an Nahrungsmitteln

Der Kalorienbedarf eines Menschen ist abhängig von mehreren Faktoren. Entscheidend sind vor allem Alter, Geschlecht, Körpergröße, Gewicht und körperliche Aktivität. Wie viele Kalorien ein Mensch pro Tag benötigt, „variiert daher von Mensch zu Mensch und auch bei ein und demselben Menschen von Zeit zu Zeit sehr“ (DGE, 2015).

Als Grundlage für die vorliegende Bedarfsschätzung und die Berechnung möglicher Autonomiegrade wurden daher die Referenzwerte für die Nährstoffzufuhr genutzt, die die wissenschaftlichen Fachgesellschaften für Ernährung in Deutschland (DGE), Österreich (ÖGE) und der Schweiz (SGE) gemeinsam herausgeben. „Die Referenzwerte bilden die Basis der lebensmittelbezogenen Empfehlungen für eine vollwertige Ernährung“ (DGE, 2018c) für Gesunde. Die „Richtwerte für die durchschnittliche Energiezufuhr bei Personen unterschiedlichen Alters in Abhängigkeit vom Ruheenergieumsatz und der körperlichen Aktivität (PAL-Werte; PAL = *physical activity level*; Maß für die körperliche Aktivität)“ (DGE, 2018b), sind im Anhang II in Tabelle 451 dargestellt.

In Tabelle 84 ist der geschätzte Kalorienbedarf der Bevölkerung in Deutschland dargestellt, der anhand dieser Bedarfsreferenzwerte für Männer und Frauen und der Bevölkerungsstruktur im Jahr 2017 (Statistisches Bundesamt, 2019e) geschätzt wurde. Dabei wurde ein PAL-Wert von 1,6 als Durchschnittswert angenommen (vgl. Anhang II: Tabelle 451), welcher für einen eher bewegungsarmen Lebenswandel angegeben wird (sitzende Tätigkeit, zeitweilig auch zusätzlicher Energieaufwand für gehende und stehende Tätigkeiten, wenig oder keine anstrengende Freizeitaktivität) (vgl. 14.19.2). Auf dieser Basis ergibt sich für die Gesamtbevölkerung ein geschätzter Kalorienbedarf von ca. 2.240 kcal pro Person und Tag.

Tabelle 84: Kalorienbedarf in Deutschland nach Altersgruppe und Geschlecht bei PAL-Wert 1,6 (kcal/Tag)

Altersgruppe	Männer	Frauen	Insgesamt
unter 15	1.785	1.623	1.708
15 bis unter 19 Jahre	3.000	2.300	2.666
19 bis unter 25 Jahre	2.800	2.200	2.516
25 bis unter 51 Jahre	2.700	2.100	2.406
51 bis unter 65 Jahre	2.500	2.000	2.249
65 Jahre und älter	2.500	1.900	2.167
Insgesamt	**2.499**	**1.981**	**2.238**

Quellen: DGE, 2018c; Statistisches Bundesamt, 2019e

Zur Kontrolle wurden dementsprechende Schätzungen für Baden-Württemberg und ausgewählte Landkreise durchgeführt, für die sich in den meisten Fällen ebenfalls Werte von knapp 2.240 kcal pro Person und Tag ergaben. Lediglich in den Landkreisen Konstanz und Tübingen fiel der Bedarf ein wenig niedriger aus. Dabei handelte es sich um die einzigen beiden Landkreise, die einen Frauenanteil von über 51 Prozent aufwiesen.

Tabelle 85: Geschätzter Kalorienbedarf pro Person in Baden-Württemberg und ausgewählten Landkreisen des Landes im Jahr 2016 (kcal/Tag)

Region	Durchschnittsalter	Anteil Frauen an Bevölkerung	Kalorien pro Person und Tag
Baden-Württemberg	43,4	50,3%	2.238
LKR Bodenseekreis	44,6	50,7%	2.236
LKR Esslingen	43,6	50,1%	2.240
LKR Konstanz	43,5	51,2%	2.233
LKR Ravensburg	43,0	50,2%	2.239
LKR Sigmaringen	43,7	49,9%	2.240
LKR Tübingen	41,3	51,3%	2.233

Quellen: DGE, 2018; Statistisches Landesamt BW, 2019, Regionaldatenbank

Zum Vergleich: Die FAO schätzte den täglichen Kalorienbedarf (DES)[40] eines hypothetischen Landes im Jahr 2008 auf 2.414 kcal pro Person und Tag (FAO Statistics Division, 2008 S. 4). Bei internationalen Vergleichen ist zu berücksichtigen, dass das Durchschnittsalter der deutschen Bevölkerung mit mehr als 44 Jahren wesentlich über dem weltweiten Durchschnitt von ca. 31 Jahren liegt (Stand 2018), während der Anteil Bevölkerung, der z. B. in der Landwirtschaft schwerer körperlicher Arbeit nachgehen muss, deutlich unter dem globalen Vergleichswert liegt[41]. Weltweit bewegt sich nur jede vierte erwachsene Person zu wenig, in Deutschland liegt der Anteil unzureichend körperlich aktiver Erwachsener bei mehr als 42 Prozent (World Health Organisation, 2018). Dementsprechend ist davon auszugehen, dass der Kalorienbedarf in Deutschland unter dem globalen Durchschnittsbedarf liegt.

Schätzt man den tatsächlichen Kalorienverzehr in Deutschland über den Lebensmittelverzehr (vgl. Tabelle 87) und den Kaloriengehalt (vgl. Tabelle 88), erhält man einen Wert von rund 2.242 kcal pro Person und Tag (vgl. Tabelle 90). Dabei wurde von einem mittleren Fettgehalt von rotem Fleisch ausgegangen. Die tatsächliche Kalorienaufnahme ohne Berücksichtigung von Getränken entspräche damit fast genau dem anhand der durchschnittlichen Richtwerte geschätzten Bedarf. Auch wenn nach Clauß und Brombach (2014) kein proportionaler Zusammenhang zwischen einer erhöhten Kalorienaufnahme und Übergewicht besteht, (Clauß, et al.,

[40] Dietary Energy Supply per person (DES) auf Basis des Food Balance Sheet (FBS) (FAO Statistics Division, 2008, p. 4).

[41] Weltweit ist ein Drittel aller arbeitenden Menschen in der Landwirtschaft beschäftigt (Zukunftsstiftung Landwirtschaft, 2020). In Deutschland liegt der Anteil des Primären Sektors bei rund 1,4 Prozent.

2014), lässt der hohe Anteil von Erwachsenen, die in Deutschland unter Übergewicht leiden (im Jahr 2017 waren 59 Prozent der Männer und 37 Prozent der Frauen übergewichtig) (DGE, 2017), darauf schließen, dass der geschätzte Bedarf mit 2.240 kcal pro Person und Tag nicht zu niedrig angesetzt sein dürfte. Da die Anteile der Übergewichtigen und Fettleibigen in Deutschland deutlich über den internationalen Vergleichswerten liegen[42], ist auch nicht auszuschließen, dass der tatsächliche Bedarf aufgrund geringerer Aktivitätslevel im Durchschnitt der Gesamtbevölkerung ohne Getränke eher noch unterhalb des über den PAL-Wert 1,6 geschätzten Durchschnittsbedarfs liegt. Berücksichtigt werden muss schließlich nicht zuletzt, dass auch eine nicht unerhebliche Kalorienaufnahme mit dem Konsum der in der Statistik nicht erfassten alkoholischen Getränke und anderer Genussmittel erfolgt. So führte allein der Bierkonsum, der in Deutschland im Jahr 2015 105,9 Liter pro Person betrug (Deutscher Brauer-Bund e.V., 2016; BMEL, 2018, S. 202), potenziell zu einer Kalorienaufnahme von 72 bis 162 kcal pro Person und Tag[43]. Geht man im Mittel von ca. 100 kcal pro Person und Tag aus, wird der berechnete Orientierungswert für die Gesamtbevölkerung bereits um 4,5 Prozent überschritten. Der Weinverbrauch von rund 20,5 Litern pro Person (BMEL, 2018 S. 202) führte potenziell zu einer zusätzlichen Kalorienaufnahme von 37 bis 97 kcal pro Person und Tag[44]. Geht man im Mittel von ca. 80 kcal pro 100 ml Wein aus, führt dies zu einer potenziellen Kalorienaufnahme von 45 kcal pro Person und Tag, was etwa 2 Prozent des Orientierungswertes für die Gesamtbevölkerung entspricht. Hinzu kamen weitere alkoholische Getränke. Die jährliche Kalorienaufnahme kann folglich allein auf Grund des Verzehrs alkoholischer Getränke um mehr als 6,5 Prozent über dem berechneten Orientierungswert liegen. Somit ergäbe sich eine Kalorienaufnahme von ca. 2.388 kcal pro Person und Tag, womit der Verzehr etwa dem Bedarf der deutlich jüngeren und aktiveren Weltbevölkerung entspräche.

Auf dieser Datengrundlage wurde der auf Basis der Referenzwerte geschätzte Energiebedarf von 2.240 kcal pro Einwohner und Tag als ausreichende Grundlage für die folgenden Berechnungen eingeschätzt, da zudem ein „Sicherheitspuffer“ von mindestens 10 Prozent für wahrscheinliche Verluste berücksichtigt wurde.

10.2 Verbrauch und Verzehr

Der Verbrauch der wichtigen Lebensmittelgruppen betrug in Deutschland im Jahr 2015 ohne Getränke rund 687 kg pro Einwohner und Jahr. Davon entfielen 13 Prozent auf Fleisch und 18 Prozent auf Milchprodukte. Insgesamt haben tierische Produkte einen Anteil von 33 Prozent

[42] Mit 23,6 Prozent lag der Anteil der Erwachsenen mit Fettleibigkeit in Deutschland im Jahr 2015 um rund 22 Prozent über dem OECD-Durchschnitt von 19,4 Prozent. Als übergewichtig galten im Jahr 2015 weltweit rund 2,2 Mrd. Menschen, was einem Anteil von 30 Prozent entsprach. In Deutschland galt knapp die Hälfte der Bevölkerung als übergewichtig (DGE, 2017).

[43] Der Kaloriengehalt von Bier liegt, je nach Sorte, zwischen 25 und 56 kcal/100ml. (Yazio GmbH, 2017-2019)

[44] Je nach Sorte enthält Wein ca. 65 bis 160 kcal/100ml und mehr (Yazio GmbH, 2017-2019)

am Gesamtverbrauch. Unter den pflanzlichen Lebensmitteln haben Getreideprodukte (inkl. Brot und Backwaren) mit über 17 Prozent, Obst mit 15 Prozent, Gemüse mit 14 Prozent und Kartoffeln mit 10 Prozent die größten Anteile am Gesamtverbrauch. Die sonstigen pflanzlichen Lebensmittel haben zusammen einen Anteil von 9 Prozent. (BMEL, 2018 S. 146-147)

Tatsächlich verzehrt werden deutlich geringere Lebensmittelmengen. Da durch das BMEL nicht für alle Lebensmittelgruppen jährlich Daten zum Verzehr erhoben werden, wurde in den übrigen Fällen auf Daten der Nationalen Verzehrsstudie II aus dem Jahr 2008 zurückgegriffen. Die für die Schätzung des Verzehrs genutzten Daten sind in Tabelle 86 dargestellt. Anhand der vorliegenden Daten zeigt sich, dass die Differenzen zwischen Verbrauch und Verzehr je nach Lebensmittelgruppe sehr unterschiedlich sind. Milchprodukte (Käse, Joghurt, Quark etc.) werden nur zu rund 69 Prozent des Verbrauchs verzehrt. Besonders groß ist die Differenz zwischen Verbrauch und Verzehr im Fall der Kartoffel. Mit 25,2 kg/Ea werden nur rund 37 Prozent des Verbrauchs verzehrt. Der Fleischverzehr von Männern und Frauen betrug im Jahr 2014 nach Angaben des BMEL rund 153 g/Tag bzw. 89 g/Tag (BMEL, 2018 S. 152). Im Mittel entspricht das bezogen auf die Gesamtbevölkerung rund 44 kg pro Jahr und damit lediglich 49 Prozent des Fleischverbrauchs, der 89,7 kg/Ea beträgt. Deutlich höher lag der Fleischverzehr nach Angaben des Bundesverbandes der Deutschen Fleischwarenindustrie, der für das Jahr 2015 einen Wert von 61,1 kg pro Person angibt (BVDF, 2018). Dies entspricht in der Größenordnung den Angaben der BLE, die einen Wert von 60 kg pro Person für das Jahr 2016 angibt (BLE, 2017a).

Die Angaben von BVDF und BLE beziehen sich auf die offizielle Agrarstatistik. „Die Daten der Agrarstatistik umfassen die für den Verbrauch zur Verfügung stehende Menge (beruhen auf Produktionszahlen). In Verzehrsstudien wie der Nationalen Verzehrsstudie II werden die von den Teilnehmern tatsächlich verzehrten Mengen erfasst (verzehrsfertig, fertig zubereitet).“ (Heuer, 2018b)

Der Unterschied kann sich nach Heuer aus mehreren Aspekten ergeben, wie z. B.:

- nicht mehr aktuelle Umrechnungsfaktoren von Verbrauch zu Verzehr sowie für die zu Grunde liegenden Statistiken (bspw. sind in der Agrarstatistik Importe und Exporte einbezogen, deren Mengen oft nur ungenau erfassbar sind)
- nicht in die Statistik eingerechnete Mengenverluste wie z.B. (Wasser)-Gewichtsverluste beim Erhitzen, Trocknen (Salami) oder in Form von Abfall
- auch eine gewisse Unterschätzung bei der Angabe des Fleischverzehrs ist möglich, bspw. werden als „ungesund“ angesehene Lebensmittel von den Befragten möglicherweise in geringerer Menge angegeben als sie tatsächlich verzehrt wurden.

Mit den Datenlücken und den Berechnungsfaktoren befasst sich ein Projekt des Thünen-Instituts, mit dem Ziel, künftig eine bessere Grundlage für die Agrarstatistik zu erhalten. (Heuer, 2018b)

Bis auf Weiteres muss man davon ausgehen, dass eine Menge in einer Größenordnung zwischen einem Drittel und der Hälfte der verbrauchten Fleischmenge nicht verzehrt wird. Im Folgenden wurde daher vom Mittelwert beider Erhebungen ausgegangen, welcher 52,6 kg pro Person und Jahr entspricht. Die verbleibenden 41 Prozent des Fleischverbrauchs umfassen Futter, industrielle Verwertung und Verluste einschließlich Knochen (BVDF, 2018). Wie der Vergleich von Daten aus den Jahren 2005 bis 2007 mit Daten aus dem Jahr 2017 in Tabelle 86 zeigt, ist der Verzehr über einen Zeitraum von mehr als 10 Jahren bis heute sehr konstant geblieben.

Relativ große Unterschiede zwischen den Verbrauchs- und Verzehrangaben sind auch beim Zucker zu verzeichnen. „Im Durchschnitt nehmen Männer täglich 78g und Frauen 61g „freie Zucker“ auf. Damit tragen „freie Zucker“ umgerechnet 13,0% (Männer) bzw. 13,9% (Frauen) zur Energiezufuhr bei.“ (Heuer, 2018a) Dies entspricht einem durchschnittlichen Verzehr von 25,4 kg pro Einwohner und Jahr. Unter freiem Zucker versteht man Zucker, den ein Lebensmittel nicht von Natur aus enthält, sondern der ihm vom Hersteller, Koch oder Verbraucher beigefügt wird. „Die wichtigsten Quellen für „freie Zucker“ sind Süßwaren (36%), Fruchtsäfte und Nektare (26%), Backwaren (14%) und Limonaden (12%)“ (Heuer, 2018a). Demnach werden nur rund drei Viertel des Zuckerverbrauchs tatsächlich verzehrt. Verluste entstehen beispielsweise im Zuge der Verschwendung von Backwaren. Nach Angaben des WWF waren in Deutschland im Jahr 2015 mit 1,7 Millionen Tonnen rund 38 Prozent der produzierten Backwaren als Verluste zu verzeichnen (WWF, 2020). Für Nüsse und Kerne wird für den Zeitraum 2015-2016 ein Verbrauch von ca. 3,7 kg/Ea (ohne Schalen) angeben[45] (International Nut and Dried Fruit Council, 2018 S. 15-53). Der Verbrauch ist damit gegenüber dem Jahr 2008 um ca. 52 Prozent gestiegen [46] (International Nut and Dried Fruit Council, 2013 S. 13-49). Der Verzehr von Nüssen und Samen lag nach der Nationalen Verzehrstudie II des MRI aus dem Jahr 2008 bei ca. 1,3 kg/Ea (MRI, 2008). Davon lassen sich Verluste von ca. 49 des Verbrauchs ableiten. Sofern der Verzehr dem Verbrauch entsprechend zugenommen hat, dürfte er im Zeitraum 2015-2016 bei ca. 1,9 kg/Ea gelegen haben.

Der Fischfleischverbrauch lässt sich nicht genau beziffern, da der Verbrauch lediglich nach Fanggewicht angegeben wird (BMEL, 2018 S. 149). Daher wurde der Filetverbrauch anhand durchschnittlicher Filetausbeuten der beliebtesten Speisefische geschätzt. Die Filetausbeute

[45] Kerngewicht ohne Schale. Erfasst wurde der Verbrauch von Mandeln, Paranüssen, Cashews, Haselnüssen, Macadamia-Nüssen, Pekannüssen, Walnüssen, Erdnüssen, Pinienkernen und Pistazien.

[46] Für das Jahr 2008 lagen keine Zahlen zum Verbrauch von Pistazien vor, weshalb die Veränderung zwischen 2008 und 2016 auf Basis der übrigen Daten ohne Pistazien berechnet wurde.

der neun Speisefische, die zusammen einen Marktanteil von rund 80 Prozent haben [47], wurde auf ca. 54 Prozent geschätzt [48] (vgl. Chefs Resources Inc., 2017), womit sich bei einem verbrauchten Fanggewicht von 13,5 kg/Ea ein wahrscheinlicher Filetverbrauch von rund 7,3 kg/Ea ergibt.

Tabelle 86: Verzehr wichtiger Lebensmittelgruppen in Deutschland (kg pro Person und Jahr)

Quelle	MRI, 2008	BMEL, 2018	BVDF, 2018	BLE, 2017	Heuer, 2018
Bezugsjahr	2005 – 2007	2014	2015	2016	2005 – 2007
Einheit	Kilogramm pro Einwohner und Jahr				
Fleisch, gesamt	44,3	44,2	61,1	60	
Fisch	9,5	7,1			
Milch	41,8	53,1			
Joghurt, Quark, etc.	29,7	-			
Käse und Quark	-	17,9			
Käse	15,3	-			
Butter/Tierische Fette	4,7	4,9			
Eier	6,9	-			
Gemüse	84,9	-			
Gemüse, Pilze, Hülsenfrüchte	-	50,9			
Obst	92,7	52,9			
Saft/Nektar	91,6	-			
Getreide, Reis	29,0	25,6			
Brot	57,3	48,5			
Backwaren	14,4	23,5			
Reis, roh	-	-			
Kartoffeln	29,6	25,2			
Hülsenfrüchte	-	-			
Tofu	-	-			
Nüsse & Samen	1,3	-			
Pflanzliche Öle & Fette	3,3	4,0			
Süße Aufstriche	6,6	-			
Honig					
Süßwaren	10,4	20,1			
Zucker					25,4

Quellen: Heuer, 2018a; BLE, 2017; BMEL, 2018; BVDF, 2018; MRI, 2008;

[47] Lachs, Alaska-Seelachs, Hering, Thunfisch, Forelle, Kabeljau, Pengasius, Seelachs, Rotbarsch (Statista, 2017b)

[48] Die Filetausbeuten der einzelnen Speisefische wurden nach den Anteilen der Fischarten am Verbrauch gewichtet.

In der Lebensmittelgruppe „Pflanzliche Fette“ wurde durch MRI und BMEL nur Margarine (z. B. Halbfettmargarine, Margarine mit Olivenöl) erfasst (MRI, 2008 S. 175). Zum Verzehr sonstiger pflanzlicher Öle (z. B. Olivenöl, Rapsöl, Leinöl) liegen keine Daten vor. Als Vergleichswert wurde daher die Differenz zwischen Butterverbrauch und Butterverzehr herangezogen, die bei rund 18 Prozent liegt. Da die meisten pflanzlichen Öle im Vergleich zu Butter eine höhere Haltbarkeit aufweisen und in ungeöffneten Flaschen länger gelagert werden können, wurden die Verluste auf 10 Prozent geschätzt. Eine hohe Haltbarkeit weisen auch die übrigen Lebensmittelgruppen Reis, Hülsenfrüchte (z. B. Linsen) und Honig auf, zu denen ebenfalls keine Daten zum Verzehr vorliegen. Aufgrund ihrer geringen Verderblichkeit wurde auch in diesen Fällen von geringen Verlusten von 10 Prozent ausgegangen. Der Reisverzehr wurde auf Basis dieser Annahme vom Getreideverzehr getrennt erfasst. Insgesamt haben diese vergleichsweise haltbaren Lebensmittel (Öle, Reis, Hülsenfrüchte, Honig) mit 22 kg nur einen Anteil von 3,2 Prozent am Gesamtverbrauch, weshalb der Einfluss ihrer geschätzten Verlustquoten auf die Gesamtverlustquote gering ist.

Tabelle 87: Lebensmittelverzehr und geschätzte Verluste

Lebensmittel	Verbrauch (kg/Ea)	Verzehr (kg/Ea)	Differenz absolut	Differenz relativ
Fleisch, gesamt	[1)] 89,4	[1) 4)] 52,6	36,8	41%
Fisch	[11)] 13,5 (7,3)	[1)] 7,1	0,2	3%
Milch	[1)] 54,0	[1)] 53,1	0,9	2%
Joghurt, Quark, etc.	[1)] 40,9	29,7	11,2	27%
Käse	[1)] 24,6	15,3	9,3	38%
Butter	[1)] 6,0	[1)] 4,9	1,1	18%
Eier	[1)] 14,5	[1)] 6,9	7,6	52%
Gemüse	[1)] 97,1	[1)] 83,9	13,2	14%
Obst	[1)] 102,7	[1)] 92,7	10,0	10%
Getreide	[8)] 23,3	[7)] 21,0	2,3	10%
Brot, Backwaren	[3)] 92,8	[1)] 72,1	20,7	22%
Reis, roh	[1)] 5,1	[6)] 4,6	0,5	10%
Kartoffeln	[1)] 68,6	[1)] 25,2	43,4	63%
Hülsenfrüchte	[1)] 1,1	[10)] 1,0	0,1	10%
Nüsse & Samen	[2)] 3,7	[9)] 1,8	1,8	49%
Pflanzliche Öle & Fette	[1)] 14,6	[10)] 13,1	1,5	10%
Honig	[1)] 1,1	[10)] 1,0	0,1	10%
Zucker	[1)] 34,0	[5)] 25,4	8,6	25%
SUMME	**686,9**	**512,2**	**169,3**	**25%**

Quellen: (1) BMEL, 2018; (2) International Nut and Dried Fruit Council, 2018; (3) Geschätzt nach WWF, 2018; (4) MRI, 2008 (5) Heuer, 2018a (6) Schätzung (7) Verzehr nach BMEL, 2018, S. 152, abzüglich des geschätzten Reisverzehrs; (8) Verbrauch geschätzt auf Basis der Verzehrsangaben nach BMEL, 2018, bei angenommenen Verlusten von 10 Prozent; (9) Schätzung nach MRI, 2008, und International Nut and Dried Fruit Council, 2013, 2018; (10) Aufgrund fehlender Daten musste der Verzehr dieser Lebensmittel geringer Verderblichkeit geschätzt werden. (11) Verbraucht werden nach BMEL, 2018, 13,5 Kilogramm Fisch pro Einwohner. Bei einer geschätzten Filetausbeute von ca. 54 Prozent ergibt sich ein Fischfleischverbrauch von rund 7,3 kg/Ea

Insgesamt ergibt sich zwischen Verbrauch und Verzehr auf Basis dieser Datengrundlage eine Gesamtdifferenz von 25 Prozent. Diese Verluste umfassen jedoch auch Anteile, die in der Verbrauchsstatistik enthalten sind, aber nicht zum Verzehr geeignet sind, wie z. B. Gemüseschalen, Kerne von Kernobst und ähnliches. Die größten absoluten Differenzen sind in den Lebensmittelgruppen Kartoffeln/Kartoffelprodukte, Fleisch, Milchprodukte und Brot/Backwaren zu verzeichnen. Zusammen haben ihre Verluste Anteile von 18 Prozent am Gesamtverbrauch und 70 Prozent an den Gesamtverlusten (vgl. Tabelle 87). Die im Vergleich zu Fleisch geringen Verluste, die sich aus der Schätzung für den Fischfiletverbrauch ergeben, erscheinen eher unwahrscheinlich und sollten künftig genauer untersucht werden. Allerdings würden hier um einige Prozentpunkte höhere Verluste sich nur geringfügig auf die Gesamtbilanz des Nahrungssektors auswirken.

Ein großer Teil der Nahrungsmittelverluste wird als Futter, als industrieller Rohstoff oder als Substrat für Biogasanlagen verwendet. Der Nutzen dieser verschiedenen Verwendungen ist jedoch nicht bei allen Lebensmittelgruppen gleichwertig, weil für ihre Kompensation ein unterschiedlicher Flächenbedarf entsteht.

10.3 Ernährungsweisen

Der Nahrungsmittelbedarf und der damit verbundene Produktionsflächenbedarf in Deutschland hängen neben der Produktionsweise (konventionell oder ökologisch) und der effizienten Nutzung der produzierten Nahrungsmittel entscheidend von der Ernährungsweise ab.

Verglichen wurden deshalb der heutige Verbrauch und der heutige Verzehr (Stand 2015) mit den Ernährungsempfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Ernährung (DGE, 2018a) und der Österreichischen Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit (AGES, 2017) für eine ausgewogene Mischkosternährung sowie den Empfehlungen des Vegetarierbundes Deutschland e. V. für vegetarische und vegane Ernährung (VEBU, 2017a; VEBU, 2017b). Verwendet wurden dabei jeweils die Mittelwerte der in den Empfehlungen angegebenen Spannen. Anschließend wurden die so erhaltenen Lebensmittelmengen proportional angepasst, um mit jeder der verglichenen Ernährungsempfehlungen den täglichen Kalorienbedarf von 2.240 kcal pro Person abzudecken. Berücksichtigt wurden dabei außer Reis keine Nahrungspflanzen, die in Deutschland bisher nicht im Freilandanbau genutzt werden.

Für die Schätzung der mit den Empfehlungen verbundenen Kalorien wurden die in Tabelle 88 dargestellten Kaloriengehalte angenommen, die aktuellen Kalorientabellen entnommen wurden (vgl. Fddb Internetportale GmbH, 2017; Yazio GmbH, 2017; Sun Sirius GmbH, 2017). Für Algen wird je nach Produkt eine große Spanne von 26 kcal [49] bis 376 kcal [50] pro 100g und

[49] Meeresalgen, roh, frisch (n. Fddb, 2017)
[50] Spirulina Chlorella Algen Kapseln

mehr angegeben. Gewählt wurde daher mit getrockneten Nori-Algen ein Algenprodukt, das sich mit 188 kcal/100g im mittleren Bereich dieser Spanne bewegt (Fddb, 2018). Da die Empfehlungen keine Verzehrsangaben zu den einzelnen Lebensmitteln innerhalb der größeren Lebensmittelgruppen enthalten, wurden innerhalb der Gruppen Fleisch, Gemüse und Obst Mittelwerte gebildet. Dabei wurden die verschiedenen Lebensmittel innerhalb der Gruppen zu gleichen Anteilen am Gesamtgewicht berücksichtigt. Für Käse wurde ein mittlerer Kaloriengehalt von 350 kcal/100g angenommen, der für beliebte Schnittkäsesorten typisch ist. (Die Spanne der verschiedenen Käsesorten reicht von ca. 100 bis rund 500 kcal pro 100g.)

Die an den Kalorienbedarf angepassten empfohlenen Bedarfsmengen sind in Tabelle 89 neben dem heutigen Verbrauch und dem heutigen Verzehr im Vergleich dargestellt. Je nach Ernährungsweise beträgt der empfohlene Lebensmittelverbrauch pro Person zwischen 547 und 706 kg pro Jahr, wenn man von Verlusten von 7,5 (5 bis 10) Prozent ausgeht. Im direkten Vergleich werden große Unterschiede zwischen den Empfehlungen und dem tatsächlichen Verzehr deutlich. So werden in Deutschland heute mehr Lebensmittel mit höherer Kaloriendichte verzehrt, als aus ernährungswissenschaftlicher Sicht empfohlen wird.

Tabelle 88: Mittlerer Kaloriengehalt wichtiger Lebensmittelgruppen

Lebensmittelgruppe	kcal/100g
Fleisch, weiß	160
Fleisch, rot	230
Fisch	140
Milch*	55 (46-64)
Joghurt, Quark, etc.	62
Käse	350
Eier	161
Gemüse	27
Obst	62
Saft	40
Getreide	350
Brot, Backwaren	225
Reis, roh	311
Kartoffeln	70
Hülsenfrüchte	84
Tofu	144
Nüsse & Samen	640
Pflanzliche Öle/Fette	840
Honig	287
Marmelade	250
Zucker	409
Meeresalgen	188

* In Deutschland liegen der Verbrauch von teilentrahmter Milch und Vollmilch auf einem ähnlichen Niveau
Quellen: Yazio GmbH, 2017; Sun Sirius GmbH, 2018; Fddb Internetportale GmbH, 2017;

Tabelle 89: Verbrauch und Verzehr nach Ernährungsweise (kg/Ea)

	Verbrauch 2015 (BMEL, 2017)	Verzehr 2015 (BMEL/MRI)	Verzehr vegetar. n. VEBU	Verzehr vegan n. VEBU	Verzehr Misch-kost n. AGES, 2017	Verzehr Misch-kost n. DGE, 2018
Fleisch, gesamt	89,7	52,6 [1)]			19,1	25,8
Fleisch, weiß	20,1	11,8			14,2	**12,9
Fleisch, rot	69,6	40,8			4,9	**12,9
Fisch	*13,5	7,1			7,6	6,6
Milch	54,0	53,1	46,2		14,2	35,9
Joghurt, Quark, etc.	40,9	29,7			62,1	49,4
Käse	24,5	15,3	9,2		17,7	22,0
Butter	6,0	4,9				4,5
Eier	14,5	6,9	3,4		8,2	9,3
Gemüse	97,1	83,9	221,9	140,8	266,1	140,4
Obst	102,7	92,7	110,9	105,6	106,5	100,2
Saft		*0,0				
Getreide	23,3	21,0	57,3	68,6	60,3	22,0
Brot, Backwaren	92,8	72,1	19,2	40,5	21,3	80,1
Reis, roh	5,1	4,6 [3)]	30,3	28,2	19,9	11,0
Kartoffeln	68,6	25,2	103,5	88,0	95,8	90,2
Hülsenfrüchte	1,1	1,0	38,8	42,2	21,9	19,9
Tofu			19,2	35,2		
Nüsse & Samen	3,7	1,9	16,9	15,8	8,9	10,0
Pflanzl. Öle/Fette	14,6	13,1 [4)]	5,5	5,3	5,3	9,5
Honig	1,1	1,0 [3)]				
Marmelade						
Zucker	34,0	25,4 [2)]				
Meeresalgen				1,1		
SUMME	**687,9**	**511,7**	**682,6**	**570,0**	**734,9**	**636,8**

* Fanggewicht
** Der Verzehr von Saft und Nektar wird von MRI (2008) mit rund 92 kg pro Jahr angegeben. Der Kaloriengehalt von Saft, Nektar und Limonaden geht vor allem auf den Zuckergehalt zurück, der jedoch in der Kategorie Zucker erfasst ist. Um eine Doppelwertung zu vermeiden, wurden hier keine Werte für den Getränkekonsum angegeben.
*** Da keine differenzierten Angaben zum Verzehr von rotem und weißem Fleisch gemacht werden, wurden jeweils Anteile von 50 Prozent angenommen.

Quellen: BMEL, 2017; MRI, 2008; VEBU, 2017a; VEBU, 2017b; AGES, 2017; DGE, 2018a
Ergänzende Quellen: (1) BVDF, 2018; BMEL, 2017; MRI, 2008; (2) Heuer, 2018; (3) Schätzwert (90% des Verbrauchs), da keine Angaben vorhanden; (4) Schätzwert, da die Verzehrsangabe deutlich mehr als 50 Prozent vom Verbrauch abweicht und nicht plausibel erscheint.

Vergleicht man den Mittelwert der Empfehlungen von DGE (2018a) und AGES (2017) mit dem durchschnittlichen Verzehr in Deutschland, werden die größten Reduktionen für den Verzehr von Fleisch (- 57 Prozent), Pflanzliche Öle/Fette (- 43 Prozent), Brot/Backwaren (- 29 Prozent), empfohlen. Auf Rohr- und Rübenzucker wird in allen Empfehlungen nahezu vollständig ver-

zichtet. Für Milch und Milchprodukte (inkl. Käse) weichen die empfohlenen Mengen nur geringfügig vom heutigen Verzehr ab. Der Verzehr der Lebensmittelgruppen Hülsenfrüchte (Faktor 21,2), Kartoffeln (Faktor 3,7), Nüsse & Samen (Faktor 3,2), Gemüse (Faktor 2,4) und Getreide (Faktor 2,0) soll dagegen nach den Empfehlungen um ein Mehrfaches gesteigert werden. Für fleischlose Ernährung empfiehlt der VEBU im Vergleich zum bisherigen Durchschnittsverzehr einen deutlich höheren Verzehr von Hülsenfrüchten, Gemüse und Nüssen. Nach Angaben des VEBU ist bei einer fleischlosen Ernährung zudem der Verzehr größerer Mengen Tofu zu empfehlen. Tofu hat einen hohen Eiweißgehalt und gilt als vergleichsweise reich an Eisen.

Der auf Basis der dargestellten Daten berechnete Kalorienbedarf je nach Ernährungsempfehlung im Vergleich zu den aktuellen Verbrauchs- und Verzehrsmengen ist in Tabelle 90 dargestellt. Die über die Angaben zum Verzehr abgeschätzte Kalorienaufnahme im Jahr 2015 entspricht dem empfohlenen Verzehr von rund 2.240 kcal unerwartet genau. Angesichts der hohen Zahl von Menschen mit Übergewicht muss die Richtigkeit dieser Übereinstimmung jedoch bezweifelt werden. Der Lebensmittelverbrauch übersteigt die Verzehrsempfehlungen um 836 kcal/Tag. Dies entspricht 27 Prozent des Gesamtverbrauchs und 37 Prozent des ernährungswissenschaftlich berechneten Tagesbedarfs (bezogen auf den Durchschnitt der Gesamtbevölkerung). Würden die vermeidbaren Verluste minimiert, könnten in Deutschland dementsprechend deutlich mehr Menschen ernährt werden.

Berücksichtigt man neben den dargestellten Lebensmitteln auch die alkoholischen Getränke Wein, Sekt und Bier, so steigt der der Kalorienverbrauch auf ca. 3.205 kcal/Tag und der Verzehr auf ca. 2.400 kcal/Tag. Hinzu kommen weitere nicht berücksichtigte Nischenprodukte und Getränke[51]. Der heutige Kalorienverbrauch liegt damit um mindestens 43 Prozent über dem geschätzten Energiebedarf von 2.240 kcal pro Einwohner und Tag und die geschätzte Kalorienaufnahme beträgt möglichweise mehr als 107 Prozent des geschätzten Energiebedarfs. Nicht auszuschließen ist aber auch ein höheres Ausmaß von Verlusten und Verschwendung.

[51] Mit dem Verzehr freier Zucker sind nur Getränke erfasst, denen freie Zucker zugefügt werden.

Tabelle 90: Jährlicher Kalorienverbrauch nach Ernährungsweise ohne alkoholische Getränke (kcal/Ea)

	BMEL, Verbrauch 2015	BMEL/MRI Verzehr 2015	VEBU, Bedarf vegetar.	VEBU, Bedarf vegan	AGES (2017), Bedarf	DGE (2018), Bedarf
Fleisch, weiß	40.200	23.664	0	0	28.463	20.607
Fleisch, rot	159.390	93.824	0	0	11.180	29.623
Fisch	10.220	9.965	0	0	10.616	9.216
Milch	29.970	29.475	25.656	0	7.877	19.938
Joghurt, Quark	25.358	18.443	0	0	38.500	30.629
Käse	85.750	53.655	32.359	0	62.097	77.134
Eier	23.345	11.165	5.514	0	13.226	14.976
Gemüse	26.217	22.646	59.911	38.003	71.855	37.895
Obst	63.674	57.480	68.786	65.450	66.000	62.108
Getreide	81.511	73.360	200.626	240.159	211.130	77.134
Brot, Backwaren	208.772	162.197	43.269	91.049	47.903	180.314
Reis, roh	15.861	14.275	94.311	87.548	61.799	34.142
Kartoffeln	48.020	17.630	72.484	61.579	67.065	63.110
Hülsenfrüchte	924	832	32.618	35.470	18.394	16.738
Tofu	0	0	27.692	50.671	0	0
Nüsse & Samen	23.680	12.264	107.928	101.342	56.774	64.112
Pflanzliche Öle/Fette	122.640	110.376	46.597	44.337	44.710	79.882
Honig	3.157	2.841	0	0	0	0
Marmelade	0	0	0	0	0	0
Zucker	139.060	103.753	0	0	0	0
Meeresalgen	0	0	0	1.985	0	0
SUMME	**1.107.750**	**818.380**	**817.750**	**817.594**	**817.591**	**817.558**
Pro Tag	**3.035**	**2.271**	**2.240**	**2.240**	**2.240**	**2.240**

Quelle: Eigene Berechnung

An den aufgeführten Nahrungsmitteln ohne Getränke haben tierische Lebensmittel heute einen Anteil von 34 Prozent am gesamten Kalorienverbrauch, tragen aber beim Kalorienverzehr nur rund 29 Prozent zur Ernährung bei. Je nach Ernährungsempfehlung sollte ihr Anteil allerdings nicht mehr als 25 Prozent betragen. Bei einer vollwertigen Mischkosternährung wird ein Anteil von 19 bis 25 Prozent empfohlen, bei vegetarischer Ernährung ein Anteil von 7 Prozent (vgl. Tabelle 91).

Tabelle 91: Anteil tierischer und pflanzlicher Lebensmittel am Kalorienverbrauch nach Ernährungsweise

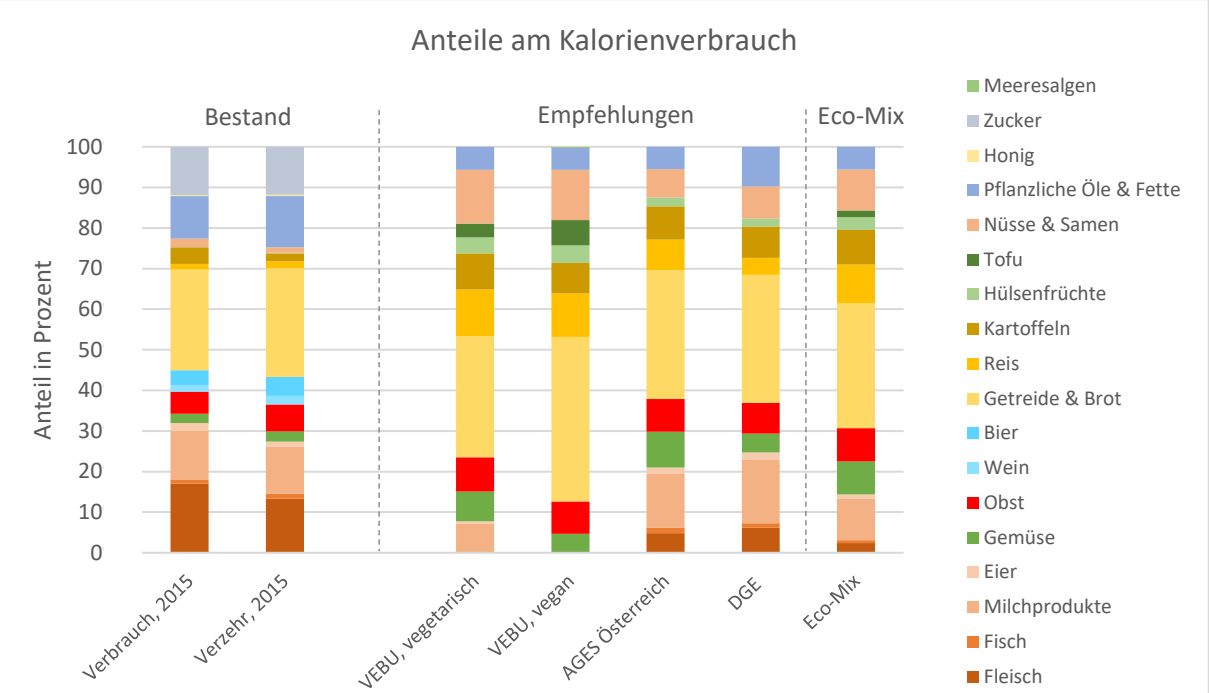
Produktgruppe	Bestand		Empfehlungen			
	Verbrauch 2015	Verzehr 2015	VEBU vegetar.	VEBU vegan	AGES (2017)	DGE (2018)
Tierische Produkte	34%	29%	8%	0%	21%	25%
Pflanzliche Produkte	66%	71%	92%	100%	79%	75%

Quelle: Eigene Berechnung

Über die allgemeinen Ernährungsempfehlungen hinausgehend gab die DGE im Jahr 2008 eine Studie zu den Kosten einer vollwertigen Ernährung heraus, die einen detaillierten Warenkorb für eine gesunde Mischkosternährung beinhaltet. Proportional an einen Kalorienbedarf von 2.240 kcal/Tag angepasst, ergibt sich bei dem Warenkorb ein Bedarf von rund 572 kg Lebensmitteln (Karg, et al., 2008 S. 12-13). Bei der Schätzung der daraus folgenden Kalorienaufnahme ergab sich ein Anteil tierischer Lebensmittel von rund 19 Prozent.

Vergleicht man den Mittelwert der Verzehrsempfehlungen von AGES (2017) und DGE (2018), so liegt der empfohlene Fleischverzehr um rund 75 Prozent unter dem heutigen Verbrauch und um rund 57 Prozent unter dem heutigen Verzehr (Stand: 2015). Geht man von unvermeidbaren Verlusten von 5 bis 10 Prozent des Verzehrs aus, könnte der Bedarf damit theoretisch auf ein Viertel des heutigen Verbrauchs gesenkt werden. Dies entspräche rund 22 kg/Ea.

Soll der Konsum tierischer Produkte aus ökologischen Gründen weiter gesenkt werden, ließe sich beispielsweise ein Mittelwert zwischen den Empfehlungen nach AGES für eine gesunde Mischkost und eine vegetarische Ernährung nach VEBU anstreben. Bei der sich daraus ergebenden Ernährungsweise, hier als „Eco-Mix“ bezeichnet, würden tierische Produkte noch rund 14 Prozent zur Kalorienaufnahme beitragen. Der Fleischverbrauch würde auf knapp 10 Kilogramm pro Person und Jahr reduziert.



Quellen: Eigene Berechnung nach AGES, 2018; BMEL, 2017; BMEL, 2019; Heuer, 2018a; INC, 2018; DGE, 2018a; VEBU, 2017a; VEBU, 2017b
Grafik: Eigene Darstellung

Abbildung 113: Anteile der Lebensmittelgruppen an Kalorienverbrauch und Kalorienverzehr nach Ernährungsweise

10.4 Verluste und Verschwendung

Die Gründe für die Differenz zwischen Verbrauch und Verzehr sind zwar vielfältig, doch hat Verschwendung einen großen Anteil daran. Nach einer Schätzung der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO) werden in der industrialisierten Welt deutlich mehr Lebensmittel vergeudet als in Entwicklungsländern: Gustavsson et al. (2011) zufolge beträgt die Lebensmittelverschwendung durch Verbraucher in Europa und Nordamerika rund 95 bis 115 kg/Ea, während man im subsaharischen Afrika und Süd-/Südostasien nur von 6 bis 11 kg/Ea ausgeht. Die globalen Gesamtverluste wurden auf 1,3 Mrd. Tonnen pro Jahr geschätzt (Gustavsson, et al., 2011 S. V). Bei einer Weltbevölkerung von rund 6.895.890.000 im Jahr 2010 entspricht dies rund 188 kg pro Person und Jahr.

Eine erste umfangreiche Studie von Kranert et al. zur Verschwendung von Lebensmitteln in Deutschland kam im Jahr 2012 zu dem Ergebnis, dass in Deutschland jährlich rund 10.970.000 Tonnen Lebensmittel weggeworfen werden (Kranert, et al., 2012 S. 205). Bezogen auf die Einwohnerzahl Deutschlands im Jahr 2011 (80,3 Mio.) entsprach dies rund 137 kg/Ea. Nach einer Untersuchung des WWF Deutschland aus dem Jahr 2015 betragen die Gesamtverluste in Deutschland insgesamt rund 18.390.000 Tonnen pro Jahr, wovon 9.870.000 t als vermeidbar angesehen wurden (WWF Deutschland, 2015 S. 7). Bezogen auf die Bevölkerung des Jahres 2014 (81,2 Mio.) entspricht dies Gesamtverlusten von 226 kg/Ea, wovon rund 122

kg/Ea als vermeidbar eingeordnet wurden. Laut WWF liegen die Gesamtverluste in Deutschland damit zwar um lediglich rund 20 Prozent über dem globalen Durchschnitt, der Anteil der Verschwendung an den Verlusten ist in Deutschland jedoch wesentlich höher als im globalen Vergleich. Eine neuere Studie des Thünen-Instituts (Schmidt, et al., 2019) aus dem Jahr 2019 gibt mit rund 12,5 Millionen Tonnen wieder deutlich geringere Gesamtverluste als die Studie des WWF an. Demnach läge Deutschland mit Verlusten von 152 kg als Industrieland um 19 Prozent unter dem von Gustavsson et. al geschätzten globalen Durchschnitt. Übereinstimmung zeigen beide Studien allerdings mit Blick auf den Anteil der vermeidbaren Verluste, den sie mit ca. 54 bzw. 55 Prozent angeben. Demnach dürften sich die vermeidbaren Verluste in einer Spanne zwischen 81 bis 122 kg/Ea bewegen. Somit beträgt das Ausmaß der Verschwendung in Deutschland im Vergleich zum subsaharischen Afrika und Süd-/Südostasien, wo nur 7 bis 10 kg/Ea vergeudet werden, ungefähr das Elffache. Während in Deutschland mehr als die Hälfte der Verluste auf Verschwendung zurückzuführen sind, hat Verschwendung in Entwicklungsländern nur einen Anteil von rund 6 Prozent an den Gesamtverlusten. Dagegen sind dort rund 40 Prozent der 120-170 kg/Ea Gesamtverlust allein auf Nachernte- und Prozessverluste zurückzuführen (Gustavsson, et al., 2011 S. 5). Zum Vergleich: In Deutschland beziffert der WWF Deutschland (2015) Nachernteverluste (8,7 Prozent) und Prozessverluste (14,2 Prozent) auf lediglich 22,9 Prozent der Gesamtverluste (WWF Deutschland, 2015 S. 9).

Obwohl die Daten zu Verlusten und Verschwendung immer genauer werden, ist es durchaus möglich, dass das Ausmaß der tatsächlichen Verluste noch größer ist, als in den bisherigen Studien dargestellt. So liegen bisher keine genaueren Schätzungen zu Verlusten und Verschwendung in der Fischerei vor. Doch allein die ungenutzten Beifänge und Rückwürfe stellen zumindest in Teilen ein erhebliches Potenzial dar, den Druck auf stark befischte Fischarten zu reduzieren. „Genaue Zahlen über die Rückwurfmengen liegen nicht vor, doch Schätzungen der EU für die Nordsee bewegen sich im Rahmen zwischen 40 und 60% des Fangs. Die Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO) geht von weltweit acht Prozent des gesamten Fischfangs aus. In manchen Gewässern enden bis zu 70 Prozent der gefangenen Fische als Rückwurf“ (Wichert, 2012). Nach Jeppe Kolding (Universität Bergen) wäre es auch aus ökologischer Sicht vorteilhaft, weniger selektiv zu fischen. Den Beifang zu nutzen, wäre möglich, denn es ließe sich „fast alles essen, was aus dem Meer kommt. Es gibt nur kulturelle Vorlieben“ (Kolding zit. n. DLF, 2012). Deshalb ist es nach Kolding erforderlich, die Einstellung der Verbraucher zu ändern (DLF, 2012).

Nach Pladerer et al. (2016) decken die meisten der bisher vorliegenden Studien zu den Lebensmittelverlusten in Deutschland auch „den Ernte- und Nacherntebereich nur unzureichend ab“ (Pladerer , et al., 2016 S. 15). Lediglich die Studie des WWF aus dem Jahr 2015 berücksichtigt auch Ernteverluste. Dies ist durchaus relevant, da diese Verluste in Deutschland

großenteils vermeidbar wären. So werden z. B. größere Mengen an für den Verzehr geeigneten Kartoffeln und Möhren direkt bei der Ernte aussortiert. „Von den insgesamt 18 Mio. t Lebensmittelabfällen, die in Deutschland jährlich entstehen, sind allein etwa 1,4 Mio. t auf vermeidbare Verluste von Kartoffeln und Kartoffelprodukten zurückzuführen. Diese fallen entlang der Wertschätzungskette an […]. Darin nicht enthalten sind Verluste, die aufgrund der Anwendung von Qualitätssicherungsanforderungen zur bzw. nach der Ernte entstehen“ (WWF Deutschland, 2017 S. 6). Ein Beispiel für unterschiedliche Qualitätsanforderungen sind die Ertragsunterschiede zwischen Möhren als Frischware und Möhren als Industrieware: Bei einer Verwendung als Industrieware fallen die nutzbaren Erträge um fast ein Viertel höher aus (KTBL, 2017; KTBL, 2009; Prüße et al., 2002). Bei vielen anderen Feldfrüchten besteht mit Blick auf die nutzbaren Anteile der Ernteverluste und geeignete Verwendungsmöglichkeiten noch weiterer Forschungsbedarf. Pladerer et al. erwarten jedoch, dass die Verluste im Ernte- und Nacherntebereich in Deutschland rund 2 Millionen Tonnen umfassen (Pladerer , et al., 2016 S. 15). Damit schätzen Pladerer et al. die Ernte- und Nachernteverluste auf eine ähnliche Menge, wie die Studie des WWF aus dem Jahr 2015. Folglich würden sich die Ernteverluste in einer ähnlichen Größenordnung bewegen wie die Nachernteverluste. Nach Auskunft befragter Landwirte aus der Region Stuttgart sind bei der Ernte z. B. Schälbarkeit und Optik wichtige Auswahlkriterien. Kleine oder ungünstig geformte Kartoffeln erhöhen den Arbeitsaufwand bei der Verarbeitung und würden deshalb nicht mehr nachgefragt. In der Vergangenheit ließen sich die kleinen Kartoffeln noch als Viehfutter vermarkten, doch heute sind sie als Futtermittel aufgrund der guten Verfügbarkeit einfacher handhabbarer Futtermittel wirtschaftlich nicht mehr konkurrenzfähig und bleiben deshalb meist ungenutzt.

Eine Möglichkeit, Kartoffeln wieder als Futtermittel für Rinder und Schweine nutzbar zu machen und dadurch eigens als Futtermittel angebautes Getreide zu ersetzen, wurde durch das landwirtschaftliche Forschungsinstitut NIBIO in Norwegen untersucht. Im Rahmen des Projektes „CYCLE“ wurden die gewaschenen, rohen Kartoffeln zerschnitten oder gequetscht und mit Grassilage (wegen der Milchsäurebakterien) und Trockenschnitzeln gemischt, um den TM-Gehalt zu erhöhen. Durch dieses von Kühnemann (2016) beschriebene Verfahren bildeten die Kartoffeln kaum unerwünschte Säuren. Für die Rundballensilage erwies sich ein TM-Gehalt von mindestens 30 Prozent als günstig. In folgenden Untersuchungen sollen das Mischungsverhältnis optimiert und weitere Produkte, wie z. B. Möhren, getestet werden. (Kühnemann, 2016) Mithilfe solcher Lösungsansätze könnte der Nahrungskalorienertrag pro Hektar zumindest über den Weg der Futterproduktion gesteigert und das Ausmaß der Verschwendung reduziert werden.

Nach Auskunft von Landwirten in der Region Stuttgart wäre ein erheblicher Teil der von ihnen aussortierten Möhren für den Verzehr geeignet, könnte aber aufgrund ungewünschter Formbildung nicht als Lebensmittel verkauft werden. Die Möglichkeit, sie als Futtermittel vermarkten

zu können, wäre für ihn daher eine Alternative, wenn sich das Verbraucherverhalten nicht ändert. Allerdings mangelt es auch hier bisher an der Nachfrage.

Da es sich bei der Studie des Thünen-Instituts aus dem Jahr 2019 (Schmidt, et al., 2019) um eine Nachfolgestudie der Erhebung von Kranert et al. aus dem Jahr 2012 handelt, ergibt sich in der aktuellen Literatur für die Gesamtverluste in Deutschland eine Spanne von 152 bis 226 kg/Ea. Da Ernteverluste nur in der Studie des WWF berücksichtigt wurden, dürfte die tatsächliche Spanne eher zwischen 164 und 226 liegen. Dies entspricht etwa 24 bis 33 Prozent des Verbrauchs. Die Schätzung der Verluste über den nach MRI/BMEL geschätzten Verzehr ergab, wie zuvor (Abschnitt 10.2) dargestellt, Gesamtverluste ohne Ernteverluste von mindestens 25 Prozent des Verbrauchs, die jedoch auch für den Verzehr ungeeignete Anteile (wie Schalen und Kerne) umfassen (vgl. Tabelle 87).

Tabelle 92: Jährliche Lebensmittelabfälle nach Bereichen der Nahrungsmittelkette

Bereich der Versorgungskette		**Studien**				
		FAO 2011	**Kranert et al. 2012**	**WWF 2015**	**Pladerer et al. 2016**	**Schmidt et al. 2019**
		Regionaler Bezug				
		Industrie-länder	**Deutsch-land**	**Deutsch-land**	**Deutsch-land**	**Deutsch-land**
Insgesamt	Ernteverluste (kt)			980		
	Nachernteverluste (kt)			1.590		[3] 1.165
	Fischerei (kt)					
	Industrie (kt)		1.850	2.610		2.165
	Handel (kt)		550	2.580		493
	Großverbraucher (kt)		1.900	3.400		
	Gastronomie (kt)					1.695
	Haushalte (kt)		6.670	7.230		6.960
	Insgesamt (kt)		10.970	18.390	13.000	12.478
	Pro Einwohner (kg)	**280 - 300**	**137**	**226**	**160**	**152**
	Verlust/Verbrauch		**20%**	**33%**	**23%**	**22%**
Davon vermeid-bar	1.000 Tonnen			9.870		6.680
	Prozent		[1] k. A.	54%		54%
	Pro Einwohner (kg)	**95 - 115**	[2] **k. A.**	**122**	**k. A.**	**81**

1) Nach Kranert et al. waren zum Zeitpunkt der Erhebung aufgrund unvollständiger Datenbasis keine Angaben zur Vermeidbarkeit von Abfällen möglich.
2) Die vermeidbaren Abfälle der Haushalte wurden auf 33 bis 57 kg/Ea geschätzt, die teilweise vermeidbaren Abfälle auf 16 bis 18 Kg/Ea (Kranert, et al., 2012 S. 114-115).
3) Nach Abzug von Schalen und Knochen

Ergänzt man die wahrscheinlichen Ernteverluste, ergibt sich ein Gesamtverlust von 27 Prozent. Hinzu kommen die bisher unbekannten nutzbaren Anteile der Verluste, die bisher in der

Fischerei entstehen. Die Schätzung bestätigt somit die in der Literatur angegebene Spanne, in deren Mitte sie sich bewegt. Aus der Differenz zwischen dem Verbrauch und dem in Verzehrsstudien ermittelten Verzehr ergeben sich Gesamtverluste von 170 (160 – 180) kg/Ea. Damit liegt das Ergebnis der Schätzung um rund 12 Prozent über dem Ergebnis von Schmidt et al. (2019) und um etwa 6 Prozent über der Schätzung durch Pladerer et. al (2016).

Für die mögliche Reduktion des Flächenbedarfs der Ernährung ausschlaggebend ist allerdings die Höhe der nicht vermeidbaren Verluste. Setzt man die in der Literatur angegebenen unvermeidbaren Verluste ins Verhältnis zur Gesamtproduktion einschließlich der von WWF und Pladerer et al. geschätzten Ernteverluste, haben diese mit ca. 88 (71 – 104) kg/Ea einen Anteil von 12,6 (10,2 – 15,0) Prozent. Davon entfallen nach Angaben in der Literatur rund 60 Prozent in den Haushalten an.

Nach Angaben des Thünen-Instituts fallen etwa 71 Prozent der unvermeidbaren Abfälle in den Haushalten (51 kg/Ea) und 16 Prozent in der Lebensmittelverarbeitung (12 kg/Ea) an (Schmidt, et al., 2019 S. 59). Unvermeidbare Lebensmittelabfälle entstehen nach Kranert et al. (2012) „üblicherweise im Zuge der Speisenzubereitung und werden der Entsorgung zugeführt. Dies beinhaltet im Wesentlichen nicht essbare Bestandteile (z.B. Knochen, Bananenschalen o.ä.) aber auch Essbares (z.B. Kartoffelschalen)“ (Kranert, et al., 2012 S. 4).

Nach Schmidt et. al (2019) wären von den rund 12,7 Mio. Tonnen der Gesamtverluste rund 7,05 Mio. Tonnen „theoretisch vermeidbar“ (Schmidt, et al., 2019 S. 36), was mehr als 55 Prozent der Gesamtverluste entspricht. Somit könnten die Verluste von ca. 22,5 (20,0 – 25,0) Prozent auf weniger als 10 Prozent des Verbrauchs gesenkt werden, was in Relation zum Verzehr rund 10 Prozent entspricht. Diese 10 Prozent wurden in den Szenarien, die im Rahmen dieser Arbeit berechnet wurden, jeweils auf den Verzehr, der sich aus den verschiedenen Ernährungsweisen ergibt, aufgeschlagen, um den Mindestbedarf an Nahrung und somit auch den Mindestbedarf an Produktionsflächen zu erhalten. Durch Umstellung auf eine andere Ernährungsweise können die Verluste in einzelnen Produktsegmenten steigen während sie in anderen Segmenten sinken. Als Maßnahmen zur Minimierung der Verluste sind neben der Reduktion des Anteils tierischer Produkte vor allem eine verbesserte Einkaufsplanung und Resteverwertung zu nennen. Hierdurch können die Verluste bei haltbaren Produkten, wie Reis, Nudeln, Öle und bei einmachfähigen Produkten, wie verschiedenen Gemüse und Obstsorten, aber auch bei Brot in den Privathaushalten sehr gering gehalten werden. Darüber hinaus können Information zur Verwertung zu einem sorgsameren Umgang mit Lebensmitteln führen, was weitere Verluste vermeiden könnte. So zeigt etwa der Vergleich zwischen den üblichen Verlusten beim Putzen von frischem Obst und Gemüse mit den tatsächlich nicht essbaren Anteilen, dass hier wahrscheinlich noch ein erhebliches Einsparpotenzial besteht. Häufig werden z. B. Äpfel, Möhren und Zucchini geschält, obwohl in und unter der Schale wichtige Nährstoffe enthalten sind. Auch die Nutzung der häufig entsorgten Blätter von Radieschen und

Rote Beete kann die Verluste reduzieren. Ein weiteres Beispiel ist der Brokkolistrunk, der häufig entsorgt wird, obwohl er essbar und nährstoffreich ist. So werden beim Putzen mit mehr als 25 Prozent des Gemüses und 13 Prozent des Obstes häufig größere Mengen als nötig im Abfall entsorgt. Als nicht essbar werden bei Gemüse lediglich rund 18 Prozent und bei Obst zwischen 10 und 13 Prozent eingeschätzt. Dabei sind die Verluste im Falle der heimischen Obstsorten um ca. 2 Prozentpunkte geringer als im Gesamtdurchschnitt, da vor allem Bananenschalen hohe Gewichtsanteile haben. Die Verluste, die beim Putzen entstehen, sowie die nicht essbaren Anteile von beliebten Gemüsesorten sind in Tabelle 93 dargestellt.

Tabelle 93: Putzabfälle und nicht essbare Anteile beliebter Gemüsesorten

Gemüse	Verbrauch (kg/Ea)	Schalen und nicht essbare Anteile	Nicht essbare Anteile	Abfälle inkl. Schalen [6] (kg/Ea)	Nicht essbare Abfälle [6] (kg/Ea)
Aubergine	1,5	[2] 17%	[1] 0%	0,25	0,00
Blumenkohl	2,4	[2] 38%	[2] 38%	0,92	0,92
Brokkoli	2,9	[2] 39%	0% - 39%	1,14	0,58
Chicorée	0,5	[2] 11%	[1] 15%	0,05	0,07
Gurken	3,4	[2] 26%	0%	0,88	0,00
Kartoffel	68,6	[2] 20%	[3] 13%	13,72	8,58
Kohlrabi	1,5	[2] 34%	[1] 24%	0,50	0,36
Kürbis	0,5	[4] 26%	[4] 26%	0,13	0,13
Möhren	8,7	[2] 19%	0% - 19%	1,66	0,87
Paprika inkl. Schale	1,5	[2] 8%	[1, 5] 8%	0,12	0,12
Porree	1,5	[2] 42%	[1] 33%	0,61	0,48
Radies	1,5	[2] 37%	[2] 37%	0,54	0,54
Rosenkohl	2,4	[1] 25%	[1] 22%	0,53	0,60
Rote Beete	4,4	[1] 13%	[1] 13%	0,59	0,59
Rotkohl	7,8	[1] 14%	[1] 14%	1,09	1,09
Spargel	0,2	[2] 26%	[2] 26%	0,05	0,05
Spinat	1,5	[2] 15%	[2] 15%	0,22	0,22
Tomaten	18,4	[5] 5%	[5] 5%	0,37	0,37
Weißkohl	6,3	[1] 14%	[1] 14%	0,90	0,90
Zucchini	6,3	[2] 13%	[2] 13%	0,82	0,82
Zwiebeln	6,3	[2] 8%	[2] 8%	0,50	0,50
Gesamt	**147,9**	**[6] 18%**	**[6] 12%**	**26,2**	**18,3**

(1) (Prüße, et al., 2002) (2) (Gruner + Jahr GmbH, 2020) (3) Arapoglou, et al., 2010; Pathak, et al., 2017 (4) (Bognar, 2006) (5) Eigene Annahmen (6) Eigene Berechnung

10.5 Landwirtschaftliche Produktion und Flächenbedarfe

Die Landwirtschaft liefert seit jeher neben Nahrungsmitteln zahlreiche energetisch und stofflich nutzbare Rohstoffe. Im Folgenden werden zunächst die Erträge pflanzlicher Nahrungsmittel

und tierischer Nahrungsmittel im klassischen Landbau inklusive ihrer wichtigsten Koppelprodukte dargestellt. Anschließend werden die Ertragspotenziale ackerbaulicher Agroforstsysteme dargestellt, die den klassischen Ackerbau mit Baumpflanzungen für die Produktion von Wertholz und Obst oder Nüssen ergänzen.

10.5.1 Pflanzliche Nahrungsmittel

Pflanzliche Nahrungsmittel können in verschiedene Produktgruppen unterteilt werden. Die nachfolgend dargestellten Produktgruppen entsprechen weitgehend der Unterteilung, in der sie durch das statistische Landesamt Baden-Württemberg erfasst werden. Neben den Nahrungsmitteln werden jeweils ihre wichtigsten Koppelprodukte dargestellt, die aus den übrigen Pflanzenteilen hergestellt werden können.

10.5.1.1 Getreide und Hackfrüchte

Getreide und Hackfrüchte haben mit rund 63 Prozent (Stand 2016) den größten Anteil an der Ackerflächennutzung in Baden-Württemberg.

10.5.1.1.1 Ertragspotenziale

Die Erträge des Getreideanbaus in Deutschland werden jährlich von den statistischen Ämtern des Bundes und der Länder erfasst. Die dort erfassten Gesamterträge beinhalten sowohl die konventionellen als auch die ökologischen Erträge. Nach Wirtschaftsweise differenzierte Ertragspotenziale sind den Veröffentlichungen und Datenbanken des KTBL (2017) zu entnehmen. Im Vergleich zum konventionellen Landbau fallen die durchschnittlichen Erträge des ökologischen Landbaus deutlich geringer aus. Aufgrund des geringen Anteils des ökologischen Landbaus in Deutschland von 3,8 Prozent (Stand: 2016) an der gesamten Getreideanbaufläche (6,325 Mio. ha) fällt die ökologische Landwirtschaft bisher jedoch statistisch kaum ins Gewicht, sodass der tatsächliche Durchschnittsertrag in Deutschland nach BMEL (2017) mit 7,8 t/ha nur um rund 0,1 t bzw. 1,3 Prozent unter dem vom KTBL angegebenen Ertragspotenzial des konventionellen Landbaus liegt (vgl. Tabelle 94). Aufgrund dieser geringen Abweichung eignen sich die Durchschnittserträge als Bezugsgröße für einen Vergleich mit dem ökologischen Landbau, wie er nachfolgend beschrieben ist. Diese Feststellung der Eignung ist erforderlich, da die in aktuellen Studien von Noleppa (2016) und Brückler et al. (2018) erhobenen Ertragspotenziale des ökologischen Landbaus, die für die folgende Schätzung der Potenziale genutzt wurden, in Relation zu den Erträgen des konventionellen Anbaus angegeben werden.

Die durchschnittlichen Getreidekornerträge des konventionellen Landbaus liegen, nach Angaben des KTBL (2017), je nach Kulturpflanze zwischen 4,4 und 7,9 Tonnen pro Hektar. Zu den Erträgen des Dinkelanbaus liegen jedoch vergleichsweise wenige Daten vor. Das Ertragspotenzial von Dinkel soll jedoch dem von Winterweizen am nächsten kommen. In langjährigen Anbauversuchen in Süddeutschland wurden die Erträge der regional wichtigsten Dinkelsorte

(Franckenkorn) mit denen der wichtigsten E-Weizensorte (Kerubino) verglichen. Dabei lieferte die Dinkelsorte „Franckenkorn [..] im 5-jährigen Schnitt in Arnstein 72,6 dt/ha, in Giebelstadt 84,4 dt/ha. Kerubino drosch 80,3 dt/ha in Arnstein und 92,7 dt/ha in Giebelstadt. Damit lag der Dinkelertrag auf beiden Standorten nur um 10 % unter dem des E-Weizens“ (top agrar online, 2015). Die Ertragserwartung im ökologischen Landbau beträgt bei ursprünglichen Dinkelsorten im Bio-/Extenso-/IP-Suisse-Anbau 3,0 bis 5,0 t/ha und im intensiven ÖLN-Anbau 4,5 – 7,0 t/ha (IG Dinkel, 2014). Die Körnermaiserträge liegen konventionell bei rund 10 t/ha. In Baden-Württemberg zeigen die Erträge nur leichte Abweichungen vom bundesweiten Durchschnitt (vgl. Statistisches Bundesamt, 2017a, und Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2018c). Die Erträge des ökologischen Landbaus werden in den Datenbanken der statistischen Ämter bisher nicht gesondert aufgeführt. Neben den Daten, die das KTBL (2017) für den ökologischen Anbau mit 3,0 bis 3,9 t/ha angibt, nennen Noleppa (2016) und Brückler et al. (2018) jeweils relative Mengenerträge im Verhältnis zum konventionellen Anbau. Die sich aus diesen Angaben ergebenden Ertragspotenziale sind in Tabelle 94 dargestellt.

Tabelle 94: Hektarerträge Getreide und Hackfrüchte, konventionell und ökologisch (t/ha; Angaben bei üblichen Wassergehalten)

	Quellen							
	Destatis, 2017 [1)]	STL BW, 2018 [2)]	BMEL, 2017 [3)]	KTBL, 2017 [4)]	KTBL, 2017 [4)]	Noleppa, 2016 [5)]	Brückler et al., 2018 [6)]	FiBL, 2015; IG Dinkel, 2014
Anbauweise	**konventionell**				**ökologisch**			
Zeitraum	2011-2016	2013-2017	2010-2017	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Region	RB: FR, TÜ, S *	BW	BRD	BRD	BRD	BRD	BRD**	BRD**
Kulturpflanze	Ertrag in t/ha							
Winterweizen	7,4	7,6	7,8	7,9	3,9	3,5	5,0	[7)] 5,3
Roggen	5,8		5,5	5,9	3,9	2,8	3,4	
Wintergerste	6,8	7,1	7,1	6,9	3,9	3,4	4,2	
Sommergerste	5,4	5,5	5,4	5,9	3,0	2,6	3,6	
Hafer	5,0	4,7	4,7	4,4	3,0	2,3	3,2	
Triticale	6,6	6,7	6,3	5,9	3,9	3,0	4,3	
Dinkel				7,1	3,0			[8)] 4,9
Körnermais		10,2	9,7	9,8	5,7		6,2	
Kartoffeln	39,1	40,3	43,6	45,0	25,0	23,9	22,2	
Zuckerrüben	76,3	79,2	70,9	60,0	50,0	58,7	51,5	

* BW = Baden-Württemberg, RB = Regierungsbezirk, FR = Freiburg, TÜ = Tübingen, S = Stuttgart
** Relative Angaben (im Verhältnis zum konventionellen Ertrag am gleichen Standort) auf die BRD übertragen.
Quellen: S. 72; (1) Statistisches Bundesamt, 2017a; (2) STL BW, 2018; (3) BMEL, 2017;(4) KTBL, 2017; (5) Noleppa, 2016, S. 5; (6) Brückler et al., 2018; (7) FiBL, 2015; (8) IG Dinkel, 2014;

Auf Basis der in Tabelle 94 dargestellten Ertragswerte wurden Durchschnittswerte gebildet, die einen Vergleich der ökologischen Landwirtschaft mit der konventionellen Landwirtschaft

ermöglichen. In Tabelle 95 sind neben den potenziellen mittleren Hektarerträgen die durchschnittlichen Ertragspotenziale der ökologischen Landwirtschaft in Relation zum konventionellen Anbau dargestellt. Die berechneten Durchschnittserträge des ökologischen Getreideanbaus in Deutschland liegen zwischen 55 und 60 Prozent der konventionellen Erträge. Für den Kartoffelanbau zeigt sich mit 56 Prozent ein ähnliches Verhältnis. Mit 75 Prozent der konventionellen Erträge ist die Differenz zwischen ökologischer und konventioneller Wirtschaftsweise beim Anbau von Zuckerrüben deutlich geringer. (Vgl. Tabelle 95)

Bisher liegen nur wenige Daten vor, die einen direkten Vergleich der Erträge unter gleichen Bedingungen im gleichen Zeitraum am selben Standort erlauben. Einer der wenigen detaillierten Versuche, die die Erträge am selben Standort untersuchen, findet seit 1978 in der Schweiz statt.

Tabelle 95: Getreidekorn- und Hackfruchterträge ökologischer Landwirtschaft im Vergleich

Kulturpflanze	Ertrag in t/ha		Relative Mengenerträge des ökologischen Landbaus
	⌀ konventionell	⌀ ökologisch	Prozent
Winterweizen	7,7	4,4	57,7
Roggen	5,7	3,4	58,9
Wintergerste	7,0	3,9	55,4
Sommergerste	5,6	3,1	55,0
Hafer	4,7	2,8	59,8
Triticale	6,4	3,7	58,7
Dinkel	7,1	3,9	55,2
Körnermais	9,9	6,0	60,2
Kartoffeln	42,0	23,7	56,4
Zuckerrüben	71,6	53,4	74,6

Quelle: Eigene Berechnung

Dort werden durch das Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL) in einem praxisnahen Versuchsdesign der biologisch-dynamische, der organisch-biologische und der konventionelle Anbau von Ackerkulturen wie Weizen, Kartoffeln, Mais, Soja oder Kleegras verglichen. Beim Winterweizen betrugen die Ertragsdifferenzen in den Jahren 1985-2005 rund 11 bis 14 Prozent, zwischen 2005-2012 betrugen sie 33 Prozent (im konventionellen Verfahren war die Düngungsintensität erhöht worden). Bei Soja waren die Erträge im Zeitraum 1999-2012 in biologischen und konventionellen Anbausystemen im Mittel gleich hoch (2.8 t TM/ha). Die Silomaiserträge der biologischen Anbausysteme lagen im gleichen Zeitraum mit 17.5 t TM/ha um 11 Prozent unter den Erträgen der konventionellen Systeme (FiBL, 2015). Meta-Analysen welt-

weiter Datenerhebungen haben ebenfalls eine etwas geringere Differenz zwischen konventionellem und ökologischem Landbau ergeben. Global werden im ökologischen Getreideanbau 65 bis 85 Prozent der konventionellen Erträge erzielt (Resl, et al., 2016). Es erscheint daher fraglich, ob die bisher vorliegenden Daten zu den Erträgen in Deutschland für einen direkten Vergleich von konventionellem und ökologischem Landbau ausreichen. Vielmehr erscheint es sinnvoll, weitere Vergleiche durchzuführen, in denen unter gleichen Bedingungen am gleichen Standort angebaut wird.

Vergleicht man den Kalorienertrag, so zeigt sich, dass die dargestellten Getreide und Hackfrüchte bei gleichen Flächenanteilen im ökologischen Anbau auf ca. 60 Prozent der Erträge des konventionellen Anbaus kommen. Die Kartoffel erzielt sowohl im konventionellen als auch im ökologischen Landbau höhere Kalorienerträge pro Hektar als alle Getreidearten. Die ebenfalls ertragreiche Zuckerrübe ist von geringerem Interesse, da nach den ernährungswissenschaftlichen Empfehlungen auf Rohr- und Rübenzucker verzichtet werden sollte.

Tabelle 96: Kalorienertrag von Getreide und Hackfrüchten (kcal/ha)

Kulturpflanze	kcal/100g	kcal/ha	
		konventionell	ökologisch
Winterweizen	353	27.064.076	15.612.336
Roggen	293	16.789.510	9.893.878
Wintergerste	315	21.937.450	12.147.020
Sommergerste	315	17.540.488	9.642.505
Hafer	350	16.464.458	9.842.557
Triticale	329	20.970.081	12.311.224
Dinkel	347	24.640.470	13.593.725
Körnermais	108	10.679.143	6.426.400
Kartoffel	70	29.417.178	16.602.913
Zuckerrübe	43	30.790.419	22.961.786
Durchschnitt	**280**	**24.032.586**	**14.337.149**

Quelle: Eigene Berechnung

Der Flächenbedarf für die Erzeugung von 1.000 kcal liegt beim konventionellen Anbau von Getreide und Hackfrüchten zwischen 0,32 und 0,94 m². Im ökologischen Anbau reicht die Spanne von 0,44 bis 1,56 m². Sieht man vom Zuckerertrag der Zuckerrübe ab, sind Kartoffeln und Weizen sowohl im konventionellen als auch im ökologischen Anbau die Pflanzen mit dem geringsten Flächenbedarf pro 1.000 kcal.

Ein Hektar Getreide (ohne Mais) kann, wie in Tabelle 96 und in Tabelle 97 dargestellt, im konventionellen Anbau rechnerisch den jährlichen Kalorienbedarf von 23 bis 37 Personen decken, im ökologischen Anbau von 13 bis 21 Personen. Der Kalorienertrag von einem Hektar Kartoffeln im konventionellen Anbau reicht aus, um den Jahreskalorienbedarf von 40 Personen

zu decken, im ökologischen Anbau von 23 Personen. Deutlich niedriger ist in Vergleich dazu das Ernährungspotenzial von Mais mit 15 Personen pro Hektar bei konventionellem Anbau oder 9 Personen pro Hektar bei ökologischem Anbau. (Vgl. Tabelle 97)

Tabelle 97: Flächenbedarf pro 1.000 kcal und ernährbare Personen pro Hektar

Kulturpflanze	m²/1.000 kcal, konventionell	m²/1.000 kcal, ökologisch	Personen pro Hektar, konventionell	Personen pro Hektar, ökologisch
Winterweizen	0,37	0,64	37,1	21,4
Roggen	0,60	1,01	23,0	13,6
Wintergerste	0,46	0,82	30,1	16,6
Sommergerste	0,57	1,04	24,0	13,2
Hafer	0,61	1,02	22,6	13,5
Triticale	0,48	0,81	28,7	16,9
Dinkel	0,41	0,74	33,8	18,6
Körnermais	0,94	1,56	14,6	8,8
Kartoffel	0,34	0,60	40,3	22,7
Zuckerrübe	0,32	0,44	42,2	31,5
Durchschnitt	**0,42**	**0,70**	**32,9**	**19,6**

Quelle: Eigene Berechnung

10.5.1.1.2 Koppelprodukte und Flächengutschriften

Getreide und Hackfrüchte liefern große Mengen an Stroh und Kraut, die einen relevanten Beitrag zur Versorgung mit nachwachsenden Rohstoffen für die stoffliche oder energetische Nutzung darstellen können. Die potenziellen Stroherträge der einzelnen Getreidearten wurden auf Basis der in Tabelle 95 dargestellten Kornerträge und der jeweiligen Korn-Stroh-Verhältnisse nach Thrän et al. (2016) berechnet. Der Strohertrag von Dinkel, der von Thrän et al. nicht angegeben wird, ist nach Angaben der IG Dinkel um „1/3 höher als bei anderen Getreidearten“ (IG Dinkel, 2014). Basierend auf dem Mittelwert des Korn-Stroh-Verhältnisses der übrigen Getreidearten ergibt sich daraus ein Korn-Stroh-Verhältnis von 1:1,2. Allerdings handelt es sich dabei um eine konservative Schätzung. Kolbe & Wellenberg geben für Dinkel mit einem Korn-Stroh-Verhältnis 1:1,5 ein deutlich höheres Dinkelstrohaufkommen an (Kolbe, et al., 2002). Die jeweiligen Stroherträge nach Getreideart und Anbauweise sind in Tabelle 98 dargestellt.

Tabelle 98: Mittleres Strohaufkommen und mittleres Korn-Stroh-Verhältnis in Deutschland

Kulturpflanze	Mittleres Korn-Stroh-Verhältnis	Mittleres Strohaufkommen [5]	
		konventionell	ökologisch
Winterweizen	[1] 1,0	[5] 7,7	[5] 4,4
Roggen	[2] 0,8	[5] 4,6	[5] 2,7
Wintergerste	[2] 1,0	[5] 7,0	[5] 3,9
Sommergerste	[2] 0,9	[5] 5,0	[5] 2,8
Hafer	[2] 0,9	[5] 4,2	[5] 2,5
Triticale	[2] 1,1	[5] 7,0	[5] 4,1
Dinkel	[3] 1,2	[5] 8,7	[5] 4,8
Körnermais (t TM)	[4] 1,1	[4] 10,5	[5] 6,3

(1) Kolbe & Wellenberg, 2002; (2) Thrän et al., 2016; (3) IG Dinkel, 2014; (4) Fleschhut, 2016; (5) Eigene Berechnung

Im konventionellen Anbau fallen folglich zwischen 4,2 und 8,7 t Stroh pro Hektar an, im ökologischen Anbau zwischen 2,5 und 4,8 t/ha. Nachhaltig nutzbar sind mit Blick auf die Humusbilanz nach Thrän et al. (2016) jedoch nur 27 bis 43 Prozent des theoretischen Strohpotenzials (Thrän, et al., 2016 S. 294).

Der Kartoffelkrautertrag des Kartoffelanbaus liegt bei rund 2,5 t Trockenmasse pro Hektar (Pacan, et al., 2010). Der Ertrag an Rübenblättern liegt in Deutschland bei ca. 6,3 t TM/ha (KTBL, 2012 S. 117). Die Hektarerträge im ökologischen Anbau wurden über das jeweilige Mengenverhältnis von Kraut zu Knolle bzw. Blatt zu Rübe geschätzt. Demnach beträgt der Kartoffelkrautertrag ca. 1,4 t/ha und der Rübenblatt ca. 4,7 t/ha. (Vgl. Tabelle 99) Kartoffelkraut und Rübenblätter eignen sich als Biogassubstrat. Aus Kartoffelkraut lassen sich im konventionellen Landbau rund 6.450 kWh/ha gewinnen (vgl. Tabelle 351: Energieausbeuten und Energieerträge aus Restpflanzen und Reststoffen der Stärkeproduktion), aus Rübenblättern rund 14.700 kWh/ha (vgl. Tabelle 353: Hektarerträge und Ausbeuten der Zuckerrübenproduktion in Deutschland).

Tabelle 99: Kartoffelkraut- und Rübenblattaufkommen (t/ha)

Kulturpflanze	Mittleres Kraut-/Blattaufkommen		Mittleres Knollen-Kraut-Verhältnis
	konventionell	ökologisch	
Kartoffel (t TM)	[1] 2,5	[3] 1,4	1:0,1
Zuckerrübe (t TM)	[2] 6,3	[3] 4,7	1:0,1

Quellen: (1) Pacan & Dröge, 2010; (2) KTBL, 2012, S. 117 (3) Berechnung

Getreidestroh ist sowohl für energetische als auch für stoffliche Nutzungen geeignet. Geht man von einem Wassergehalt von 15 Prozent und einem Heizwert von 4,0 kWh/kg aus (TFZ

Bayern, 2008) ergeben sich im konventionellen Landbau Energiepotenziale von 6.450 bis 34.630 kWh/ha, im ökologischen Landbau von 3.640 bis 19.100 kWh/ha. Die jeweiligen Energieerträge und die sich daraus ergebenden Flächengutschriften sind in Tabelle 100 dargestellt.

Tabelle 100: Energiepotenziale und Flächengutschriften von Stroh, Kartoffelkraut und Rübenblättern

Kulturpflanze	Technisches Potenzial (kWh/ha)		Nachhaltiges Potenzial (kWh/ha)	
	konventionell	ökologisch	konventionell	ökologisch
Winterweizen	30.668	17.691	13.187	7.607
Roggen	18.337	10.806	7.885	4.646
Wintergerste	27.857	15.425	11.979	6.633
Sommergerste	20.046	11.020	8.620	4.739
Hafer	16.935	10.124	7.282	4.353
Triticale	28.045	16.465	12.059	7.080
Dinkel	35.888	19.799	15.432	8.514
Körnermais	34.020	20.472	14.629	8.803
Kartoffel	6.445	3.638	2.771	1.564
Zuckerrübe	14.703	10.965	6.322	4.715
Durchschnitt	**23.294**	**13.640**	**10.017**	**5.865**

Quelle: Eigene Berechnung

Aufgrund der Flächengutschriften aus einer nachhaltigen Nutzung der Koppelprodukte (max. 43 Prozent des Aufkommens) reduziert sich die Flächeninanspruchnahme der Getreidekornproduktion im konventionellen Anbau um Werte zwischen 9 und 20 Prozent, im ökologischen Anbau um 6 bis 11 Prozent. Die Flächeninanspruchnahme der Kartoffelproduktion reduziert sich im konventionellen Anbau um 4 Prozent, im ökologischen Anbau 11 Prozent. Im Durchschnitt reduzieren die Koppelprodukte die Flächeninanspruchnahme im konventionellen Anbau um 13 Prozent und im ökologischen Anbau um 8 Prozent. Im Falle der Zuckerrübe betragen die entsprechenden Werte 8 und 6 Prozent.

Tabelle 101: Flächengutschriften für Koppelprodukte von Getreide und Hackfrüchten bei energetischer Nutzung (m²/ha)

Kulturpflanze	konventionell	ökologisch
Winterweizen	1.691	975
Roggen	1.011	596
Wintergerste	1.536	850
Sommergerste	1.105	608
Hafer	934	558
Triticale	1.546	908
Dinkel	1.978	1.091
Körnermais	1.875	1.129
Kartoffel	355	201
Zuckerrübe	811	604
Durchschnitt	**1.284**	**752**

Quelle: Eigene Berechnung

Vergleicht man den Kalorienertrag unter Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte (in diesem Fall Bioenergieträger), so erhöht sich die Flächeneffizienz der konventionellen Produktion theoretisch (sofern 100 Prozent des Strohaufkommens genutzt werden können) um 45 Prozent und die der ökologischen um 21 Prozent. Falls nachhaltig lediglich bis zu 43 Prozent des Strohaufkommens nutzbar sind, steigt die Flächeneffizienz im konventionellen Anbau noch um 15 Prozent und im ökologischen Anbau um 8 Prozent.

Die größte Steigerung der Flächeneffizienz ist für Dinkel und Winterweizen zu verzeichnen. Können 100 Prozent des Strohaufkommens genutzt werden, steigt die Flächeneffizienz von Dinkel um 85 Prozent im konventionellen Anbau und um 34 Prozent im ökologischen Anbau. Können nachhaltig nur 43 Prozent des Strohaufkommens genutzt werden, betragen die entsprechenden Werte 25 und 12 Prozent. Die geringste Flächeneffizienzsteigerung erzielt die Kartoffel mit Effizienzsteigerungen im einstelligen Prozentbereich. Im direkten Vergleich der Flächeneffizienz fällt die Kartoffel deshalb durch die Berücksichtigung der Koppelprodukte hinter Winterweizen und Dinkel zurück, allerdings nur mit geringem Abstand.

Der Flächenbedarf je 1.000 kcal liegt im konventionellen Anbau zwischen 0,22 und 0,53 m und im ökologischen Anbau zwischen 0,50 und 1,15 m², wenn das gesamte Strohaufkommen genutzt werden kann. Sind nur 43 Prozent des Strohaufkommens nutzbar, liegen die dementsprechenden Werte konventionell zwischen 0,30 und 0,76 m² und ökologisch zwischen 0,41 und 1,38 m². Sieht man von den Zuckererträgen der Zuckerrübe ab, sind auch unter Berücksichtigung der Koppelprodukte Weizen und Kartoffel die beiden Pflanzen mit dem geringsten Flächenbedarf. Ist das gesamte Strohaufkommen nutzbar, nimmt Weizen für 1.000 kcal rund 28 Prozent weniger Anbaufläche in Anspruch als die Kartoffel.

Tabelle 102: Flächenbedarf von Getreide und Hackfrüchten unter Berücksichtigung von Koppelprodukten (kcal/ha)

Kulturpflanze	kcal/100g	m²/1.000 kcal bei 100% Strohnutzung		m²/1.000 kcal bei 43% Strohnutzung	
		konventionell	ökologisch	konventionell	ökologisch
Winterweizen	353	0,22	0,50	0,31	0,58
Roggen	293	0,46	0,87	0,54	0,95
Wintergerste	315	0,29	0,66	0,39	0,75
Sommergerste	315	0,42	0,89	0,51	0,97
Hafer	350	0,48	0,88	0,55	0,96
Triticale	329	0,31	0,64	0,40	0,74
Dinkel	347	0,22	0,55	0,33	0,66
Körnermais	108	0,53	1,15	0,76	1,38
Kartoffel	70	0,31	0,57	0,33	0,59
Zuckerrübe	43	0,26	0,37	0,30	0,41
Durchschnitt	**280**	**0,29**	**0,58**	**0,36**	**0,65**

Quelle: Eigene Berechnung

Sind nur 43 Prozent des Strohaufkommens verfügbar, beträgt die Differenz zwischen Weizen und Kartoffel bei der Flächeninanspruchnahme konventionell noch 6 Prozent und ökologisch nur noch 2 Prozent.

Tabelle 103 zeigt die durchschnittliche Steigerung der Flächeneffizienz durch eine energetische Nutzung der Koppelprodukte von Getreide und Hackfrüchten. Die stofflichen Verwendungsmöglichkeiten für Stroh und die jeweiligen Nutzungspotenziale werden im Kapitel „Rohstoffe“ ausführlich dargestellt.

Tabelle 103: Steigerung der Flächeneffizienz durch Koppelprodukte

Kulturpflanze	Theoretische Nutzbarkeit des Strohaufkommens (100%)		Nachhaltige Nutzbarkeit des Strohaufkommens (43%)	
	konventionell	ökologisch	konventionell	ökologisch
	Effizienzsteigerung in Prozent			
Winterweizen	65	29	20	11
Roggen	31	16	11	6
Wintergerste	56	25	18	9
Sommergerste	35	16	12	6
Hafer	28	15	10	6
Triticale	56	27	18	10
Dinkel	85	34	25	12
Körnermais	77	36	23	13
Kartoffel	9	5	4	2
Zuckerrübe	23	16	9	6
Durchschnitt	**45**	**21**	**15**	**8**

Quelle: Eigene Berechnung

10.5.1.2 Ölfrüchte und Eiweißpflanzen

Abgesehen von Winterraps haben Ölfrüchte und Eiweißpflanzen in Deutschland bisher nur sehr geringe Anteile an der landwirtschaftlichen Flächennutzung. In den Jahren 2015 bis 2018 lag der Anteil von Winterraps an der Gesamtanbaufläche der Ölfrüchte (1.319.325 ha) nach durchschnittlich bei 97,3 Prozent. Unter den sonstigen Ölfrüchten hatten Sonnenblumen mit 1,4 Prozent und Öllein mit 0,3 Prozent die größten Flächenanteile. Im Jahr 2018 betrug die Anbaufläche von Sonnenblumen rund 19.500 ha. Öllein wurde auf 3.800 ha angebaut. Wertvolle Speiseöle lassen sich aber zum Beispiel auch aus Ölkürbissen, Öllein, Leindotter, Hanf, Soja und Walnüssen gewinnen, die deshalb im Folgenden unter den Ölfrüchten erfasst werden. Die Anbaufläche von Soja, das statistisch wahlweise unter den Eiweiß- oder Hülsenfrüchten erfasst wird, betrug im Jahr 2018 rund 24.100 Hektar. Die Anbaufläche der Lupinen bewegte sich mit 23.400 ha in der gleichen Größenordnung. (Statistisches Bundesamt, 2018) Linsen werden in Deutschland hauptsächlich in Baden-Württemberg und Bayern angebaut, jedoch auf sehr kleinen Flächen. Die derzeit größte ökologische Erzeugergemeinschaft „Alb-

Leisa“ baut Linsen auf einer Fläche zwischen 250 und 300 Hektar an (Stand 2017) (Nachfrage nach Albleisa wächst stetig, 2017).

10.5.1.2.1 Ertragspotenziale

Entscheidend für die Ölerträge der wichtigsten Ölpflanzen sind neben den Saaterträgen vor allem der Ölgehalt der Saat und die Wahl des Pressverfahrens. Während Pflanzenöle für die stoffliche und energetische Nutzung hauptsächlich per Warmpressung oder Extraktion gewonnen werden, erfolgt die Gewinnung von Speiseölen meist mittels der schonenderen Kaltpressung, die Voraussetzung für die Gewinnung hochwertiger Öle ist. Bei der Kaltpressung wird die Ölsaat ausschließlich durch mechanischen Druck bei Temperaturen von maximal 40°C ausgepresst. Je nach Pressverfahren und Art der Ölsaat können die Ölausbeuten zwischen 15 und 85 Prozent des in der Saat enthaltenen Öls liegen. Bei den wichtigen Ölsaaten, die sich für eine Nutzung in Deutschland eignen, werden in dezentralen Ölmühlen in der Regel Ausbeuten von ca. 80 Prozent erzielt. Dabei ist zu beachten, dass es sich hierbei um den Abpressgrad handelt, der sich ausschließlich auf den Ölgehalt bezieht. Die in der Literatur angegebenen Ölausbeuten beziehen sich in der Regel auf das Gesamtgewicht der Saat. Im Folgenden wurde daher zwischen Abpressgrad und Ölausbeute unterschieden und der Begriff Ölausbeute stets auf das Gesamtgewicht der Saat bezogen.

Die bei der Kaltpressung zurückbleibenden Presskuchen sind wertvolle Lebens- und Futtermittel, deren Energiegehalt jedoch erheblich schwanken kann, u. a. infolge unterschiedlicher Restölgehalte. Neben Ölen und Presskuchen liefern die verschiedenen Ölpflanzen eine Vielzahl möglicher Koppelprodukte. Eiweißpflanzen, wie Lupine und Linse, liefern in der Regel geringe Mengen an Koppelprodukten und vergleichsweise geringe Kalorienerträge pro Hektar.

10.5.1.2.1.1 Raps

Der Kornertrag von Winterraps liegt im konventionellen Anbau zwischen 2,8 und 4,8 t/ha (Lewandowski, 2016), im Mittel kann man mit rund 3,8 t/ha rechnen (vgl. Tabelle 106). Im ökologischen Landbau liegt der mittlere Ertrag bei 2,2 t/ha (vgl. Tabelle 106). Der mittlere Ölgehalt der Samen liegt bei Winterraps zwischen 40 bis 45 Prozent des Kornertrags (Lewandowski, 2016). Die Ölausbeute liegt im Falle der Warmpressung bei rund 42 Prozent und bei rund 34 Prozent, wenn das Öl per Kaltpressung gewonnen wird (FNR, 2018f). Bei Sommerraps liegen sowohl der Kornertrag mit 2,0 bis 2,8 t/ha als auch der Ölgehalt der Samen deutlich unter den Werten von Winterraps (Lewandowski, 2016). Der Ölertrag liegt damit bei Winterraps im konventionellen Anbau zwischen 940 und 2.000 kg/ha. Im Mittel kann man bei Warmpressung mit 1.710 kg/ha rechnen, bei Kaltpressung mit 1.380 kg/ha.

Der bei der Pressung anfallende Presskuchen kann als hochwertiges Viehfutter oder als Brennstoff genutzt werden. Der Energiegehalt des Futtermittels hängt in hohem Maße vom

Fettgehalt des Korns und vom erreichten Abpressgrad ab: „Bei einem Rohfettgehalt der Rapssaat von 46 % und einem Abpressgrad von 30 % würde ein Fettgehalt von 22,9 % im Rapskuchen resultieren. [...] Bei einem mittleren Fettgehalt von 20 % ist von rund 14 MJ ME/kg auszugehen. Ändert sich der Restfettgehalt um ± 1 %, verändert sich gleichzeitig der Energiegehalt um durchschnittlich ± 0,3 MJ ME je kg Rapskuchen. 3 % Fett mehr oder weniger ergeben also einen Energieunterschied von fast 1 MJ ME/kg.“ (Sommer, 2006) Ausgehend von einem mittleren Fettgehalt von 45 Prozent und einem Abpressgrad von rund 34 Prozent, wurde auf dieser Basis ein Restfettgehalt von 17,2 Prozent berechnet. Der Energiegehalt eines durchschnittlichen Presskuchens wurde somit auf 13,2 MJ/kg geschätzt. Daraus ergibt sich ein Gesamtertrag von 33.000 MJ pro Hektar. Nutzt man den Rapskuchen als Brennstoff, wird für diesen ein mittlerer Heizwert von 6,0 kWh/kg angegeben (Gerbaulet, 2017). Daraus ergibt sich ein Energieertrag von 15 MWh/ha.

Auch der Rapsstrohertrag hängt in hohem Maße von der Anbaumethode ab. Nach Lewandowski (2016) beträgt er bei Winterraps 1,9 Tonnen und bei Sommerraps 2,1 Tonnen pro Tonne Korn (Lewandowski, 2016). Bei einem Winterrapskornertrag von 3,8 t/ha liegt der Strohertrag somit bei rund 7,2 t/ha. Beim ökologischen Winterrapsanbau kann man dementsprechend einen Strohertrag von 4,1 t/ha erwarten. Thrän et al. (2016) geben ein Rapsstrohaufkommen von 10 t/ha an. Bergen lassen sich mit der heutigen Erntetechnik nach Thrän et al. aber nur etwa 6 bis 8 t/ha. Dies ergibt „ein effektives Korn-Stroh-Verhältnis von ca. 1:1,7“. (Thrän, et al., 2016). Der Heizwert von Pellets aus Rapsstroh liegt zwischen 4,3 und 4,7 kWh/kg (Kraft, 2017). Im Mittel beträgt der Heizwert des Strohertrags folglich ca. 32.300 kWh/ha.

Neben Korn und Stroh liefert Raps einen vergleichsweise hohen Honigertrag, der zwischen 40 und 230 kg pro Hektar betragen kann (Pritsch, 2007, S. 133. zit. n. D. Moser, 2012, S. 10). Bei einem Kaloriengehalt von ca. 306 kcal pro 100g ergibt dies einen Kalorienertrag von 122.400 bis 703.800 kcal/ha.

10.5.1.2.1.2 Sonnenblume

Sonnenblumen liefern im Durchschnitt Kornerträge von 2,1 bis 4,0 t (Thrän et al. 2016; Lewandowski, 2016). Der mittlere Kornertrag liegt laut TLL bei 2,2 t/ha (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2014 S. 7), nach Angaben des KTBL beträgt er 3,0 t/ha (KTBL, 2017). Im ökologischen Anbau kann man ebenfalls mit Erträgen zwischen 2,0 und 4,0 t/ha rechnen (BLE, 2017) Der Durchschnittsertrag liegt nach Angaben des KTBL bei rund 3,0 t/ha (KTBL, 2017), nach LfULG bei 2,5 t/ha (LfULG, 2010 S. 42). Der Ölgehalt des Sonnenblumenkorns liegt im Durchschnitt zwischen 48 und 52 Prozent (Pfützner, 2018), die Ölausbeute bewegt sich zwischen 35 und 50 Prozent des Korngewichts (Lewandowski, 2016). Der Ölertrag liegt somit bei rund 1.400 (700 bis 2.000) kg/ha.

Der bei der Ölpressung anfallende Sonnenblumenpresskuchen ist ein wertvolles Futtermittel mit einem hohen Protein- und Rohfasergehalt. Der mittlere Energiegehalt des Presskuchens als Futtermittel wurde über den Kaloriengehalt von Korn (5.570 kcal/kg [52]) und Öl (9.000 kcal/kg) sowie den mittleren Abpressgrad (42,5 Prozent) auf bis zu 12,7 MJ/kg geschätzt, was bei einem mittleren Kornertrag von 2,7 t/ha einem Presskuchenertrag von 1,6 t/ha mit einem Energieertrag von bis zu 20.900 MJ/ha entspricht.

Das mittlere Strohaufkommen liegt bei einem Korn-Stroh-Verhältnis von 1:4,1 (Hydro Agri Dülmen GmbH, 1993, zit. n. Thrän et al., 2016) theoretisch zwischen 8,6 bis 16,4 Tonnen lufttrockene Masse pro Hektar (Thrän et al., 2016). In der Praxis wurden in Baden-Württemberg (7 - 9 t TM/ha) und in Rheinland-Pfalz (6 -10 t TM/ha) Trockenmasseerträge zwischen 6 und 10 t TM/ha erzielt. In einem Forschungsprojekt wurden über zwei Jahre an sechs Standorten 14 bis 15 t TM/ha erzielt. Die Methanausbeute liegt bei 268 (262 bis 299) m³/t TM (Vetter, et al., 2009 S. 45-46). Geht man im Mittel von 11 t TM/ha aus, ergibt sich daraus ein Biogasertrag von 2.948 m³/ha. Bei einem Heizwert von 5,0 - 7,5 kWh/m³ können somit durchschnittliche Energieerträge von ca. 18.425 kWh/ha erwartet werden.

Sonnenblumen bieten Insekten ein reiches Angebot an Nektar und Pollen (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen; Deutscher Imkerbund; Apis, 2018). Der Honigertrag wird mit 5 bis 80 kg/ha angeben (Ion et al., 2011, zit. n. Moosbeckhofer et al., 2012, S. 6). Pauschale Mittelwerte sind jedoch als Orientierungswert nur bedingt geeignet, da Nektarfluss und Honigertrag von Sonnenblumen wesentlich von genetischen Faktoren (z. B. Nektarproduktion, Corollalänge), den kultivierten Sonnenblumensorten sowie von klimatischen Bedingungen, Bodentypen und der Bewirtschaftungsweise abhängen (Moosbeckhofer, et al., 2012 S. 26). Bisher konzentrierte man sich bei der Züchtung vor allem auf Ertragssicherheit, Krankheitsresistenz, Ölgehalt und Ölsäuremuster. Dabei wurde nach Moosbeckhofer et al. zu wenig beachtet, dass insektenbestäubte Sonnenblumen höhere Erträge liefern und Samen höherer Qualität produzieren (Moosbeckhofer, et al., 2012 S. 28).

10.5.1.2.1.3 Lein

Öllein liefert einen Kornertrag zwischen 1,5 und 2,0 t/ha (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2016a). Der Ölgehalt des Korns beträgt 40 bis 50 Prozent (Pude, et al., 2012 S. 65). Geht man davon aus, dass bei der Kaltpressung 75 bis 80 Prozent des im Korn enthaltenen Öls abgepresst werden können, sind Ölerträge von 610 (450 bis 800) kg/ha zu erwarten. Bei Warmpressung bzw. Extraktion können mit einer Abpressung von 90 bis 99 Prozent ca. 720 (540 bis 990) kg/ha gewonnen werden.

[52] Zum Kaloriengehalt von Sonnenblumenkernen werden auch höhere Angaben gemacht. So gibt z. B. die Firma Herbert Kluth (GmbH & Co. KG) einen Wert von 613 kcal/100g an.

Leinsaatpresskuchen gilt als wertvolles Futtermittel für die Tierernährung mit einem hohen Protein- und Energiegehalt (Kramerbräu Saaten und Öle GmbH, 2018). Der Energiegehalt liegt im Mittel zwischen 10 und 11 MJ pro kg Frischmasse oder 12,4 MJ ME pro kg Trockenmasse (LfL Bayern, 2017b S. 76). Bei einer Ölausbeute von ca. 35 Prozent und einem Aufkommen von 1,14 t Leinkuchen pro Hektar mit einem TM-Gehalt von 88 Prozent ergibt sich ein Energieertrag von 12.412 MJ ME/ha.

Der Leinstrohertrag liegt bei 1,5 Tonnen pro Tonne Korn (Graf, et al., 2005 S. 6), woraus sich ein durchschnittlicher Hektarertrag von ca. 2,6 t Stroh ergibt.

Der Nutzen von Lein als Insektenweide ist eher gering, da Lein im Unterschied zu Raps und Sonnenblume nur geringe Mengen an Nektar und Pollen produziert (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen; Deutscher Imkerbund; Apis, 2018). Somit sind auch nur geringe Honigerträge möglich.

10.5.1.2.1.4 Leindotter

Leindotter produziert üblicherweise Erträge von 2,0 bis 2,5 t Korn pro Hektar (Hartmann, et al., 2012 S. 5). Der Ölgehalt des Korns beträgt rund 40 Prozent (Hartmann, et al., 2012 S. 2). Bei Kaltpressung ist mit einem Ölertrag von 0,6 bis 0,8 t/ha zu rechnen. Der Energiegehalt des Presskuchens beträgt rund 13 MJ ME pro Kilogramm (Weißmann, et al., 2006). Als Futtermittel genutzt liefert Leindotterpresskuchen somit rund 20.000 MJ ME pro Hektar. Das Stroh wird in der Regel nicht geerntet und dient als Dünger für die Folgekulturen. Da Leindotteröl zwar ein wertvolles Speiseöl ist, in Deutschland aber kaum als solches nachgefragt wird, erfolgt der direkte Vergleich mit anderen Pflanzenölen im Kapitel über die stoffliche Nutzung von Pflanzenölen.

10.5.1.2.1.5 Soja

Der Sojabohnenertrag im konventionellen Anbau liegt in Deutschland nach Angaben des KTBL bei rund 3,9 Tonnen pro Hektar (3,5 t Speisequalität, 0,44 t Futterware). Andere Quellen geben Durchschnittserträge zwischen 2,7 und 3,5 t/ha an (LBV, 2014; IG Pflanzenzucht GmbH, 2014, S.25; Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2014, S. 6). Im Mittel aller Quellen ergibt sich ein Ertrag von 3,2 t/ha (vgl. Tabelle 105 und Tabelle 106).

Im ökologischen Anbau können nach Angaben des KTBL im Schnitt 2,6 t/ha (2,3 t Speisequalität, 0,3 t Futterware) geerntet werden (KTBL, 2017). Nach Brückler et al. kann mit 93,4 Prozent der konventionellen Erträge gerechnet werden (Brückler, et al., 2018), was in Deutschland rund 3,0 t/ha entspricht. In sechsjährigen Versuchen des FiBL wurden im ökologischen Anbau die gleichen Erträge wie im konventionellen Anbau erzielt (FiBL, 2015) was in Deutschland folglich rund 3,2 t/ha entspricht. Im Mittel aller Quellen ergibt sich damit ein Durchschnittsertrag

von 2,8 t/ha (vgl. Tabelle 105 und Tabelle 106). Der Ölgehalt von Sojabohnen schwankt zwischen 15 und 21 Prozent (Fischer, 2003), durchschnittlich liegt er bei rund 20 Prozent (Gladysz, et al., 2014). Die Ölausbeute des konventionellen Durchschnittsertrags liegt bei Kaltpressung somit bei 550 (410 und 580) kg/ha, bei Extraktion bei 650 (490 bis 690) kg/ha. Im ökologischen Landbau werden durch Kaltpressung 490 (370 bis 510) kg/ha erzielt, bei Extraktion 580 (430 bis 610) kg/ha.

Der durchschnittliche Energiegehalt des bei der Kaltpressung anfallenden Sojakuchens als Futtermittel liegt bei 14,1 MJ/kg. Sojaextraktionsschrot hat durchschnittlich einen Energiegehalt von 13,8 MJ/kg (LfL Bayern, 2017). Bei konventionellem Anbau fallen somit pro Hektar 2,6 t Sojaschrot mit einem Energiegehalt von rund 34.100 MJ ME oder 2,7 t Sojakuchen mit einem Energiegehalt von rund 37.400 MJ ME an. Im ökologischen Anbau fallen bei der Speiseölgewinnung durch Kaltpressung pro Hektar rund 2,4 t Sojakuchen mit einem Energiegehalt von rund 33.100 MJ ME an. Der Strohertrag beträgt im Mittel etwa eine Tonne pro Tonne Sojakorn (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2014 S. 7). Sojastroh kann als Rohstoff für die Spanplattenproduktion (Morrison, 2012) oder nach einer Brikettierung als Brennstoff genutzt werden. Geht man von einem für lufttrockenes Stroh typischen Heizwert von rund 4 kWh/kg aus, sind im konventionellen Anbau durchschnittliche Energieerträge von 12.650 kWh/ha zu erwarten, im ökologischen Landbau von rund 11.200 kWh/ha.

Soja produziert zudem Blütennektar und kann somit als Weide für Bienen und andere Insekten dienen, sofern die kleinen Blüten sich bei ausreichend Wärme öffnen (von Beesten, o. J.). „Zwar sind die Nektarmengen gering, doch blüht die Bohne im Hochsommer, wenn vielfach sonst nichts mehr blüht“ (von Beesten, o. J.).

10.5.1.2.1.6 Hanf

In Kombinationsnutzung liefert Hanf zwischen 3 und 5 Tonnen Stroh und zwischen 0,5 und 1,0 t Samen pro Hektar (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2016b). Bei einem Ölgehalt von 30 bis 35 Prozent (Florapower GmbH & Co. KG, 2018) und einer Abpressung von 80 Prozent des im Korn enthaltenen Öls ergibt sich eine Ölausbeute von ca. 26 Prozent sowie ein Ölertrag von etwa 195 (130 bis 260) kg pro Hektar. Der Kaloriengehalt von Hanfsamen wird mit 464 kcal/g angegeben (Hanf-Natur, 2018), der von Hanföl liegt bei 8.240 kcal/l (Pödör, 2018). Der bei der Kaltpressung anfallende Presskuchen enthält nach Angaben verschiedener Hersteller rund 2.860 bis 2.900 kcal/kg. Kombiniert man die Angaben zu Hanföl und Hanfpresskuchen, erhält man einen Kaloriengehalt der Samen von ca. 445 kcal/100g. Folglich ist Hanfpresskuchen mit rund 12 MJ ME/kg so energiereich wie Sojapresskuchen[53]. Umgerechnet

[53] Verhältnis : 1 MJ = 238,8459 kcal

auf den Hektar ergibt sich ein Ertrag von 4.400 bis 8.900 MJ ME/ha. Als Insektenweide liefert Hanf lediglich Pollen aber keinen Nektar.

10.5.1.2.1.7 Ölkürbis

Zum Anbau von Ölkürbissen liegt eine umfangreiche Datenbasis bisher nur für die Steiermark in Österreich vor, die von der dortigen Landwirtschaftskammer veröffentlicht wurde: Im Durchschnitt kann man in der Steiermark mit einem Kernertrag von 550 (500 bis 600) kg pro Hektar rechnen. Die Jahreserträge können in einem Bereich zwischen 300 und 1.000 kg/ha schwanken. Für 1 Liter Öl benötigt man ca. 2,5 bis 3,0 kg Kürbiskerne. (LK Steiermark, 2016) Dies entspricht einer Ölausbeute von 33 bis 40 Prozent. Der durchschnittliche Ölertrag liegt damit bei rund 205 (170 bis 240) kg/ha. Im ökologischen Anbau werden rund 91 Prozent der konventionellen Erträge erzielt (Brückler, et al., 2018). Dies entspricht Ölerträgen von rund 187 (155 bis 219) kg/ha.

In Deutschland rechnet man im Mittel mit 700 (600 bis 800) kg pro Hektar (Meierhöfer, 2017). Allerdings gibt es in Deutschland noch wenige Erfahrungen mit dem Anbau von Ölkürbissen. Neben den wertvollen Kernen liefern Ölkürbisse auch größere Mengen an Fruchtfleisch, das zwar als Lebensmittel verwendet werden kann, bei der Kürbiskernproduktion jedoch häufig ungenutzt bleibt, weil es zum Zeitpunkt der Kernreife nicht mehr so zart ist, wie im Sommer, solange der Kürbis noch grün ist.

10.5.1.2.1.8 Walnuss

Die Echte Walnuss (Juglans regia) wird in erster Linie wegen ihres Fruchtertrags angebaut. Das Holz der Walnuss ist jedoch ein begehrtes Edelholz, das überwiegend zur Produktion hochwertiger Gegenstände genutzt wird, hauptsächlich als Rohstoff für Möbel, Innenausbau, Parkett oder Täfelungen. Da es in der Regel als Nebenprodukt bei der Fällung alter Fruchtbäume anfällt, sind die nutzbaren Aufkommen relativ gering. Mit dem zunehmenden Interesse an modernen und traditionellen Agroforstsystemen (z. B. Streuobstwiesen), könnte die Walnuss aber künftig an Bedeutung gewinnen. Walnussbäume liefern durchschnittlich erst ab einem Alter von ca.15 bis 16 Jahren erste Nusserträge. Der jährliche Nussertrag eines Baumes nimmt mit dem Alter zu und steigt zwischen dem 35. und dem 60. Jahr auf durchschnittlich 45 kg pro Baum (WBI, o. J.). Der durchschnittliche Nussertrag wurde bei Umtriebszeiten von 50 Jahren auf rund knapp 1.050 kg pro Baum geschätzt. Pro Standjahr ergibt dies einen Schnitt von rund 21 kg pro Baum und Jahr. Wie in Tabelle 104 dargestellt, fällt der größte Teil des Ertrages jedoch erst zwischen dem 35. und 50. Standjahr an. Um kontinuierlich eine bestimmte Menge zu produzieren, benötigt man daher Bestände unterschiedlichen Alters. Streuobstwiesen umfassen auf einem Hektar in der Regel zwischen 60 und 120 Bäume. In Baden-Württemberg lag der Durchschnitt im Jahr 2005 bei rund 80 Bäumen pro Hektar (Küpfer, et al., 2010). Daraus ergibt sich rechnerisch ein Nussertragspotenzial von 1.680 kg pro Hektar. In

der Praxis erzielt einer der größten Walnussproduzenten Süddeutschlands (Weingut Weber, 2018a) mit 450 hochgewachsenen Bäumen auf einer Fläche von 5 Hektar 5 bis 7 Tonnen pro Jahr (Weingut Weber, 2018 S. 8). Dies entspricht 1.000 bis 1.400 kg/ha*a. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die eine Hälfte der Bäume rund 70 Jahre alt ist (Pflanzjahr 1950) und eine Höhe von 25 bis 30 Metern aufweist, während die andere Hälfte der Bäume mit zehn Jahren noch relativ jung ist und somit noch keine hohen Erträge liefert.

Moderne Agroforstsysteme auf Ackerflächen umfassen deutlich weniger Bäume als traditionelle Streuobstwiesen. Geht man nach Möndel von 26 Bäumen pro Hektar aus (Möndel, 2007), so erhält man über eine Nutzungsdauer von 50 Jahren rechnerisch etwa 546 kg Walnüsse pro Hektar und Jahr.

In Plantagen können veredelte Bäume unter günstigen Bedingungen bereits im 5. Jahr nach der Pflanzung erste kleine Erträge liefern. „Bei erwachsenen Bäumen sind Durchschnittserträge von 40 kg pro Baum realistisch“ (Walnussveredlung Biebelnheim, 2018). Im Plantagenanbau kann die Walnuss rund 50 Jahre kultiviert werden (Körber, 2008). Mit etwa 90 bis 100 veredelten Bäumen pro Hektar (Körber, 2008; Walnussveredlung Biebelnheim, 2018) sind die Baumbestände in Ertragsplantagen nur wenig dichter als auf typischen Streuobstwiesen. Geht man von geringen, leicht ansteigenden Erträgen zwischen dem 5. und 10. Standjahr sowie durchschnittlich 40 kg pro Baum zwischen dem 10. und 50. Standjahr aus, erhält man über eine Nutzungsdauer von 50 Jahren bis zu 3,4 t pro Hektar und Nutzungsjahr. In Plantagen mit ausschließlich erwachsenen Bäumen kann man mit 4,0 bis 5,0 t/ha*a rechnen.

10.5.1.2.1.8.1 Kernerträge

Der Kernanteil der Früchte kann zwischen 25 und 55 Prozent variieren. „Wirtschaftlich interessante Nusssorten, wie z. B die Franquette, haben 45 bis 50 % Kernanteil“ (Walker, 2011). Folglich kann man von Kernerträgen von 1,5 bis 1,7 t/ha ausgehen. Die Ölausbeute liegt bei etwa 45 bis 52 Prozent (Ölmühle Scheibel, 2017). Bezogen auf das Erntegewicht einschließlich der holzigen Schale liegt die Ölausbeute somit bei rund 23 Prozent. Der bei der Pressung anfallende Presskuchen ist ein wertvolles Nahrungsmittel, das z. B. zu einem feinen Mehl vermahlen werden kann, welches zum Backen geeignet ist (OPW Ingredients GmbH, 2018). Die von den Kernen getrennten Schalen können brikettiert und als Brennstoff genutzt werden. Walnussschalenbriketts haben einen höheren Heizwert als Holz, weshalb verschiedene Hersteller sie u. a. als nachhaltige Alternative zu Grillkohle anbieten. Der Energieertrag aus den im Plantagenanbau anfallenden Walnussschalen dürfte demnach mehr als 7.500 kWh/ha betragen.

Tabelle 104: Walnusserträge pro Baum nach Alter

Baumalter	Kg pro Baum und Jahr [1)]	kg Gesamt pro Baum [2)]
16. - 20. Standjahr:	10	50
21. - 25. Standjahr:	15	75
26. - 35. Standjahr:	25	250
36. - 50. Standjahr:	45	675
SUMME 1. - 50. Standjahr	**21**	**1.050**

Quellen: (1) WBI, o. J.; (2) Eigene Berechnung n. WBI, o. J.

10.5.1.2.1.8.2 Walnussholz

Ein wichtiges Nebenprodukt der Nussproduktion ist das Holz der Walnuss. In forstwirtschaftlich gepflegten Baumbeständen können Walnussbäume in 25 Jahren bereits eine Höhe von 17 Metern, Stammlängen von mehr als 8 Metern und einen mittleren Durchmesser von 22 cm erreichen (Ehring, et al., 2008). Im Fall von Agroforstsystemen mit dem Ziel der Wertholzproduktion geht A. Möndel (2007) bei fünfzigjährigen Umtrieben und Beständen mit 26 Bäumen pro Hektar von einem Wertholzertrag von 26 m³/ha aus (Möndel, 2007). Dies entspricht 0,52 m³ Wertholz pro Hektar und Jahr.

Auf Streuobstwiesen können mit 80 Bäumen pro Hektar, je nach Pflege und Stammhöhe, demnach bis zu 1,60 m³ Wertholz pro Hektar und Jahr erzielt werden. Bei geringeren Stammhöhen können die Wertholzerträge jedoch auch deutlich darunter liegen. Im Plantagenanbau liegt der Fokus nicht auf der Produktion von Wertholz, ist aber bei Hochstammbäumen dennoch möglich. In jedem Fall fällt bei der Rodung am Ende der Nutzungsdauer Holz an, das sich zumindest als Energieholz nutzen lässt. Aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit konnte der Holzertrag nur geschätzt werden: Da Walnussplantagen eher wie Streuobstwiesen strukturiert sind, wurde das Aufkommen über das Aufkommen an Rodungsholz auf Streuobstwiesen geschätzt. Dieses beträgt nach Nitsch et al. bei 100 Bäumen pro Hektar rund 1,0 t/ha*a (Nitsch, et al., 2001 S. 132). Die häufigste Baumart auf Streuobstwiesen ist der Kulturapfel. Walnussbäume können mit 20 bis 30 Metern etwa doppelt so hoch werden wie Apfelbäume (8 bis 15 Meter) und Stämme mit beachtlichen Längen und Durchmessern entwickeln. Durch die Veredelung im Plantagenanbau wird der Wuchs jedoch kontrolliert. Das Rodungsholzaufkommen wurde daher auf ca. 1,5 (1,0 – 2,0) t/ha*a geschätzt (vgl. Nitsch, et al., 2001; Möndel, 2007; Ehring & Keller, 2008).

10.5.1.2.1.8.3 Heu als Koppelprodukt

Streuobstwiesen liefern neben den Frucht- und Holzerträgen auch Heu, das als Rohstoff für die stoffliche Nutzung oder als Viehfutter genutzt werden kann. Der Grünlandertrag von Streuobstwiesen in Süddeutschland beträgt ca. 5 bis 7 Tonnen Trockenmasse pro Hektar und Jahr (Miller, 2014). In Obstplantagen findet meist keine Heunutzung statt. Der Grasschnitt wird stattdessen meistens gemulcht und zur Düngung genutzt.

10.5.1.2.1.9 Lupinen

Von Natur aus enthalten die Samen der Lupine große Mengen an bitteren und giftigen Alkaloiden. Die Samen wilder Pflanzen sollten daher nicht verzehrt werden. Bei den für den Verzehr geeigneten Lupinen wurden die problematischen Bitterstoffe herausgezüchtet. Insbesondere die Samen der blau blühenden Süßlupine bieten sich als Alternative zu Soja an. Sie enthalten viel Eiweiß und liefern zudem Vitamin E sowie wertvolle Aminosäuren und Spurenelemente.

Im konventionellen Anbau liegt das Ertragspotenzial der blauen Lupine unter Praxisbedingungen bei etwa 2,5 bis 4,0 t/ha (Schachler, et al., 2002/2016 S. 5). Im ökologischen Anbau hat die Blaue Lupine ein Ertragspotenzial von 1,7 bis 2,5 t/ha (FiBL, 2011), die Erträge der Gelben liegen bei etwa 1,0 bis 2,5 t/ha bei und bei der Weißen Lupine bei 1,5 bis 3,5 t/ha. (BLE, 2017b)

10.5.1.2.1.10 Linsen

Linsen sind reich an Eiweiß und Ballaststoffen und zeichnen sich durch eine hohe Haltbarkeit aus. Angebaut werden sie heute meistens gemeinsam mit einer Stützfrucht. Dafür eignet sich vor allem Hafer. „Landwirte, die Linsen mit weniger geeigneten Stützfrüchten anbauen, ernten im Schnitt 400 bis 600 Kilogramm Linsen pro Hektar“ (Universität Hohenheim, 2016). Durch verbesserte Anbaumethoden können die Erträge im Anbau mit Hafer als Stützfrucht jedoch gesteigert werden. Auf ökologisch bewirtschafteten Versuchsfeldern der Universität Hohenheim wurde im Jahr 2015 unter sehr günstigen Bedingungen ein Ertrag von über drei Tonnen geerntet. (Universität Hohenheim, 2016). Nach Auskunft der Versuchsleitung geht man davon aus, dass langfristig Durchschnittserträge von rund 1,0 t/ha möglich sein sollten (Gruber, 2018). Da zum konventionellen Anbau keine aktuellen Daten vorliegen, wurde vereinfachend angenommen, dass dort ebenfalls ein Durchschnittsertrag von mindestens 1,0 t/ha möglich sein dürfte. In der Praxis werden im ökologischen Anbau auf der Schwäbischen Alb in Baden-Württemberg bisher Spitzenerträge von bis zu 1,5 t/ha erzielt, im Durchschnitt ernten befragte Erzeuger dort bisher 0,5 bis 0,6 t/ha. Als Stützfrüchte werden Hafer, Braugerste oder Leindotter genutzt. In dieser Funktion liefert Hafer als Stützfrucht Erträge von bis zu 0,5 t/ha, Braugerste bis zu 0,3 t/ha und Leindotter bis zu 0,7 t/ha (Häußler, 2017). Leindotter ist jedoch mit einem vergleichsweise hohen Arbeitsaufwand verbunden.

10.5.1.2.2 Erträge im Vergleich

In Tabelle 105 sind die Ertragspotenziale von Ölpflanzen und Eiweißpflanzen in Deutschland dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Differenz zwischen konventionellem und ökologischem Anbau deutlich geringer ausfällt als im Falle des Getreideanbaus. Im direkten Vergleich liegen die durchschnittlichen Erträge der Ölfrüchte und Eiweißpflanzen im ökologischen Anbau bei über 80 Prozent der Erträge des konventionellen Anbaus.

Tabelle 105: Hektarerträge von Ölfrüchten und Eiweißpflanzen (t/ha)

Quellen	Diverse	STL BW; LBV	BMEL, 2017; TLL, 2014	KTBL, 2017	KTBL, 2017	Noleppa, 2016; BLE, 2016	Brückler et al., 2018	Diverse
Anbauweise	**konventionell**				**ökologisch**			
Kulturpflanze	**Ertrag in t/ha**							
Winterraps	[1] 3,8	[6] 4,0	[8] 3,8	[10] 3,4	[10] 1,9	[11] 2,3		[13] 2,3
Sonnenblumen	[2] 3,2		[8] 2,2	[10] 3,0	[10] 3,0	[21] 3,0		[13] 2,5
Soja	[3] 2,7	[7] 3,5	[9] 3,3	[10] 3,5	[10] 2,3		[12] 2,8	[14] 3,2
Ölkürbis	[4] 0,6						[12] 0,4	
Öllein	[5] 1,8				[10] 1,4			
Hanf	[19] 0,8							[19] 0,8
Walnuss	[20] 1,6							[20] 1,6
Blaue Lupine	[15] 3,3				[10] 2,5			[16] 2,1
Linse	[17] 1,0							[18] 0,6

(1) Statistisches Bundesamt, 2017a; (2) Lewandowski, 2016; (3) IG Pflanzenzucht GmbH, 2014, S. 25; (4) LK Steiermark, 2016; (5) Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2016a; (6) Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (STL BW), 2018 ; (7) LBV, 2014; (8) BMEL, 2017, S. 72; (9) Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2014, S.7; (10) KTBL, 2017; (11) Noleppa, 2016, S. 5; (12) Brückler et al., 2017; (13) LfULG, 2010, S. 42; (14) FiBL, 2015; (15) Schachler et al., 2002/2016 (16) FiBL, 2011; (17) Schätzung n. Universität Hohenheim, 2016; (18) Häußler, 2017 (19) Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2016b (20) Eigene Berechnung n. Walnussveredlung Biebelnheim, 2018; (21) BLE, 2016;

Betrachtet man nur die hier dargestellten Ölfrüchte, werden im ökologischen Anbau sogar 86 Prozent der konventionellen Erträge erzielt. Die Eiweißpflanzen Lupine und Linse erreichen im ökologischen Anbau etwa zwei Drittel der konventionellen Erträge. Keine oder sehr geringe Unterschiede zeigen sich bei Sonnenblumen und Soja. Auch in der Wahlnussproduktion gibt es keine Unterschiede im Ertrag (Walnussveredlung Biebelnheim, 2018a), da die Walnuss kaum Pflanzenschutz benötigt: „Walnussveredlungen zeichnen sich durch hohe Vitalität und geringe Krankheitsanfälligkeit aus. Allerdings muss in feuchten Jahren auf Marssonina und Bakterienbrand geachtet werden und ggf. eine Bekämpfung mit Kupferpräparaten durchgeführt werden“ (Walnussveredlung Biebelnheim, 2018).

Tabelle 106: Zusammenfassung - Durchschnittliche Erträge von Ölfrüchten und Eiweißpflanzen im konventionellen und ökologischen Landbau (t/ha)

Kulturpflanze	Ertrag t/ha		Relative Mengenerträge des ökologischen Landbaus (%)
	⌀ konventionell	⌀ ökologisch	Durchschnitt Literatur
Winterraps	3,8	2,2	57,2
Sonnenblumen	2,8	2,8	100,0
Soja	3,2	2,8	88,7
Ölkürbis	0,6	0,4	78,2
Öllein	1,8	1,4	78,3
Hanf	0,8	0,8	100,0
Walnuss*	1,6	1,6	100,0
Blaue Lupine	3,3	2,3	70,3
Linse	(1,0)	0,6	(60,0)

* ohne Schale
Quellen: (1) Statistisches Bundesamt, 2017a; (2) Lewandowski, 2016; (3) IG Pflanzenzucht GmbH, 2014, S. 25; (4) LK Steiermark, 2016; (5) Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2016a; (6) Statistisches Landesamt Baden-Württemberg (STL BW), 2018 ; (7) LBV, 2014; (8) BMEL, 2017, S. 72; (9) Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2014, S.7; (10) KTBL, 2017; (11) Noleppa, 2016, S. 5; (12) Brückler et al., 2017; (13) LfULG, 2010, S. 42; (14) FiBL, 2015; (15) Schachler et al., 2002/2016 (16) FiBL, 2011; (17) Schätzung n. Universität Hohenheim, 2016; (18) Häußler, 2017 (19) Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2016b (20) Eigene Berechnung n. Walnussveredlung Biebelnheim, 2018; (21) BLE, 2016;

10.5.1.2.2.1 Kalorienerträge

Aus den mittleren Hektarerträgen und dem jeweiligen Kaloriengehalt ergeben sich für Ölfrüchte im konventionellen Anbau Hektarerträge zwischen 2,5 und 18,4 Millionen kcal/ha, im ökologischen Anbau 1,9 bis 15,2 Millionen kcal/ha.

Tabelle 107: Kalorienerträge von Ölfrüchten und Eiweißpflanzen

Kulturpflanze	kcal/kg Korn	kcal Korn/ha	
		konventionell	ökologisch
Winterraps	[4)] 4.870	18.396.550	10.522.748
Sonnenblumen	[2)] 5.570	15.431.552	15.707.400
Soja	[4)] 4.150	13.127.488	11.644.520
Ölkürbis	[1)] 4.460	2.453.000	1.918.250
Öllein	[3)] 4.250	7.437.500	5.822.500
Hanf	[2)] 4.550	3.412.500	3.412.500
Walnuss	[1)] 6.540	10.464.000	10.464.000
Lupinen	[2)] 1.190	3.867.500	2.719.150
Linsen (roh)*	[1, 2)] 3.000	3.000.000	1.650.000

Quellen: (1) Yazio GmbH, 2017; (2) Fddb, 2018; (3) Sun Sirius GmbH, 2018; (4) Eigene Berechnung
* Der Kaloriengehalt von rohen Linsen wird mit 274 bis 316 kcal/100g angegeben, häufig sind Angaben um 300 kcal/100g.

Im konventionellen Anbau liefert Winterraps mit Abstand die meisten Kalorien pro Hektar, gefolgt von Sonnenblumen, Soja und Walnuss. Im Gegensatz zu den übrigen Ölfrüchten wird Rapssaat jedoch nicht vollständig als Nahrungsmittel genutzt, sondern dient vorrangig der Ölproduktion. Der dabei anfallende Rapskuchen wird als Futtermittel in der Viehhaltung eingesetzt. Im ökologischen Anbau liefert die Sonnenblume den höchsten Kalorienertrag pro Hektar – vor Soja, Winterraps und Walnuss.

Neben den ölhaltigen Kernen können Winterraps und Sonnenblumen beachtliche Honigerträge produzieren. Mit Honigerträgen zwischen 40 und 230 kg/ha liefert Raps im Mittel ca. 413.100 kcal/ha in Form von Honig. Sonnenblumen liefern mit 5 bis 80 kg Honig im Mittel rund 130.050 kcal/ha. Geringe Mengen an Nektar liefern zudem die Blüten von Lupinen, Öllein und Soja.

10.5.1.2.2.2 Hinweise zur Datengrundlage

Der Kaloriengehalt von Leinsamen wird mit 372 kcal/100g (Fddb, 2018) bis 534 kcal/100g (Yazio GmbH, 2017-2019) angegeben. Für die vorliegende Schätzung wurde ein mittlerer Wert von 425 kcal/100g angenommen (Sun Sirius GmbH, 2018). Rapssaat wird in der Lebensmittelproduktion nur zur Ölgewinnung genutzt, Angaben zum Kaloriengehalt des ganzen Korns liegen daher nicht vor. Für ganze Sojabohnen werden Werte von 149 kcal/100g (Fddb, 2018) bis 170 kcal/100g (Sun Sirius GmbH, 2018) angegeben, für geröstete Sojakerne 489 kcal/100g (Fddb, 2018). Der Kaloriengehalt von Rapskernen und frischen Sojakernen wurde deshalb anhand des Kaloriengehalts der Öle sowie des Energiegehalts der Presskuchen berechnet. Sojaöl enthält 828 kcal/100g (Fddb, 2018), Sojakuchen hat einen Energiegehalt von rund 14 MJ ME/kg (LfL Bayern, 2017). Rapsöl enthält 828 kcal/100g (P. Brändle GmbH, 2018), Rapskuchen hat einen Energiegehalt von 13,2 MJ ME/kg. Auf dieser Basis wurde für Rapssaat ein Kaloriengehalt von rund 490 kcal/100g und für frische Sojakerne von rund 415 kcal/100g berechnet.

10.5.1.2.2.3 Ölerträge

Aufgrund der dargestellten Hektarerträge und der jeweiligen Ölausbeuten bei Kaltpressung ergeben sich Speiseölerträge von 0,2 bis 1,3 t/ha im konventionellen Anbau und von 0,2 bis 1,1 t/ha im ökologischen Anbau. Im Mittel liegen die Ölerträge des ökologischen Anbaus somit bei rund 84 Prozent des konventionellen Anbaus.

Tabelle 108: Speiseölausbeuten und Hektarerträge im konventionellen und im ökologischen Anbau

Kulturpflanze	Ölausbeute	Ölertrag t/ha	
	Kaltpressung	konventionell	ökologisch
Winterraps	33,6 %	1,27	0,73
Sonnenblumen	39,0 %	1,08	1,10
Soja	16,0 %	0,51	0,45
Ölkürbis	36,4 %	0,20	0,16
Öllein	30,0 %	0,53	0,41
Hanf	26,0 %	0,20	0,20
Walnuss*	48,5 %	0,78	0,78

Bezogen auf das Kerngewicht ohne Schale
Quelle: Eigene Berechnung

Der Kaloriengehalt der hier dargestellten Pflanzenöle liegt zwischen 824 und 828 kcal pro Liter, was 896 bis 900 kcal/100g entspricht (S. Brändle GmbH, 2018; Fddb, 2018; Pödör Premium Öle und Essige, 2018). Daraus ergeben sich im konventionellen Anbau Kalorienerträge von 1,7 bis 11,4 Millionen kcal/ha, im ökologischen Anbau von 1,4 bis 9,6 Millionen kcal/ha. Die höchsten Erträge liefern konventionell Winterraps vor Sonnenblumen, Walnuss, Öllein und Soja. Im ökologischen Anbau rückt die Sonnenblume an die erste Stelle vor Walnuss, Winterraps, Soja und Öllein. Ölkürbis und Hanf liefern jeweils die geringsten Hektarerträge, wenn mögliche Koppelprodukte unberücksichtigt bleiben.

Tabelle 109: Kaloriengehalt von Pflanzenölen und Kalorienerträge pro Hektar, konventionell und ökologisch

Kulturpflanze	kcal/100g Öl	Ölertrag kcal/ha	
		konventionell	ökologisch
Winterraps	[1)] 900	11.425.600	6.535.400
Sonnenblumen	[3)] 898	8.950.600	9.561.000
Soja	[2)] 900	4.555.100	3.950.700
Ölkürbis	[3)] 898	1.795.800	1.404.300
Öllein	[3)] 898	4.714.500	3.690.800
Hanf	[3)] 896	1.747.200	1.747.200
Walnuss	[3)] 898	6.968.500	6.968.500

Quellen: (1) S. Brändle GmbH, 2018 (2) Fddb, 2018; (3) Pödör, 2018

10.5.1.2.3 Koppelprodukte und Flächengutschriften

Die wichtigsten Koppelprodukte von Öl- und Eiweißpflanzen sind, wie bereits dargestellt, das Stroh von Raps, Sonnenblume, Soja, Öllein und Hanf sowie das Holz der Walnuss, sofern

diese als Agroforstbaum oder als Streuobstbaum genutzt wird. In Tabelle 110 sind die jeweiligen Hektarerträge der wichtigsten Speiseölpflanzen im konventionellen Anbau dargestellt, in Tabelle 111 die Hektarerträge im ökologischen Anbau.

Tabelle 110: Hektarerträge von Ölpflanzen im konventionellen Anbau (t/ha)

Produkt	Winter-raps	Sonnen-blumen	Soja	Öl-kürbis	Öllein	Hanf	Walnuss Plantage	Walnuss Streuobst
Korn (t/ha)	3,8	2,7	3,2	0,6	1,8	0,8	1,6	0,8
Frucht (t/ha)				(28,0)				
Stroh (t/ha)	7,2	11,0	3,2		2,6	4,5		
Wertholz (m³/ha)								0,8 - 1,6
Nussschalen (t/ha)							1,8	0,9
Brennholz (t/ha)							1,5	(1,0)
Heu (t TM/ha)								6,5
Honig (t/ha)	0,14	0,04	k. A.		k. A.			

Quellen: s. o.

Tabelle 111: Hektarerträge von Ölpflanzen im ökologischen Anbau (t/ha)

Produkt	Winter-raps	Sonnen-blumen	Soja	Öl-kürbis	Öllein	Hanf	Walnuss Plantage	Walnuss Streuobst
Korn ökologisch (t/ha)	2,2	2,7	2,7	0,4	1,4	0,8	1,6	0,8
Frucht ökologisch (t/ha)				(22,0)				
Stroh ökologisch (t/ha)	4,1	11,0	2,7		2,1	4,5		
Wertholz (m³/ha)								0,8 - 1,6
Nussschalen (t/ha)							1,8	0,9
Brennholz (t/ha)							1,5	(1,0)
Heu (t TM/ha)								6,5
Honig (t/ha)	0,14	0,04	k. A.		k. A.			

Quellen: s. o.

Das Stroh von Raps und Sonnenblume bietet sich vor allem für eine energetische Nutzung an (Rapsstroh als Brennstoff, Sonnenblumenstroh als Biogassubstrat). Das Stroh von Öllein und Hanf eignet sich sowohl für energetische als auch für verschiedene stoffliche Nutzungen, die in den folgenden Kapiteln genauer betrachtet werden.

10.5.1.2.3.1 Ölproduktion auf Basis von Ölpflanzen

Bei der folgenden Berechnung der Flächengutschriften wurde angenommen, dass das Stroh von Öllein und Hanf zur Faser- bzw. Dämmstoffproduktion genutzt wird. Für das Stroh der übrigen Pflanzen sowie das Heu der Streuobstwiesen wurde eine energetische Nutzung angenommen. Aus den jeweiligen Hektarerträgen ergeben sich nach der beschriebenen Berechnungsmethode für den konventionellen Anbau Flächengutschriften zwischen 1.600 und 7.229 m²/ha. Im Vergleich von konventionellem Anbau (Tabelle 112) und ökologischer Produktion

(Tabelle 113) zeigen sich deutlich geringere Ertragsunterschiede als im Getreideanbau. Lediglich beim Rapsanbau fallen die Flächengutschriften im ökologischen Anbau deutlich geringer aus als im konventionellen Anbau. Die größten Flächengutschriften erhalten im konventionellen Anbau Hanf, Streuobst-Walnuss, Winterraps und Sonnenblumen.

Tabelle 112: Flächengutschriften der Speisölproduktion im konventionellen Anbau (m²/ha)

Produkt	Winter-raps	Sonnen-blumen	Ölkürbis	Öllein	Soja	Hanf	Walnuss Plantage	Walnuss, Streu-obst
Fruchtfleisch			1.600*					
Presskuchen/Mehl							1.108	548
Honig	131	41						
Wertholz								1.513
Textilfasern				429				
Dämmstoff				263		4.500		
Futtermittel	2.957	2.085		1.878	3.351	595		
Schäben				1.903				
Festbrennstoff	4.142				1.622		970	2.685
Biogassubstrat		3.760						
SUMME	**7.229**	**5.886**	**1.600**	**4.472**	**4.973**	**5.095**	**2.078**	**4.746**

* Es wurde unterstellt, dass sich grundsätzlich eine sinnvolle Nutzung für das Fruchtfleisch finden lässt.
Quelle: Eigene Berechnung

Winterraps erhält im ökologischen Anbau deutlich geringere Gutschriften als im konventionellen Anbau. Bei Hanf, Walnuss und Sonnenblume gibt es keine oder nur geringe Differenzen zum konventionellen Anbau.

Tabelle 113: Flächengutschriften der Speisölproduktion im ökologischen Anbau (m²/ha)

Produkt	Winter-raps	Sonnen-blumen	Ölkürbis	Öllein	Soja	Hanf	Walnuss Plantage	Walnuss, Streu-obst
Fruchtfleisch			1.251*					
Presskuchen/Mehl							1.108	548
Honig	75	41						
Wertholz								1.513
Textilfasern				429				
Dämmstoff				263		4.500		
Futtermittel	1.691	2.085		1.470	2.966	595		
Schäben				1.903				
Festbrennstoff	2.369				1.436	0	970	2.685
Biogassubstrat		3.760						
SUMME	**4.135**	**5.886**	**1.251**	**4.064**	**4.402**	**5.095**	**2.078**	**4.746**

* Es wurde unterstellt, dass sich grundsätzlich eine sinnvolle Nutzung für das Fruchtfleisch finden lässt.
Quelle: Eigene Berechnung

Unter Berücksichtigung der Koppelprodukte der Speiseölproduktion liegt Winterraps im konventionellen Anbau mit einer Flächeninanspruchnahme von 0,3 m²/1.000 kcal bei der Flächeneffizienz leicht vor Sonnenblumen mit 0,4 m²/1.000 kcal und deutlich vor Soja und Plantagenwalnuss mit jeweils 1,1 m²/1.000 kcal. Im ökologischen Anbau weisen Sonnenblumen mit 0,4 m²/1.000 kcal eine deutlich höhere Flächeneffizienz auf als Winterraps mit 1,0 m²/1.000 kcal, Plantagenwalnuss mit 1,1 m²/1.000 kcal und Soja mit 1,2 m²/1.000 kcal. Streuobstwalnuss und Öllein erreichen ebenfalls Werte unter 2,0 m²/1.000 kcal. Hanf und Ölkürbis liegen sowohl im konventionellen als auch im ökologischen Anbau deutlich hinter den Effizienzwerten der übrigen Pflanzen in diesem Vergleich.

Tabelle 114: Flächeninanspruchnahme der Pflanzenölproduktion nach Kulturpflanze, Wirtschaftsweise und Koppelproduktnutzung (m²/kg Öl)

Wirtschaftsweise & Nutzung	Winterraps	Sonnenblumen	Soja	Ölkürbis	Öllein	Hanf	Walnuss, Plantage	Walnuss, Streuobst
konventionell ohne KP	1,0	1,1	2,0	4,08	2,3	5,7	1,4	2,9
konventionell inkl. KP	0,3	0,4	1,1	3,42	1,3	2,8	1,1	1,5
ökologisch ohne KP	1,7	1,1	2,4	5,21	2,9	5,7	1,4	2,9
ökologisch inkl. KP	1,0	0,4	1,2	4,38	1,7	2,8	1,1	1,5

KP = Koppelprodukte
Quelle: Eigene Berechnung

Durch die Nutzung möglicher Koppelprodukte reduziert sich die Flächeninanspruchnahme der Speisölproduktion im konventionellen Anbau durchschnittlich um 45 (16 – 70) Prozent und im ökologischen Anbau um 42 (16 – 64) Prozent. Große Effekte der Koppelproduktnutzung zeigen sich bei Sonnenblumen, Winterraps, Soja, Hanf und Streuobstwalnuss.

10.5.1.2.3.2 Kornproduktion durch Ölpflanzen

Wird das Korn von Ölpflanzen nicht als Rohstoff für die Speiseölproduktion genutzt, ist der Kalorienertrag pro Hektar deutlich höher, sodass sich ohne Berücksichtigung von Koppelprodukten ein deutlich geringerer Flächenbedarf je 1.000 kcal ergibt. Da allerdings der Presskuchen als Futtermittel entfällt, ergeben sich deutlich geringere Flächengutschriften. Diese sind in Tabelle 115 für den konventionellen Anbau und in Tabelle 116 für den ökologischen Anbau dargestellt. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass Rapskorn üblicherweise nicht unverarbeitet als Nahrungsmittel verwendet wird, sondern fast ausschließlich als Rohstoff für die Ölproduktion. Für die Nutzung der Fasern des Öllein wurde in diesem Fall keine Textilfaserproduktion, sondern eine vollständige Verarbeitung zu Dämmstoff unterstellt.

Tabelle 115: Flächengutschriften für Koppelprodukte der Kornproduktion von Ölpflanzen im konventionellen Anbau (m²/ha)

Produkt		Winter-raps	Sonnen-blumen	Soja	Öl-kürbis	Öllein	Hanf	Walnuss, Plantage	Walnuss, Streuobst
Fruchtfleisch					1.600				
Honig		131	41						
Wertholz									1.513
Dämmstoff						862	4.500		
Festbrennstoff		3.837		1.622	0	983		1.787	2.685
Biogassubstrat		0	2.362	0	0	0	0	0	0
SUMME		**3.968**	**2.403**	**1.622**	**1.600**	**1.845**	**4.500**	**1.787**	**4.199**

Quelle: Eigene Berechnung

Tabelle 116: Flächengutschriften für Koppelprodukte der Kornproduktion von Ölpflanzen im ökologischen Anbau (m²/ha)

Produkt	Winter-raps	Sonnen-blumen	Soja	Öl-kürbis	Öllein	Hanf	Walnuss, Plantage	Walnuss, Streuobst
Fruchtfleisch				1.251				
Honig	131	41						
Wertholz								1.513
Dämmstoff					675	4.500		
Festbrennstoff	2.083		1.407	0	769		1.787	2.685
Biogassubstrat	0	2.215	0	0	0	0	0	0
SUMME	**2.214**	**2.256**	**1.407**	**1.251**	1.**444**	**4.500**	**1.787**	**4.199**

Quelle: Eigene Berechnung

10.5.1.2.3.3 Eiweißpflanzen

Die bekannten Ertragspotenziale der Eiweißpflanzen Lupine und Linse sind in Tabelle 117 dargestellt. Lupinen, die als Eiweißpflanze eine Alternative zu Soja darstellen, erreichen nur im konventionellen Anbau Kornerträge auf dem Niveau von Soja. Zudem liegen bisher nur wenige Erfahrungen und Daten zur Nutzung der Restpflanzen vor, die z. B. als Biogassubstrat verwendet werden können. Es konnten daher keine Flächengutschriften zugewiesen werden.

Tabelle 117: Hektarerträge von Eiweißpflanzen (t/ha)

Produkt	Lupinen	Linsen
Korn konventionell	3,3	1,0
Korn ökologisch	2,3	0,6
Stroh/Kraut konventionell	k. A.	k. A.
Stroh/Kraut ökologisch	k. A.	k. A.
Korn Stützfrucht konventionell		0,7
Korn Stützfrucht ökologisch		0,4
Stroh Stützfrucht konventionell		0,7
Stroh Stützfrucht ökologisch		0,4

Quellen: Universität Hohenheim, 2016; Häußler, 2017; Gruber, 2018; Schachler, et al., 2002/2016; FiBL, 2011; BLE, 2017b

Linsen können ihre vergleichsweise geringen Kornerträge trotz ihrer relativ zahlreichen Koppelprodukte kaum kompensieren. Flächengutschriften von 1.144 m²/ha im konventionellen Anbau und 629 m²/ha im ökologischen Landbau wirken sich nur geringfügig auf die Flächeneffizienz aus. So steigt der Kornertrag von Linsen im ökologischen Anbau durch die Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte nur um rund 13 Prozent. Im konventionellen Anbau dürfte der Effekt etwas deutlicher sein. Er kann hier jedoch nicht genauer beziffert werden.

Tabelle 118: Flächengutschriften für Koppelprodukte von Eiweißpflanzen (m²/ha)

Produkt	Lupinen		Linsen	
	konventionell	ökologisch	konventionell	ökologisch
Korn Stützfrucht			808	444
Honig	k. A.	k. A.		
Futtermittel			k. A.	k. A.
Festbrennstoff			336	185
Biogassubstrat	k. A.	k. A.		
SUMME	**0**	**0**	**1.144**	**629**

Quelle: Eigene Berechnung

10.5.1.2.3.4 Zusammenfassung

Ob die Körner bzw. Kerne für die Ölproduktion verwendet oder direkt verzehrt werden, wirkt sich zunächst kaum merklich auf die Flächeneffizienz von Ölfrüchten aus. Bezogen auf die

Flächeninanspruchnahme je 1.000 kcal führt die Nutzung des Korns als Nahrungsmittel rein rechnerisch zu sehr ähnlichen Effizienzwerten, wie im Falle der Ölproduktion, bei welcher der Presskuchen als Futtermittel betrachtet wurde. Wird der Presskuchen verfüttert, stehen für den menschlichen Verzehr dennoch weniger Kalorien zur Verfügung. Bei einem direkten Verzehr des Korns bzw. der Kerne büßt Winterraps daher im Vergleich zu anderen Ölpflanzen an Flächeneffizienz ein, weil das Rapskorn in der Regel nicht direkt verzehrt wird, sondern fast ausschließlich als Futtermittel Verwendung findet. Die sich daraus ergebenden Auswirkungen auf den Flächenbedarf je 1.000 kcal wurden hier jedoch nicht berechnet. Sonnenblumen, Soja und Plantagenwalnuss weisen somit nicht nur vergleichsweise hohe Kornerträge auf, sondern, mit Blick auf die Nahrungskalorien, die direkt für den menschlichen Verzehr geeignet sind, auch mit Abstand die geringste Flächeninanspruchnahme in Quadratmetern pro 1.000 kcal.

Die Differenz zwischen konventionellem und ökologischem Anbau fällt bei den Ölpflanzen deutlich geringer aus als bei Getreide und Hackfrüchten. Unter Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte wird im ökologischen Anbau von Öl- und Eiweißpflanzen im Vergleich zum konventionellen Anbau im Durchschnitt aller betrachteten Pflanzen eine Flächeneffizienz von 82 Prozent erreicht. Sonnenblumen, Hanf und Walnuss liefern im ökologischen Anbau praktisch die gleichen Erträge wie im konventionellen Anbau.

Der Vergleich der wichtigen Öl- und Eiweißpflanzen in Abbildung 114 veranschaulicht die Auswirkungen der Koppelprodukte auf die jeweiligen Flächeneffizienzwerte.

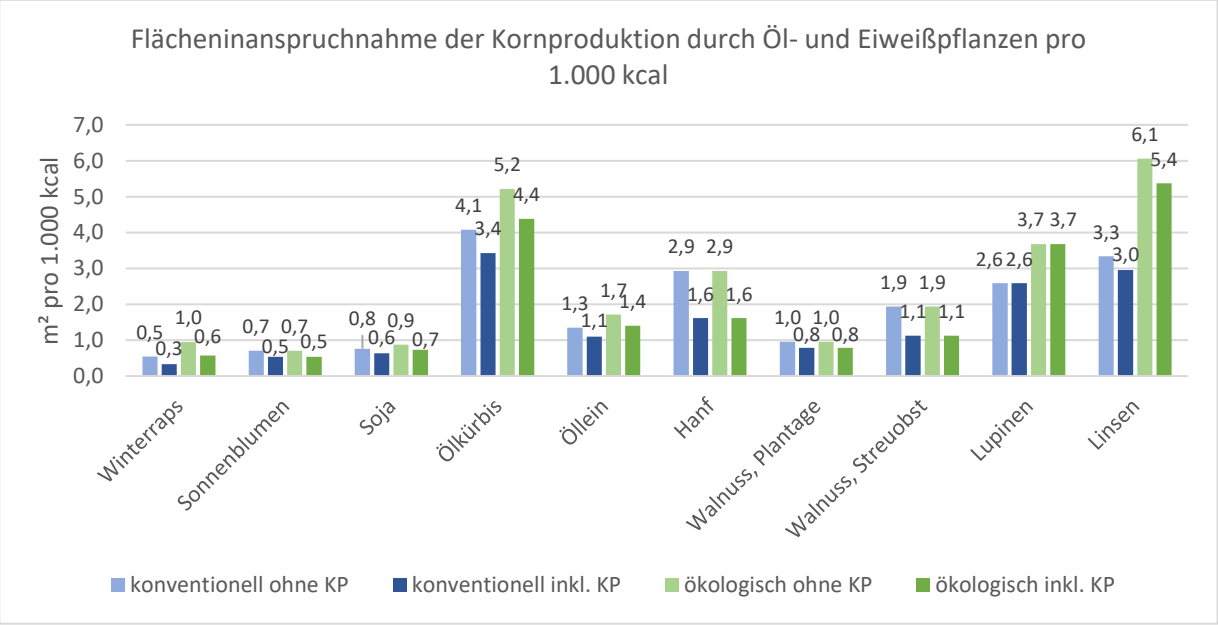


Abbildung 114: Flächeninanspruchnahmen der Kornproduktion wichtiger Öl- und Eiweißpflanzen nach Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte (m²/1.000 kcal)

Die durchschnittliche Flächeninanspruchnahme unter Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte liegt bei Ölpflanzen im konventionellen Anbau bei 1,19 (0,33 – 3,42) m²/1.000 kcal und im ökologischen Anbau bei 1,39 (0,53 – 4,38) m²/1.000 kcal. Die Eiweißpflanzen Lupinen und

Linsen nehmen im konventionellen Anbau 2,59 – 2,95 m²/1.000 kcal in Anspruch während ihr Flächenbedarf im ökologischen Anbau bei 3,68 – 5,37 m²/1.000 kcal liegt. Zählt man Soja ebenfalls zu den Eiweißpflanzen, dann ist Soja mit Werten von 0,64 m²/1.000 kcal (konventionell) und 0,74 m²/1.000 kcal (ökologisch) deutlich flächeneffizienter als Lupinen[54] und Linsen.

Tabelle 119: Flächeninanspruchnahme durch Öl- und Eiweißpflanzen für die Kalorienproduktion (m²/1.000 kcal)

Wirtschaftsweise & Nutzung	Winterraps	Sonnenblumen	Soja	Ölkürbis	Öllein	Hanf	Walnuss Plantage	Walnuss, Streuobst	Lupine	Linsen
Konvent. ohne KP	0,54	0,70	0,76	4,08	1,34	2,93	0,96	1,94	2,59	3,33
Konvent. inkl. KP	0,33	0,53	0,64	3,42	1,10	1,61	0,78	1,12	*2,59	2,95
Ökolog. ohne KP	0,95	0,70	0,88	5,21	1,72	2,93	0,96	1,94	3,68	6,06
Ökolog. inkl. KP	0,57	0,53	0,74	4,38	1,40	1,61	0,78	1,12	*3,68	5,37

* Der Energieertrag aus der energetischen Nutzung der Pflanze lag noch nicht vor, weshalb die daraus folgenden Flächengutschriften nicht berechnet werden konnten.
KP = Koppelprodukte.
Quelle: Eigene Berechnung

[54] Wie bereits erwähnt, liegen für Lupinen keine Informationen zu den Nutzungspotenzialen der Restpflanze vor. Hier wird zumindest eine gewisse Eignung als Biogassubstrat angenommen, die hier jedoch nicht berücksichtigt werden konnte. Die Werte für Lupinen unter Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte sind daher in Klammern gesetzt.

10.5.1.3 Gemüse und Salate

Die Erträge des Gemüse- und Salatanbaus wurden den offiziellen Statistiken des Statistischen Bundesamtes (Destatis), des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) und des Bayerischen Landesamtes für Statistik entnommen. Sofern in den Statistiken Erträge in Stückzahlen pro Hektar angegeben sind, wurden diese mithilfe der mittleren Einzelgewichte der Gemüseerzeugnisse nach Prüße et. al (2002) in Tonnen pro Hektar umgerechnet. Im Einzelnen handelt es sich bei den verwendeten Mittelwerten um die mittleren Gewichte von Kohlrabi (265g), Kopfsalat (348g), Staudensellerie (652g) und Möhren (62g) (Prüße, et al., 2002).

Die Erträge des Gemüse- und Salatanbaus variieren von Region zu Region ebenso wie von Jahr zu Jahr. Die mittleren Erträge des konventionellen Anbaus weichen in Süddeutschland jedoch kaum von den Erträgen im Bundesgebiet ab, wie der Vergleich der Daten des Statistischen Bundesamtes (Destatis) und des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) mit den Daten des Bayerischen Landesamtes für Statistik in Tabelle 120 zeigt. Mit Blick auf den Klimawandel muss künftig jedoch im gesamten Bundesgebiet von größeren Ertragsschwankungen und dauerhaften Ertragsminderungen ausgegangen werden, wenn sich Dürren, Starkregen und Überschwemmungen häufiger ereignen sollten.

10.5.1.3.1 Ertragspotenziale

Nimmt man gleiche Flächenanteile aller Gemüsearten an, ergibt sich für Deutschland unter den bisherigen klimatischen Bedingungen ein durchschnittliches Ertragspotenzial von etwas weniger als 30 t/ha (Statistisches Bundesamt, 2011). Nach den Angaben des KTBL kann man in Deutschland mit einem mittleren Ertrag von knapp 34 t/ha rechnen. Mit den in Bayern erfassten Gemüsearten erhält man dort laut Bayerischem Landesamt für Statistik (BLS) ein Ertragspotenzial von rund 36 t/ha (Bayerisches Landesamt für Statistik, 2011). Die Differenzen von bis zu 6 t/ha im Durchschnittsertrag lassen sich größtenteils darauf zurückführen, dass die Datensätze des KTBL und des BLS weniger Daten zu ertragsschwächeren Salaten oder Erbsen beinhalten. Würden diese in der Statistik ergänzt, ergäben sich ebenfalls Durchschnittswerte von ca. 30 t/ha. Der ökologische Landbau hatte im Jahr 2014 einen Anteil von 6,3 Prozent an der Agrarfläche in Deutschland. Bis zum Jahr 2017 ist dieser Anteil auf 8,2 Prozent gestiegen (BLE, 2018). Die Datenbasis zu den Ertragspotenzialen des Gemüse- und Salatanbaus ist daher im Vergleich zum konventionellen Anbau deutlich kleiner. Insgesamt können anhand der bisher vorliegenden Daten die konventionellen und ökologischen Erträge von 39 Kulturpflanzen miteinander verglichen werden. Nach Angaben des KTBL (2017) und des Statistischen Bundesamtes (2019a) liegt das Ertragspotenzial der 39 Kulturpflanzen bei rund 22 t/ha. Im Vergleich zum konventionellen Anbau liegt das Ertragspotenzial des ökologischen Landbaus folglich bei rund 71 Prozent (vgl. Tabelle 119 und Tabelle 121).

Tabelle 120: Mittlere Hektarerträge des Gemüse- und Salatanbaus nach Wirtschaftsweise (t/ha)

Quellen	Destatis, 2011 [1]	BLS, 2011 [2]	KTBL 2017 [3], 2009 [4]	KTBL, 2015 [6], 2017 [3]	Destatis, 2019 [8]	Durchschnitt	
Wirtschaftsweise	**Konventionell**			**Ökologisch**		**Konv.**	**Ökol.**
Zeitraum	2009-2011	2005-2010	k. A.	k. A.	2016-2017		
Kulturpflanze							
Blumenkohl	27,6	30,6	[4] 26,6	[3,5,6] 20,4	19,3	28,3	19,9
Brokkoli	14,3	18,0	[3] 16,0	[3] 12,0	10,5	16,1	11,2
Chinakohl	40,3	44,2	[3] 60,0		25,3	48,2	25,3
Grünkohl	16,7		[3] 20,0		15,7	18,4	15,7
Kohlrabi	32,2	30,7	[3, 5] 29,8	[3,5,6] 27,8	24,2	30,9	26,0
Rosenkohl	20,6		[3] 20,0	[3] 8,0	11,1	20,3	9,6
Rotkohl	61,3	62,0	[4] 56,4		40,7	59,9	40,7
Weißkohl	78,3	77,9			54,7	78,1	54,7
Wirsing	35,0	33,8	[4] 33,4		24,2	34,1	24,2
Eichblattsalat	27,5	25,7			20,6	26,6	20,6
Eissalat	25,3	32,8	[4] 26,6		17,0	28,2	17,0
Endiviensalat	32,4	39,8			21,6	36,1	21,6
Feldsalat	8,2		[3] 6,0	[3] 6,0	5,5	7,1	5,7
Kopfsalat	28,5	31,3	[3, 5] 29,6	[3,5,6] 20,9	21,1	29,8	21,0
Lollosalat	25,2	24,7			18,2	24,9	18,2
Radicchio	19,8				20,4	19,8	20,4
Römischer Salat	22,6				17,1	22,6	17,1
Rucolasalat	12,0				7,3	12,0	7,3
Spinat	17,0	13,9	[3] 17,0	[3] 12,3	16,5	16,0	14,4
Rhabarber	21,6	24,6			15,5	23,1	15,5
Spargel im Ertrag	5,3	4,7	[3] 6,2	[7] 4,9	4,9	5,4	4,9
Spargel insgesamt						4,4	3,9
Staudensellerie	43,1		[3, 5] 38,5	[3,5,6] 36,5	28,1	40,8	32,3
Knollensellerie	44,9	50,8	[3] 48,0	[3] 30,0	29,1	47,9	29,6
Möhren Frischware	54,3	46,0	[4] 52,7	[3] 35,0	48,7	51,0	41,9
Möhren Industrieware			[3, 5] 65,1	[3,5] 60,2		65,1	60,2
Radies	27,3	24,1	[4] 27,7		20,2	26,3	20,2
Rettich	29,7	37,7	[3] 30,2		23,2	32,5	23,2
Rote Bete	46,7	51,8	[3] 54,0	[3] 45,0	39,3	50,8	42,1
Einlegegurken	74,3	78,0			27,1	76,1	27,1
Schälgurken	32,3	28,5			14,9	30,4	14,9
Gurken			[4] 55,4			55,4	
Speisekürbisse	26,5	17,1	[3] 27,0	[3] 18,0	19,7	23,5	18,8
Zucchini	33,0	28,8	[3] 69,0		27,8	43,6	27,8
Zuckermais	17,2	14,2			7,2	15,7	7,2
Buschbohnen	10,6	12,2	[3] 12,0	[3] 8,0	8,9	11,6	8,5
Dicke Bohnen	8,1				10,3	8,1	10,3
Frischerbsen (o. Hülsen)	5,5		[1, 3] 4,9	[1,3,6] 3,0	4,0	5,5	3,5
Frischerbsen (m. Hülsen)	7,3		[3] 6,5	[3] 4,0	5,7	6,9	4,9
Bundzwiebeln	39,5				30,0	39,5	30,0
Speisezwiebeln	49,3	45,2	[3] 34,0	[3] 30,0	30,5	42,8	30,0
Porree (Lauch)	35,2		[3] 42,5	[3] 24,0	25,7	38,9	24,9
Durchschnitt	**29,7**	**35,7**	**33,9**	**22,6**	**20,8**	**30,7**	**21,7**

Quellen: (1) Destatis, 2011; (2) Bayerisches Landesamt für Statistik, 2011; (3) KTBL, 2017; (4) KTBL, 2009; (5) Prüße et al., 2002; (6) KTBL, 2015; (7) Statista, 2019a; (8) Statistisches Bundesamt, 2019a;

Tabelle 121: Ertragspotenzial des ökologischen Gemüseanbaus im Vergleich zum konventionellen Anbau

Kulturpflanze	Ertragspotenzial ökologisch
Blumenkohl	70%
Brokkoli	70%
Chinakohl	53%
Grünkohl	85%
Kohlrabi	84%
Rosenkohl	47%
Rotkohl	68%
Weißkohl	70%
Wirsing	71%
Eichblattsalat	78%
Eissalat	60%
Endiviensalat	60%
Feldsalat	81%
Kopfsalat	70%
Lollosalat	73%
Radicchio	(103%)
Römischer Salat	76%
Rucolasalat	60%
Spinat	90%
Rhabarber	67%
Spargel	90%
Staudensellerie	79%
Knollensellerie	62%
Möhren Frischware	82%
Möhren Industrieware	93%
Radies	77%
Rettich	71%
Rote Bete	83%
Einlegegurken	36%
Schälgurken	49%
Speisekürbisse	80%
Zucchini	64%
Zuckermais	46%
Buschbohnen	73%
Dicke Bohnen	(128%)
Frischerbsen (o. Hülsen)	63%
Frischerbsen (m. Hülsen)	70%
Bundzwiebeln	76%
Speisezwiebeln	70%
Porree (Lauch)	64%
Durchschnitt	**71%**

Konventioneller Ertrag = 100%
* Datenbasis: Ökologische Erträge der Jahre 2016-2017
Quelle: Eigene Berechnung

Da sich die Daten des Statistischen Bundesamtes (2019a) zu den Erträgen des ökologischen Anbaus lediglich auf einen Zeitraum von zwei Jahren (2016-2017) beziehen, sind gewisse Unsicherheiten nicht auszuschließen. Soweit vergleichbare Daten des KTBL vorliegen, zeigt sich bei den Werten allerdings mit rund 87 Prozent ein hohes Maß an Übereinstimmung. Zum Vergleich: Die Übereinstimmung der Daten zum konventionellen Anbau liegt bei 83 Prozent. Zudem zeigt sich ein hohes Maß an Übereinstimmung bei der Ertragsdifferenz im Vergleich zum konventionellen Anbau. Bei den 16 Kulturpflanzen, zu denen Daten des KTBL und des Statistischen Bundesamtes vorliegen, beträgt die Differenz zu den konventionellen Erträgen im Durchschnitt 27 Prozent. Bei den Kulturpflanzen, zu denen nur Daten aus den Jahren 2016 und 2017 vorliegen, beträgt die Differenz 29 Prozent. In beiden Fällen bewegt sich das Ertragspotenzial folglich zwischen 71 und 73 Prozent des konventionellen Landbaus. Lediglich im Falle der Dicken Bohnen scheint offensichtlich, dass es sich in den Jahren 2016 - 2017 um einen Ertrag handelt, der deutlich über dem langjährigen Ertragsdurchschnitt liegen dürfte. Klammert man diesen Wert aus, liegt das Ertragspotenzial der übrigen Pflanzen im ökologischen Landbau bei 68 Prozent der konventionellen Ertragspotenziale. Ein Potenzial im Bereich zwischen 68 und 73 Prozent erscheint auch deshalb plausibel, weil es etwa den Verhältnissen entspricht, die sich auch im Anbau von Obst, Hackfrüchten sowie von mehreren Öl- und Eiweißpflanzen zeigen.

10.5.1.3.2 Kalorienerträge

Bei einer vereinfachten Schätzung der Kalorienerträge wichtiger Gemüse und Salate anhand der Hektarerträge in Tonnen (inkl. Schalen, Kerne etc.) und der Kaloriengehalte zeigen sich erhebliche Unterschiede hinsichtlich der Flächeneffizienz.

Bildet man einen Durchschnittswert der 39 Kulturpflanzen (ohne Möhren Frischware), so erhält man im konventionellen Gemüseanbau rund 7,8 Mio. kcal pro Hektar. Lediglich 14 Kulturpflanzen (36 Prozent) liegen beim Kalorienertrag über dem Durchschnitt aller Pflanzen. Möhren liefern dabei mit Abstand die höchsten Kalorienerträge aller Gemüse und Salate. Als Industrieware erhält man etwa 27 Mio. kcal/ha, als Frischware rund 21 Mio. kcal/ha. Den mit Abstand geringsten Kalorienertrag liefert der Anbau von Spargel. Im Ertrag produziert Spargel etwa 975.000 kcal/ha. Da sich jedoch nur rund 81 Prozent der jährlichen Anbauflächen im Ertrag befinden, ergibt sich für die Gesamtfläche ein Ertrag von rund 800.000 kcal/ha, was nur 3 Prozent des Kalorienertrags des Möhrenanbaus (Industriequalität) und 10 Prozent des Durchschnittsertrags aller Gemüsearten entspricht. Dabei handelt es sich bei Spargel und Möhren um die beiden Pflanzen mit den höchsten Anteilen an der Gemüseanbaufläche in Deutschland.

Tabelle 122: Kalorienerträge im konventionellen Gemüseanbau (kcal/ha) *

Gemüseart	kcal/100g [1)]	kcal/ha [2)]	Rel. zum Durchschnitt	Rel. zum Top-Ertrag
Möhren Industrieware	41	26.691.000	342%	100%
Möhren Frischware	41	20.911.182	268%	78%
Weißkohl	25	19.529.810	250%	73%
Rotkohl	29	17.373.246	222%	65%
Speisezwiebeln	40	17.136.475	219%	64%
Bundzwiebeln	40	15.817.333	202%	59%
Zuckermais	95	14.913.417	191%	56%
Rote Bete	27	13.726.443	176%	51%
Porree (Lauch)	31	12.045.567	154%	45%
Einlegegurken	15	11.421.349	146%	43%
Knollensellerie	19	9.098.548	116%	34%
Zucchini	20	8.721.111	112%	33%
Kohlrabi	27	8.343.474	107%	31%
Gurken	15	8.308.989	106%	31%
Wirsing	24	8.174.121	105%	31%
Dicke Bohnen	92	7.427.467	95%	28%
Rosenkohl	36	7.309.800	94%	27%
Blumenkohl	25	7.070.592	91%	26%
Staudensellerie	17	6.935.830	89%	26%
Endiviensalat	18	6.497.700	83%	24%
Chinakohl	13	6.261.026	80%	23%
Brokkoli	35	5.627.662	72%	21%
Rettich	16	5.206.044	67%	20%
Grünkohl	28	5.143.133	66%	19%
Frischerbsen (o. Hülsen)	84	4.600.400	59%	17%
Schälgurken	15	4.561.903	58%	17%
Speisekürbisse	19	4.470.067	57%	17%
Radies	16	4.214.912	54%	16%
Kopfsalat	14	4.172.559	53%	16%
Lollosalat	16	3.985.600	51%	15%
Eissalat	14	3.953.238	51%	15%
Rhabarber	17	3.930.246	50%	15%
Eichblattsalat	14	3.723.767	48%	14%
Spinat	23	3.673.397	47%	14%
Rucolasalat	28	3.361.867	43%	13%
Radicchio	17	3.360.333	43%	13%
Buschbohnen	25	2.898.506	37%	11%
Römischer Salat	12	2.707.200	35%	10%
Feldsalat	18	1.275.300	16%	5%
Spargel (Insgesamt)	18	797.510	10%	3%
Durchschnitt **		**7.806.845**	**100%**	**29%**
Durchschnitt ertragreichere Hälfte **		**12.181.850**	**156%**	**46%**

* Vereinfachte Schätzung, da nicht essbare Anteile nicht abgezogen wurden. ** Ohne Möhren Frischware
Quellen: (1) Yazio GmbH, 2017; Fddb, 2018; Sun Sirius GmbH, 2018 (2) Eigene Berechnung

In den Jahren 2009 bis 2011 betrug die Spargelanbaufläche insgesamt rund 22.640 Hektar pro Jahr. Dies entsprach einem Anteil von rund 20 Prozent an der gesamten Gemüseanbaufläche, womit Spargel die Gemüseart mit der größten Anbaufläche in Deutschland war. Im Zeitraum von 2009 bis 2017 ist die Spargelanbaufläche um 29 Prozent auf 28.279 ha angewachsen (vgl. Tabelle 123), was bei einer Gesamtanbaufläche von 128.883 ha einem Anteil von 22 Prozent an der Gemüseanbaufläche entsprach (Statistisches Bundesamt, 2019b).

Tabelle 123: Spargelanbauflächen in Deutschland 2009 - 2017 (Hektar)

Spargelfläche	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Gesamt	22.028	22.872	23.019	23.806	24.093	25.336	25.705	27.039	28.379
Im Ertrag	18.190	18.794	18.611	19.329	19.634	20.122	20.594	22.274	23.190
Nicht im Ertrag	3.838	4.078	4.408	4.478	4.459	5.213	5.111	4.766	5.189

Quelle: Statistisches Bundesamt, 2019b, GENESIS-Online Datenbank

Trotz des hohen Flächenanteils von 20,3 Prozent trug Spargel in den Jahren 2009-2011 nur mit rund 2 Prozent zur gesamten Kalorienproduktion[55] des Freilandgemüseanbaus bei. Insgesamt hatten im Zeitraum 2009-2011 nur 10 von 39 Pflanzen einen höheren Anteil an der Kalorienproduktion als an der Flächeninanspruchnahme des Gemüseanbaus. Möhren wiesen dabei die größte positive Differenz auf. Sie wurden zwischen 2009 und 2011 lediglich auf 9 Prozent der Gemüseanbaufläche angebaut, trugen aber mit 27 Prozent zur Kalorienproduktion bei[56]. Neben dem Spargelanbau liefert vor allem der Anbau von diversen Salatarten, Buschbohnen und Spinat besonders geringe Kalorienerträge pro Hektar.

Im Durchschnitt wurde auf Basis der Flächenanteile und Kalorienerträge der verschiedenen Pflanzen für die Jahre 2009-2011 ein Kalorienertrag des Gemüseanbaus von rund 8.983.000 kcal/ha berechnet. Dies entspricht rund 74 Prozent des Ertragspotenzials im konventionellen Anbau, wenn ausschließlich die ertragreichere Hälfte der Pflanzen zu gleichen Flächenanteilen genutzt würde (vgl. Tabelle 122 und Tabelle 124).

[55] Große Anteile der produzierten Kalorien verbleiben, wie in Kapitel 10.4 dargestellt, bei der Ernte auf dem Acker und gelangen gar nicht in den Handel. Bei der Kalorienproduktion bleiben solche und weitere Verluste jedoch zunächst unberücksichtigt.

[56] Möhren weisen, wie in Kapitel 10.4 dargestellt, vergleichsweise hohe vermeidbare Verluste auf.

Tabelle 124: Flächenanteile und Anteile an Kalorienproduktion der Gemüsearten 2009-2011

Gemüseart	Hektar [1)]	Flächen-anteil [2)]	Kalorienertrag Gesamt [2)]	Anteil an Kalorien-produktion	Differenz Kalorienanteil zu Flächenanteil
Möhren/Karotten	10.174	9,1%	271.545.337.000	27,1%	18,0 PP
Speisezwiebeln	8.945	8,0%	153.291.477.287	15,3%	7,3 PP
Weißkohl	6.310	5,7%	123.239.609.645	12,3%	6,6 PP
Rotkohl	2.248	2,0%	39.055.056.614	3,9%	1,9 PP
Bundzwiebeln	1.760	1,6%	27.838.506.667	2,8%	1,2 PP
Zuckermais	1.750	1,6%	26.103.450.306	2,6%	1,0 PP
Porree (Lauch)	2.376	2,1%	28.624.281.589	2,9%	0,7 PP
Rote Rüben (Rote Bete)	1.451	1,3%	19.912.493.067	2,0%	0,7 PP
Einlegegurken	2.454	2,2%	28.024.184.073	2,8%	0,6 PP
Knollensellerie	1.533	1,4%	13.951.107.123	1,4%	0,0 PP
Zucchini	1.019	0,9%	8.886.812.222	0,9%	0,0 PP
Stauden-/Stangensellerie	254	0,2%	1.761.700.820	0,2%	-0,1 PP
Sonstige Gemüsearten	2.980	2,7%	26.232.593.705	2,6%	-0,1 PP
Dicke Bohnen	494	0,4%	3.671.644.356	0,4%	-0,1 PP
Wirsing	1.105	1,0%	9.029.678.480	0,9%	-0,1 PP
Rosenkohl	698	0,6%	5.104.677.000	0,5%	-0,1 PP
Endiviensalat	562	0,5%	3.651.707.400	0,4%	-0,1 PP
Schälgurken	327	0,3%	1.490.221.552	0,1%	-0,1 PP
Kohlrabi	2.271	2,0%	18.950.811.058	1,9%	-0,1 PP
Radicchio	267	0,2%	897.209.000	0,1%	-0,1 PP
Sonstige Salate	322	0,3%	1.089.024.254	0,1%	-0,2 PP
Rucolasalat	475	0,4%	1.596.886.667	0,2%	-0,3 PP
Chinakohl	1.061	1,0%	6.642.948.316	0,7%	-0,3 PP
Rettich	782	0,7%	4.069.391.407	0,4%	-0,3 PP
Grünkohl	1.000	0,9%	5.141.418.956	0,5%	-0,4 PP
Rhabarber	835	0,7%	3.280.445.105	0,3%	-0,4 PP
Eichblattsalat	841	0,8%	3.130.446.511	0,3%	-0,4 PP
Römischer Salat	995	0,9%	2.694.566.400	0,3%	-0,6 PP
Lollosalat	1.347	1,2%	5.367.274.667	0,5%	-0,7 PP
Brokkoli	2.119	1,9%	11.926.891.391	1,2%	-0,7 PP
Speisekürbisse	1.856	1,7%	8.294.953.711	0,8%	-0,8 PP
Blumenkohl	4.495	4,0%	31.784.667.699	3,2%	-0,9 PP
Kopfsalat	2.152	1,9%	8.980.737.081	0,9%	-1,0 PP
Radies	3.391	3,0%	14.292.767.338	1,4%	-1,6 PP
Feldsalat	2.195	2,0%	2.798.858.400	0,3%	-1,7 PP
Spinat	3.356	3,0%	12.327.919.863	1,2%	-1,8 PP
Frischerbsen (o. Hülsen)	4.283	3,8%	19.701.979.733	2,0%	-1,9 PP
Buschbohnen	3.729	3,3%	10.809.493.830	1,1%	-2,3 PP
Eissalat	4.658	4,2%	18.415.498.459	1,8%	-2,3 PP
Spargel (Gesamtfläche)	22.640	20,3%	18.055.358.436	1,8%	-18,5 PP

Quelle: (1) BMEL, 2016c; (2) Eigene Berechnung

Folglich könnte das Ernährungspotenzial des Gemüseanbaus bei gleicher Flächeninanspruchnahme durch eine Ernährungsumstellung auf diese ertragreicheren Gemüsearten um 36 Prozent gesteigert werden.

Die Ertragspotenziale des ökologischen Gemüseanbaus sind in Tabelle 125 dargestellt. Hier liegen 14 Pflanzen über dem durchschnittlichen Ertragspotenzial. Bildet man ebenfalls den Durchschnitt der ertragreichsten 20 Gemüsearten (ohne Möhren Frischware), so ergibt sich ein Ertragspotenzial von rund 8,2 Mio. kcal/ha. Die 20 kalorienertragreichsten Pflanzen im ökologischen Anbau erreichen damit rund 67 Prozent des Kalorienertrags der kalorienertragreichsten Pflanzen im konventionellen Anbau.

Tabelle 125: Kalorienerträge im ökologischen Gemüseanbau (kcal/ha)

Gemüseart	kcal/100g	kcal/ha ökologisch	Rel. zum Durchschnitt	Rel. zum Top-Ertrag
Möhren Industrieware	41	24.692.250	462%	100%
Möhren Frischware	41	17.161.089	321%	69%
Weißkohl	25	13.674.760	256%	55%
Bundzwiebeln	40	12.015.218	225%	49%
Speisezwiebeln	40	12.000.000	225%	49%
Rotkohl	29	11.807.704	221%	48%
Rote Bete	27	11.375.642	213%	46%
Dicke Bohnen	92	9.486.779	178%	38%
Porree (Lauch)	31	7.704.738	144%	31%
Kohlrabi	27	7.022.894	132%	28%
Zuckermais	95	6.808.429	127%	28%
Wirsing	24	5.798.580	109%	23%
Knollensellerie	19	5.616.587	105%	23%
Zucchini	20	5.558.032	104%	23%
Staudensellerie	17	5.489.908	103%	22%
Blumenkohl	25	4.969.294	93%	20%
Grünkohl	28	4.396.127	82%	18%
Einlegegurken	15	4.072.121	76%	16%
Brokkoli	35	3.931.500	74%	16%
Endiviensalat	18	3.891.639	73%	16%
Rettich	16	3.708.460	69%	15%
Speisekürbisse	19	3.578.323	67%	14%
Radicchio	17	3.462.816	65%	14%
Rosenkohl	36	3.441.975	64%	14%
Spinat	23	3.301.074	62%	13%
Chinakohl	13	3.294.217	62%	13%
Radies	16	3.233.216	61%	13%
Kopfsalat	14	2.938.356	55%	12%
Frischerbsen (o. Hülsen)	84	2.917.368	55%	12%
Lollosalat	16	2.914.359	55%	12%
Eichblattsalat	14	2.890.752	54%	12%
Rhabarber	17	2.631.843	49%	11%
Eissalat	14	2.378.480	45%	10%
Schälgurken	15	2.239.437	42%	9%
Buschbohnen	25	2.113.050	40%	9%
Römischer Salat	12	2.049.662	38%	8%
Rucolasalat	28	2.033.314	38%	8%
Feldsalat	18	1.032.982	19%	4%
Spargel (Gesamtfläche)	18	715.967	13%	3%
Durchschnitt *		**5.557.575**	**100%**	**23%**
Durchschnitt der ertragreicheren Hälfte *		**8.201.033**	**148%**	**33%**

* Ohne Möhren Frischware

10.5.1.3.3 Flächeneffizienter Gemüse-Mix im ökologischen Anbau

In Tabelle 126 ist das Ertragspotenzial eines beispielhaften flächeneffizienten Gemüse-Mixes dargestellt, der auf einer Fläche von 100 Hektar nur die 20 Gemüsearten mit den höchsten Kalorienerträgen pro Hektar und die immer beliebter werdenden Speisekürbisse umfasst. Nachfolgend wird dieser als „Effizienz-Mix“ bezeichnet. Neben den besonders ertragreichen Gemüsearten wurden auch beliebten Gemüsearten größere Flächenanteile zugewiesen. Das Beispiel dieses „Effizienz-Mixes“ zeigt, dass im ökologischen Anbau höhere Kalorienerträge möglich sind als im heutigen, überwiegend konventionellen Gemüseanbau – sofern der Kalorienertrag pro Hektar als ein wichtiges Kriterium für die Wahl der Gemüsearten genutzt wird. Der Effizienz-Mix übertrifft ökologisch angebaut mit 10.477.205 kcal/ha den Kalorienertrag des heutigen, überwiegend konventionellen Gemüseanbaus um 17 Prozent. Baut man anstelle von Zuckermais auf 7 Prozent der Fläche Spargel an, sinkt der Ertrag des Gemüse-Mixes zwar auf 9.989.808 kcal/ha, womit der heutige Kalorienertrag des Gemüseanbaus jedoch immer noch um 11 Prozent übertroffen wird.

Tabelle 126: Ertragspotenzial eines flächeneffizienten ökologischen Gemüse-Mixes (Beispiel)

Gemüseart	kcal/ha ökologisch	Flächenanteil in Prozent	Kalorienertrag Gesamt
Möhren Industrieware	24.692.250	14	345.691.500
Weißkohl	13.674.760	7	95.723.322
Bundzwiebeln	12.015.218	2	24.030.435
Speisezwiebeln	12.000.000	8	96.000.000
Rotkohl	11.807.704	8	94.461.634
Rote Bete	11.375.642	6	68.253.851
Dicke Bohnen	9.486.779	4	37.947.118
Porree (Lauch)	7.704.738	7	53.933.163
Kohlrabi	7.022.894	3	21.068.682
Zuckermais	6.808.429	8	54.467.432
Wirsing	5.798.580	3	17.395.740
Knollensellerie	5.616.587	2	11.233.173
Zucchini	5.558.032	6	33.348.192
Staudensellerie	5.489.908	1	5.489.908
Blumenkohl	4.969.294	6	29.815.763
Grünkohl	4.396.127	2	8.792.254
Einlegegurken	4.072.121	2	8.144.241
Brokkoli	3.931.500	6	23.588.997
Endiviensalat	3.891.639	1	3.891.639
Rettich	3.708.460	1	3.708.460
Speisekürbisse	3.578.323	3	10.734.969
SUMME „Effizienz-Mix“	10.477.205	100	1.047.720.473

Quelle: Eigene Berechnung

Umstellungen bei den Ernährungsgewohnheiten könnten folglich die Ertragsdifferenz im Vergleich zum konventionellen Anbau ohne weiteres kompensieren und trotzdem einen gewissen Spielraum ermöglichen, Flächeneffizienz nicht zum einzigen Kriterium machen zu müssen. Dies gilt insbesondere, wenn der gesamte essbare Möhrenertrag eines Hektars genutzt wird.

10.5.1.3.4 Flächeninanspruchnahme

Um 1.000 kcal bereitzustellen, nimmt der Gemüseanbau in Deutschland heute etwa 1,80 m² in Anspruch. Bei einer am Kalorienertrag orientierten Ausrichtung der Produktion ließe sich dieser Wert fast halbieren auf 0,96 m²/1.000 kcal.

Tabelle 127: Flächeninanspruchnahme des Gemüseanbaus im Freiland nach Pflanzenkombination (m²/1.000 kcal)

Pflanzenkombination	m²/1.000 kcal
Status Quo	1,80
„Effizienz-Mix“	0,96

Quelle: Eigene Berechnung

10.5.1.4 Obst

Kommerzieller Obstbau erfolgt heutzutage meist im Plantagenanbau. Insbesondere in Süddeutschland existieren aber immer noch große Streuobstflächen, die nach wie vor ein beachtliches Potenzial darstellen, weil sie neben Obst auch Holz und Heu liefern können. Die reinen Obsterträge liegen jedoch deutlich unter den Erträgen von Obstplantagen. Um eine hohe Flächeneffizienz zu erzielen, ist eine umfassende Nutzung der möglichen Koppelprodukte erforderlich.

10.5.1.4.1.1 Obstplantagen

Obstanlagen oder Plantagen liefern, je nach Kulturpflanze und Wirtschaftsweise zwischen 5,6 und 50 Tonnen Fruchtertrag pro Hektar und Jahr. Die Jahreserträge unterliegen jedoch relativ großen Schwankungen. Die höchsten Erträge erbringen Apfelplantagen mit bis zu 50 t/ha im konventionellen Anbau, gefolgt von Birnenplantagen mit bis 35 zu t/ha (KTBL, 2009 S. 485). Die jeweiligen Mittelwerte der Ertragsspannen liegen im ökologischen Anbau nach Angaben des KTBL zwischen 65 und 73 Prozent des konventionellen Landbaus, im Durchschnitt bei 71 Prozent (vgl. Tabelle 128).

Tabelle 128: Ertragspotenziale im Obstbau, konventionell und ökologisch

Obstart	Konventionell	Ökologisch	Ertragspotenzial des ökol. Landbaus
Äpfel	25,0 - 50,0	25,0 - 30,0	73%
Birnen	25,0 - 35,0	20,0 - 22,0	70%
Pflaumen/Zwetschgen	10,0 - 20,0	7,0 - 15,0	73%
Süßkirschen	8,0 - 16,0	5,6 - 12,0	73%
Sauerkirschen	8,0 - 12,0	5,6 - 8,5	71%
Erdbeeren	9,0 - 14,0	7,0 - 8,0	65%
Durchschnitt			**71%**
Quelle:	KTBL, 2009, S. 485	KTBL, 2015, S. 363	Eigene Berechnung

In Tabelle 129 sind die geschätzten Ertragspotenziale des konventionellen und des ökologischen Obstbaus in Deutschland und in Baden-Württemberg angegeben. Die Ertragsstatistiken von Bund (Statistisches Bundesamt, 2019 S. 18) und Ländern, auf denen die Daten basieren, bilden den durchschnittlichen Gesamtertrag ab, ohne nach Wirtschaftsweise zu unterscheiden. Dabei fließen vor allem Daten aus dem Erwerbsanbau ein, der hauptsächlich in Obstanlagen/Plantagen erfolgt. Die Ertragspotenziale des ökologischen Landbaus in Baden-Württemberg wurden anhand der Angaben des KTBL in Relation zu den Erträgen des konventionellen Anbaus (vgl. Tabelle 128) geschätzt.

Tabelle 129: Ertragspotenziale im konventionellen und ökologischen Obstbau (t/ha)

	BRD gesamt	BRD ökologisch [6]	BW gesamt	BW ökologisch [6]
Zeitraum	**2005-2017**		**1992-2018**	
Obstart				
Äpfel	[1] 29,6	21,7	[3] 32,1	23,5
Birnen	[1] 20,0	14,0	[3] 29,4	20,6
Pflaumen/Zwetschgen	[1] 11,2	8,2	[3] 11,1	8,1
Süßkirschen	[1] 5,6	4,1	[3] 6,8	5,0
Sauerkirschen	[1] 7,0	4,9	[3] 8,5	6,0
Mirabellen/Renekloden*	[1] 10,1	7,2	11,1	7,9
Erdbeeren**	[2] 9,0	5,8	[4] 8,9	5,8

* Zu Mirabellen/Renekloden lagen lediglich Daten der Jahre 2016 und 2018 vor. ** Zu Erdbeeren lagen lediglich Daten einzelner Jahre vor (BRD: 2017, BW: 2016) vor.
Quellen: (1) Statistisches Bundesamt, 2017b, S. 18; (2) Statistisches Bundesamt, 2018b (3) Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2019a und 2018e; (4) Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2016 (5) Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2018d (6) Schätzung n. KTBL, 2015, S. 363

Die Schätzung der Kalorienerträge pro Hektar erfolgte anhand der Kaloriengehalte der verschiedenen Früchte, die in Tabelle 130 dargestellt sind.

Tabelle 130: Kaloriengehalt wichtiger Obstfrüchte

Obstart	kcal/100g
Äpfel	[1] 52
Birnen	[1] 58
Pflaumen/Zwetschgen	[1] 46
Süßkirschen	[2] 65
Sauerkirschen	[2] 40
Mirabellen/Renekloden	[3] 64
Erdbeeren	[1] 32

Quellen: (1) Yazio GmbH, 2017; (2) Sun Sirius GmbH, 2018; (3) Fddb, 2018;

Anhand des Kaloriengehalts der jeweiligen Früchte ergeben sich auf Basis der dargestellten Obstertragspotenziale Kalorienerträge zwischen 1,9 und 17,1 Millionen Kilokalorien pro Hektar (vgl. Tabelle 131). Apfel- und Birnenplantagen sind dabei mit Abstand die ertragreichsten Obstpflanzen. Erdbeeren weisen in diesem Vergleich die geringsten Kalorienerträge pro Hektar auf.

Tabelle 131: Kalorienerträge von Obstplantagen konventionell und ökologisch (kcal/ha)

Obstart	BRD, gesamt	BRD ökologisch	BW gesamt	BW ökologisch
Äpfel	15.392.400	11.287.800	16.694.000	12.242.300
Birnen	11.620.100	8.134.100	17.063.100	11.944.200
Pflaumen/Zwetschgen	5.142.100	3.770.900	5.084.600	3.728.700
Süßkirschen	3.645.000	2.673.000	4.393.600	3.222.000
Sauerkirschen	2.801.200	1.974.900	3.406.400	2.401.500
Mirabellen/Renekloden	6.465.000	4.587.100	7.113.600	5.047.300
Erdbeeren	2.867.200	1.869.900	2.851.200	1.859.500

Quelle: Eigene Berechnung

10.5.1.4.1.1.1 Koppelprodukte

Obstplantagen liefern im Vergleich zu Streuobstweisen eine geringere Vielfalt an Koppelprodukten. In der Regel wird der Unterwuchs gemulcht, anfallender Baumschnitt wird gehäckselt und ebenfalls als Dünger in der Anlage genutzt. Lediglich am Ende der Nutzungsdauer, die zwischen 10 und 30 Jahren beträgt, fällt bei der Rodung des Altbestandes Rodungsholz an. „Bei modernen Anlagen, die alle 10 bis 15 Jahre gerodet werden, fallen rd. 60 t/ha an.“ (Nitsch, et al., 2001 S. 132) Umgerechnet auf das einzelne Jahr ergeben sich daraus Aufkommen von 5,0 (4,0 – 6,0) t/ha*a.

Unterstellt man vereinfachend einen Heizwert von 4,0 kWh/ha, ergibt sich ein potenzieller Energieertrag von 20 (15 – 24) MWh/ha*a.

10.5.1.4.1.1.2 Flächeninanspruchnahme

Die Flächeninanspruchnahme, die sich aus den Hektarerträgen der Obstplantagen ergibt, ist in Tabelle 132 dargestellt und liegt in Deutschland bei 0,76 (0,34 – 1,78) m²/kg im konventionellen Anbau und bei 1,06 (0,46 – 2,43) m²/kg im ökologischen Anbau. In Baden-Württemberg liegen die entsprechenden Werte bei 0,65 (0,31 – 1,17) m²/kg im konventionellen Anbau und 0,91 (0,42 – 2,02) m²/kg im ökologischen Anbau.

Tabelle 132: Flächeninanspruchnahme durch Obstplantagen je Kilogramm Obst ohne Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte (m²/kg)

Obstart	Deutschland konventionell	Deutschland ökologisch	Baden-Württemberg konventionell	Baden-Württemberg ökologisch
Äpfel	0,34	0,46	0,31	0,42
Birnen	0,50	0,71	0,34	0,49
Pflaumen/Zwetschgen	0,89	1,22	0,90	1,23
Süßkirschen	1,78	2,43	1,48	2,02
Sauerkirschen	1,43	2,03	1,17	1,67
Mirabellen/Renekloden	0,99	1,40	0,90	1,27
Erdbeeren	1,12	1,71	1,12	1,72
Durchschnitt	**0,76**	**1,06**	**0,65**	**0,91**

Quelle: Eigene Berechnung

Unter Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte (Energieholz), ergibt sich bei einem Energieertrag von rund 20 MWh/ha eine Flächengutschrift von 2.564 m²/ha. Da keine nach Obstarten differenzierten Daten vorlagen, wurde dieser Wert vereinfachend für alle Baumobstarten übernommen. Sie verbessern sich dadurch in ihrer Flächeneffizienz um 34 Prozent. Erdbeeren liefern keine nennenswerten Nebenprodukte und erhalten daher keine Flächengutschriften. Somit liegt die Flächeninanspruchnahme der verschiedenen Obstarten in Deutschland unter Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte bei 0,58 (0,25 – 1,33) m²/kg im konventionellen Anbau und bei 0,81 (0,34 – 1,81) m²/kg im ökologischen Anbau. In Baden-Württemberg liegen die entsprechenden Werte bei 0,49 (0,23 – 1,12) m²/kg im konventionellen Anbau und 0,69 (0,32 – 1,72) m²/kg im ökologischen Anbau.

Tabelle 133: Flächeninanspruchnahme durch Obstplantagen je Kilogramm Obst unter Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte in Deutschland und Baden-Württemberg (m²/kg)

Obstart	Deutschland konventionell	Deutschland ökologisch	Baden-Württemberg konventionell	Baden-Württemberg ökologisch
Äpfel	0,25	0,34	0,23	0,32
Birnen	0,37	0,53	0,25	0,36
Pflaumen/Zwetschgen	0,67	0,91	0,67	0,92
Süßkirschen	1,33	1,81	1,10	1,50
Sauerkirschen	1,06	1,51	0,87	1,24
Mirabellen/Renekloden	0,74	1,04	0,67	0,94
Erdbeeren	1,12	1,71	1,12	1,72
Durchschnitt	**0,58**	**0,81**	**0,49**	**0,69**

Quelle: Eigene Berechnung

Auf den Kaloriengehalt bezogen, liegt die Flächeninanspruchnahme der verschiedenen Obstarten in Deutschland ohne Koppelprodukte bei 1,46 (0,65 – 3,57) m²/1.000 kcal im konventionellen Anbau und bei 2,04 (0,89 – 5,35) m²/1.000 kcal im ökologischen Anbau. In Baden-Württemberg liegen die entsprechenden Werte bei 1,24 (0,60 – 3,51) m²/1.000 kcal im konventionellen Anbau und 1,73 (0,82 – 5,38) m²/1.000 kcal im ökologischen Anbau.

Tabelle 134: Flächeninanspruchnahme durch Obstplantagen je 1.000 kcal ohne Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte in Deutschland und Baden-Württemberg (m²/1.000 kcal)

Obstart	Deutschland konventionell	Deutschland ökologisch	Baden-Württemberg konventionell	Baden-Württemberg ökologisch
Äpfel	0,65	0,89	0,60	0,82
Birnen	0,86	1,23	0,59	0,84
Pflaumen/Zwetschgen	1,94	2,65	1,97	2,68
Süßkirschen	2,74	3,74	2,28	3,10
Sauerkirschen	3,57	5,06	2,94	4,16
Mirabellen/Renekloden	1,55	2,18	1,41	1,98
Erdbeeren	3,49	5,35	3,51	5,38
Durchschnitt	**1,46**	**2,04**	**1,24**	**1,73**

Quelle: Eigene Berechnung

Unter Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte fällt die Erdbeere im Vergleich der Flächeneffizienz sowohl bezogen auf das Erntegewicht als auch auf die geernteten Kalorien pro Hektar deutlich zurück und liegt bei der Flächeneffizienz der Kalorienerzeugung sowohl im konventionellen Anbau als auch im ökologischen Anbau mit deutlichem Abstand hinter den anderen Obstarten. Insgesamt nimmt sie für 1.000 Kilokalorien die 3,5- bis 4,7-fache Fläche

in Anspruch wie der Durchschnitt der anderen sechs Obstarten, die in diesem Vergleich berücksichtigt wurden. Insgesamt liegt die kalorienbezogene Flächeninanspruchnahme der sieben betrachteten Obstarten in Deutschland unter Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte bei 1,10 (0,48 – 3,57) m²/1.000 kcal im konventionellen Anbau und bei 1,54 (0,66 – 5,35) m²/1.000 kcal im ökologischen Anbau. In Baden-Württemberg liegen die entsprechenden Werte bei 0,93 (0,45 – 3,51) m²/1.000 kcal im konventionellen Anbau und 1,30 (0,61 – 5,38) m²/1.000 kcal im ökologischen Anbau.

Tabelle 135: Flächeninanspruchnahme durch Obstplantagen je 1.000 kcal unter Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte in Deutschland und Baden-Württemberg (m²/1.000 kcal)

Obstart	Deutschland konventionell	Deutschland ökologisch	Baden-Württemberg konventionell	Baden-Württemberg ökologisch
Äpfel	0,48	0,66	0,45	0,61
Birnen	0,64	0,91	0,44	0,62
Pflaumen/Zwetschgen	1,45	1,97	1,46	1,99
Süßkirschen	2,04	2,78	1,69	2,31
Sauerkirschen	2,65	3,77	2,18	3,10
Mirabellen/Renekloden	1,15	1,62	1,05	1,47
Erdbeeren	3,49	5,35	3,51	5,38
Durchschnitt	**1,10**	**1,54**	**0,93**	**1,30**

Quelle: Eigene Berechnung

10.5.1.4.1.2 Streuobst

Streuobstbau ist eine traditionelle und meist umweltverträgliche Form des Obstbaus. Im Gegensatz zu niederstämmigen Plantagenobstanlagen werden dabei hochstämmige Bäume genutzt, die nicht in Reihen stehen, sondern „verstreut“ über die Fläche verteilt sind. Auf bewirtschafteten Flächen stehen meist etwa 60 bis 100 Bäume.

10.5.1.4.1.2.1 Obsterträge

Auf Streuobstwiesen können jährlich etwa 100 bis 500 kg Früchte pro Baum geerntet werden (ANUAL, 2018). Bei 80 Bäumen pro Hektar liegen die Erträge somit zwischen 8,0 und 40,0 Tonnen pro Hektar und Jahr. Die Erträge hängen jedoch stark vom Alter des Baumbestandes, der Lage, der Bewirtschaftungsweise und der Baumpflege ab. Apfelbäume liefern zwischen dem 6. und 12. Standjahr erste Erträge, die danach mit zunehmendem Baumalter ansteigen (vgl. Abbildung 115). In Österreich liegen die durchschnittlichen Erträge von Apfelhochstammbäumen im 50. Standjahr bei rund 25 t/ha.

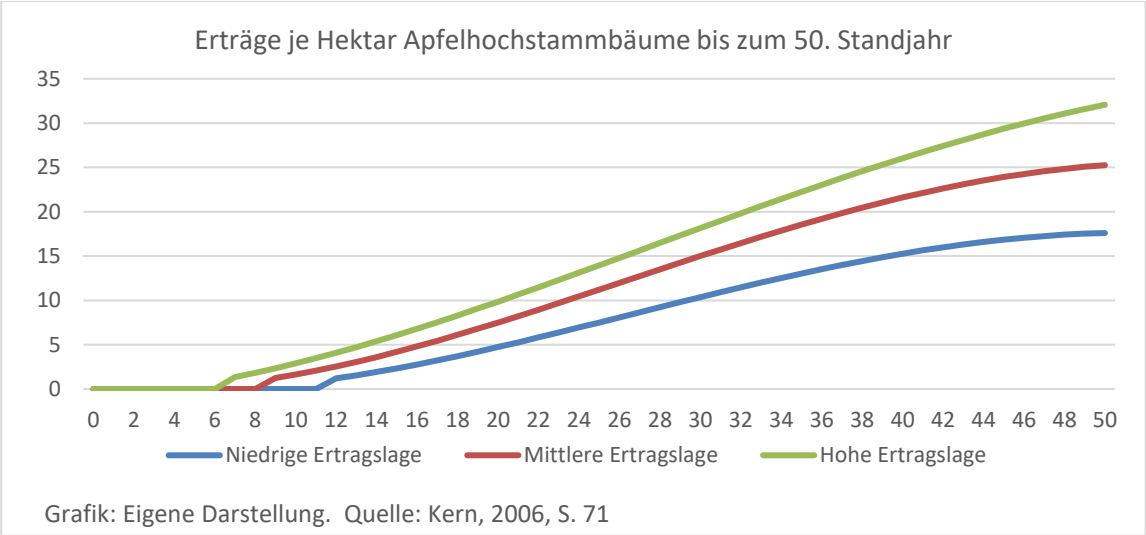


Abbildung 115: Erträge von Apfelstreuobstwiesen nach Alter und Ertragslage

Über eine Nutzungsdauer von 50 Jahren konnte man in mittleren Ertragslagen von etwa 11,8 Tonnen pro Hektar und Jahr ausgehen (Kern, 2006 S. 71). In Süddeutschland kann man bei ökologischer Bewirtschaftung unter den bisherigen klimatischen Bedingungen durchschnittlich Erträge von rund 140 kg pro Baum und Jahr erwarten (Degenbeck, 2013 S. 8), was einem Hektarertrag von rund 11 t/a entspricht. Mostbirnbäume liefern nach Kern (2006) in mittleren Ertragslagen rund 12,8 t/ha. Vergleichbare Erhebungen zur Produktion von Pflaumen/ Zwetschgen und Kirschen sind nicht bekannt. Nimmt man aber an, dass der Ertrag ebenfalls ungefähr ein Drittel des Plantagenertrags beträgt, kann man auf Streuobstwiesen mit Pflaumenerträgen von 3,7 t/ha rechnen. Bei 80 Bäumen entspricht dies rund 44 kg pro Baum. Für Süßkirschen liegt der geschätzte Ertrag bei rund 2,3 t/ha, für Sauerkirschen bei 2,8 t/ha.

Tabelle 136: Jährliche Obsterträge von Streuobstwiesen (t/ha)

Kulturpflanze	Niedrige Ertragslage	Mittlere Ertragslage	Hohe Ertragslage
Apfelhochstammbäume [1)]	8,1	11,8	14,8
Mostbirnbäume [1)]	9,9	12,8	16,6
Pflaumen/Zwetschgen [2)]	k. A.	3,7	k. A.
Süßkirschen [2)]	k. A.	2,2	k. A.
Sauerkirschen [2)]	k. A.	2,8	k. A.

Quellen: (1) Kern, 2006, S. 71 (2) Eigene Berechnung

Eine interessante Alternative für Streuobstwiesen könnte 'Aprimira', die sogenannte "Aprikosenmirabelle", sein. Dabei handelt es sich „um eine köstliche, zwetschgenähnliche Mirabelle“ (LWG, 2015). Die Erträge von 'Aprimira' setzen bereits im 2. Standjahr ein, im 5. Standjahr kann man bereits rund 30 kg pro Baum erwarten (LWG, 2015), was bei einem Bestand von 80 Bäumen rund 2,4 t/ha entspricht. Aufgrund der altersabhängigen Ertragszunahmen und frühen

Ersterträge ist es wahrscheinlich, dass der durchschnittliche Jahresertrag über eine Nutzungsdauer von 50 Jahren mehr als 2,4 t/ha beträgt.

10.5.1.4.1.2.2 Koppelprodukte

Für die Beurteilung der Flächeneffizienz von Streuobstwiesen ist die Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte erforderlich. Dabei handelt es sich in erster Linie um Energieholz, das beim jährlichen Baumpflegeschnitt anfällt. Bei einem typischen Aufkommen von rund einer Tonne Trockenmasse pro Hektar (Balko, 2011; Letalik, 2008) ergibt sich bei einem Heizwert von 4,1 kWh/kg ein Energiepotenzial von 4.100 kWh/ha*a. Zudem kann das Mähgut der Wiesen als Heu/Viehfutter, Brennstoff oder als Rohstoff für die Herstellung von Dämmstoffen, Kartonagen/Pappen oder Biokunststoffen verwendet werden (vgl. Kapitel 11.2). Pro Hektar kann man mit einem Aufkommen von 5 bis 7 t TM/ha rechnen (Balko, 2011 S. 19). Bei einer thermischen Nutzung liegt der Heizwert von Heu bei 16,6 MJ/kg TM (Oechsner, 2013), woraus sich ein Energiepotenzial von 23.000 bis 32.300 kWh/ha ergibt. Im Mittel kann man folglich von einem Energiepotenzial von 27.700 kWh/ha ausgehen. Als Biogassubstrat liefert Heu rund 426,1 Nm^3/t FM bzw. 543,3 Nl/kg oTM. Aus einer Biogasausbeute von rund 3.260 Nm^3/ha ergibt sich bei einem Heizwert von 5 bis 7,5 kWh/m^3 ein Energiepotenzial von 20.400 kWh/ha.

Ein weiteres mögliches Koppelprodukt ist Wertholz für die stoffliche Nutzung. Dabei werden möglichst große astfreie Stammhöhen angestrebt. Große Baumhöhen erschweren allerdings die Obsternte. Liegt der Fokus auf der Fruchtproduktion, werden die astfreien Stämme deshalb durch gezielten Baumschnitt relativ kurzgehalten. Der Umweltschutzverband NABU empfiehlt jedoch Stammhöhen von mindestens 180 cm (NABU, 2015). Bei einer Kombinationsnutzung muss ein wirtschaftlich und ökologisch sinnvolles Verhältnis zwischen Frucht- und Holzproduktion gefunden werden. Die durchschnittliche Lebenserwartung von Apfelbäumen liegt bei rund 50 Jahren. Im Alter von 50 Jahren kann ein Apfelbaum einen Stammdurchmesser von knapp 40 cm erreichen (Benning, 2019). Durchmesser von 40 cm sind jedoch seltener, gewöhnlich werden Stammdurchmesser bis etwa 30 cm erreicht (GD Holz, 2018a). Birnen haben im Alter von 50 Jahren ebenfalls einen Stammdurchmesser von 30 cm (Benning, 2019). Geht man von einer Stammhöhe von knapp 2 Metern aus, kann man ein Stammvolumen von ca. 0,1 (bis 0,2) m^3 erwarten. Bei 80 Bäumen pro Hektar erhält man somit rund 8 (bis 16) m^3 Holz, was bei einer Nutzungsdauer von 50 Jahren umgerechnet rund 0,16 (bis 0,32) m^3/ha*a entspricht. Bei einer geschätzten Schnittholzausbeute von rund 60 Prozent ergibt dies einen Wertholzertrag von 0,10 (bis 0,19) m^3/ha*a.[57]

[57] Der Wert vor der Klammer gibt den mittleren erwartbaren Ertrag an, der Wert in der Klammer gibt hohe Erträge an, die unter sehr guten Bedingungen möglich sind.

Schließlich haben Streuobstwiesen einen hohen ökologischen Wert. Neben Lebensraum für eine große Artenvielfalt liefern sie zahlreichen Arten Nahrung. Apfelstreuobstwiesen produzieren während der Blütezeit (2. Hälfte April bis Ende Mai) ein sehr reichhaltiges Angebot an Pollen und Nektar (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen; Deutscher Imkerbund; Apis, 2018). Pro Hektar Apfel-Streuobstwiese kann man mit 50 kg/ha rechnen (Crane, 1951). Pflaumen/Zwetschgen haben ein Honigpotenzial von 30 kg/ha, Sauerkirschen von 80 kg/ha (Crane, 1951). Nach Droege (1984) gibt es in der Nektarproduktion der Kirschen keine wesentlichen Unterschiede. Folglich dürfte sich der Honigertrag der Süßkirsche in einer ähnlichen Größenordnung bewegen wie im Falle der Sauerkirsche (Droege, 1984, zit. n. Töpfer, 2014). Auch Birnen bieten reichhaltiges Angebot an Pollen und Nektar (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen; Deutscher Imkerbund; Apis, 2018). Daten zum Honigertrag pro Hektar Birne liegen nicht vor, nach Droege dürfte er jedoch aufgrund der deutlich geringeren Nektar-Tagesproduktion, die mit 2 mg pro Blüte um zwei Drittel unter der von Apfelbaumblüten liegt, unterhalb des Ertrags von Apfelstreuobstwiesen liegen (Droege, 1984, zit. n. Töpfer, 2014).

In Tabelle 137 sind die jeweiligen Ertragspotenziale der wichtigsten Obstbaumarten dargestellt. Erhebungen zu den Energieholzpotenzialen liegen bisher nicht nach Baumarten differenziert vor. Deshalb wurde pauschal ein niedriger Ertrag von 1,0 t/ha angenommen, der eher an der unteren Grenze der Ertragsspanne liegt. Nach Letalik (2008) sind aber bis zu 2,0 t/ha möglich.

Tabelle 137: Hektarerträge von Streuobstwiesen

Obstbaumart	Obst (t/ha)	Energieholz (t/ha) [4]	Heu (t/ha) [4]	Honig (t/ha) [5]	Honig (kcal/ha) [3]
Äpfel	[1] 11,8	1,0	6,0	0,05	153.000
Birnen	[1] 12,8	1,0	6,0	k. A.	k. A.
Pflaumen/Zwetschgen	[3] 3,7	1,0	6,0	0,03	91.800
Süßkirschen	[3] 2,3	1,0	6,0	(0,08)	(244.800)
Sauerkirschen	[3] 2,8	1,0	6,0	0,08	244.800
Mirabellen/Renekloden	[3] 3,7	1,0	6,0	k. A.	k. A.
'Aprimira'	[2] [3] > 2,4	1,0	6,0	k. A.	k. A.

Quellen: (1) Kern, 2006, S. 71; (2) LWG, 2015 ;(3) Eigene Berechnung; (4) Balko, 2011; (5) Crane, 1951

Abbildung 116 zeigt die Hektarerträge von Streuobstwiesen in einer grafischen Darstellung. Sie veranschaulicht, dass die Biomasseerträge von Streuobstwiesen durchaus vergleichbar mit ackerbaulichen oder forstwirtschaftlichen Biomasseerträgen sind. Dies gilt insbesondere für Streuobstwiesen mit Apfel- und Birnbäumen.

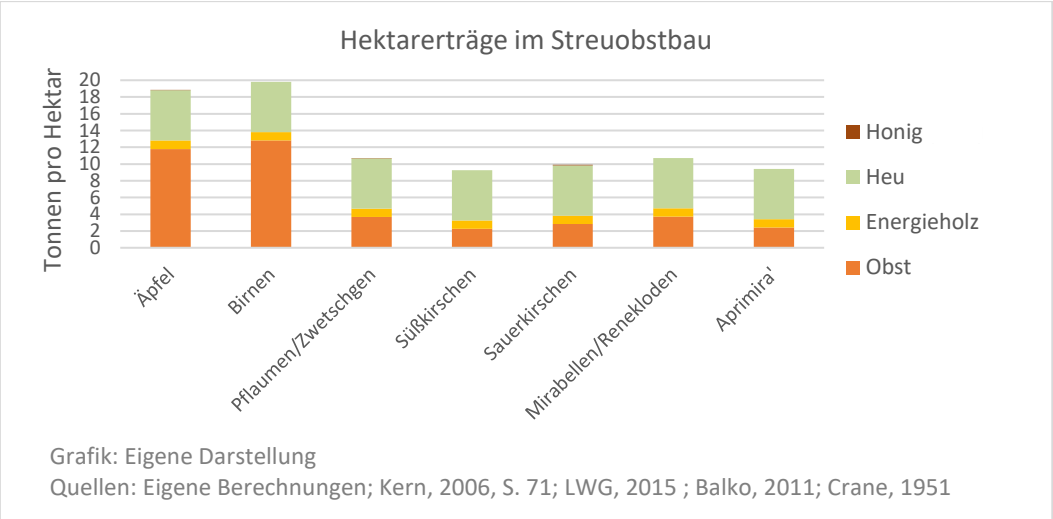


Abbildung 116: Gesamterträge aller Produkte im Streuobstbau (t/ha)

Tabelle 138 zeigt die Flächengutschriften, die für die jeweiligen Koppelprodukte gutgeschrieben werden können. Unter Berücksichtigung der bekannten Koppelprodukte ohne Wertholzproduktion steigt die Flächeneffizienz um 47 Prozent.

Tabelle 138: Flächengutschriften (m²/ha) und daraus folgende Hektarbedarfe von Streuobstwiesen (m²/kg) nach Kulturpflanze

Kulturpflanze	Gutschrift Energie-holz (m²/ha)	Gutschrift Biogas (m²/ha)	Gutschrift Honig (m²/ha)	Gutschrift Gesamt (m²/ha)	Flächenbedarf pro kg Obst inkl. Koppel-produkte (m²/kg)
Äpfel	526	2.615	49	3.190	0,58
Birnen	526	2.615	k. A.	3.141	0,54
Pflaumen/Zwetschgen	526	2.615	29	3.170	1,85
Süßkirschen	526	2.615	k. A.	3.141	3,04
Sauerkirschen	526	2.615	78	3.219	2,39
Mirabellen/Renekloden	526	2.615	k. A.	3.141	1,85
'Aprimira'	526	2.615	k. A.	3.141	< 2,86

Quelle: Eigene Berechnung

10.5.1.4.1.3 Flächeneffizienz von Streuobstwiesen und Obstplantagen im Vergleich

Streuobstwiesen werden meistens ohne Pflanzenschutzmittel bewirtschaftet, weshalb sich für einen Vergleich der Flächeneffizienz ökologisch bewirtschaftete Plantagen anbieten. Ohne eine Nutzung der Koppelprodukte erreichen Streuobstwiesen mit Apfelbäumen rund 54 Prozent des Ertrags von Apfelplantagen. Unter Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte (Energieholz, Heu als Biogassubstrat, Honig) werden dagegen 59 Prozent der Flächeneffizienz von Plantagen erzielt, wenn auch das Rodungsholz der Plantagen berücksichtigt wird. Bei Birnen steigt die Effizienz durch die Nutzung von Koppelprodukten von 91 auf 99 Prozent der Plantagenerträge. Bei gleichen Flächenanteilen steigt die Effizienz von Streuobstwiesen im

Durchschnitt aller Kulturpflanzen, bei denen ein Vergleich möglich ist, von 57 auf 65 Prozent. Nutzt man das Heu nicht als Biogassubstrat und erzielt somit höhere Energieerträge, steigt die Flächeneffizienz auf 75 Prozent der Effizienz von Obstplantagen. Birnen auf Streuobstwiesen erreichen in diesem Fall sogar eine höhere Effizienz als Birnen im Plantagenanbau (vgl. Tabelle 139).

Tabelle 139: Flächeneffizienz von Streuobstwiesen im Vergleich zu ökologisch bewirtschafteten Obstanlagen nach Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte

Kulturpflanze	Effizienz ohne Koppelprodukte	Effizienz inkl. Koppelprodukte VI (Heu als Biogassubstrat)	Effizienz inkl. Koppelprodukte VII (Heu als Festbrennstoff)
Äpfel	54%	59%	69%
Birnen	91%	99%	115%
Pflaumen/Zwetschgen	45%	49%	57%
Süßkirschen	55%	59%	69%
Sauerkirschen	57%	63%	73%
Mirabellen/Renekloden	k. A.	k. A.	k. A.
Aprimira'	41%	60%	69%
Durchschnitt	**57%**	**65%**	**75%**

Quelle: Eigene Berechnung

10.5.1.5 Nüsse

Die wichtigsten Nüsse, die in Deutschland produziert werden können, sind die Walnuss und die Haselnuss. Wie bereits dargestellt, kann man im Plantagenanbau von Walnüssen über die Nutzungsdauer mit Erträgen von rund 3,4 t/ha*a rechnen und bei einem Kernanteil von 47 Prozent einen Kernertrag von ca. 1,6 t/ha erwarten.

Die Haselnuss kann als Dauerkultur 40 Jahre genutzt werden. Bereits im 5. Standjahr kann man mit ersten Erträgen rechnen, bevor nach jährlichen Ertragszuwächsen zwischen dem 10. und dem 12. Jahr der Vollertrag erreicht wird (VBH, o. J.). In den Jahren 6 – 9 kann man nach Schätzl & Jäger von 0,75 t/ha ausgehen, ab dem 10. Jahr werden Erträge von 2,5 t/ha angegeben (Schätzl, et al., 2011). Nach Angaben des Industrieverbandes Agrar (IVA) liegt der Vollertrag von Plantagen in Süddeutschland bei 3,5 bis 4,0 t/ha (IVA, 2014). Über die gesamte Nutzungsdauer dürfte sich somit ein Ertrag von rund 2,75 (2,5 bis 3,0) Tonnen pro Hektar und Jahr ergeben. Der Kernanteil der Sorte ‚Ennis' beträgt fast 50 Prozent, was für Haselnüsse sehr hoch ist. Die ertragreiche Sorte ‚Nottinghams Frühe Haselnuss' weist einen Kernanteil von 42 Prozent auf (Klock, 2019). Dieser Wert liegt der folgenden Schätzung zugrunde.

Beim Holz der Haselnuss handelt es sich um ein sehr wertvolles Holz, das als Bauholz für Außen- und Innenausbauten genutzt werden kann und auch für den Bau von Möbeln sehr

wertvoll ist (Richter, 2017). Es eignet sich außerdem „aufgrund des hohen Brennwertes hervorragend als Brennholz“ (Richter, 2012). Die Baumhasel „ist in den ersten Jahren sehr schnellwüchsig. Bis zu 60 Zentimeter Zuwachs jährlich sind dabei durchaus möglich“ (Advanco GmbH, 2019). In Plantagen ist der Erziehungsschnitt nach dem 6. bis 7. Jahr abgeschlossen (VBH, o. J. a). Der Baumbestand ist in seiner Struktur anderen Obstplantagen sehr ähnlich. Daten zum Rodungsholzaufkommen lagen allerdings nicht vor, weshalb es anhand des Durchschnittswertes für ältere Obstplantagen geschätzt wurde: „Nach Ablauf der Nutzungsphase fallen bei der Rodung älterer Obstplantagen mit einem Alter von 30 Jahren nochmals 80 t/ha an“ (Nitsch, et al., 2001 S. 132). Die Haselnuss kann aber auch deutlich älter werden.

10.5.1.5.1 Ertragspotenziale des Nussanbaus

In Tabelle 140 sind die Ertragspotenziale des Anbaus von Walnüssen und Haselnüssen zusammengefasst. Mit 5,2 Millionen kcal/ha im Streuobstanbau und 8,1 bzw. 10,5 Millionen kcal/ha*a im Plantagenanbau sind die Kalorienerträge ebenso beachtlich wie die möglichen Energieerträge aus der energetischen Nutzung der Koppelprodukte. Im Streuobstanbau von Walnüssen sind neben den Wertholzerträgen ca. 21 MWh/ha*a und mehr aus Holz, Schalen und Heu zu gewinnen, im Plantagenanbau mehr als 14 MWh/ha*a aus Holz und Schalen.

Tabelle 140: Ertragskennwerte des Nussanbaus

Kennwert	Walnuss Plantage	Walnuss Streuobst	Haselnuss Plantage
Nussertrag, Schalen und Kerne (t/ha)	[1)] 3,40	[1)] 3,40	[2)] 2,75
Kernanteil (Prozent)	[3)] 47	[3)] 47	[4)] 42
Kernertrag (t/ha)	[5)] 1,60	[5)] 0,79	[6)] 1,26
Kaloriengehalt Nusskern (kcal/kg)	6.540	6.540	6.440
Kalorienertrag (kcal/ha)	[7)] 10.464.000	[7)] 5.163.984	[7)] 8.114.400
Ertrag Holz (t/ha)	[8)] 1,60	[8)] 1,00	[9)] 2,00
Ertrag Wertholz (m³/ha)		[10)] 0,80	
Ertrag Nussschalen (t/ha)	[5)] 1,80	[5)] 0,89	[6)] 1,74
Heizwert Holz & Schalen (kWh/ha)	[11)] 13.940	[11)] 7.751	[11)] 15.334
Heu (t/ha)		[12)] 6,5	
Energiepotenzial Heu (kWh/ha)		[13)] 13.195	

Quellen: (1) WBI, o. J.; Körber, 2008; Walnussveredlung Biebelnheim, 2018; (2) VBH, o. J.; Schätzl & Schägger, 2011; IVA, 2014; (3) Walker, 2011 (4) Klock, 2019 (5) WBI, o. J.; Körber, 2008; Walnussveredlung Biebelnheim, 2018; Walker, 2011; (6) VBH, o. J.; Schätzl & Schägger, 2011; IVA, 2014; Klock, 2019; (7) Eigene Berechnung (8) Schätzung nach: Nitsch, et al., 2001; Möndel, 2007; Ehring & Keller, 2008 (9) Schätzung nach Nitsch, et al., 2001; (10) Schätzung nach Möndel, 2007; (11) Eigene Berechnung (12) Miller, 2014; Balko 2011 (13) Eigene Berechnung

10.5.1.5.2 Flächengutschriften

Anhand der zuvor dargestellten Ertragspotenziale wurden mögliche Flächengutschriften berechnet. Diese fallen im Streuobstanbau aufgrund der Produktion der Koppelprodukte Wertholz und Heu mit 0,42 ha/ha mehr als doppelt so hoch aus, wie im Plantagenanbau.

Tabelle 141: Flächengutschriften für Koppelprodukte des Nussanbaus

Koppelprodukt	Walnuss Plantage	Walnuss Streuobst	Haselnuss Plantage
Wertholz		1.513	0
Festbrennstoffe	1.787	2.685	1.966
Summe	**1.787**	**4.199**	**1.966**

Quelle: Eigene Berechnung

10.5.1.5.3 Flächeninanspruchnahme

Bezogen auf das Kernertragsgewicht (ohne Schale) liegt die Flächeninanspruchnahme der Nussproduktion ohne Koppelprodukte bei 6,25 bis 12,66 m²/kg. Unter Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte sinken die Werte auf 5,13 bis 7,35 m²/kg. (Tabelle 142)

Tabelle 142: Gewichtsbezogene Flächeninanspruchnahme der Nusskernproduktion (m²/kg)

	Walnuss Plantage	Walnuss Streuobst	Haselnuss Plantage
Ohne Koppelprodukte	6,25	12,66	7,94
Inklusive Koppelprodukte	5,13	7,35	6,38

Quelle: Eigene Berechnung

Bezogen auf den Kalorienertrag liegt die Flächeninanspruchnahme der Nusskernproduktion ohne Koppelprodukte zwischen 0,96 und 1,94 m²/1.000 kcal. Unter Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte werden nur 0,78 bis 1,12 m²/1.000 kcal in Anspruch genommen. (Vgl. Tabelle 143)

Tabelle 143: Kalorienbezogene Flächeninanspruchnahme der Nussproduktion (m²/1.000 kcal)

	Walnuss Plantage	Walnuss Streuobst	Haselnuss Plantage
Ohne Koppelprodukte	0,96	1,94	1,23
Inklusive Koppelprodukte	0,78	1,12	0,99

Quelle: Eigene Berechnung

10.5.1.6 Wein

Der Weinkonsum in Deutschland lag im Zeitraum 2008 – 2018 auf einem konstanten Niveau: „Pro Kopf trinken deutsche Verbraucher durchschnittlich knapp über 20 Liter in einem Jahr. Im Jahr 2018 summierte sich der Pro-Kopf-Verbrauch auf rund 20,5 Liter. Der durchschnittliche Pro-Kopf-Konsum von Schaumweinen (z.B. Sekt oder Champagner) lag im Jahr 2018 bei rund 3,4 Litern“ (Statista, 2019k). Auf die Gesamtbevölkerung hochgerechnet entspricht dies rund 19,5 Millionen Hektolitern pro Jahr.

In Deutschland wird Weinmost auf rund 100.000 Hektar Rebfläche produziert. Die Gesamtproduktion in Deutschland lag im genannten Zeitraum bei rund 9 Millionen Hektolitern pro Jahr. Der durchschnittliche Ertrag im Zeitraum von 2007 bis 2016 betrug 90,7 Hektoliter Weinmost pro Hektar. Dabei erreichten die Rotmosterträge einen Durchschnittswert von 97,7 hl/ha und die Weißmosterträge von 86,6 hl/ha. Die Erträge unterscheiden sich allerdings je nach Sorte. Zudem kommt es witterungsbedingt zu erheblichen Schwankungen der Jahreserträge. Bei Rotmost reichte die Spanne von 70,6 bis 104,0 hl/ha und bei Weißmost von 65,6 bis 100,2 hl/ha. (BMEL, 2018 S. 86-87) In Baden-Württemberg wurden in den Jahren 2007 bis 2016 auf rund 27.240 ha rund 2,25 Millionen Hektoliter erzeugt, was einem Ertrag von rund 82,5 hl pro Hektar entspricht. Für den durchschnittlichen Weinkonsum pro Person werden in Deutschland somit knapp 23 m² Rebfläche benötigt. Hinzu kommen ca. 3,7 m²/Ea für die Deckung des Sektkonsums. In Baden-Württemberg liegen die entsprechenden Werte bei 25 m²/Ea und 4,1 m²/Ea. Der Flächenbedarf pro Hektoliter liegt in Deutschland bei ca. 110 m² und in Baden-Württemberg bei ca. 121 m².

10.5.1.7 Arznei-, Gewürz- und Aromapflanzen

Neben Nahrungsmitteln, Energie und Rohstoffen für die stoffliche Nutzung produziert die Landwirtschaft auch Rohstoffe für pflanzliche Arzneimittel. Im Jahr 2011 wurden in Deutschland auf rund 12.239 Hektar Arznei-, Gewürz- und Aromapflanzen angebaut. Den größten Anteil hatte Lein (Diätlein) mit 21 Prozent. Es folgten Petersilie mit 15 Prozent und Echte Kamille mit 9 Prozent vor Schnittlauch, Dill und Sanddorn mit jeweils 5 Prozent. Die verbleibenden 40 Prozent entfielen auf sonstige Pflanzen (FNR, 2018b S. 20). Der Anteil pflanzlicher Arzneimittel (ohne Homöopathie) am Umsatz mit Humanarzneimitteln in Apotheken lag im Jahr 2011 bei 3 Prozent (FNR, 2018b S. 21). Heute werden Arznei-, Gewürz- und Aromapflanzen auf rund 12.000 Hektar angebaut (FNR, 2018f). Insgesamt entspricht dies einer Fläche von rund 1,5 m² pro Einwohner. „Das sind aber nur etwa 15 Prozent der eigentlich benötigten pflanzlichen Rohstoffe für die pharmazeutische, kosmetische und Nahrungsergänzungsmittelindustrie. Der Rest entstammt Importen oder Wildsammlungen“ (FNR, 2018f). Selbst wenn man davon ausgeht, dass der gesamte Bedarf von heimischen Anbauflächen gedeckt werden könnte, würde der Anbau von Arznei-, Gewürz- und Aromapflanzen angesichts dieser Zahlen nicht sehr ins Gewicht fallen. Deshalb wurde hier auf eine weitere Vertiefung verzichtet.

10.5.2 Tierische Lebensmittel

Der Gesamtverbrauch tierischer Lebensmittel in Deutschland betrug im Jahr 2015 rund 243 kg pro Einwohner. Milchprodukte hatten daran mit rund 125 kg/Ea einen Anteil von 52 Prozent. Der Anteil der Fleischprodukte lag mit rund 89 kg/Einwohner bei 37 Prozent. Eier und Fisch hatten am Gesamtverbrauch jeweils einen Anteil von 6 Prozent. Fleisch- und Milchprodukte haben neben den großen Anteilen am Verbrauch auch einen überproportionalen Anteil am Flächenbedarf der Lebensmittelproduktion. Pauschale Aussagen zu ihrem Flächen- und Ressourcenaufwand pro Kilogramm sind jedoch kritisch zu betrachten, da hier eine Vielzahl von Faktoren maßgeblich ist. Aufgrund ihrer großen Zahl und Komplexität können diese Faktoren hier nicht vollständig abgebildet werden. Daher wurde ein Schwerpunkt auf die Frage gelegt, wie sich die für das Tierwohl als vorteilhaft geltende Weidehaltung von Mutter- und Milchkühen auf den Flächenbedarf des Milch- und Fleischverbrauchs auswirkt. Mit Blick auf das Tierwohl wurde zudem untersucht, wie sich der Flächenbedarf der Produktion von Hühnerfleisch und Eiern durch die Nutzung sogenannter Zweinutzungshühner verändert, die sowohl für die Mast als auch für die Eierproduktion geeignet sind.

10.5.2.1 Flächenverfügbarkeit

In Deutschland standen im Jahr 2016 pro Einwohner von 0,202 Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche (LNF) rund 0,057 Hektar in Form von Dauergrünland zur Verfügung (vgl. Tabelle 144). Somit handelte es sich bei 28 Prozent der landwirtschaftlichen Nutzflächen um Agrarflächen, welche nur durch Viehhaltung für die Lebensmittelproduktion nutzbar sind. Ohne eine Nutzung tierischer Lebensmittel standen in Deutschland für die menschliche Ernährung lediglich 0,143 Hektar Ackerland zur Verfügung. Da das heutige Grünland sich nicht vollständig für den Ackerbau eignet und Landnutzungsänderungen mit Blick auf den Natur- und Klimaschutz auch weiterhin vermieden werden sollten, gewinnt die Nutzung von Dauergrünland angesichts der fortschreitenden Flächenverknappung (vgl. Tabelle 144) als Grundlage der menschlichen Ernährung an Bedeutung.

Tabelle 144: Verfügbarkeit von Ackerland und Grünland in Deutschland 2005 bis 2016 (ha)

Kennwert	2005	2007	2010	2013	2016	Entwicklung 2005 - 2016
	Landwirtschaftliche Flächen (Hektar)					
LNF insgesamt [1)]	17.035.200	16.954.329	16.704.044	16.699.600	16.658.928	-2,2%
Ackerland [1)]	11.903.300	11.877.013	11.846.665	11.875.900	11.763.002	-1,2%
Dauergrünland [1)]	4.929.000	4.874.745	4.654.693	4.621.000	4.694.469	-4,8%
LNF/Einwohner	[2)] 0,207	[2)] 0,206	[2)] 0,204	[1)] 0,207	[1)] 0,202	-2,3%
Ackerland/EW	[2)] 0,144	[2)] 0,144	[2)] 0,145	[1)] 0,147	[1)] 0,143	-1,3%
Grünland/EW	[2)] 0,060	[2)] 0,059	[2)] 0,057	[1)] 0,057	[1)] 0,057	-4,9%

Quelle: (1) Statistisches Bundesamt, 2019, GENESIS-Online Datenbank (2) Eigene Schätzung: Die Bevölkerung der Jahre 2005, 2007 und 2010 wurde auf Basis des Zensus 2011 auf unter 81 Millionen geschätzt. Die Bevölkerung im Jahr 2011 wird durch das Statistische Bundesamt mit 80.327.900 Einwohnern angegeben.

10.5.2.2 Ökologische Vor- und Nachteile der Grünlandnutzung

10.5.2.2.1 Allgemeine ökologische Vorteile der Grünlandnutzung

Die Futterproduktion auf Grünlandflächen macht Flächen für die Lebensmittelproduktion nutzbar, die für die Produktion pflanzlicher Lebensmittel nicht oder wenig geeignet sind, z. B. aufgrund der Topografie oder der Bodenbeschaffenheiten. Zudem wäre ein großflächiger Umbruch von Grünland in Ackerland mit erheblichen ökologischen Nachteilen verbunden. Zum einen ist insbesondere extensiv bewirtschaftetes Grünland ein wichtiger Standort für artenreiche Pflanzengesellschaften und die an sie angepassten Tierarten: „Über ein Drittel aller heimischen Farn- und Blütenpflanzen haben ihr Hauptvorkommen im Grünland“ (Becker, et al., 2014). Zum anderen sind in den Böden große Mengen Kohlenstoff gespeichert, von denen bei einem Umbruch des Grünlandes erhebliche Mengen freigesetzt werden. Die durchschnittlichen Kohlenstoffvorräte von Grünlandböden (U-Tiefe: 0 - 0,3 m) liegen nach Del Gado et al. (2003) bei 71 t C/ha (Del Gado et al., 2003, zit. n. Saathoff und Haaren, 2011). In Baden-Württemberg liegen sie nach Neufeldt (2005) zwischen 93 und 103 t C/ha (Neufeldt, 2005, zit. n. Saathoff und Haaren, 2011). „Jeder Umbruch von Dauergrünland führt zu einem Verlust von mindestens 30 bis 50% des im Boden vorhandenen Humus innerhalb von 20 bis 40 Jahren. Je höher die ursprünglichen Kohlenstoffvorräte unter Dauergrünland waren, desto größer ist auch der absolute Kohlenstoffverlust“ (Freibauer, et al., 2012). Folglich entstehen im Fall eines Umbruchs je nach Bodenart unterschiedliche Mengen an Treibhausgasen, die sich in einer Größenordnung der Emissionen bewegen, die bei Waldrodungen entstehen können (Saathoff, 2009b S. 8). „Ca. 20 bis 40 % (IPCC 2006) bzw. 20 bis 35 t C ha^{-1} (UBA 2007) des ursprünglichen Bodenkohlenstoffs kann bei Grünlandumbruch mineralisiert und als CO_2 freigesetzt werden“ (Saathoff, 2009a S. 11).

Geht man am Beispiel Baden-Württembergs von einem Kohlenstoffvorrat von 93 t/ha und einem Verlust von 30 Prozent dieses Vorrats aus, ergibt dies bei einem Umwandlungsfaktor von 3,67 mögliche THG-Emissionen von rund 102 t CO_2-Äquivalent pro Hektar. Die Kompensation dieser Treibhausgasemissionen erfordert einen hohen Aufwand bzw. viel Zeit, um den Kohlenstoff wieder zu binden. Zudem weist Grünland im Vergleich zu Ackerland ein größeres CO_2-Absorbtionspotenzial auf. Mit der Umwandlung in Ackerland geht dieses Potenzial großenteils verloren. Insgesamt liegt das Treibhausgaspotenzial (GWP100)[58] von Grünland zwischen –22 und 5 t CO_2-Äq./ha*a, während die Emissionen von Ackerland nach Haaren et al. (2010) zwischen 1 und 22 t CO_2-Äq./ha*a betragen (Haaren et al., 2010, zit. n. Saathoff & Haaren, 2011), solange ein Abbau des Kohlenstoffvorrates stattfindet. In langjährig genutzten mineralischen

[58] GWP 100 = Globales Erwärmungspotenzial bzw. relatives Treibhauspotenzial, gemessen in CO2-Äquivalenten, für einen Zeitraum von 100 Jahren

Ackerböden kommt es dagegen „i.d.R. zu keinem signifikanten Abbau der Bodenkohlenstoffvorräte bzw. zu keinen relevanten CO_2-Emissionen“ (Saathoff, et al., 2011), weil sich der C-Kreislauf bereits in einem Gleichgewicht befindet. Die bisherigen Forschungsergebnisse zu den durch Landnutzungsänderungen verursachten THG-Emissionen weisen nach Saathoff & Haaren zwar „noch große Unsicherheiten und Spannbreiten auf, geben jedoch einen Eindruck von den Dimensionen der THG-Emissionen“ (Saathoff, et al., 2011). Ziel einer nachhaltigen und möglichst klimaneutralen Versorgung mit Lebensmitteln und nachwachsenden Rohstoffen sollte daher sein, Landnutzungsänderungen möglichst zu vermeiden.

Tabelle 145: THG-Senkenfunktion und THG-Emissionen unterschiedlicher Ökosystemtypen (Haaren et al., 2016)

Treibhauspotenzial	Feuchtgebiete	Wald	Grünland	Acker
GWP100-Gesamt [t CO_2-Äq. ha^{-1} a^{-1}]	-1 bis 45	-41 bis-3	-22 bis 5	1 bis 22

Quelle: Haaren et al., 2010, zit. n. Saathoff & Haaren, 2011

10.5.2.2.1.1 Ökologische Vor- und Nachteile von grünlandbasierter Viehhaltung, insbesondere Weidehaltung

Mit Blick auf die ökologischen Auswirkungen weist die Weidehaltung gegenüber der Stallhaltung mehrere Vorteile auf. Sutter et al. (2013) kommen in einem Vergleich beider Haltungssysteme am gleichen Standort zu dem Schluss, dass die Milchproduktion in einem Vollweidesystem „ein großes ökologisches Potenzial“ bietet. Hauptquellen der Umweltwirkung der Stallherde sind der Anbau der Kraftfutter Mais und Soja (Sutter, et al., 2013). Die wichtigsten ökologischen Vor- und Nachteile der Weidehaltung lassen sich, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, wie folgt zusammenfassen:

10.5.2.2.1.2 Landschaftspflege und Artenvielfalt

Die Weidehaltung von Rindern, Schafen und Ziegen ist ein wirksames Mittel zur Erhaltung und Pflege wertvoller und artenreicher Kulturlandschaften, die einst durch Beweidung entstanden sind. Die Beweidung, insbesondere die extensive Beweidung von Grünland führt zu anderen Pflanzengesellschaften als die Mahd und fördert die Artenvielfalt. „Modernes Ansaat-Grünland besteht vielfach aus maximal zehn verschiedenen Gras- und Leguminosenarten. Dagegen gedeihen auf großflächigen, extensiv genutzten Weiden 200 und mehr Pflanzenarten“ (Jedicke, et al., 2012 S. 2). Intensiv genutztes Grünland hat nicht unbedingt ein höheres Biodiversitätspotenzial als Ackerland. Für manche Organismen ist Ackerland sogar ein günstigerer Lebensraum (Nemecek, et al., 2014).

10.5.2.2.1.3 Gewässer

Beweidung kann zudem die Belastung der Gewässer reduzieren. Durch extensive Weidesysteme „können besonders auch die Spitzen in den Nährstofffrachten im Gewässer gekappt und mittlere Frachten entscheidend reduziert werden“ (Jedicke, et al., 2012 S. 2).

10.5.2.2.1.4 Klima

Mit Blick auf den Klimaschutz erweist sich naturnahe Beweidung im Vergleich zu einer intensiven Grünlandnutzung ebenfalls als vorteilhaft. „Selbst im Vergleich zur Mähnutzung reduzieren Beweidungsverfahren, welche die Vegetation nicht vollständig nutzen, die Emission von Kohlendioxid, Methan und Lachgas“ (Jedicke, et al., 2012 S. 2). Auch muss berücksichtigt werden, dass eine nachhaltige Beweidung zur dauerhaften Erhaltung von Grünland als Kohlenstoffspeicher beitragen kann. Nach Nemecek et al. (2014) kann allerdings die Klimabilanz von Stallherden mit einer Teilmischration mit Mais-Grassilage und Proteinausgleichsfutter geringere THG-Emissionen verursachen als Herden in Weidehaltung. So liegt der Methanausstoß einer Stallherde um rund ein Viertel unter dem Ausstoß einer Weideherde mit Silo und um knapp ein Fünftel (18 Prozent) unter dem Methanausstoß einer Weideherde ohne Silo (Sutter, et al., 2013).

Nach Idel konzentrieren sich bisherige Untersuchungen vor allem auf die Emissionen der Viehhaltung, insbesondere von Methan. „Das Potenzial der Wiederkäuer zur Kohlestoffspeicherung im Boden“ durch nachhaltiges Beweidungsmanagement bleibt dagegen nach Idel oft unberücksichtigt (Idel, 2012 S. 17). Zu wenig berücksichtigt werden nach Idel auch die Klimabilanzen der in der Stallfütterung eingesetzten Kraftfutter (Idel, 2012 S. 21). Auch weisen Kraftfutter, wie bereits dargestellt, erhebliche Unterschiede bei der Klimabilanz auf, je nachdem, ob sie mit (direkten oder indirekten) Landnutzungsänderungen verbunden sind oder von langjährig ackerbaulich genutzten Flächen stammen. Sutter et al. (2013) weisen der Stallherde eine Waldabholzung von 0,0027 m² pro kg ECM (Energie korrigierte Milch) zu, den Weideherden jeweils 0,0004 m² pro kg ECM (Sutter, et al., 2013).

Führt die Viehhaltung direkt oder indirekt, beispielsweise über Futtermittelimporte, zur Abholzung von Urwäldern, ist dies mit erheblichen Auswirkungen auf die Klimabilanz verbunden. Pro Hektar können durch die Rodung weit mehr als 200 Tonnen CO_2-Äquivalent freigesetzt werden[59].

[59] Die Menge der bei einer vollständigen Rodung freigesetzten THG-Emissionen pro Hektar Wald hängt vor allem von der vorhandenen Biomasse ab. In tropischen Regenwäldern reicht die Spanne der oberirdischen Biomasse von 120 bis 680 t TM/ha. In kontinentalen Wäldern Europas liegt die oberirdische Biomasse zwischen 20 und 230 t TM/ha (IPCC, 2006, S. 4.54). Der Kohlenstoffanteil liegt jeweils bei rund 0,47 t C pro t TM (IPCC, 2006, S. 4.48). Die Verbrennung der oberirdischen Biomasse tropischer Regenwälder kann folglich rund 200 bis 1.170 t/CO_2 emittieren.

10.5.2.2.1.5 Tierwohl

Die Weidehaltung hat nach Diersing-Espenhorst & Culiuc zahlreiche Vorteile für die Tiere: So stärkt sie die Muskulatur und schont Klauen, Gelenke und Beine. Das Laufen im Gras reinigt die Klauen und lässt sie leichter abtrocknen. Auch das natürliche Liegeverhalten wird begünstigt. Durch Weidehaltung kann somit die Gesundheit und Fruchtbarkeit der Herde gefördert werden. (Diersing-Espenhorst, et al., 2018) Jedoch ist die Herdenbeobachtung insbesondere bei größeren Kuhherden auf der Weide schwieriger als im Stall, weshalb Krankheiten, Brunst oder Verkalbungen nicht so schnell auffallen (Diersing-Espenhorst, et al., 2018). Die Freilandhaltung von Schweinen ist ein naturnahes Haltungsverfahren, das ihrer natürlichen Lebensweise sehr entgegenkommt. Allerdings „muss neben der Auslauffläche noch Fläche zum Umtrieb vorhanden sein, denn durch eine Übernutzung der Weide entwickeln sich Krankheitskeime und besonders Parasiten. Nur bei einem ausreichenden Flächenangebot kann sich der Boden ausreichend erholen. Um die Übertragung von Schweinepest und Maul- und Klauenseuche durch den Kontakt mit Wildschweinen auszuschließen, müssen Schweineweiden mit einem teuren doppelten Zaun versehen sein“ (BLE, 2019). Da es kaum Schutz vor Kälte, Hitze und Feuchtigkeit gibt, ist besondere Umsicht nötig. Regionen mit einer hohen Wildschweindichte sind „weniger geeignet, weil die Gefahr besteht, dass Krankheiten aus dem Wildschweinebestand auf die Haustiere übergreifen können“ (KTBL, 2011). Alte Nutzrassen sind robuster und an die Bedingungen im Freien besser angepasst als die heutigen Mastschweine. „Insbesondere für den ökologischen Landbau ist es [..] notwendig und auch Voraussetzung, dass es robuste und genügsame Nutztierrassen gibt, die an die jeweiligen regionalen Verhältnisse angepasst sind und [...] ohne den Einsatz von pharmazeutischen Hilfsmitteln aufwachsen können“ (Strahl, 2006). Im Vergleich zur Stallhaltung sind bei der Weidehaltung der Arbeitsaufwand höher und die Futterverwertung (Fleischansatz je Kilogramm Futter) schlechter (BLE, 2019). Ähnliches lässt sich zur Freilandhaltung von Hühnern sagen, da ein begrünter Auslauf den natürlichen Bedürfnissen der Tiere am meisten entspricht, aber auch gewisse Risiken für die Tiergesundheit durch z. B. Beutegreifer und Vogelgrippe erhöht. Die Freilandhaltung erfordert daher mehr Arbeit und Management. (KTBL, 2009a)

10.5.2.2.1.6 Sonstige Aspekte

Neben den positiven Aspekten, die sich mit Blick auf den Klimaschutz und den Artenschutz zeigen, sprechen weitere Faktoren für den Erhalt und die Nutzung von Grünlandflächen. Neben geringeren Beeinträchtigungen der Böden durch Bodenbearbeitung und Erosion ist auch das Risiko für Nitratauswaschung und die Belastung mit Schadstoffen deutlich geringer als im Ackerbau. Dies gilt sowohl für den ökologischen als auch für den konventionellen Landbau. Nachteile im Vergleich zum Ackerland sind vor allem die niedrigeren Ertragspotenziale und die geringere Produktvielfalt. Dies ist jedoch nur mit Blick auf jene Flächen relevant, die bisher als

Grünland genutzt werden, aber auch ackerbaufähig sind. Eine Einschätzung der Unterschiede zwischen Ackerland und Grasland durch Nemecek et al. (2017) ist in Tabelle 146 dargestellt.

Tabelle 146: Grundsätzliche Unterschiede zwischen Ackerland und Grasland mit Relevanz für die Umweltwirkungen (Nemecek et al., 2017).

Kriterium	Ackerland	Grasland
Intensitätsunterschiede	geringer	hoch
Pestizid-Einsatz, Ökotoxizität	mittel-hoch	gering
Bodenbearbeitung	ja	nein
Risiko für Nitratauswaschung, Erosion	mittel-hoch	niedrig
Lachgasemissionen	höher	tiefer
Wirkung auf Bodenqualität	eher negativ	eher positiv
Biodiversitätspotenzial	gering-mittel	gering-hoch
Vielfalt an Produkten	groß	klein
Ertragspotenzial	höher	niedriger
Nährstoffkonzentration von Futtermitteln	mittel-hoch	gering-mittel
Ernten	eine	viele
Leguminosen	geringer Anteil	wichtig

Quelle: Nemecek et al., 2014

10.5.2.3 Milchvieh- und Rinderhaltung

In der Bewertung von Milch- und Fleischerzeugung spielte die Flächeneffizienz bis vor einigen Jahren nur eine untergeordnete Rolle. So stellte Dorfner im Jahr 2012 fest, dass die Flächeneffizienz erst an Bedeutung gewinnt, seit die Fläche immer häufiger der knappste Faktor für die betriebliche Entwicklung geworden ist. Inzwischen ist sie laut Dorfner „die neue entscheidende Größe in der Milcherzeugung“ (Dorfner, 2012 S. 31). Nach seiner Ansicht ergänzt der Maßstab Flächeneffizienz „die bekannten Erfolgskennzahlen in der Milcherzeugung und ist auch ein wichtiger Teil der Nachhaltigkeitsdiskussion, folgt aber noch keiner einheitlichen nationalen oder internationalen Definition“ (Dorfner, 2012 S. 34). Dementsprechend uneinheitlich sind die Angaben der Erzeuger und wissenschaftlicher Veröffentlichungen, die für eine Bewertung der Flächeneffizienz benötigt werden. Dies trifft, noch mehr als in der Milchviehhaltung, besonders auf die Rindermast (Mutterkuhhaltung, Färsenmast, Remontenmast, Bullenmast) zu.

Nachfolgend wird daher ein Überblick über wichtige Erzeugungssysteme mit ihren wichtigsten aktuellen Kennzahlen gegeben, die eine Vergleichbarkeit der Flächeneffizienz ermöglichen. Um eine bessere Vergleichbarkeit und höhere Qualität der Daten zu erreichen, besteht jedoch weiterer Forschungsbedarf. Wichtige Voraussetzung dafür ist eine Vereinheitlichung der Standards insbesondere hinsichtlich der Datenerfassung und Dokumentation.

10.5.2.3.1 Milchviehhaltung zur Produktion von Milch und Fleisch

Der Flächenbedarf der Milchproduktion hängt von vielen verschiedenen Faktoren ab, auf die hier nicht detailliert eingegangen werden kann. Wichtige Faktoren sind vor allem die Art der eingesetzten Futtermittel und die Futterverwertung der Milchkühe, aber auch die Haltungsform und die Wirtschaftsweise.

Die meisten Milchviehbetriebe ernähren ihr Vieh mit Futtermischungen, die sowohl Raufutter (z. B. Gras, Grassilage, Heu) als auch Kraftfutter enthalten. „Neben dem Energie- wird auch der Eiweißbedarf zunehmend über Konzentratfuttermittel (Raps- und Sojaextraktionsschrote) auf Grund des hohen Ergänzungsbedarfs von Maisprodukten und dem Anstieg der Anforderungen an die Proteinversorgung mit steigender Leistung des Einzeltieres abgedeckt“ (Isselstein, et al., 2015 S. 19). Mit solchen Futtermischungen und leistungsfähigen Milchkühen sind in der konventionellen Landwirtschaft sehr hohe Milcherträge pro Hektar LNF möglich. In den Jahren 2012 bis 2016 lagen diese in Süddeutschland (Bayern), wie in Tabelle 147 dargestellt, meist zwischen rund 13,4 und 14,6 Tonnen ECM/ha*a.

Tabelle 147: Milcherträge pro Hektar in Süddeutschland (Bayern) insgesamt (kg ECM/ha)

Jahr	Unteres Viertel	Ø gesamt	oberes Viertel	Rel. zu 2012
2011/2012	10.685	13.432	15.769	100%
2012/2013	11.599	13.645	16.069	102%
2013/2014	11.243	13.965	15.144	96%
2014/2015	13.437	15.573	17.360	110%
2015/2016	11.798	14.553	17.172	109%

Quelle: LfL Bayern (2013-2017): Milchreporte 2012 bis 2016

Die Milchleistung pro Kuh liegt deutlich über 8 Tonnen ECM pro Jahr, die benötigte Futterfläche liegt bei ca. 0,63 ha pro Kuh mit Nachzucht. Im Schnitt halten die Betriebe in Bayern 1,56 bis 1,59 Kühe pro Hektar (vgl. Tabelle 148).

Tabelle 148: Durchschnittliche Flächenkennwerte der Milchviehbetriebe in Bayern (2012-2016)

Jahr	FF-Ausstattung (ha)**	Kuhbestand	Milchleistung (kg ECM/Kuh)	Flächeneffizienz (kg ECM/ha)	Kühe pro Hektar FF	FF pro Kuh mit NZ (ha)
2012	45	71	7.998	13.432	1,56	0,64
2013	49	78	8.140	13.645	1,59	0,63
2014	53	84	8.297	13.965	1,59	0,63
2015	*48	85	8.295	*15.573	*1,75	*0,57
2016	58	91	8.615	14.553	1,56	0,64

* Die Ursachen der relativ deutlichen Abweichungen des Jahres 2014/2015 vom Trend der übrigen Jahre (vgl. Milchreport Bayern 2015) konnten nicht nachvollzogen werden.
** Berechnet. Quelle: LfL Bayern (2013-2017): Milchreporte Bayern 2012 bis 2016

Nach Dorfner (2013) beeinflusst die Veränderung der Milchleistung die Flächeneffizienz mehr als die Grobfutterleistung[60] (vgl. Tabelle 149). Die besten Fleckviehbetriebe erreichen „über 17.000 kg/ha, indem sie eine überdurchschnittliche Milchleistung pro Kuh (>8.400 kg) mit einer relativ hohen Grobfutterleistung und einem geringen Flächenbedarf“ kombinieren (Dorfner, 2013)

Tabelle 149: Einfluss der Milch- und Grobfutterleistung auf die Flächeneffizienz

Flächeneffizienz (Sortierung)	Einheit	<7.000	7.000-9.000	9.000-11.000	11.000-13.000	13.000-15.000	>15.000
Flächeneffizienz (Durchschnitt)	kg ECM/ha Futterfläche	5.916	8.195	10.196	11.961	13.877	17.471
Milchleistung	kg ECM/Kuh	7.000	7.337	7.745	7.915	8.225	8.408
Grobfutterleistung	kg ECM/Kuh	2.285	2.417	2.685	2.694	2.820	2.726
Futterflächenbedarf	ha pro Kuh	1,20	0,90	0,76	0,66	0,59	0,49

Quelle: BZA Bayern 2010/11 (234 Fleckviehbetriebe, Milchkuh mit Nachzucht), zit. n. Dorfner, 2013

[60] Alle Ganzpflanzenprodukte (frisch, siliert und natürlich getrocknet) sowie Cobs und Stroh. Grobfutter zeichnen sich durch eine hohe Strukturwirksamkeit aus. (Weiß, o. J.)

10.5.2.3.1.1.1 Milchleistung bei reduziertem Kraftfuttereinsatz

In Deutschland werden 60 Prozent und mehr des Energiebedarfes der Milchkühe „durch Milchleistungsfutter (Kraftfutter), aber auch aus hochwertigen Grobfuttermitteln, die auf dem Acker erzeugt werden (Mais), bereitgestellt“ (Isselstein, et al., 2015 S. 19), obwohl Grünland für die Wiederkäuerhaltung ein grundsätzlich hohes Produktionspotenzial aufweist. Nach einem Vergleich durch Jürgens, Poppinga & Sperling (2016) erzielten kraftfutterfrei bzw. kraftfutterreduziert wirtschaftende Betriebe gegenüber dem Durchschnitt der Milchviehbetriebe in Deutschland allerdings eine um 27 Prozent geringere Milchleistung pro Kuh (Poppinga, et al., 2015 S. 19). Dabei lag die Milchleistung von 39 kraftfutterfrei wirtschaftenden Betrieben bei 5.489 kg/Kuh. Bei durchschnittlichem Kraftfuttereinsatz betrug die Milchleistung von Öko-Futterbaubetrieben in Deutschland 5.909 kg/Kuh (BMEL, WJ 2012/13)[61]. Der Durchschnitt aller Milchviehbetriebe in Deutschland (INLB, Ø 2011 u. 2012) lag bei 7.523 kg/Kuh. (Jürgens, et al., 2016 S. 56)

In einem Vergleich von 12 Betrieben durch Eilers (2013) erzielten 9 ökologisch wirtschaftende Betriebe ohne Kraftfuttereinsatz eine Milchleistung von knapp 6.000 kg pro Kuh und damit rund 90 Prozent der Milchleistung, die in ökologischen Betrieben mit reduziertem Kraftfuttereinsatz erzielt wurde. Die drei Betriebe, die wenig Kraftfutter einsetzten (ca. 720 kg pro Kuh und Jahr ohne Grascobs), erreichten eine Milchleistung von rund 6.700 kg/Kuh. Die Nutzungsdauer lag nach Eilers im Durchschnitt aller 12 Bio-Betriebe mit 4,5 Laktationen um 50 Prozent über dem Durchschnitt konventioneller Betriebe. (Eilers, 2013 S. 145) [62]

Prinzipiell lassen sich ohne Kraftfutter aber auch Milchleistungen zwischen 7.000 und ca. 8.000 kg/Laktation erreichen, wie ein Versuch auf dem Plantahof der landwirtschaftlichen Schule in Landquart GR in der Schweiz zeigt. Dort wird eine Braunvieh-Milchviehherde geführt, die in zwei Teilherden unterschiedlicher Produktionsformen unterteilt ist (Plantahof, 2018 S. 58). In einem Vergleich wurden die Milchleistungen einer Raufutterherde und einer sogenannten Leistungsherde ermittelt. Die Raufutterherde erhielt kein Kraftfutter (Plantahof, 2018 S. 60). Im Zeitraum 2004 bis 2008 produzierte die Raufutterherde durchschnittlich 8.119 kg Milch pro Laktation, die Leistungsherde 10.471 kg (Brandenburger, et al., 2008 S. 126). Die Milchleistung der Raufutterherde lag damit bei 78 Prozent der Milchleistung, die mit der Leistungsherde erreicht wurde. Die Ration der Raufutterherde bestand im Winter aus 13 kg Heu, 2,5 kg Grassilage, 6,5 kg Maissilage und 2 kg Grascobs. Die Futteraufnahme lag bei etwa 24 kg TM pro Kuh und Tag. Die Leistungsherde erhielt die gleiche Ration, zusätzlich aber noch bis zu 6 kg Kraftfutter. In dieser Herde lag die Futteraufnahme bei etwa 27 kg TM pro Kuh und

[61] Zit. n. Jürgens, et al., 2016, p. 56

[62] Frank et al. (2015) haben für ökologisch wirtschaftende Betriebe mit 6.620 kg ECM eine ähnliche Milchleistung ermittelt. Nach Frank et al. lag die Zahl der Laktationen in Bio-Betrieben mit 2,9 um ein Drittel höher als in konventionell wirtschaftenden Betrieben mit 2,2 Laktationen. (Frank, et al., 2015)

Tag. (top agrar, 2009). Die ohne Kraftfutter vorsorgte Raufutterherde erbrachte damit höhere Leistungen als der Durchschnitt der Herdebuchkühe des Braunviehzuchtverbandes (Schweiz) im gleichen Zeitraum (Kunz, 2013). Dies wird auf die Genetik, die gute Futterqualität und hohe Grundfutteraufnahmen der Tiere zurückgeführt (top agrar, 2009; Kunz, 2013). Die Energiegehalte des Heus betrugen in den Jahren 2004 bis 2008 durchschnittlich 5,6 MJ NEL pro kg TM. Die entsprechenden APDE- und APDN-Gehalte betrugen zwischen 91 und 116 g/kg TM (Kunz, 2013).

Tabelle 150: Milchleistung einer Leistungsherde und einer Raufutterherde im Vergleich

Jahr	Leistungsherde (LH)	Grünland-/Raufutterherde (RH)
2004 [1)]	9.010	8.330
2005 [1)]	10.950	7.616
2006 [1)]	10.219	8.007
2007 [1)]	11.167	8.064
2008 [1)]	11.009	8.635
2017 [2)]	8.959	7.657
2018 [2)]	9.845	7.948
Ø (7 Jahre)	**10.166**	**8.037**
Rel. zu LH	100%	79%

Quellen: (1) Brandenburger et al., 2008; (2) Plantahof, 2018

In den Jahren 2017 und 2018 erreichte die Raufutterherde mit 7.803 kg pro Laktation rund 83 Prozent der Milchleistung, die mit der Leistungsherde erzielt wurde (9.402 kg) (Plantahof, 2018 S. 62). Ziel einer Weiterentwicklung des Herdentrennungsversuches[63] ist es, künftig „eine maximale Effizienz in der Milchproduktion bei höchstmöglicher Milchleistung pro Hektare Grünland zu erreichen. Damit wird nicht mehr die Milchleistung pro Kuh im Vordergrund stehen, sondern die Leistung pro Flächeneinheit“ (Plantahof, 2018 S. 60-61).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Milchleistung bei einer Fütterung mit wenig bzw. ohne Kraftfutter zwischen 73 und 90 Prozent der Milchleistung beträgt, die in Milchviehbetrieben mit Kraftfuttereinsatz erreicht wird. Den geringsten Unterschied stellte Eilers (2013) im ökologischen Landbau fest.

[63] Stand 2018: Die Raufutterherde wurde in Grünlandherde umbenannt. Die beiden Herden (Leistungs- und Raufutterherde) unterschieden sich bislang nur bezüglich Fütterung: Die Raufutterkühe erhielten im Gegensatz zu den Hochleistungskühen kein Kraftfutter, wurden aber mit Silage (Mais und Gras) sowie mit Graswürfeln versorgt. Im Rahmen der Weiterentwicklung des Herdentrennungsversuches wird die Grünlandherde fortan im Winter nur mit Heu und Emd gefüttert werden. Auf Silomais wird verzichtet. Zusätzlich wird Kraftfutter in bescheidenem Rahmen als Ergänzungsfutter eingesetzt (durchschnittlich maximal 300 kg pro Kuh und Jahr). Während der Vegetationszeit frisst die Gründlandherde hauptsächlich Weidegras. (Plantahof, 2018 S. 60-61).

Tabelle 151: Milchleistung nach Kraftfuttereinsatz (kg Milch pro Kuh)

Futtereinsatz, Produktionsweise	Quelle			
	Jürgens et al., 2016	**Eilers, 2013**	**Brandenburger, 2008**	**Plantahof, 2018**
KF-reduziert, konventionell	5.489		8.064	7.803
Üblicher KF-Einsatz, konventionell	7.523		10.471	9.402
KF-reduziert, ökologisch		6.000		
Üblicher KF-Einsatz, ökologisch		6.700		
Leistungspotenzial kraftfutterreduzierter Produktion (100% = Leistung bei üblichem KF-Einsatz)	**73%**	**90%**	**77%**	**83%**

KF = Kraftfutter
Quellen: Brandenburger, 2008; Eilers, 2013; Jürgens et al., 2016; Plantahof, 2018

10.5.2.3.1.1.2 Flächenbedarf von Stall- und Weidehaltung

Der direkte Vergleich der Erträge von Stall- und Weidehaltung wird unter anderem durch die geringe Zahl der Betriebe erschwert, die in gleichen Systemen unter vergleichbaren Standortbedingungen arbeiten. Einer der wenigen direkten Vergleiche dieser Art wurde auf dem Gutsbetrieb des BBZN Hohenrain in der Schweiz durchgeführt. Sutter et al. (2013) haben dort den Flächenbedarf dreier Herden verglichen, von denen eine im Stall und zwei auf der Weide gehalten wurden. Die Stallherde benötigte 0,98 m² pro Kilogramm ECM, die Weideherde ohne Silo 1,41 m²/kg ECM, die Weideherde mit Silo 1,42 m²/kg ECM. Der Anteil von extensiv bewirtschaftetem Grünland lag im Fall der Stallherde bei 8,2 Prozent, im Fall der Weideherde-SILO bei 7,0 Prozent. Die insgesamt in Anspruch genommenen Flächen sind in Tabelle 152 dargestellt.

Tabelle 152: Flächenbedarf für die Produktion von einem kg ECM im Durchschnitt von drei Versuchsjahren. Systemvergleich Milchproduktion Hohenrain (2008-2010).

Fläche nach Nutzungsart	Stallherde (m^2 pro Jahr und kg ECM)	Weideherde-SILO (m^2 pro Jahr und kg ECM)
Ackerland	0,32	0,14
Grasland intensiv	0,50	1,06
Grasland extensiv	0,08	0,10
Wald	0,06	0,09
Übrige Fläche	0,02	0,02
SUMME	**0,98**	**1,41**

ECM = energiekorrigierte Milch.
Quelle: Sutter et al., 2013

Die Stallherde produziert somit 10.205 kg ECM/ha bzw. 11.111 kg ECM/ha LNF. Die Weideherde mit Silo liefert 7.040 kg ECM/ha bzw. 7.692 kg ECM/ha LNF, was 69 Prozent des Stallherdenertrags entspricht.

10.5.2.3.1.1.3 Flächenproduktivität der Milcherzeugung auf Grünlandstandorten

In Deutschland ermöglicht Grünland in intensiven Systemen Milchleistungen von 10.000 kg je Hektar und Jahr, auf ertragsstarken Standorten und bei optimiertem Management sind bis zu 13.000 kg/ha möglich (Isselstein, et al., 2015 S. 13).

Zu den Flächenpotenzialen im ökologischen Landbau fand ein sechsjähriger Weideversuch im Ökobetrieb des Versuchs- und Bildungszentrums Haus Riswick der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen in Kleve statt. Dabei wurden von 2009 bis 2014 Weideversuche im Kurzrasensystem mit ganztägiger oder halbtägiger Weidedauer durchgeführt[64]. Unter den niederrheinischen Standortbedingungen kann „eine Weideleistung von 9.000 bis 9.800 kg ECM je ha unabhängig von der Weidedauer erzielt werden“ (Berendonk, et al., 2015 S. 3). Die Flächenproduktivität, die neben der Weideleistung auch die Schnittleistung des Grünlandes umfasst, variiert nach Berendonk & Verhoeven (2015) zwischen 11.000 und 13.000 kg ECM/ha (Berendonk, et al., 2015 S. 3). In drei weiteren Versuchsjahren ist in Kleve ein System der Kurzrasenweide bei begrenztem Weideflächenangebot geprüft worden. Dabei wurden den 40 Kühen „jeweils nach intensiver Vorweide während der Weideperioden insgesamt 8 ha Weidefläche in Stallnähe zur Verfügung gestellt. Diese Weidefläche wurde maximal geweidet; Schnittanteile ergaben sich nicht. Im Rahmen der Halbtagsweide erfolgte eine angepasste Zufütterung im Stall“ (Verhoeven, et al., 2018). Pro kg ECM wurden 144 g Kraftfutter aufgewendet. Nach der zur Berechnung angewendeten Anteilsmethode lagen die Weide- und Flächenleistungen im Durchschnitt der Weideperioden bei 12.108 kg ECM/ha (Verhoeven, et al., 2018). In der Regel ist die Flächennutzung im ökologischen Anbau jedoch weniger intensiv, die Flächenerträge sind dementsprechend geringer. Nach Leisen & Mersch wurden in Niederungen (auf Marsch und Lehmböden) im Erhebungsjahr 2011 Erträge von 8.476 (6.566 – 11.506) kg ECM/ha erzielt. Dies entspricht etwa 60 Prozent der Flächeneffizienz in der konventionellen Milchviehhaltung mit hohem Kraftfutteranteil. Die betrieblichen Kennwerte der verglichenen Milchviehhaltungssysteme sind in Tabelle 454 (Anhang II) dargestellt. Im Mittel der betrachteten Studien liegt der Ertrag im ökologischen Landbau bei rund 8.600 (5.240 bis

[64] Angaben zur Fütterung: Im Rahmen der dreijährigen Ganztagsweide (2009-11) wurden lediglich geringe Zufuttermengen (3 kg TM Silomais oder max. 4 kg KF/Kuh/Tag) im Stall eingesetzt. Die Weidezeit betrug täglich 20 Stunden. Während der dreijährigen Halbtagsweide (2012-14) wurde den Kühen entweder tagsüber 8 Stunden oder unter Hitzebedingungen nachts 12 Stunden Weidezeit gewährt. Im Stall wurde eine Mischration bestehend aus Kleegrassilage, 2 kg Getreidemischung sowie Mineralergänzung in Mengen von 6 kg Trockenmasse in den Monaten April und Mai, 7,5 kg Trockenmasse in den Monaten Juni und Juli sowie 9 kg Trockenmasse in den Monaten August bis Weideende verabreicht. Bei Milchleistungen oberhalb von 22 kg ECM wurde Milchleistungsfutter mit 16 % Rohprotein und 7,2 MJ NEL/kg tierindividuell über Abrufstationen zugeteilt. (Berendonk, et al., 2015 S. 1-2)

12.110) kg Milch pro Hektar. In der ökologischen Landwirtschaft ist die Milchleistung pro Kuh um rund 20 Prozent geringer als in der konventionellen Landwirtschaft. Dafür ist die Besatzdichte höher, sodass die Milchleistung pro Hektar nur rund 10 Prozent unter dem Wert der konventionellen Landwirtschaft liegt (vgl. Tabelle 153)

Tabelle 153: Milchleistungen in der grünlandbasierten Milchviehhaltung

SN	Haltungssystem	Milchkühe pro Hektar	kg Milch pro Kuh	kg Milch pro Hektar
1	Weidehaltung, ökologisch n. Eilers, 2013	0,88	[1] 5.981	[6] 5.239
2	Stallhaltung, konventionell n. Sutter et al., 2013	1,25	[2] 8.900	[6] 11.111
3	Weidehaltung, konventionell n. Sutter et al., 2013	1,27	[2] 6.074	[6] 7.692
4	Weidehaltung, ökologisch n. Leisen & Mersch, 2013	1,90	[6] 4.461	[3] 8.476
4a	Weidehaltung, ökologisch n. Leisen & Mersch, 2013	1,80	[6] 4.079	[3] 7.343
5	Weidehaltung, ökologisch n. Verhoeven et al, 2018	1,80	[6] 6.727	[4] 12.108
6	Grünlandbasierte Haltung, konventionell n. Gräfe, 2010	1,47	[5] 6.580	[5] 9.676
Ø	**Grünlandbasierte Haltung, konventionell**	**1,33**	**[6] 7.185**	**[6] 9.493**
Ø	**Grünlandbasierte Haltung, ökologisch***	**1,53**	**[6] 5.723**	**[6] 8.608**

SN = Systemnummer. * Durchschnitt ohne System 4a
Quellen: (1) Eilers, 2013; (2) Sutter et al., 2013; (3) Leisen & Mersch, 2013 (4) Verhoeven et al, 2018 (5) Gräfe, 2010 (6) Eigene Berechnung

Nimmt man an, dass drei Viertel des Grünlandes mit geringer bis mittlerer Intensität (ca. 4.000 bis 8.500 kg Milch/ha) und ein Viertel mit hoher Intensität (ca. 10.000 bis 12.000) genutzt werden, sind bei grünlandbasierter Viehhaltung rechnerisch Erträge von 8.625 kg Milch/ha zu erwarten. Dies entspricht fast genau dem Durchschnitt der hier berücksichtigten Studien.

Die Flächenleistungen in Regionen mit unterschiedlichen Standortbedingungen, die sich in einem Vergleich durch Leisen & Mersch im Jahr 2011 zeigten, sind in Tabelle 154 dargestellt. In den Mittelgebirgsregionen fielen die durchschnittlichen Flächenleistungen im Vergleich zu Standorten in Niederungen um 13 bzw. 27 Prozent geringer aus (Leisen, et al., 2013).

Tabelle 154: Flächenleistung ökologisch bewirtschafteter Kuhweiden in unterschiedlichen Regionen 2011 (Leisen & Mersch, 2013)

Region (Anzahl Betriebe)	Kuhbesatz bei tatsächlichem Weideanteil (Kühe/ha)	Kuhbesatz berechnet für 100% Weideanteil (Kühe/ha)	Weidetage	Milch (kg ECM/ha)
Marsch und Lehmböden in Niederungen (10)	2,6	1,9	224	8.476
Mittelgebirge (6)	3,0	1,8	216	7.343
Mittelgebirge, flachgr., 2-3 Monate o Regen (3)	2,4	1,3	222	6.178
Niedermoor, anmoorig (3)	1,9	1,1	234	5.072
Sandböden in Niederungen (5)	2,3	1,5	232	6.825
Hochmoor (1)	1,6	0,8	226	3.131

Quelle: Leisen & Mersch, 2013

10.5.2.3.1.1.4 Flächenerträge der Milchproduktion

Um die potenziellen Flächenerträge der Milchviehhaltung zu erhalten, muss die an die Kälber verfütterte Vollmilch von den Flächenleistungen abgezogen werden. Kälber erhalten in der Regel in der ersten Woche ca. 25 Liter Milch. Anschließend werden sie in der konventionellen Milchviehhaltung im herkömmlichen Tränkeverfahren zwischen der ersten und achten Woche auf Milchaustauscher (MAT)[65] umgestellt und erhalten von der zweiten bis zum Ende der 8. Woche insgesamt ca. 330 Liter Vollmilch oder MAT. Beim Einsatz von MAT ist es erforderlich, auf eine ausreichende Nährstoffversorgung zu achten. Der Vollmilchbedarf beträgt somit zwischen 25 und ca. 355 Liter. Im sogenannten Ad-Libitum Tränkeverfahren erhalten die Kälber in den ersten drei Lebenswochen Milch zur freien Aufnahme, in denen sie bis zu 10 Liter pro Tag und mehr trinken (Reiter, et al., 2016 S. 5). Versuche zeigten, dass sich die höheren Milchaufnahmen „positiv auf die Entwicklung der Kälber bis hin zur späteren Milchleistung auswirken“ (Reiter, et al., 2016 S. 6). Der Vollmilchbedarf steigt demnach um ca. 46 Liter auf bis zu 400 Liter und mehr pro Kalb. Unterstellt man ein Vollmilch-Milchaustauscher-Verhältnis von 1:1, so ergibt sich ein Vollmilchbedarf von ca. 200 Litern pro Milchkuh und Jahr. Häufig werden die Kälber schon vor der 8. Woche abgesetzt, jedoch wird ein späteres und schrittweises Absetzen bis zur 9. Woche empfohlen, weil es sich positiv auf die Gesundheit und die spätere Leistungsfähigkeit der Tiere auswirkt (Pahlke, 2015). In Biobetrieben beträgt die Tränkephase mindestens 12 Wochen (Reiter, et al., 2016 S. 5), wobei nur Vollmilch verfüttert und auf Milchaustauscher verzichtet wird. In der Vollmilchmast erhalten die Kälber in den ersten drei Monaten ca. 900 (750 – 1.050) Liter Milch und insgesamt (bis zu einem Alter von 17 Wochen bzw.

[65] „Die Typen von Milchaustauscher bestehen im Magermilchaustauscher, dem Nullaustauscher mit Molkepulver sowie dem Nullaustauscher mit Molkepulver und pflanzlichen Zusatzstoffen.“ (Agrarnetz, o. J. S. 11) Als pflanzliche Proteinalternativen kommen z. B. Sojaproteine oder modifizierte Weizenproteine zum Einsatz. (Trouw Nutrition Deutschland GmbH, o. J. S. 6)

einem Lebendgewicht von 170 kg) ca. 1.000 bis 1.400 Liter Milch (Ruetz, 2018). 900 Liter Vollmilch entsprechen einem Verbrauch von rund 920 kg pro Milchkuh. Bei einem schrittweisen Absetzen bis zur 13. Woche fällt der Milchbedarf etwas geringer aus. Die für die menschliche Ernährung verfügbare Menge beträgt somit zwischen ca. 13.800 und 14.000 kg bei konventioneller Produktionsweise. In der ökologischen Landwirtschaft senkt die Tränke der Kälber den Milchertrag von ca. 8.600 auf rund 7.700 kg pro Hektar. Woitowitz geht davon aus, dass der durchschnittliche Vollmilchbedarf der Kälberaufzucht sowohl konventionell als auch ökologisch rund 200 kg pro Kuh und Jahr beträgt (Woitowitz, 2007 S. 37, 39). Aufgrund der unterschiedlichen Vorgaben der ökologischen Landwirtschaft im Vergleich zur konventionellen Landwirtschaft ist eine gleiche Höhe des Bedarfs jedoch unwahrscheinlich.

Unterstellt man, dass in der konventionellen Milchviehhaltung 200 kg Vollmilch und in der ökologischen Milchviehhaltung 900 kg Vollmilch pro Kuh und Jahr an die Kälber verfüttert werden, so liegt der Hektarertrag der ökologischen grünlandbasierten Milchviehhaltung bei 7.235 kg Milch und damit bei 84 Prozent der Milchleistung pro Hektar (vgl. Tabelle 155). Verglichen mit der kraftfutterreduzierten konventionellen Milchviehhaltung werden rund 78 Prozent des Hektarertrags erzielt. Im Vergleich zur konventionellen Landwirtschaft mit hohem Kraftfutteranteil (13.700 kg/ha) erreicht die ökologische grünlandbasierte Milchviehhaltung 53 Prozent der Flächenproduktivität.

Tabelle 155: Für den menschlichen Verbrauch verfügbarer Milchertrag der grünlandbasierten Viehhaltung

SN	Haltungssystem	Milchkühe pro Hektar	kg Milch pro Kuh	kg Milch pro Hektar
1	Weidehaltung, ökologisch n. Eilers, 2013	0,88	5.081	4.450
2	Stallhaltung, konventionell n. Sutter et al., 2013	1,25	8.700	10.861
3	Weidehaltung, konventionell n. Sutter et al., 2013	1,27	5.874	7.439
4	Weidehaltung, ökologisch n. Leisen & Mersch, 2013	1,90	3.561	6.766
4a	Weidehaltung, ökologisch n. Leisen & Mersch, 2013	1,80	3.179	5.723
5	Weidehaltung, ökologisch n. Verhoeven et al, 2018	1,80	5.827	10.488
6	Grünlandbasierte Haltung, konventionell n. Gräfe, 2010	1,47	6.380	9.382
Ø	**Grünlandbasierte Haltung, konventionell**	**1,33**	**6.985**	**9.228**
Ø	**Grünlandbasierte Haltung, ökologisch***	**1,53**	**4.823**	**7.235**

* Durchschnitt ohne System 4a
Quelle: Eigene Berechnung

10.5.2.3.1.1.5 Fleischertrag der Milchviehhaltung

Der Fleischertrag der Milchviehhaltung pro Hektar hängt, wie der Milchertrag pro Hektar, von einer Vielzahl von Faktoren ab. Neben den bereits zuvor erwähnten kommen hier unter anderem die Lebensdauer und die je nach Rasse unterschiedliche Schlachtausbeute als weitere Faktoren hinzu. Die mögliche Lebensdauer von Milchkühen beträgt 20 bis 25 Jahre. Die tatsächliche Lebensdauer von wirtschaftlich genutzten Milchkühen liegt deutlich darunter und nimmt durch die Steigerung der Milchleistung allgemein ab. In konventionellen Betrieben liegt sie daher in der Regel mit 3 bis 5 Jahren [66] unter der Lebensdauer in ökologisch wirtschaftenden Betrieben, wo sie meist ca. 6 Jahre beträgt (vgl. Tabelle 156).

Kühe weisen in der Regel Lebendgewichte von ca. 660 bis 670 kg auf, das Schlachtgewicht liegt im Durchschnitt bei ca. 326 kg, was einer Schlachtausbeute von rund 49 Prozent entspricht (AgrarMarkt Austria, 2018). Die Schlachtausbeute variiert allerdings von Rasse zu Rasse und beträgt z. B. bei Jersey-Milchrindern ca. 55 Prozent, bei typischen Zweinutzungsrindern ca. 57 Prozent (Fleckvieh) oder 58 Prozent (Deutsche Schwarzbunte) (Omlor, 2010 S. 8). Bei einem durchschnittlichen Milchkuhbesatz zwischen 0,8 und 1,9 Milchkühen pro Hektar (vgl. Eilers, 2013; Leisen & Mersch, 2013) ergibt sich in der ökologischen Milchviehhaltung ein Lebendgewicht der Milchkühe von 532 bis 1.264 kg pro Hektar und ein Schlachtgewicht von 260 bis 620 kg/ha. Bei einer Lebensdauer von 6 bis 9 Jahren ergibt sich damit ein Fleischertrag von 29 bis 103 kg pro Hektar und Jahr.

Viele Betriebe halten neben Kälbern auch Färsen für die Fleischproduktion. Färsen (weibliche Rinder, die noch kein Kalb geboren haben) werden in der Regel in einem Alter von 16 bis 19 Monaten bei einem Lebendgewicht von mindestens 450 kg (450 kg - 550 kg) geschlachtet, die Ausschlachtung liegt bei etwa 53 bis 57 Prozent (Lindner, 2006). Pro Färse kann man folglich mit rund 240 bis 310 kg Fleisch rechnen. Kälber (Rinder unter 6 Monate) haben ein Lebendgewicht unter 220 kg (Statistisches Bundesamt, 2008 S. 7). Pro Kalb fallen durchschnittlich etwa 100 kg Fleisch an (AgrarMarkt Austria, 2018 S. 2). Geht man vereinfachend davon aus, dass keine Färsennutzung erfolgt, jede Kuh ab dem Alter von 24 Monaten ein Kalb pro Jahr gebiert[67] und die Kälberverluste bei 10 Prozent liegen (Gräfe, 2010 S. 6), so erhält man rund 60 kg Kalbfleisch pro Kuh und Jahr. Je nach Kuhbesatz ergeben sich somit Kalbfleischerträge von 51 bis 118 kg/ha. Der gesamte Fleischertrag der ökologischen Milchviehhaltung liegt somit zwischen 88 und 213 kg/ha*a. Als Mittelwert wird ein Ertrag von 168 kg/ha angenommen (vgl. Tabelle 156).

[66] Das Abgangsalter von Milchkühen liegt in der Regel zwischen 4 und 5 Jahren. (Wangler, et al., 2009)
[67] Bei einer Zwischenkalbezeit von 367,2 Tagen werden pro Kuh und Jahr 99,59 Kälber lebend geboren, bei einer Zwischenkalbezeit von 391,5 Tagen sind es 95,53 lebend geborene Kälber

Tabelle 156: Fleischerträge der grünlandbasierten Milchviehhaltung in Niederungen

Datenbasis	Kühe/ ha LNF	Lebens-dauer (Jahre)*	Kälber pro Kuh	kg Kuh-fleisch/ Kuh*a	kg Kalb-fleisch/ Kuh*a	kg Rind-fleisch/ Kuh *a	kg Rind-fleisch/ pro ha
Weidehaltung, ökologisch n. Eilers, 2013	0,88	7,8	4,6	36,6	51,1	100,2	87,7
Stallhaltung, konventio-nell, n. Sutter et al., 2013	1,25	5,6	3,2	72,7	71,9	115,8	144,6
Weidehaltung, konventio-nell n. Sutter et al., 2013	1,27	5,6	3,2	73,7	73,0	115,8	146,7
Weidehaltung, ökologisch n. Leisen & Mersch, 2013	1,90	6,5	4,0	95,3	117,9	112,2	213,2
Weidehaltung, ökologisch n. Verhoeven et al, 2018	1,80	6,5	4,0	90,3	111,7	112,2	202,0
Grünlandbasierte Haltung, konventionell n. Gräfe, 2010	1,47	5,6	3,2	85,6	84,7	115,8	170,3
Ø Insgesamt	**1,43**	**6,3**	**3,7**	**75,7**	**85,1**	**112,0**	**160,8**
Ø konventionell	**1,33**	**5,6**	**3,2**	**77,3**	**76,5**	**115,8**	**153,9**
Ø ökologisch	**1,53**	**6,9**	**4,2**	**74,1**	**93,6**	**108,2**	**167,6**

Quelle: Eigene Berechnung
* Geschätzt nach Eilers, 2013;

10.5.2.3.1.1.6 Kalorienertrag der grünlandbasierten Milchviehhaltung

In der ökologischen, grünlandbasierten Milchviehhaltung kann man bei einem Kaloriengehalt von 670 kcal/kg Milch mit 2.982 bis 7.026 Mcal/ha aus der Milchproduktion rechnen. Der Kalorienertrag aus der Fleischproduktion liegt bei 138 bis 335 Mcal/ha und mehr. Damit trägt die Fleischproduktion in der ökologischen Milchviehhaltung rund 5,2 Prozent zum gesamten Kalorienertrag bei. Der Fleischertrag pro Hektar ist in der ökologischen Viehhaltung aufgrund des höheren Kuhbesatzes etwas höher (vgl. Tabelle 157).

Tabelle 157: Kalorienertrag und Flächenanteil der Fleischproduktion in der grünlandbasierten Milchviehhaltung pro Hektar

Datenbasis	Milch (kcal/ha)	Fleisch (kcal/ha)	Milch & Fleisch (kcal/ha)	Fleischanteil an kcal	Flächenanteil Fleisch (m²/ha)
Weidehaltung, ökologisch n. Eilers, 2013	2.981.762	137.751	3.119.513	4,4%	442
Stallhaltung, konventionell n. Sutter et al., 2013	7.277.154	227.041	7.504.194	3,0%	303
Weidehaltung, konventionell n. Sutter et al., 2013	4.984.144	230.313	5.214.457	4,4%	442
Weidehaltung, ökologisch n. Leisen & Mersch, 2013	4.533.220	334.711	4.867.931	6,9%	688
Weidehaltung, ökologisch n. Verhoeven et al, 2018	7.026.960	317.094	7.344.054	4,3%	432
Grünlandbasierte Haltung, konventionell n. Gräfe, 2010	6.286.176	267.441	6.553.617	4,1%	408
Ø konventionell	**6.182.491**	**241.598**	**6.424.090**	**3,8%**	**384**
Ø ökologisch	**4.847.314**	**263.185**	**5.110.499**	**5,2%**	**520**

Quelle: Eigene Berechnung

Aus der berechneten Netto-Flächeninanspruchnahme der ökologischen Milchproduktion durch Abzug des Flächenanteils der Fleischproduktion ergibt sich pro 1.000 kcal ein Flächenaufwand von 2,0 (1,4 bis 3,2) Quadratmetern. (Vgl. Tabelle 158)

Tabelle 158: Flächenaufwand für Milch aus der grünlandbasierten Milchviehhaltung pro 1.000 kcal (m²)

Haltung, Wirtschaftsweise	LNF/kg Milch (m²)	LNF pro 1.000 kcal (m²)	Ackerfläche pro 1.000 kcal (m²)	Grünland pro 1.000 kcal (m²)
Weidehaltung, ökologisch (n. Eilers, 2013)	2,15	3,2	0,0	3,2
Stallhaltung, konventionell (n. Sutter et al., 2013)	0,89	1,3	0,5	0,9
Weidehaltung, konventionell (n. Sutter et al., 2013)	1,28	1,9	0,2	1,7
Weidehaltung, ökologisch (n. Leisen & Mersch, 2013)	1,38	2,1	0,0	2,1
Weidehaltung, ökologisch (n. Verhoeven et al, 2018)	0,91	1,4	0,0	1,4
Grünlandbasierte Haltung, konventionell (n. Gräfe, 2010)	1,02	1,5	0,3	1,2
Ø konventionell	**1,07**	**1,6**	**0,3**	**1,3**
Ø ökologisch	**1,48**	**2,0**	**0,0**	**2,0**

Quelle: Eigene Berechnung

Die Flächeninanspruchnahme pro Kilogramm Fleisch liegt in der ökologischen grünlandbasierten Milchviehhaltung bei 3,1 m²/kg. In der konventionellen Landwirtschaft mit einem Ackerflächenanteil von 23 Prozent beträgt sie rund 2,5 m²/kg. Damit weist Fleisch aus der Milchviehhaltung im Vergleich zu anderen Fleischproduktionsweisen einen geringen Flächenbedarf auf.

Tabelle 159: Flächenbedarf von Rindfleisch aus der grünlandbasierten Viehhaltung pro Kilogramm (m²)

Haltung, Wirtschaftsweise	LNF pro kg Fleisch (m²)	Ackerfläche pro kg Fleisch (m²)	Grünland pro kg Fleisch (m²)
Weidehaltung, ökologisch n. Eilers, 2013	5,0	0,0	5,0
Stallhaltung, konventionell n. Sutter et al., 2013	2,1	0,7	1,3
Weidehaltung, konventionell n. Sutter et al., 2013	3,0	0,3	2,7
Weidehaltung, ökologisch n. Leisen & Mersch, 2013	3,2	0,0	3,2
Weidehaltung, ökologisch n. Verhoeven et al, 2018	2,1	0,0	2,1
Grünlandbasierte Haltung, konventionell n. Gräfe, 2010	2,4	0,5	1,9
Ø konventionell	**2,5**	**0,6**	**1,9**
Ø ökologisch	**3,1**	**0,0**	**3,1**

WW=Wirtschaftsweise (ökologisch oder konventionell), HF=Haltungsform, WH = Weidehaltung, SH = Stallhaltung, k. A.= keine Angabe

Die Flächeneffizienz der ökologischen grünlandbasierten Milchproduktion liegt somit bei rund 91 Prozent der konventionellen grünlandbasierten Viehhaltung. Der Flächenaufwand der Rindfleischproduktion, deren Anteil am gesamten Kalorienertrag bei ca. 4,4 Prozent liegt, beträgt im ökologischen Landbau folglich 2,0 (1,4 – 3,2) m² pro 1.000 kcal (vgl. Tabelle 160). Angenommen wurde dabei ein niedriger Kaloriengehalt pro Kilogramm Fleisch (mageres Rindfleisch: 1.570 kcal/kg).

Der Flächenaufwand der ökologischen Viehhaltung ist somit zwar um ca. 25 Prozent höher als in der konventionellen Landwirtschaft, doch der Ackerflächenbedarf geht dabei gegen Null. Durch eine Umstellung auf grünlandbasierte ökologische Milchproduktion reduziert sich der Ackerflächenbedarf pro 1.000 kcal im Vergleich zur konventionellen Milchproduktion um bis zu einem halben Quadratmeter. Besonders gering ist die Ackerflächeninanspruchnahme der grünlandbasierten Milchviehhaltung, wenn das gelegentlich als Ergänzung benötigte Kraftfutter Nebenprodukte aus der Produktion pflanzlicher Lebensmittel enthält, wie Presskuchen oder Rübenschnitzel.

Tabelle 160: Flächenaufwand für Rindfleisch aus der Milchviehhaltung pro 1.000 kcal (m²)

Haltung, Wirtschaftsweise	LNF Gesamt pro 1.000 kcal (m²)	Ackerfläche pro 1.000 kcal (m²)	Grünland pro 1.000 kcal (m²)
Weidehaltung, ökologisch (n. Eilers, 2013)	3,2	0,0	3,2
Stallhaltung, konventionell (n. Sutter et al., 2013)	1,3	0,5	0,9
Weidehaltung, konventionell (n. Sutter et al., 2013)	1,9	0,2	1,7
Weidehaltung, ökologisch (n. Leisen & Mersch, 2013)	2,1	0,0	2,1
Weidehaltung, ökologisch (n. Verhoeven et al, 2018)	1,4	0,0	1,4
Grünlandbasierte Haltung, konventionell (n. Gräfe, 2010)	1,5	0,3	1,2
Ø konventionell	**1,6**	**0,4**	**1,2**
Ø ökologisch	**2,0**	**0,0**	**2,0**

Quellen: Eigene Berechnungen; Eilers, 2013; Sutter et al., 2013; Leisen & Mersch, 2013; Verhoeven et al, 2018; Gräfe, 2010

10.5.2.3.1.1.7 Leder als mögliches Koppelprodukt der Milchproduktion

Bei der Schlachtung von Rindern aus der Milchviehhaltung fällt Haut an, die zu Leder verarbeitet werden kann. Der Vorteil solchen Rindsleders gegenüber vielen anderen Lederarten besteht vor allem darin, dass Tiere nicht eigens für die Lederproduktion getötet werden. Zudem

vermeidet Leder aus inländischer Erzeugung Lederimporte aus Produktionsländern ohne greifende Arbeits-, Natur- oder Tierschutzgesetze[68]. Viele Länder mit bedeutenden Nutztierpopulationen außerhalb Europas „verfügen über keine resS. kaum detaillierte Vorschriften zur Haltung, zu Eingriffen (z. B. Kastration, Schwanzcoupieren), zu Transporten oder zur Schlachtung von Nutztieren“ (Schweizer Tierschutz STS, 2014 S. 6). In der Schweiz unterstützt der Schweizer Tierschutz STS aus diesen Gründen die Idee, Leder aus tierfreundlicher Haltung geklärter Herkunft[69] zu etablieren (Schweizer Tierschutz STS, 2014 S. 9). Die Produktion der deutschen Lederindustrie lag im Jahr 2018 bei 8 Mio. Quadratmetern Flächenleder pro Jahr (Verband der Deutschen Lederindustrie e. V. , 2019).

Rindsleder ist das am weitesten verbreitete Leder und wird nahezu in allen Bereichen eingesetzt, in denen Leder verarbeitet wird. Sein Anteil an der weltweiten Lederproduktion liegt bei rund zwei Dritteln. Aus Rindsleder können u. a. Schuhe, Autoleder, Möbelleder, Taschen, Gürtel, Sättel und Lederbekleidung hergestellt werden. Eine Rindslederhaut hat im Durchschnitt eine Fläche von rund 5 Quadratmetern, die Fläche fällt jedoch je nach Rinderrasse unterschiedlich aus. Für einen Mantel werden etwa 3 bis 6 Quadratmeter Leder benötigt, für ein großes Sofa etwa 25 Quadratmeter (LEDERZENTRUM GmbH, 2019). Der Verschnitt liegt meist zwischen 30 und 45 Prozent, bei großen Flächen kann er noch deutlich höher liegen (LEDERZENTRUM GmbH, 2019). Geht man im ökologischen Landbau vereinfachend von einem Besatz von 0,8 bis 1,9 Kühen pro Hektar und einer Lebensdauer von 6 bis 8 Jahren aus, erhält man rund 1,0 (0,5 bis 1,6) m² Leder pro Hektar und Jahr (ohne Berücksichtigung der Kälber). Bei 4,7 Millionen Hektar Dauergrünland (Stand 2018) entspricht dies einem theoretischen Potenzial von 2,3 bis 7,2 Millionen Quadratmetern pro Jahr, was 0,03 bis 0,09 m² pro Einwohner und Jahr entspricht. Unter anderem in der grünlandbasierten Remontenmast sind jedoch noch deutlich höhere Besatzstärken (hier: Tiere pro Hektar) möglich (Meili, o. J.).

10.5.2.3.1.1.8 Biogas als mögliches Koppelprodukt der Milchviehhaltung

Bei einer Milchleistung von 6.580 kg Milch pro Kuh fallen nach Gräfe (2010) rund 24 m³ Gülle pro Kuh an (Gräfe, 2010 S. 6). Geht man davon aus, dass Kühe in Voll- oder Teilweide durchschnittlich zwischen 0 und 33 Prozent des Jahres im Stall verbringen, fallen dort zwischen 0,0 und 8,0 m³ Gülle an, die theoretisch für eine Biogasnutzung verfügbar sind. Geht man in der ökologischen grünlandbasierten Haltung von 4.500 bis 6.000 kg/Milch pro Kuh aus, dürften die Mengen zwischen 0,0 und 7,0 m³ Gülle pro Kuh und Jahr liegen. Nimmt man eine Biogasausbeute von 20,2 Nm^3/t FM an (LfL Bayern, 2019), kann man von einem Energiepotenzial von bis zu 880 kWh pro Hektar Futterfläche ausgehen.

[68] In Deutschland wurden im Zeitraum 2011 bis 2017 jährlich rund 1.274.200 Kühe gewerblich geschlachtet, hinzu kamen 1.399.700 Bullen, 506.800 weibliche Rinder und 23.600 Ochsen (jeweils ohne Hausschlachtungen). (Statistisches Bundesamt, 2019c)

[69] «Schweizer Leder aus tierfreundlicher Haltung»

10.5.2.3.1.2 Agrophotovoltaik in der Milchviehhaltung

Photovoltaik kommt bereits häufig auf Grünland zum Einsatz, meist in Kombination mit einer Beweidung durch Schafe. Erhöht montierte Anlagen lassen jedoch auch eine Befahrung der Fläche mit Traktoren sowie eine Beweidung mit Kühen zu (vgl.12.2.2.4). Die Erträge im Futterbau und auf Grünland dürften durch die Photovoltaik zwar zurückgehen, doch die Rückgänge bewegen sich bisher im einstelligen Prozentbereich. „Beim Kleegras ist der Ertrag im Vergleich zur Referenzfläche nur leicht um 5,3 % reduziert“. Im Anbau von „Kartoffeln, Weizen und Sellerie, sind die Ernteverluste durch die Beschattung mit rund 18 - 19 % etwas stärker ausgeprägt“ (Högy, zit. n. Fraunhofer ISE/Elsner, Universität Hohenheim, 2018). Geht man von Einbußen von 5 bis 20 Prozent beim Biomasseertrag aus, dürften im Durchschnitt Milcherträge von ca. 6.900 (3.560 bis 9.960) kg Milch pro Hektar Grünland zu erwarten sein. Der Einfluss auf den Fleischertrag der Milchviehhaltung dürfte eher gering sein, weshalb ein Ertrag von ca. 147 kg/ha*a erwartet wird. Der PV-Stromertrag einer Agrophotovoltaikanlage liegt um ca. 20 Prozent unter dem Ertrag einer PV-Freiflächenanlage (Fraunhofer ISE/Elsner, Universität Hohenheim, 2018). Für Deutschland kann man von einen Freiflächenanlagenertrag von rund 460 MWh/ha*a als Mittelwert ausgehen (BMVI, 2015 S. 50). Künftig ist mit weiteren Ertragssteigerungen durch verbesserte Anlagentechnik zu rechnen. Zwei der ertragreichsten Freiflächenanlagen in Süddeutschland liefern ca. 705 MWh/ha*a (vgl. 12.2.2.3). Zieht man ein Fünftel des Ertrags aufgrund des größeren Modulabstandes ab, erhält man rund 570 MWh/ha*a. Werden bifaziale Module genutzt, sind Erträge von ca. 717 MWh/ha*a möglich (Fraunhofer ISE, 2019)

Tabelle 161: Ertragspotenzial von Agrophotovoltaik in der grünlandbasierten Milchviehhaltung

Nutzung	kWh pro ha	kg Milch pro ha	kg Fleisch pro ha	Milch, kcal pro ha	Fleisch, kcal pro ha	Milch & Fleisch, kcal pro ha
Milchvieh	440*	6.330	147	4.241.000	230.800	4.471.800
PV-Anlage	570.000					

* Bei reiner Weidehaltung ist keine energetische Nutzung möglich.
Quellen: Eigene Berechnungen

10.5.2.3.2 Mastrinderhaltung zur Fleischproduktion

Die am weitesten verbreiteten Rindermastsysteme sind die Bullen- und Ochsenmast, die Mutterkuhhaltung und die Ammenkuhhaltung. In der Mutterkuhhaltung umfasst eine Masttiereinheit eine Kuh mit Kalb, in der Ammenkuhhaltung eine Kuh mit zwei Kälbern. Die Haltung auf der Weide gewinnt auch hier an Bedeutung, weil sie den natürlichen Lebensbedingungen am nächsten kommt. „Werden bestimmte Voraussetzungen eingehalten, ist die ganzjährige Weidehaltung aus Sicht des Tierschutzes durchaus zu befürworten“ (Averbeck, et al., 2000). Eine

Folge der Weidehaltung sind jedoch geringere Schlachtausbeuten im Vergleich zur Stallhaltung (Omlor, 2010 S. 10).

10.5.2.3.2.1 Mutterkuhhaltung und Ammenkuhhaltung

In der konventionellen grünlandbasierten Mutterkuhhaltung liegt der Flächenbedarf pro Produktionseinheit Mutterkuh (PEMK) einschließlich anteiliger Nachzucht und Deckbulle im Durchschnitt bei 1,78 ha Grünland, was einem Viehbesatz von 0,74 GVE entspricht (Gräfe, 2013 S. 1). Der Anteil der Einheit „Mutterkuh und Kalb“ am Flächenbedarf beträgt 55 Prozent (0,98 ha) (Gräfe, 2013 S. 3). In der Ammenkuhhaltung ist der Flächenbedarf pro Masttiereinheit etwas höher als in der Mutterkuhhaltung, doch der Fleischertrag pro Hektar ist insgesamt höher, wodurch die Flächeneffizienz steigt (Häusler, 2016 S. 29-30). Häusler gibt für die Mutterkuhhaltung Flächenbedarfe von 34 m² pro kg Fleischzuwachs bei Einstellern und 25 m² pro kg Fleischzuwachs bei Jungrindern an. Die entsprechenden Werte der Ammenkuhhaltung liegen bei 18 m²/kg und 14 m²/kg (Häusler, 2016 S. 30). Dies entspricht einem Fleischzuwachs von rund 300 bis 400 kg Fleisch pro Hektar in der Mutterkuhhaltung und rund 550 bis 710 kg Fleisch pro Hektar in der Ammenkuhhaltung. Der Ackerflächenanteil liegt hier bei rund 3 bis 4 Prozent in der Mutterkuhhaltung und bei rund 4 Prozent in der Ammenkuhhaltung (Häusler, 2016 S. 29). Nach Meili liegt das Ertragspotenzial der Mutterkuhhaltung ohne Einsatz von Kraftfutter und Mais am Standort Bubikon in der Schweiz bei 424 kg Schlachtgewicht pro Hektar (Meili, 2018 S. 2). Weitere Versuche zur Rindermast in Mutterkuhhaltung ohne Kraftfutter wurden unter anderem in den Jahren 2006 bis 2014 an der LFS Hohenlehen[70] durchgeführt.

10.5.2.3.2.2 Grünlandbasierte Remontenmast zur Fleischproduktion

Der Betrieb Meilibeef in Bubikon (Schweiz) übernimmt abgetränkte weibliche Remonten-Kälber (Kreuzungen von Milch- und Mastrassen) aus einem benachbarten Milchviehbetrieb im Alter von ca. 5 bis 6 Monaten bei einem Lebendgewicht von 200 kg. Im Mastbetrieb werden sie anschließend bis zu einem Alter von max. 27 Monaten ohne den Einsatz von Mais und Kraftfutter gemästet (Grundsatz: „Feed no Food“). Im Sommer werden die Rinder auf einer Kurzrasenweide gehalten und im Winter mit Grassilage und Heu gefüttert (Verhältnis ca. 9:1). (Meili, o. J. S. 2-5) Gehalten werden 24-30 Tiere auf einer Fläche von 6,2 Hektar. Pro Jahr werden durchschnittlich 18 Masttiere mit einem Schlachtgewicht von ca. 300 kg und eine Mut-

[70] Der Bio-Betrieb der LFS Hohenlehen erforscht seit dem Jahr 2006 in mehreren Versuchen die Möglichkeiten ökologischer Mutterkuhhaltung. Zwischen 2006 und 2010 wurden 10 Mutterkühe gehalten, die neben Heu, Grassilage und geringen Mengen Frischgrases täglich 0,5 – 1,0 kg Gerstenschrot erhalten haben. Die Jungrinder erhielten kein Kraftfutter. Die männlichen Jungrinder wurden mit einem Lebendgewicht von 360 kg geschlachtet, die männlichen mit einem Gewicht von 400 kg. In den vier Jahren bis 2010 wurden bei 38 Abkalbungen 42 Kälber geboren. 3 Kälber verendeten. Kreuzungen von Fleckvieh und Limousinrindern erreichten das Mastendgewicht im Durchschnitt nach 8,5 Monaten, reinrassige Limousin nach 9,9 Monaten (Velik, 2010).

terkuh mit einem Schlachtgewicht von 263 kg geschlachtet. Somit ergibt sich ein Schlachtgewicht von 910 (868 + 42) kg pro Hektar (Meili, o. J. S. 2-5). Aktuell (Stand 2018) erzielt der Remontenmastbetrieb 956 kg/ha. Nach Meili ist der Ertrag der Remontenmast bei gleichem Trockenmasseertrag pro Hektar Grünland um den Faktor 2,25 höher als in der Mutterkuhhaltung. Die geringere Flächeneffizienz der Mutterkuhhaltung erklärt Meili mit dem Verlust, der sich aus dem Erhaltungsbedarf der Mutterkuh ergibt, die das Kalb mit Milch versorgt. (Meili, 2018 S. 2).

10.5.2.3.2.2.1 Zusammenfassung: Ertragspotenziale der Rinder- und Milchviehhaltung

Pauschale Aussagen zur Flächeninanspruchnahme der Erzeugung von Milch und Milchproduktion sind nicht möglich, da bei den Ertragspotenzialen nicht nur nach Wirtschaftsweise (konventionell oder ökologisch), sondern auch nach Haltungsform und Flächennutzungsintensität differenziert werden muss. Dementsprechend ist die Spanne der durchschnittlichen Flächenleistungen der grünlandbasierten Milchviehhaltung von ca. 5.000 bis 12.000 kg Milch pro Hektar (je nach angewendetem System) selbst in ertragreichen Niederungen groß. Noch größer ist die Differenz zwischen extensiv grünlandbasierter Haltung ohne Kraftfutter, die zum Teil weniger als 5.000 kg ECM/ha liefert, einerseits und intensiver Stallhaltung mit hohem Kraftfutteranteil, die im Durchschnitt mit mehr als 14.000 kg ECM/ha etwa den dreieinhalbfachen Ertrag liefert, andererseits. Die ökologische grünlandbasierte Milchproduktion erreicht ca. 61 Prozent der Flächenleistung, die in der intensiven konventionellen Landwirtschaft mit hohem Kraftfutteranteil erreicht werden. Unterschiedliche Vorgaben zur Fütterung der Kälber senken den Marktmilchertrag pro Hektar jedoch auf rund 52 Prozent im Vergleich zur intensiven konventionellen Produktion.

Vergleicht man konventionelle und ökologische Landwirtschaft auf Grünlandstandorten, fällt die Differenz geringer aus. Nach Gräfe (2010) kann man bei konventioneller Milchproduktion auf Grünlandstandorten bei einer Marktmilchleistung von 6.580 kg/Kuh und einem Grünlandanteil von 78 Prozent von einem Flächenbedarf von 0,67 ha pro Kuh ausgehen. Dies entspricht rund 9.800 kg Milch pro Hektar LNF. (Gräfe, 2010, S. 6) Die Differenz zur ökologischen Landwirtschaft beträgt in diesem Fall nur 24 Prozent. Die intensive ökologische Weidehaltung erreicht mit 11.000 bis 13.000 kg ECM/ha (Berendonk, et al., 2015 S. 3) etwa 86 Prozent der Milcherträge, die in der intensiven konventionellen Milchviehhaltung pro Hektar erzielt werden. Davon abzuziehen ist jedoch jeweils der Vollmilchbedarf der Kälberfütterung (ca. 900 kg pro Kuh). Die Marktmilchleistung pro Hektar liegt somit bei 79 Prozent der intensiven konventionellen Milchviehhaltung mit hohem Kraftfuttereinsatz.

Tabelle 162: Flächenproduktivität der Milchproduktion nach Wirtschaftsweise und Haltungsform

Wirtschaftsweise und Haltungsform	Marktmilchertrag (gerundet)	Flächenproduktivität
Konventionelle Stallhaltung, ackerlandbasiert	14.000	100%
Konventionelle Stallhaltung, grünlandbasiert	9.800	70%
Ökologische Kurzrasenweide, grünlandbasiert, intensiv	11.100	79%
Ökologische Weidehaltung, grünlandbasiert	7.200	51%
Ökologische Weidehaltung, grünlandbasiert, extensiv	< 5.000	< 36%

Quellen: Eigene Berechnungen; Eilers, 2013; Sutter et al., 2013; Leisen & Mersch, 2013; Verhoeven et al, 2018; Gräfe, 2010

Ähnlich groß wie in der Milchviehhaltung ist die Spanne in der Rindermast, die allein in der grünlandbasierten Viehhaltung von unter 300 kg bis über 900 kg pro Hektar reicht (Faktor 3). Mit Blick auf das globale Ernährungspotenzial ist aber nicht allein das Ertragspotenzial pro Hektar LNF entscheidend, sondern vor allem der Bedarf an Ackerfläche pro Nahrungskalorienbereitstellung. Je geringer der Anteil des Ackerlandes an der Kalorienbereitstellung durch die Milchvieh- und Rinderhaltung ist, desto geringer ist die Konkurrenz zur Produktion pflanzlicher Nahrungsmittel. In einem Vergleich, der dagegen vor allem die Verwertung von Kraftfutter berücksichtigt, wird die Kuh nach Idel „im falschen System bewertet“ (Idel, 2012 S. 19). Bisher wird nach Idel „nicht die Fähigkeit der Wiederkäuer zur Grünland-Verwertung, sondern ihre Mais- und Soja-Verwertung im Vergleich zu den Allesfressern Huhn und Schwein“ gemessen (Idel, 2012 S. 19). Folglich ist ein Vergleich der Flächeninanspruchnahme tierischer Lebensmittel, der die Art der genutzten Flächen außer Acht lässt, irreführend, weil es sich bei bestehendem Dauergrünland in vielen Fällen um nicht ackerfähiges Grünland handelt.

In der Stallhaltung von Milchkühen mit leistungsorientierter Kraftfutternutzung liegt der Anteil der Ackerflächen am Futtermittelverbrauch in der Regel zwischen 30 und 75 Prozent (vgl. Thomet et al., 2008; Sutter, et al., 2013; LfL Bayern, o. J.). In der grünlandbasierten Haltung kann man von einem Ackerflächenanteil von bis zu 22 Prozent ausgehen. Bei Vollweidehaltung liegt er meist deutlich unter 15 Prozent und kann auf einen vernachlässigbaren Anteil nahe Null reduziert werden (Thomet, et al., 2008; Gräfe, 2010; Sutter et al., 2013; Verhoeven et al, 2018).

Die hier verglichenen Beispiele grünlandbasierter Milchviehsysteme mit Weidehaltung weisen einen durchschnittlichen Ackerflächenanteil von rund 11 (0 – 22) Prozent auf (vgl. Tabelle 163). Sie benötigen im konventionellen Landbau somit nur rund 0,11 Hektar Ackerland, um 5,2 Mio. kcal für die menschliche Ernährung bereitzustellen. Verdoppelt man den Anteil des Ackerlandes um 0,22 ha (22 Prozent), steigt der Ertrag auf ca. 6,2 Mio. kcal pro Hektar LNF.

Zum Vergleich: Kartoffeln liefern im konventionellen Anbau als eine der kalorienertragreichsten Nahrungspflanzen in Deutschland auf 0,11 ha rund 3,3 Mio. kcal und auf 0,22 ha rund 6,6 Mio. kcal.

Dieser Vergleich zeigt, dass eine grünlandbasierte Milchproduktion mit reduziertem Kraftfuttereinsatz nicht in Konkurrenz zur Produktion pflanzlicher Lebensmittel steht. Ab einem Ackerflächenanteil von mehr als ca. 21 Prozent ist ein Anbau von Kartoffeln jedoch flächeneffizienter.

Tabelle 163: Futterflächenbedarf pro kg Milch (m²) und Futterflächenanteile von Acker und Grünland (Prozent) nach Abzug der Fleischproduktion

Haltung, Wirtschaftsweise	LNF/kg Milch (m²)	Ackerfläche pro kg Milch (m²)	Grünland pro kg Milch (m²)	Ackerflächenanteil
Weidehaltung, ökologisch (n. Eilers, 2013)	2,15	0,00	2,15	0%
Stallhaltung, konventionell (n. Sutter et al., 2013)	0,89	0,32	0,58	36%
Weidehaltung, konventionell (n. Sutter et al., 2013)	1,28	0,14	1,15	11%
Weidehaltung, ökologisch (n. Leisen & Mersch, 2013)	1,38	0,00	1,38	0%
Weidehaltung, ökologisch (n. Verhoeven et al, 2018)	0,91	0,00	0,91	0%
Grünlandbasierte Haltung, konventionell (n. Gräfe, 2010)	1,02	0,23	0,80	22%
Ø konventionell	**1,07**	**0,23**	**0,84**	**21%**
Ø ökologisch	**1,48**	**0,00**	**1,48**	**0%**

Quelle: Eigene Berechnung

In der extensiven Viehhaltung sind die Kalorienerträge zwar nur etwa halb so hoch, doch trägt insbesondere die extensive Weidehaltung, neben der Bereitstellung von Nahrungskalorien, zu Pflege und Erhaltung von artenreichen Kulturlandschaften bei. Den höchsten Weideanteil an der Futterfläche weist i. d. R. die ökologische grünlandbasierte Milchviehhaltung auf. In einer Stichprobe von Eilers lag er zwischen 30 und 80 Prozent (Eilers, 2016 S. 7).

Berendonk & Verhoeven kommen zu dem Schluss, dass die Vollweidenutzung als Grünlandnutzung bevorzugt geeignet ist, wenn Milch ausschließlich vom Grünland produziert werden soll (Berendonk, et al., 2015 S. 7).

10.5.2.3.2.3 Flächeneffizienz der Milchvieh- und Rinderhaltung: Flächenbedarf je 1.000 kcal

Kühe sind als Wiederkäuer besonders gut für die Weidehaltung geeignet, „wobei die Milchproduktion pro produzierte Proteineinheit deutlich effizienter und mit weniger Umweltbelastung verbunden ist als die Fleischproduktion“ (De Vries und De Boer, 2010, zit. n. Nemecek, et al., 2014). Die aus den unterschiedlichen Wirtschaftsweisen, Haltungsformen und Futterrationen resultierende Flächeninanspruchnahme pro 1.000 kcal ist in Tabelle 164 dargestellt. Betrachtet man den Gesamtertrag inklusive Fleischproduktion, so werden für die Bereitstellung von 1.000 kcal in der konventionellen Milchviehhaltung rund 1,6 m² in Anspruch genommen. Davon entfallen 0,4 m² auf Ackerland.

In der ökologischen Milchviehhaltung werden rund 2,0 m² benötigt, wobei jedoch auf Ackerland weitgehend verzichtet wird. Für eine Ration Milch oder Fleisch à 1.000 kcal werden in der ökologischen grünlandbasierten Haltung zwischen 1,4 und 3,2 m² beansprucht. Die Fleischproduktion durch die Milchviehhaltung weist damit eine deutlich höhere Flächeneffizienz auf, als die Fleischproduktion mittels Mastrinderhaltung.

Tabelle 164: Flächenbedarf der Milch- und Fleischproduktion pro 1.000 kcal in der Milchviehhaltung (m²)

Datenbasis	Gesamt	Acker	Grünland
Weidehaltung, ökologisch (n. Eilers, 2013)	3,2	0,0	3,2
Stallhaltung, konventionell (n. Sutter et al., 2013)	1,3	0,5	0,9
Weidehaltung, konventionell (n. Sutter et al., 2013)	1,9	0,2	1,7
Weidehaltung, ökologisch (n. Leisen & Mersch, 2013)	2,1	0,0	2,1
Weidehaltung, ökologisch (n. Verhoeven et al, 2018)	1,4	0,0	1,4
Grünlandbasierte Haltung, konventionell (n. Gräfe, 2010)	1,5	0,3	1,2
Ø konventionell	**1,6**	**0,4**	**1,2**
Ø ökologisch	**2,0**	**0,0**	**2,0**

Quelle: Eigene Berechnung

Die grünlandbasierte Mastrinderhaltung nimmt, je nach System, zwischen 6,7 und 21,2 m² pro 1.000 kcal in Anspruch (vgl. Tabelle 165). Die höchste Flächeneffizienz weist die Remontenmast auf, gefolgt von der Ammenkuhhaltung. Die Mutterkuhhaltung dürfte dagegen die höchste Vereinbarkeit mit den Zielen von Natur-, Arten- und Gewässerschutz aufweisen, auf die sich ein großer Flächenanteil intensiver Viehhaltung mit hohen Besatzdichten eher nachteilig auswirkt. Insgesamt liegen die Kalorienerträge der grünlandbasierten Fleischrindermast deutlich unter den Erträgen der grünlandbasierten Milchviehhaltung, die den Kalorienertrag des flächeneffizientesten Rindermastsystems im Durchschnitt um den Faktor 3,4 übertrifft.

Tabelle 165: Flächenbedarf und Fleischerträge grünlandbasierter Rindermast

Haltungssystem	kg SG/ ha	m²/kg SG [1)]	kcal/kg	kcal/ha [1)]	m²/1.000 kcal [1)]
Mutterkuh, Einsteller, KFR	[2)] 300	33,3	1.570	471.000	21,2
Mutterkuh, Jungrinder, KFR	[2)] 400	25,0	1.570	628.000	15,9
Ammenkuh, Einsteller, KFR	[2)] 550	18,2	1.570	863.500	11,6
Ammenkuh, Jungrinder, KFR	[2)] 710	14,1	1.570	1.114.700	9,0
Mutterkuh, ohne KF	[3)] 424	23,6	1.570	665.680	15,0
Remontenmast, ohne KF	[3)] 956	10,5	1.570	1.500.920	6,7
Ø Grünlandbasierte Rindermast	**557**	**18,0**	**1.570**	**873.967**	**11,4**

SG=Schlachtgewicht, KF=Kraftfutter, KFR=Kraftfutterreduziert
Quellen: (1) Eigene Berechnung; (2) Häusler, 2016; (3) Meili, 2018

Mit einem durchschnittlichen Kalorienertrag von 5,1 Mio. kcal pro Hektar (vgl. Tabelle 166) erreicht die ökologische Milchviehhaltung auf Grünland eine ähnliche Flächeneffizienz wie der Gemüseanbau auf Ackerland[71].

Tabelle 166: Kalorienertrag der kraftfutterreduzierten Milchviehhaltung insgesamt (kcal/ha) und ihr Flächenbedarf pro 1.000 kcal (m²)

Haltungsform, Wirtschaftsweise	Milch, kcal/ha	Fleisch, kcal/ha	Milch & Fleisch, kcal/ha	Flächenbedarf pro 1.000 kcal
Weidehaltung, ökologisch (n. Eilers, 2013)	2.981.762	137.751	3.119.513	3,2
Stallhaltung, konventionell (n. Sutter et al., 2013)	7.277.154	227.041	7.504.194	1,3
Weidehaltung, konventionell (n. Sutter et al., 2013)	4.984.144	230.313	5.214.457	1,9
Weidehaltung, ökologisch (n. Leisen & Mersch, 2013)	4.533.220	334.711	4.867.931	2,1
Weidehaltung, ökologisch (n. Verhoeven et al, 2018)	7.026.960	317.094	7.344.054	1,4
Grünlandbasierte Haltung, konventionell (n. Gräfe, 2010)	6.286.176	267.441	6.553.617	1,5
Ø konventionell	6.182.491	241.598	6.424.090	1,6
Ø ökologisch	4.847.314	263.185	5.110.499	2,0

Weidehaltung = Vollweide oder Teilweide
Quelle: Eigene Berechnung

[71] 24 von 38 der zuvor dargestellten Gemüse- und Salatpflanzen liefern im ökologischen Anbau geringere Kalorienerträge als die ökologische Milchviehhaltung.Bei gleichen Flächennanteilen aller Pflanzen liegt der Kalorienertrag des Gemüse- und Salatanbaus um ca. 9 Prozent über dem der ökologischen Milchviehhaltung. Heute haben allerdings Gemüsearten mit geringen Kalorienertrag hohe Flächenanteile, wie z. B. Spargel mit ca. 20 Prozent.

Da sie dabei nicht in Nutzungskonkurrenz zu ackerbaulich produzierten Lebensmitteln steht, kann sie einen wesentlichen Beitrag zur Nahrungsversorgung leisten. Rein rechnerisch lassen sich mit einer Fläche von einer Million Hektar und einem Ertrag von 3,1 bis 5,1 Mio. kcal/ha rund 3,8 bis 6,2 Millionen Menschen ernähren. In Deutschland sind rund 4,713 Mio. Hektar Grünland vorhanden (Stand 2018). Davon werden rund 2,657 Mio. Hektar als Weiden (einschließlich Mähweiden und Almen) genutzt. Auf 1,863 Mio. Hektar erfolgt eine Schnittnutzung. Bei 0,177 Mio. Hektar handelt es sich um ertragsarmes Dauergrünland. Demzufolge könnte von den heute genutzten Weiden rechnerisch der Kalorienbedarf von 10,0 bis 16,6 Millionen Menschen gedeckt werden.

10.5.2.3.3 Milchprodukte

10.5.2.3.3.1 Verbrauch

Der Verbrauch von Milchprodukten liegt in Deutschland bei rund 123 kg pro Person und Jahr (Stand: 2011-2015). Davon entfallen rund 51 kg auf Vollmilch und teilentrahmte Milch. Der Verbrauch anderer Frischmilchprodukte (inkl. Milchmischerzeugnisse) beträgt etwa 42,5 kg. Hinzu kommt ein Verbrauch von 24 kg Käse und 6 kg Butter (Milchindustrie-Verband e.V., 2017). Der Gesamtverbrauch pro Person ist in Tabelle 167 dargestellt.

Tabelle 167: Verbrauch von Milchprodukten pro Person (kg/Ea)

Milchprodukte	Verbrauch 2011 – 2015 in kg/Ea
Vollmilch	24,7
Teilentrahmte Milch	25,9
Entrahmte Milch	0,7
Buttermilcherzeugnisse	1,3
Sauermilch- Milchmischerzeugnisse	17,4
Naturjoghurt	4,9
Joghurt mit Zusätzen (z. B. Obst)	12,5
Sahneerzeugnisse insgesamt	5,7
Hartkäse	2,2
Schnittkäse u. halbfester Schnittkäse	6,8
Weichkäse	2,1
Sauermilch-, Koch- und Molkenkäse	0,5
Frischkäse und Speisequark	7,0
Pasta Filata*	3,9
Schmelzkäse	1,5
Butter	5,9
Verbrauch Milchprodukte insgesamt	**123,0**
davon Frischmilchprodukte insgesamt	**75%**
davon Käse insgesamt	**19%**
Butter	**5%**

* Bekannte Sorten sind z. B. Mozzarella und Provolone
Quelle: Milchindustrie-Verband e. V., 2017

10.5.2.3.3.2 Milcheinsatz bei der Herstellung von Milchprodukten

Die für die Herstellung benötigte Milchmenge variiert, je nach Produkt, erheblich. Die Produktion von Frischmilchprodukten ist mit einem relativ geringen Milcheinsatz verbunden, der meist kaum mehr als 1,0 kg Vollmilch pro Kilogramm Produkt beträgt. Lediglich Sahne ist mit einem deutlich höheren Bedarf von rund 7 kg Vollmilch pro Kilogramm verbunden. Mit Blick auf die

Flächeninanspruchnahme durch Milchprodukte müssen jedoch anfallende Nebenprodukte berücksichtigt werden, die den tatsächlichen Rohstoffverbrauch deutlich reduzieren. Neben Sahneprodukten gilt dies vor allem für Käse und Butter. Der jeweilige Milchbedarf pro Kilogramm ist in Tabelle 169 nach Produkt in der Übersicht dargestellt.

10.5.2.3.3.2.1 Käse und Nebenprodukte der Käseherstellung

Die Käseherstellung erfordert im Durchschnitt des deutschen Käseverbrauchs fast 7 Kilogramm Milch pro Kilogramm Käse. Je nach Herstellungsart wird dem Käse Wasser entzogen (Hartkäse mehr als Frischkäse). Dazu wird nach dem Dicklegen der Milch (durch Zugabe von Lab) der Käsebruch geschnitten. „Je feiner der Käsebruch zerkleinert wird, desto mehr Molke setzt sich ab und umso härter wird der fertige Käse“ (Landesvereinigung Thüringer Milch, 2017). Für 1 Kilogramm Käse benötigt man demnach zwischen 4 und 16 Kilogramm pasteurisierte Milch oder Rohmilch: Mit rund 3 kg Magermilch pro Kilogramm weist magerer Speisequark, welcher zu den Frischkäsen gezählt wird, den geringsten Milchbedarf auf, für Frischkäse aus Vollmilch werden 4 bis 6 kg Milch pro Kilogramm benötigt. Für Hartkäse wie Emmentaler und andere Bergkäse werden in der Regel zwischen 10 und 13 kg Milch benötigt. (Landesvereinigung Thüringer Milch, 2017; Karwendel-Werke, 2019) Rund 16 kg Milch benötigt man für 1 Kilogramm des italienischen Hartkäses Parmesan (Wörther, 2013)Als Nebenprodukt der Käseproduktion und der Gewinnung von Kasein entsteht Molke.[72] „Früher galt Molke eher als unerwünschtes Nebenprodukt der Käseproduktion und wurde hauptsächlich in der Tierernährung eingesetzt“ (Milchindustrie-Verband e.V., 2019). Als Futtermittel kommt Molke oder Molkenpulver (getrocknete Molke) vor allem in der Schweinemast zum Einsatz. Früher wurde Molke zudem im Bau als Bindemittel für Lehm und Mörtel genutzt, durch das Lehmputz an Wänden wasserdicht und regenfest wurde (Pollmer, 2009). Die Flächeneffizienz der Käseproduktion hängt nicht zuletzt von der Nutzung der Molke ab, die vor allem bei handwerklicher/traditioneller Käseherstellung anfällt.

In der Milchindustrie kommen heute verschiedene Filtrationsverfahren[73] zum Einsatz mit denen der Milch das Wasser entzogen wird. „Dadurch bleiben die Feststoffe als dickflüssige Masse zurück. Diese wird nun mit technischen Kunstgriffen direkt in das gewünschte Produkt wie Quark, Frischkäse oder Weichkäse umgewandelt. Dadurch fällt nur noch bei der Herstellung von Hartkäse Molke an“ (Pollmer, 2009). Wenn Molke anfällt, wird diese großenteils zu

[72] „Für die Herstellung von Käse wird die Milch zur Dicklegung mit Milchsäurebakterien oder Labenzym versetzt. Beides führt dazu, dass das Kasein in der Milch gerinnt und sich die Molke von der Käsemasse absetzt“ (Milchindustrie-Verband e.V., 2019). Die Molke enthält v. a. wasserlösliche Molkenproteine (bis 0,6 - 1%), Milchzucker (4 – 5%), sowie geringe Mengen verschiedener Vitamine und Mineralstoffe (wie Kalium, Calcium und Phosphor). (Kommer, et al., 2013)

[73] „In der Milchwirtschaft werden vier verschiedene Membranfiltrationsverfahren eingesetzt: Mikrofiltration (MF), Ultrafiltration (UF), Nanofiltration (NF) und Umkehrosmose (Reversosmose, RO)“ (Tetra Pak International S.A., 2019).

Molkenpulver verarbeitet und bei der Herstellung verschiedener Lebensmittel verwendet (Pollmer, 2009), beispielsweise als Zutat in Gesundheitsdrinks, Limonaden, Erfrischungsgetränken, Backwaren, Speiseeis, Desserts und Süßwaren. Insbesondere Süßwaren mit Schokolade enthalten häufig Süßmolkenpulver, eiweißangereichertes Molkenpulver oder andere Molkenerzeugnisse. Heute spielen zahlreiche Molkenprodukte und Molkenderivate eine große Rolle im Handel und der Lebensmittelindustrie. (Milchindustrie-Verband e.V., 2019) Molke enthält ungefähr 26 kcal/100g (Sun Sirius GmbH, 2018). Der Trockenmassegehalt beträgt rund 6 Prozent (Milchindustrie-Verband e.V., 2019). Für 1 kg Molkenpulver mit einem Wasser-Gehalt von 4 Prozent benötigt man folglich rund 16 kg Molke. Die Herstellung von Molkenpulver betrug im Zeitraum 2011 bis 2015 ca. 376.280 Tonnen pro Jahr, was einem Molkewert von rund 6,02 Mio. Tonnen entspricht. Bei einem Verbrauch von rund 1,3 kg Molkenpulver pro Person und Jahr, was rund 20 kg Molke (Molkewert) entspricht, ergab dies einen Selbstversorgungsgrad von 345 Prozent. Der Netto-Export betrug rund 264.920 Tonnen. Somit wurden rund 74 Prozent der Erzeugung oder rund 3,3 kg pro Einwohner und Jahr nicht für die Deckung des inländischen Bedarfs benötigt. Der Molkewert des exportierten Molkenpulvers entspricht rund 53 kg Molke pro Einwohner und Jahr. Als Futtermittel wurden pro Jahr rund 3,56 Mio. Tonnen Molke verfüttert (BMEL, 2018 S. 91), was rund 44 kg pro Einwohner entspricht. „Die hochwertige Proteinzusammensetzung ist für die Aufzucht von Ferkeln und Kälbern wichtig. Anders sieht es für die Schweinemast aus, in der Molke problemlos durch Getreide ersetzt werden kann“ (Kopf-Bolanz, et al., 2015). Kopf-Bolanz et al. weisen deshalb darauf hin, dass die Ökobilanz einer Verarbeitung von Molke zu Pulver für die menschliche Ernährung im Vergleich zu einer Verfütterung der Molke besser ausfällt.[74] Dies ist angesichts des hohen Energiebedarfs der Verarbeitung von Molke zu Pulver bemerkenswert. Bei der Verfütterung geht der größte Teil der in der Molke enthaltenen Kalorien für die menschliche Ernährung verloren. Durch die vielseitige Verwendung der Molke als Lebensmittel werden dagegen die Kalorienverluste infolge der Käseherstellung minimiert. Der häufig hervorgehobene erhöhte gesundheitliche Nutzen von Molke und Molkeprodukten ist jedoch nicht eindeutig (Pollmer, 2009; Sohmer, 2009; Kommer & Rau, 2013). Menschen, die bestimmte Bestandteile der Milch nicht vertragen (z. B. Milchzucker), wird zudem zur Vorsicht geraten. In den Molkenerzeugnissen können sich noch Reste oder Spuren der Stoffe befinden, die bei diesen Menschen „eine allergische Reaktion oder eine Unverträglichkeit auslösen“ (Kommer, et al., 2013).

[74] Verglichen wurden die Umweltbelastungspunkte von zwei Szenarien: „Das erste Szenario geht aus von einer Verarbeitung der bisher in der Schweinemast verwendeten Molke je zu 50 Prozent zu Molkenpulver (9 Prozent Protein) und zu Molkenproteinkonzentratpulver mit 35 Prozent Protein (WPC 35), und resultiert in einer ökologisch günstigeren Verwertungssituation. Das zweite Szenario mit einem höheren Grad der Weiterverarbeitung zu WPC 65 schneidet durch den höheren Energieaufwand und durch die grossen in der angewandten Methode dann zu entsorgenden Mengen an Molkenserum ökologisch schlechter ab als die bisherige Verwendung in der Schweinemast. Dies zeigt auf, dass die Art der Weiterverarbeitung eine entscheidende Rolle spielt.“ (Kopf-Bolanz, et al., 2015)

Neben industriellen Molkenerzeugnissen kann aus Süßmolke auch sogenannter Molkenkäse hergestellt werden, wie z. B. Ricotta (Italien), Breuil (Frankreich) und Ziger (Schweiz). Molkenkäse ist besonders fettarm, der Kaloriengehalt ist jedoch sehr unterschiedlich. Italienischer Ricotta enthält beispielsweise meist zwischen 134 und 192 kcal/100g, Mager-Ziger rund 80 bis 100 kcal/100g, Ziger mindestens 150 kcal/100g und norwegischer Gudbrandsdalen 448 kcal/100g (Fddb, 2018; Neher, 2019). Für die Herstellung von 1 Kilogramm Ziger benötigt man rund 40 Liter Molke. Ziger, der aus der Schweiz stammt, ist praktisch identisch mit dem französischen Sérac (Neher, 2019a). Wenn bei einem Verbrauch von rund 11 kg Hart-, Schnitt- und Weichkäse pro Person ca. 72 kg Molke anfallen, dann kann man daraus ca. 1,8 Kilogramm Ziger/Sérac herstellen. Dabei verbleibt jedoch ein Großteil der in der Molke enthaltenen Kalorien mit der Lactose in der zurückbleibenden Restflüssigkeit (vgl. Tabelle 168). Die Restflüssigkeit, das sogenannte „Schotto-Wasser“ kann zur Herstellung von Sig (Älplerschokolade) verwendet werden[75]. Das Verhältnis von Käse zu Molkenkäse beträgt etwa 6,8 zu 1, der „Käseertrag“ in Kilogramm pro Hektar steigt damit um knapp 15 Prozent. Der Anteil des Molkenkäses am gesamten Kalorienaufkommen liegt jedoch nur bei rund 5 Prozent. Rund 28 Prozent der im Milchertrag enthaltenen Kalorien (v. a. Lactose) verbleiben im „Schotto-Wasser“. Seine Nutzung ist daher ausschlaggebend für die Flächeneffizienz dieser Molkenverwendung.

Tabelle 168: Mögliche Hektarerträge einer kombinierten Produktion von Käse und Süßmolkenkäse am Beispiel des Molkenkäses Ziger/Sérac (Ertragsniveau ökologischer Landwirtschaft)

	Schnittkäse	Ziger (Süßmolkenkäse)	Restflüssigkeit „Schotto-Wasser“ *	SUMME
kg/ha (ca.)	1.049	155	6.032	7.235
kcal/ha (ca.)	3.238.882	247.451	1.360.981	4.847.314
kcal/kg (ca.)	3.089	1.600	226	670
Anteil kcal	67%	5%	28%	100%
m²/kg	6,37	3,30	0,47	1,38

* enthält vor allem Lactose.
Quelle: Eigene Berechnung

10.5.2.3.3.2.2 Butter und Nebenprodukte der Butterherstellung

Den höchsten Milchbedarf bei der Herstellung von Milchprodukten weist Butter mit durchschnittlich 20 bis 21 kg Vollmilch pro Kilogramm auf. Allerdings fallen auch bei der Butterherstellung 19 bis 20 kg an Koppelprodukten (Magermilch und Buttermilch) an, die den Flächenbedarf reduzieren (Milchindustrie-Verband e. V., 2018 S. 40-42). Frische Milch (Rohmilch) enthält rund 4,2 (3,5 bis 5,0) Prozent Fett. Bei der Butterherstellung wird die Milch zunächst mittels

[75] Die Restflüssigkeit der Molkenkäseproduktion wird für die Herstellung von Sig „für fünf bis sechs Stunden eingekocht. Nach Zugabe von Butter, Rahm und Zucker wird nochmals unter ständigem Rühren für weitere 1,5 Stunden weitergekocht und es entsteht die finale, marzipanähnliche, formbare Masse – der SIG“ (Alpen Sepp Handels e.U., 2019).

Zentrifuge in ca. 2,5 kg Rahm und ca. 18 kg Magermilch geteilt. Der Rahm hat anschließend einen Fettgehalt von 30 bis 40 Prozent. Aus ihm lassen sich im nächsten Schritt mittels einer Butterungsmaschine ca. 1 kg Butter und ca. 1,5 kg Buttermilch herstellen. Rahm, welcher für die Butterherstellung genutzt werden kann, fällt zudem bei der Herstellung von teilentrahmter Milch an. Werden alle Koppelprodukte vollständig genutzt, liegt der Vollmilchverbrauch pro kg Butter somit rechnerisch nur bei 1,0 Kilogramm (Milchindustrie-Verband e. V., 2018 S. 42). Ein Teil des Magermilchaufkommens wird zu anderen Produkten wie Speisequark und Magermilchkäse verarbeitet. Magermilchkäsesorten sind z. B. Innviertler Abgereifter aus dem Innviertel in Oberösterreich oder Harzer Käse. Bei Magermilch und Buttermilch handelt es sich zwar um wertvolle Koppelprodukte, doch ist ihr Aufkommen wesentlich größer als die Nachfrage. Um die Inhaltsstoffe der anfallenden Mager- und Buttermilch nicht zu verlieren und haltbar zu machen, werden große Anteile des Aufkommens zu Magermilch- und Buttermilchpulver verarbeitet. Diese werden als Zutaten für die Herstellung diverser Fertigprodukte verwendet. Die Herstellung von Magermilch- und Buttermilchpulver betrug im Zeitraum 2011 bis 2015 rund 357.140 Tonnen pro Jahr, was rund 4,4 kg Pulver und einem Magermilchwert von mehr als 48 kg Magermilch pro Einwohner entspricht. Der Verbrauch lag in Deutschland im Zeitraum 2011 bis 2015 bei weniger als 1,3 kg Magermilchpulver pro Person und Jahr, was einem Magermilchwert von rund 14 kg entspricht.[76] Der durchschnittliche Selbstversorgungsgrad betrug damit rund 346 Prozent. Der Netto-Export lag bei rund 264.920 Tonnen pro Jahr, was rund 3,3 kg pro Einwohner und rund 73 Prozent der inländischen Erzeugung gleichkommt (BMEL, 2018 S. 197). Der Netto-Export von Mager- und Buttermilchpulver entspricht folglich einem Magermilchwert von 2,68 Mio. Tonnen pro Jahr oder 33,1 kg Magermilch pro Einwohner und Jahr (BMEL, 2018 S. 197). Verfüttert wurden 14 kg Magermilch pro Einwohner und Jahr (insgesamt 1,16 Mio. Tonnen pro Jahr) (BMEL, 2018 S. 91).

Ein Nachteil von Milchpulver und Magermilchpulver ist der hohe Energieaufwand bei der Herstellung. „Auch der Verlust von Vitaminen bei der Trocknung kann als Nachteil gewertet werden“ (Jung, et al., 2019). Dieser kann sich durch den Einsatz erneuerbarer Energien erheblich auf die Flächeninanspruchnahme der Pulverherstellung auswirken. In Tabelle 169 ist der durchschnittliche Vollmilcheinsatz dargestellt, der bei der Milchverarbeitung pro kg Endprodukt erforderlich ist. Bei einzelnen Produkten, wie etwa härteren Hartkäsesorten, kann der Bedarf allerdings deutlich vom Durchschnitt abweichen.

[76] Magermilch hat einen Trockensubstangehalt von ca. 8,5 Prozent (BMEL, 2018 S. 91) bis 9,5 Prozent (Massholder, 2015), der TS-Gehalt von Magermilchpulver beträgt rund 96 Prozent (Jung, et al., 2019). Aus 100 kg Magermilch können also 8,8 bis 9,9 kg Magermilchpulver hergestellt werden. Ähnlich verhält es sich mit Buttermilch und Buttermilchpulver.

Die Berechnung des Milchbedarfs der Käseproduktion erfolgte anhand der jeweiligen durchschnittlichen Kalorien- und Trockenmassegehalte der Vollmilch, der Molke und typischen Vertretern der einzelnen Käsesorten. Die den Berechnungen zugrundeliegenden Kalorien- und Fettgehalte der verschiedenen Käsesortengruppen sind in Tabelle 456 und Tabelle 455 (s. Anhang II) dargestellt.

Tabelle 169: Milchbedarf der Herstellung von Milchprodukten pro Kilogramm und pro Person (kg)

Milchprodukt	Vollmilchbedarf (kg/kg)	Quellen
Vollmilch	1,00	(1)
Teilentrahmte Milch	1,00	(1)
Entrahmte Milch	1,00	(1)
Buttermilcherzeugnisse	1,00	(1)
Milchmischerzeugnisse	0,76	(1)
Naturjoghurt	1,00	(1)
Joghurt mit 15% Zusätzen (z. B. Obst)	0,85	(1)
Sahneerzeugnisse insgesamt	6,70	(1)
Hartkäse	10,80	(1, 2)
Schnittkäse	6,90	(2)
Weichkäse	6,20	(2)
Frischkäse / Quark	3,00 - 6,00	(2, 3)
Pasta Filata	6,10	(2)
Schmelzkäse	6,90	(2)
Butter	20,50	(1, 2)

Quellen: (1) BMEL, BLE zit. n. Milchindustrie-Verband e. V., 2018, S. 40 – 42; (2) Eigene Berechnung; (3) Karwendel-Werke, 2019

Auf Basis der jeweiligen Vollmilchbedarfe der einzelnen Produkte wurde anschließend der Gesamtbedarf an Vollmilch geschätzt, der erforderlich ist, um den Verbrauch an Milchprodukten zu decken. Die Schätzung ist in Tabelle 170 dargestellt. Insgesamt beträgt der geschätzte Bedarf rund 389 kg Vollmilch pro Person, was etwa dem Dreifachen des Milchproduktverbrauchs (Faktor 3,1) und 99 Prozent der verfügbaren Vollmilchmenge entspricht:

Tabelle 170: Schätzung des Vollmilcheinsatzes und der daraus hergestellten Produkte sowie ihrer potenziellen Nebenprodukte pro Person auf Basis des Milchproduktverbrauchs in Deutschland 2011 – 2015 (kg)

Milchprodukt	Rohstoffeinsatz		Produkte		
	Milch	Zusätze (z. B. Obst)	Hauptprodukte	Nebenprodukte I	Nebenprodukte II
Vollmilch	24,7		24,7		
Teilentrahmte Milch	26,5		25,9	0,6	
Entrahmte Milch	0,7		0,7		
Buttermilch	1,3		1,3		
Milchmischerzeugnisse	13,2	4,2	17,4		
Naturjoghurt	4,9		4,9		
Joghurt mit 15% Zusätzen (z. B. Obst)	10,7	1,9	12,5		
Sahneerzeugnisse	38,3		5,7	32,6	
Hartkäse	23,3		2,2		21,2
Schnittkäse	47,1		6,8		40,2
Weichkäse	12,9		2,1		10,8
Sauermilch-, Koch- und Molkenkäse	1,3		0,5		0,8
Frischkäse und Quark	42,0		7,0		35,0
Pasta Filata	24,0		3,9		20,1
Schmelzkäse	10,4		1,5		8,9
Butter	107,4		5,2	102,1	
SUMME	**388,7**	6,1	122,4	135,4	136,9

Nebenprodukte I: Rahm, Magermilch, Buttermilch,
Nebenprodukte II: Molke, Sig, etc.
Quelle: Eigene Berechnung

Nach Angaben der BLE standen im Zeitraum 2011 bis 2015 jährlich rund 393 kg Milch (Vollmilchwert) pro Einwohner zum Verbrauch zur Verfügung (insgesamt 31,7 Mio. Tonnen pro Jahr) (BLE, 2018c).

Dem Aufkommen von rund 135 kg Magermilch und Buttermilch steht ein Verbrauch von ca. 2,0 kg Buttermilch und entrahmter Milch gegenüber. Nimmt man an, dass der Anteil von Speisequark am Frischkäseverbrauch rund 50 Prozent beträgt, werden dafür ca. 10,5 kg/Ea Magermilch benötigt[77]. Unterstellt man des Weiteren einen Verbrauch von Magermilchkäse/Sauermilchkäse von ca. 0,5 bis 1,0 kg/Ea, entspricht dies einem Magermilchverbrauch von 5,5 bis 12,5 kg Magermilch (Neher, 2019b). Folglich ergibt sich ein Magermilchüberschuss von ca. 114 kg pro Person und Jahr. Bei einer vollständigen Verarbeitung ergibt sich ein potenzielles

[77] Der Verbrauch von Speisequark wird nicht separat erfasst, sondern ist im Wert für Frischkäse enthalten, der aktuell ca. 7 kg/Ea beträgt

Aufkommen von rund 10 kg Magermilch- und Buttermilchpulver sowie rund 8 kg Molkenpulver. Der inländische Gesamtverbrauch aller Milcherzeugnisse in Pulverform lag im Zeitraum 2011 bis so 2015 bei knapp 5,1 kg pro Einwohner und Jahr. Der Netto-Export betrug rund 6,5 kg/Ea. Die potenzielle Pulvererzeugung übersteigt Verbrauch und Export somit um 6,4 kg/Ea. Der Selbstversorgungsgrad liegt nach dieser Schätzung bei 352 Prozent. Die Schätzung kommt damit dem durch das BMEL angegebenen Selbstversorgungsgrad von 346 Prozent (BMEL, 2018 S. 197) sehr nah (Abweichung: 1,7 Prozent), die genutzten Konversionsfaktoren und die über sie geschätzten Aufkommen an Nebenprodukten erscheinen somit plausibel.

Angesichts der hohen Überschüsse bei Magermilch und Molkeprodukten scheint sich eine Nutzung als Futtermittel anzubieten. Die Verfütterung als Alternative zur Verwendung als Lebensmittel ist jedoch vergleichsweise ineffizient: Für die Erzeugung von 1 kcal in Form von Fleisch (Schlachtgewicht) benötigt man in der Schweinemast etwa 6 bis 7 kcal in Form von Futtermitteln. Bei der Verfütterung von Futtermitteln gehen in der Schweinemast somit etwa 85 Prozent der im Futtermittel enthaltenen Kalorien verloren (vgl. Abschnitt 10.5.2.4 Schweine). Geht man von Kaloriengehalten von 3.630 kcal pro kg Magermilchpulver (Institut für Ernährungsinformation, 2019a) und 3.500 kcal pro kg Molkenpulver (Institut für Ernährungsinformation, 2019b) aus, so lassen sich je Kilogramm Magermilchpulver theoretisch bis zu 0,39 kg Schweinefleisch (mit 1.450 kcal/kg) und je Kilogramm Molkenpulver bis zu 0,37 kg Schweinefleisch erzeugen.

10.5.2.3.3.3 Flächenbedarf von Frischmilchprodukten und Butter

Der Flächenbedarf von wenig verarbeiteten Frischmilchprodukten (ohne Sahne) ist vergleichsweise gering und entspricht in der Regel ungefähr dem Futterflächenbedarf der Erzeugung von einem Kilogramm Milch. Mit einem Umstieg auf erneuerbare Energien kommt der Flächenbedarf hinzu, der durch den Energiebedarf der Milcherzeugung entsteht, z. B. bei der Futterproduktion, im Stall und in der Molkerei. Grünlandbasierte Fütterung und Weidehaltung können diesen Energiebedarf reduzieren.

Bei weiter verarbeiteten Milchprodukten, wie Sahne, Käse und Butter hängt der Flächenbedarf darüber hinaus vor allem von der Verwendung der Nebenprodukte (v. a. Magermilch, Buttermilch und Molke) und der (Weiter-)Verarbeitung der Milcherzeugnisse ab.

10.5.2.3.3.3.1 Futterflächenbedarf von Milch und Milcherzeugnissen

In der grünlandbasierten ökologischen Milchviehhaltung liegt der mittlere Futterflächenbedarf bei einem Milchertrag von ca. 7.235 (4.400 – 11.100) kg pro Hektar ohne Fleischproduktion

bei 1,38 m²/kg[78]. In der konventionellen Landwirtschaft mit einer Milchleistung von 14.000 (10.000 – 18.000) kg/ha liegt der entsprechende Wert bei 0,71 m²/kg.

Tabelle 171: Futterflächenbedarf von Frischmilchprodukten (Milch, Joghurt usw.) ohne das Koppelprodukt Rindfleisch

Wirtschaftsweise	kg/ha	kcal/ha	m²/1.000 kcal	m²/kg
Ökologisch	7.235	4.847.314	2,1	**1,38**
Konventionell	14.000	9.380.000	1,1	**0,71**

Quelle: Eigene Berechnung

Sahne

Bei der Weiterverarbeitung von Vollmilch zu Sahne mit 38 (30 – 40) Prozent Fettgehalt fallen pro Kilogramm Sahne über 7 kg Magermilch an. 57 Prozent der in der Milch enthaltenen Kalorien werden dabei auf die Sahne konzentriert. Ihr wird daher ein dementsprechender Anteil an der Flächeninanspruchnahme zugewiesen. Daraus ergibt sich eine Flächeninanspruchnahme von 6,9 m²/kg bei ökologischer Viehhaltung und 3,6 m²/kg bei konventioneller Produktion.

Tabelle 172: Futterflächenbedarf der Sahne- und Magermilchproduktion ohne Rindfleisch

Produkt	kg/ha	kcal/ha	Anteil an kcal	m²/1.000 kcal	m²/kg
ökologisch					
Sahne	833	2.783.718	57%	2,1	6,9
Magermilch	6.401	2.063.596	43%	2,1	0,7
konventionell					
Sahne	1.613	5.386.752	57%	1,1	3,6
Magermilch	12.387	3.993.248	43%	1,1	0,3

Quelle: Eigene Berechnung

Da in Deutschland keine großen Mengen an Magermilch direkt verbraucht werden, wird Magermilch überwiegend zu anderen Produkten verarbeitet, wie z. B. zu Speisequark oder Magermilchkäse. Darüber hinaus werden größere Mengen Magermilch zu Pulver verarbeitet und anschließend als Lebensmittel oder als Futtermittel verwendet. Bei einer Verfütterung der Magermilch (direkt oder in Form von Pulver) zur Schweinefleischproduktion gehen für die menschliche Ernährung rund 85 Prozent der in der Magermilch enthaltenen Kalorien verloren. Aus 6.401 kg Magermilch lassen sich rechnerisch ca. 203 kg Schweinefleisch erzeugen. Die Futterflächeninanspruchnahme pro Kilogramm Sahne steigt in diesem Fall um 57 Prozent auf 10,8 m²/kg bei ökologischer Produktion und 5,6 m²/kg bei konventioneller Produktion. Auf die Schweinefleischproduktion entfallen 4,7 m² (ökologisch) bzw. 2,4 m² (konventionell) pro kg

[78] Der Milchertrag ergibt sich aus der Milchleistung von ca. 8.600 (5.200 – 12.000) kg pro Hektar abzüglich der für die Kälberfütterung aufgewendeten Vollmilchmenge.

Fleisch. Die Flächeneffizienz sinkt infolge des Kalorienverlustes bei der Magermilchverfütterung um 39 Prozent. Der Futterflächenbedarf für die Erzeugung von 1.000 Nahrungskalorien steigt ebenfalls um 57 Prozent auf 3,3 m² (ökologisch) bzw. 1,7 m² (konventionell). Im Vergleich zur Verfütterung von Futtermischungen aus Getreide, Eiweiß- und Ölfrüchten weist die Magermilchverfütterung dennoch eine beachtenswerte Futterflächeneffizienz auf: Mit ca. 4,7 m² pro kg Fleisch in der ökologischen Landwirtschaft und 2,4 m² in der konventionellen Landwirtschaft ist der Futterflächenbedarf hier deutlich geringer. Wird die Magermilch vor der Verfütterung zu Pulver verarbeitet, muss allerdings der hohe Energiebedarf der Trocknung berücksichtigt werden.

Tabelle 173: Futterflächenbedarf der Sahneproduktion bei Verfütterung der Magermilch ohne Rindfleischproduktion

Produkt	kg/ha	kcal/ha	Kalorienanteil	m²/1.000 kcal	m²/kg
Ökologisch					
Sahne	833	2.783.718	90%	3,25	10,8
Schweinefleisch	203	294.799	10%	3,25	4,7
Konventionell					
Sahne	1.613	5.386.752	90%	1,68	5,6
Schweinefleisch	393	570.464	10%	1,68	2,4

Quelle: Eigene Berechnung

Hinweis zur Berechnung (Methodik):

Zwei Alternative Berechnungsmöglichkeiten:

1. Für das Nahrungsautonomiepotenzial ist der Kalorienertrag die wichtigste Kenngröße. Die Flächeninanspruchnahme eines Produktes wird daher immer je Kilogramm und je 1.000 kcal berechnet. Werden auf einem Hektar mehrere Lebensmittel gleichzeitig produziert, z. B. wie im Falle von Milchprodukten und ihren Nebenprodukten, so wird ihr Flächenanteil je Kilogramm auf ihren Anteil am Kalorienertrag pro Hektar bezogen. Konzentriert sich ein überproportionaler Anteil des Kalorienertrags auf ein bestimmtes Produkt, wird ihm ein entsprechender Anteil an der Flächeninanspruchnahme zugeschrieben.
2. Anstatt den Anteil des Hauptproduktes, z. B. Milchrahm/Sahne, an der Futterfläche als proportional zum Anteil am Kaloriengehalt der Endprodukte zu definieren, wäre es ebenso möglich, den Flächenanteil des Hauptproduktes als unveränderlich zu definieren und auf dem Stand zum Zeitpunkt der Fertigstellung des Hauptproduktes festzuschreiben - und damit unabhängig von der Weiterverwendung der zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Nebenprodukte. Der Flächenbedarf der Sahneproduktion in der ökologischen Landwirtschaft bliebe damit unverändert (bei 6,9 m²/kg), auch wenn ihr Nebenprodukt Magermilch verfüttert würde. Somit entfiele der ursprüngliche Flächenanteil der verfütterten Nebenprodukte (Magermilch), der in diesem Beispiel 43 Prozent beträgt, vollständig auf das durch die Verfütterung von Nebenprodukten erzeugte Nebenprodukt, z. B. Schweinfleisch, dessen Flächeninanspruchnahme sich dadurch in diesem Beispiel auf 20,9 m²/kg beliefe.

Da jedoch nur eine geringe Nachfrage nach Magermilch besteht und es ohne die Erzeugung des Hauptproduktes Sahne/Rahm gar nicht zur Notwendigkeit käme, das Nebenprodukt Magermilch nützlicher zu verwenden als es schlicht zu entsorgen, erscheint es angebracht, den Verlust an Flächeneffizienz auch dem Hauptprodukt bzw. seinem Verbraucher als dem eigentlichen Verursacher der Flächeninanspruchnahme zuzuschreiben. Denn ohne eine Verwendung des Nebenproduktes Magermilch beträgt die Flächeninanspruchnahme der Sahneproduktion in ökologischer Landwirtschaft 12,0 m²/kg, und erst die Nutzung der Nebenprodukte reduziert diesen Wert. Daher wird auch im Folgenden weiterhin so verfahren, dass der Verlust an Flächeneffizienz dem Hauptprodukt proportional zu seinem Anteil an den für den menschlichen Verzehr verfügbaren Kalorien zugeschrieben wird.

Butter

Um 1 Kilogramm Butter herzustellen werden ca. 2,4 kg Sahne benötigt. In der ökologischen Landwirtschaft mit einem Ertrag von ca. 7.235 kg Milch pro Hektar kann man daher mit ca. 354 kg Butter pro Hektar rechnen. Bei der Verarbeitung zu Butter werden rund 54 Prozent des Kaloriengehalts der Milch auf das Hauptprodukt konzentriert, 42 Prozent entfallen auf die Magermilch und 4 Prozent auf die Buttermilch (Variante 1) (vgl. Tabelle 174). Durch eine Trocknung dieser Nebenprodukte erhält man pro Hektar ca. 619 kg Mager- und Buttermilchpulver (Variante 2). Berücksichtigt man diese Nebenprodukte der Butterherstellung, nimmt die Erzeugung von einem Kilogramm Butter jeweils rund 15,3 m² in Anspruch. Pro Kilogramm Mager-/Buttermilchpulver werden in diesem Fall rund 7,4 m² in Anspruch genommen. Werden die Nebenprodukte Mager- und Buttermilch als Futtermittel in der Schweinemast eingesetzt, erhält man rechnerisch ca. 219 kg Schweinefleisch neben dem Butterertrag von 354 kg pro Hektar. Infolge der Verfütterung sinkt der für die menschliche Ernährung verfügbare Kalorienertrag eines Hektars um 39 Prozent. Für die Bereitstellung von 1.000 kcal als Lebensmittel werden folglich 65 Prozent mehr Fläche benötigt. Somit werden pro Kilogramm Butter rund 25,2 m² Futterfläche in Anspruch genommen.

Tabelle 174: Futterflächenbedarf der Butterherstellung inklusive Nebenprodukte ohne Rindfleisch - ökologisch

Var.	Produkt	kg/ha	kcal/ha	Kalorienanteil	m²/1.000 kcal	m²/kg	Kalorienverlust*
1	Butter	354	2.619.739	54%	2,06	15,3	0%
	Buttermilch	479	180.266	4%	2,06	0,8	
	Magermilch	6.401	2.048.431	42%	2,06	0,7	
2	Butter	354	2.619.739	54%	2,06	15,3	0%
	Mager-/Buttermilchpulver	619	2.228.697	46%	2,06	7,4	
3	Butter	354	2.619.739	89%	3,40	25,2	-39%
	Schweinefleisch	220	318.385	11%	3,40	4,9	

* Verlust an Nahrungskalorien im Vergleich zur direkten Nutzung des Vollmilchertrags als Lebensmittel.
Var. = Nutzungsvariante (Produktpakete) Quelle: Eigene Berechnung

Die Futterflächeninanspruchnahme pro Kilogramm Schweinefleisch ist etwas höher (+5 Prozent) als im Falle der Sahneproduktion, weil ein höherer Anteil der Kalorien verfüttert wird. Dennoch liegt die Flächeninanspruchnahme pro kg Fleisch damit nur bei rund zwei Dritteln des Bedarfs, der im ökologischen Landbau bei einer direkten Verfütterung von Getreide, Eiweiß- und Ölfrüchten entsteht. Zudem besteht bei der Verfütterung von Mager- und Buttermilch weiterhin der Vorteil, dass eine Inanspruchnahme von Ackerflächen nicht notwendig ist.

Tabelle 175: Futterflächenbedarf Butterherstellung inklusive Nebenprodukte ohne Rindfleisch - konventionell

Var.	Produkt	kg/ha	kcal/ha	Kalorien-anteil	m²/1.000 kcal	m²/kg	Kalorien-verlust*
1	Butter	685	5.069.436	54%	1,07	7,9	0%
	Buttermilch	928	348.831	4%	1,07	0,4	
	Magermilch	12.387	3.961.734	42%	1,07	0,3	
2	Butter	685	5.069.436	54%	1,07	7,9	0%
	Mager-/Buttermilch-pulver	1.198	4.310.564	46%	1,07	3,8	
3	Butter	685	5.069.436	89%	1,76	13,0	-39%
	Schweinefleisch	425	615.795	11%	1,76	2,6	

* Verlust an Nahrungskalorien im Vergleich zur direkten Nutzung des Vollmilchertrags als Lebensmittel.
Var. = Nutzungsvariante.
Quelle: Eigene Berechnung

Alternativ zur zuvor dargestellten Herstellung kann Butter auch aus Rahm hergestellt werden, der bei der Produktion von teilentrahmter Milch gewonnen wird. Geht man von einem Fettgehalt teilentrahmter Milch von 1,7 (1,5 – 1,8) Prozent aus, können aus dem Milchertrag eines Hektars bei ökologischer Viehhaltung ca. 7.010 kg teilentrahmte Milch und 225 kg Butter gewonnen werden. Die Flächeninanspruchnahmen, die sich dadurch ergeben, betragen im Falle der teilentrahmten Milch 0,8 m²/kg und im Falle des „Nebenproduktes“ Butter 20,4 m²/kg. Da der Verbrauch teilentrahmter Milch in Deutschland jedoch aktuell nur 26 kg/Ea beträgt, können so maximal 0,8 kg Butter pro Einwohner als Nebenprodukt gewonnen werden, was ungefähr 14 Prozent des heutigen Butterverbrauchs entspricht. Der bei der Teilentrahmung von Milch gewonnene Rahm wird daher nicht nur zur Butterherstellung verwendet, sondern auch zur Erhöhung des Fettgehalts aller Milchprodukte, die einen höheren Fettgehalt haben als der Ausgangsrohstoff.

Tabelle 176: Futterflächenbedarf von teilentrahmter Milch und Butter in der ökologischen Landwirtschaft

Produkt	Menge (kg)	Fett-gehalt	kcal/kg	kcal/ha	Kalorien-anteil	m²/1.000 kcal	m²/kg
Teilentrahmte Milch	7.010	1,7%	374	2.618.617	54%	2,06	0,8
Butter	225	82,0%	7.400	2.228.697	46%	2,06	20,4

Quelle: Eigene Berechnung

Unter Berücksichtigung des Rindfleischaufkommens in der Milchviehhaltung steigt der Hektarertrag in der ökologischen Landwirtschaft um rund 168 kg Fleisch. Unterstellt man einen Kaloriengehalt von 157 kcal/100g erhöht sich der Kalorienertrag damit um 263 Mcal/ha. Der Futterflächenbedarf der ökologischen Milchviehhaltung liegt somit bei insgesamt 1,96 m² pro 1.000 kcal, wenn alle Nebenprodukte als Lebensmittel genutzt werden. Werden Mager- und Buttermilch in der Schweinemast verfüttert, steigt der Flächenbedarf um 60 Prozent auf 3,12 m²/1.000 kcal. Auf ein Kilogramm des jeweiligen Endprodukts bezogen, hängt der Flächenbedarf also in hohem Maße von der Nutzung der jeweiligen Nebenprodukte ab.

Tabelle 177: Futterflächenbedarf von Frischmilchprodukten und Butter in der ökologischen Landwirtschaft unter Berücksichtigung des Nebenproduktes Rindfleisch

Var.	Produkt	Ertrag (kg/ha)	kcal Gesamt	Anteil kcal	m²/1.000 kcal	m²/kg	Kalorienverlust*
1	Vollmilch, Joghurt	7.235	4.847.314	95%	1,96	1,3	-0%
	Rindfleisch	168	263.185	5%	1,96	3,1	
2	Sahne	833	2.783.718	54%	1,96	6,5	-0%
	Magermilch	6.401	2.063.596	40%	1,96	0,6	
	Rindfleisch	168	263.185	5%	1,96	3,1	
3	Butter	354	2.619.739	51%	1,96	14,5	-0%
	Buttermilch	479	180.266	4%	1,96	0,7	
	Magermilch	6.401	2.048.431	40%	1,96	0,6	
	Rindfleisch	168	263.185	5%	1,96	3,1	
4	Butter	354	2.619.739	51%	1,96	14,5	-0%
	Mager-/Buttermilchpulver	619	2.228.697	44%	1,96	7,0	
	Rindfleisch	168	263.185	5%	1,96	3,1	
5	Butter	354	2.619.739	82%	3,12	23,1	-37%
	Schweinefleisch	220	318.385	10%	3,12	4,5	
	Rindfleisch	168	263.185	8%	3,12	4,9	

* Verlust an Nahrungskalorien im Vergleich zur direkten Nutzung des Vollmilchertrags als Lebensmittel.
Var. = Nutzungsvariante. Quelle: Eigene Berechnung

Das Mengenverhältnis der Milchprodukte zu ihren Nebenprodukten ist dabei relativ stabil, kann aber je nach Fett- und Trockenmassegehalt der Rohmilch von den hier dargestellten Verhältnissen abweichen. Das Mengenverhältnis der Milchprodukte zum Nebenprodukt Rindfleisch variiert dagegen in Abhängigkeit von Milchleistung pro Kuh und dem Viehbesatz pro Hektar.

10.5.2.3.3.3.2 Flächenbedarf von Käse und Nebenprodukten der Käseherstellung

Die Höhe des Futterflächenbedarfs der Käseherstellung wird in erster Linie bedingt durch den Milchverbrauch je nach Käsesorte, der mit der Härte des Käses zunimmt. Der zweite wesentliche Faktor ist die Verwendung der bei der Käseherstellung anfallenden Molke. Wird diese

verfüttert, reduziert dies den Kaloriengesamtertrag pro Hektar, was zu einem höheren Futterflächenbedarf je Kilogramm Endprodukt führt. Im Falle der Schnittkäseproduktion erhält man in der ökologischen Landwirtschaft ca. 1.049 kg Käse und 6.354 kg Molke pro Hektar. Bei der Herstellung sammeln sich zwei Drittel der Kalorien im Käse, nur ein Drittel verbleibt in der Molke. Somit enthält ein Kilogramm Schnittkäse im Vergleich zu einem Kilogramm Molke fast die zwölffache Kalorienmenge. Auf dieser Basis ergibt sich, wie in Tabelle 178 dargestellt, eine Flächeninanspruchnahme von rund 6,4 m² pro Kilogramm Käse und 0,5 m² pro Kilogramm Molke, wenn diese als Lebensmittel verwendet wird. Der Flächenbedarf pro 1.000 kcal liegt unverändert auf dem Niveau der Vollmilchproduktion.

Tabelle 178: Kennwerte der Schnittkäseproduktion bei Nutzung der Molke als Lebensmittel – ohne Rindfleisch

Kennwert	Schnittkäse (Hauptprodukt)	Molke (Nebenprodukt)
Ertrag in kg/ha	1.049	6.186
Ertrag in kcal/ha	3.238.882	1.608.432
Kaloriengehalt in kcal/kg	3.089	260
Kalorienanteil	67%	33%
Flächenbedarf in m²/kg	6,37	0,54
Flächenbedarf in m²/1.000 kcal	2,06	2,06
Kalorienertrag (Flächeneffizienz)*	100%	

* Kaloriengehalt Vollmilchertrag = 100 Prozent. Quelle: Eigene Berechnung

Wird die Molke als Futtermittel an Mastschweine verfüttert, reduziert sich der Kalorienertrag dadurch um 28 Prozent. Die Flächeninanspruchnahme je Kilogramm Käse steigt somit um 40 Prozent von 6,4 m² auf 8,9 m².

Tabelle 179: Kennwerte der Schnittkäseproduktion bei Nutzung der Molke als Futtermittel - ohne Rindfleisch

Kennwert	Schnittkäse (Hauptprodukt)	Schweinefleisch (Nebenprodukt)
Ertrag in kg/ha	1.049	158
Ertrag in kcal/ha	3.238.882	229.776
Kaloriengehalt in kcal/kg	3.089	1.450
Kalorienanteil	93%	7%
Flächenbedarf in m²/kg	8,91	4,18
Flächenbedarf in m²/1.000 kcal	2,88	2,88
Kalorienertrag (Flächeneffizienz)*	72%	

* Kaloriengehalt Vollmilchertrag = 100 Prozent. Quelle: Eigene Berechnung

Die Schweinefleischproduktion durch Verfütterung der Molke weist mit 4,2 m²/kg einen um 11 Prozent geringeren Flächenbedarf als die Magermilchverfütterung auf. Nimmt man die

Rindfleischproduktion der Milchviehhaltung in die Betrachtung auf, erhöht sich der Kalorienertrag pro Hektar insgesamt um 5,4 Prozent. Die Flächeninanspruchnahme der Käseproduktion reduziert sich damit von 6,4 auf 6,0 m²/kg, wenn die Molke als Lebensmittel genutzt wird. Für ein Kilogramm Rindfleisch werden rund 3,1 m² aufgewendet.

Tabelle 180: Kennwerte der Schnittkäseproduktion bei Nutzung der Molke als Lebensmittel – inklusive Rindfleisch

Kennwert	Schnittkäse	Molke	Rindfleisch
Ertrag in kg/ha	1.049	6.186	168
Ertrag in kcal/ha	3.238.882	1.608.432	263.185
Kaloriengehalt in kcal/kg	3.089	260	1.570
Kalorienanteil	63%	31%	5%
Flächenbedarf in m²/kg	6,04	0,51	3,07
Flächenbedarf in m²/1.000 kcal	1,96	1,96	1,96
Kalorienertrag (Flächeneffizienz)*	100%		

* Kaloriengehalt Vollmilchertrag + Rindfleischertrag = 100 Prozent.
Quelle: Eigene Berechnung

Wird die Molke verfüttert, liegt der Flächenbedarf pro Kilogramm Käse bei rund 8,3 m². Für ein Kilogramm Fleisch werden in diesem Fall 3,9 m² (Schwein) bis 4,2 m² (Rind) aufgewendet.

Tabelle 181: Kennwerte der Schnittkäseproduktion bei Nutzung der Molke als Futtermittel – inklusive Rindfleisch

Kennwert	Schnittkäse	Schweinefleisch	Rindfleisch
Ertrag in kg/ha	1.246	188	168
Ertrag in kcal/ha	3.850.058	273.135	263.185
Kaloriengehalt in kcal/kg	3.089	1.450	1.570
Kalorienanteil	88%	6%	6%
Flächenbedarf in m²/kg	7,04	3,31	3,58
Flächenbedarf in m²/1.000 kcal	2,28	2,28	2,28
Kalorienertrag (Flächeneffizienz)*	73%		

* Kaloriengehalt Vollmilchertrag + Rindfleischertrag = 100 Prozent.
Quelle: Eigene Berechnung

Nach der gleichen Berechnungsmethode ergeben sich für die übrigen Käsesortengruppen in der ökologischen Landwirtschaft Futterflächenbedarfe zwischen 4,1 und 8,7 m²/kg, wenn das Nebenprodukt Molke als Lebensmittel verarbeitet wird (vgl. Tabelle 182). Neben dem Futterflächenbedarf der Käseherstellung nach Käsesortengruppe ist in Tabelle 182 auch der Futterflächenbedarf dargestellt, der sich in der Folge aus dem Verbrauch pro Einwohner ergibt. Die größten Anteile am Flächenbedarf pro Einwohner entfallen dabei auf Schnittkäse und Frischkäse. Da der Quarkanteil am Frischkäseverbrauch unbekannt ist, ist für Frischkäse eine

Spanne angegeben: Für Frischkäse wurde dabei der maximale Milchbedarf von 6 kg je Kilogramm Frischkäse angenommen. Liegt der Anteil von Frischkäse aus Vollmilch bei 100 Prozent des Frischkäseverbrauchs, ergibt sich folglich ein Flächenbedarf von 28,5 m²/Ea. Beträgt dagegen der Magerquarkanteil (Fettgehalt i. Tr. unter 10 Prozent) am Frischkäseverbrauch 100 Prozent, reduziert sich der Flächenbedarf um bis zu 62 Prozent auf ca. 10,8 m²/Ea. Der aktuelle Flächenbedarf der Käseproduktion liegt somit insgesamt zwischen 113 und 131 m² pro Einwohner und Jahr, sofern die Molke vollständig als Lebensmittel genutzt wird.

Tabelle 182: Futterflächenbedarf nach Käsesortengruppe pro Kilogramm und pro Einwohner bei Nutzung der Molke als Lebensmittel

Käsesorte	Verbrauch * kg/Ea	FF-Bedarf ökologisch m²/kg	FF-Bedarf ökologisch m²/Ea
Hartkäse	2,2	8,7	18,7
Schnittkäse	6,8	6,1	41,5
Weichkäse	2,1	5,5	11,5
Frischkäse / Quark	7,0	1,5 – 4,1	10,8 – 28,5
Pasta Filata	3,9	5,4	21,5
Schmelzkäse	1,5	6,1	9,1
Insgesamt	**23,5**	**4,8 - 5,6**	**113,1 –130,8**

* Ohne Sauermilch-, Koch- und Molkenkäse
Quelle: Eigene Berechnung

Wird die anfallende Molke vollständig als Futtermittel verwendet, so beträgt der Flächenbedarf der Käseproduktion, wie in Tabelle 183 dargestellt, zwischen 164 und 178 m²/Ea. Je nach Anteil der Molkenverfütterung liegt der wahrscheinliche Flächenbedarf folglich in einer Spanne zwischen ca. 113 und 178 m²/Ea.

Tabelle 183: Futterflächenbedarf nach Käsesortengruppe pro Kilogramm und pro Einwohner bei Nutzung der Molke als Futtermittel

Käsesorte	Verbrauch * kg/Ea	FF-Bedarf ökologisch m²/kg	FF-Bedarf ökologisch m²/Ea
Hartkäse	2,2	12,7	27,4
Schnittkäse	6,8	8,3	56,5
Weichkäse	2,1	7,5	15,5
Frischkäse / Quark	7,0	3,3 - 5,3	23,1 - 37,3
Pasta Filata	3,9	7,3	28,9
Schmelzkäse	1,5	8,3	12,4
Insgesamt	**23,5**	**7,0 - 7,6**	**163,8 – 178,0**

* Ohne Sauermilch-, Koch- und Molkenkäse
Quelle: Eigene Berechnung

In der konventionellen Viehhaltung ist der Bedarf an Futterfläche jeweils um ca. 48 Prozent geringer.

10.5.2.3.3.3.3 Zusammenfassung: Milch und Milcherzeugnisse

Mit einer durchschnittlichen Milchleistung von 7,2 t/ha in Niederungen ist das Ertragspotenzial der grünlandbasierten ökologischen Landwirtschaft um 48 Prozent geringer als in der konventionellen Landwirtschaft mit vergleichsweise hohem Kraftfutteranteil und dementsprechenden Ackerflächenbedarf. Beschränkt man sich auch in der konventionellen Landwirtschaft auf eine grünlandbasierte Fütterung und Weisehaltung, liegen auch ihre Erträge um knapp 30 Prozent unter denen der konventionellen Stallhaltung mit dem dort üblichen Kraftfutteranteil. Bei grünlandbasierter Haltung mit hohem Weideanteil liegt der Ertrag der ökologischen Viehhaltung folglich um ca. 26 Prozent unter dem der konventionellen Landwirtschaft. Der Einsatz von Kraftfutter erhöht demnach den Ertrag um ca. 30 bis 40 Prozent, die dafür nötige Inanspruchnahme von Ackerflächen führt jedoch zu einer Flächenkonkurrenz mit der Produktion pflanzlicher Lebensmittel. Zudem liefert die zu erheblichen Teilen kraftfutterbasierte konventionelle Milchviehhaltung aufgrund der höheren Milchleistung der Tiere etwas weniger Rindfleisch pro Kilogramm Milch. Dabei handelt es sich zwar um relativ geringe Mengen, doch reduziert eine Berücksichtigung der Fleischproduktion die Nachteile der ökologischen Landwirtschaft mit Blick auf die Flächeneffizienz ebenfalls.

Unter den Milcherzeugnissen ist die Produktion von Butter und Käse zwar mit einem vergleichsweise hohen Flächenaufwand pro Kilogramm verbunden. Werden die Milchkühe mit wenig oder ohne Kraftfutter ernährt, ermöglicht sie jedoch neben einer verbesserten Haltbarkeit der gewonnen Nahrungskalorien und Vorteilen bei Lagerung und Transport eine zusätzliche Erzeugung von Schweinefleisch, ohne den Bedarf an Ackerfläche zu erhöhen. Die Futterflächeninanspruchnahme der Schweinefleischproduktion auf Basis von Magermilch, Buttermilch und Molke nimmt zudem vergleichsweise geringe Flächen pro Kilogramm Fleisch in Anspruch. Allerdings reduziert die Verfütterung die Futterflächeneffizienz, gemessen am Kalorienertrag, je nach Käsesortengruppe um ca. 20 – 32 Prozent und im Falle der Butterproduktion um bis zu 38 Prozent. Dementsprechend ist die Spanne des Flächenbedarfs dieser Milcherzeugnisse, je nach Verwendung der Nebenprodukte, vergleichsweise groß und reicht z. B. im Falle der ökologisch auf Grünland erzeugten Butter von 13,8 bis 24,4 m²/kg.

In Tabelle 184 sind daher für Produkte mit Nebenprodukten, die für die Nutzung als Lebensmittel und als Futtermittel gleichermaßen geeignet sind, zwei Ertragsspannen angegeben. Vor der Klammer ist der durchschnittliche Flächenbedarf angegeben, der in der ökologischen Viehhaltung bei durchschnittlichem Ertragspotenzial und im Durschnitt der Haltungsformen entsteht. In Klammern ist die Spanne bei durchschnittlichem Ertragspotenzial je nach Ertragspotenzial der verschiedenen Haltungsformen angegeben. Eine Berücksichtigung der Spannweite

nach Ertragslage (z. B. in Mittelgebirgen oder montanen Lagen) wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt. In diesem Zusammenhang wird beispielsweise auf die Erhebungen von Leisen & Mersch, 2013, verwiesen[79].

Tabelle 184: Futterflächenbedarf von Milcherzeugnissen nach Wirtschaftsweise (m²/kg)

Milcherzeugnis	Flächenbedarf ökologisch (m²/kg)	Flächenbedarf konventionell (m²/kg)
Vollmilch	1,3 (0,9 – 2,2)	0,7 (0,5 – 1,0)
Teilentrahmte Milch	0,7 (0,5 – 1,2)	0,4 (0,3 – 0,6)
Magermilch	0,6 (0,4 – 1,0)	0,3 (0,2 – 0,6)
Buttermilch	0,7 (0,5 – 1,1)	0,3 (0,3 – 0,6)
Milchmischerzeugnisse	0,9 (0,7 – 1,8)	0,5 (0,4 – 0,7)
Naturjoghurt	1,3 (0,9 – 2,2)	0,7 (0,6 – 1,0)
Joghurt mit 15% Obstzusatz *	1,2 (0,8 – 1,9)	0,7 (0,5 – 1,1)
Sahne	6,6 – 10,4 (4,3 – 16,7)	3,5 – 5,5 (2,7 – 7,7)
Hartkäse	8,6 – 12,6 (5,7 – 19,4)	4,4 – 6,4 (3,5 – 9,1)
Schnittkäse	6,0 – 8,3 (4,0 – 12,8)	3,1 – 4,2 (2,5 – 6,0)
Weichkäse	5,5 – 7,5 (3,6 – 11,5)	2,8 – 3,8 (2,2 – 5,5)
Sauermilchkäse	7,5 (4,9 – 12,0)	3,8 (3,0 – 5,5)
Molkenkäse	3,3 (2,2 – 5,3)	1,7 (1,3 – 2,4)
Frischkäse	4,0 – 5,3 (2,8 – 8,3)	2,1 – 2,7 (2,2 – 3,9)
Speisequark	1,9 (1,2 – 3,1)	0,9 (0,7 – 3,1)
Pasta Filata	5,4 – 7,3 (3,6 – 11,3)	2,8 – 3,8 (2,2 – 5,3)
Schmelzkäse	6,1 – 8,3 (4,0 – 12,8)	3,1 – 4,2 (2,5 – 6,0)
Butter	13,8 – 24,4 (9,2 – 33,8)	7,7 – 12,8 (6,0 – 17,8)
Magermilchpulver	7,2 (4,5 – 10,5)	3,8 (2,9 – 5,2)
Buttermilchpulver	8,5 (5,2 – 12,3)	4,4 (3,5 – 6,2)
Molkenpulver	9,0 (6,9 – 14,4)	4,6 (3,5 – 6,3)
Molke	0,5 (0,4 – 0,9)	0,3 (0,2 – 0,4)

Werte vor den Klammern: Durchschnittsbedarf nach Nutzung der Nebenprodukte.
In Klammern: Ertragsspanne nach Nutzungsintensität und Nutzung der Nebenprodukte
* Flächenangabe umfasst Futterfläche und Obstanlagenfläche
Quelle: Eigene Berechnung

Anhand der Angaben des BMEL zur Verfütterung von Milch und Molke (BMEL, 2018 S. 91) wurde abgeschätzt, dass weniger als ein Viertel des überschüssigen Magermilchaufkommens und rund ein Drittel des Molkenaufkommens verfüttert wird (direkt oder als Pulver). Insgesamt werden nach dieser Schätzung ca. 28 Prozent des überschüssigen Aufkommens an Mager-/Buttermilch und Molke verfüttert. Werden die übrigen 72 Prozent als Lebensmittel genutzt, ist der Flächenbedarf pro Kilogramm dementsprechend relativ gering und nahe dem unteren Wert der Spanne. Auf Grundlage des so abgeschätzten Milcheinsatzes pro Kilogramm Endprodukt,

[79] Leisen, E. & Mersch, F., 2013: Flächenproduktivität in Öko-Milchviehbetrieben in unterschiedlichen Standorten und Regionen

lässt sich die Flächeninanspruchnahme pro Person berechnen. In Tabelle 185 ist der Flächenbedarf pro Kilogramm Produkt und pro Person dargestellt, der sich aus den heutigen Verbrauchsgewohnheiten und Anteilen der Verfütterung ergibt. In der konventionellen Landwirtschaft mit einer Milchleistung von 14.000 kg Milch pro Hektar ergibt sich ein Futterflächenbedarf von 272 m² pro Person und Jahr, auf den direkten Verbrauch entfallen rund 202 m²/Ea. Im ökologischen Landbau liegt der Bedarf bei 512 m²/Ea [80], auf den direkten Verbrauch entfallen davon rund 377 m²/Ea. Anhand der Überschüsse ergibt sich bei konventioneller Produktion ein potenzieller Futterflächenexport von etwa 46 m²/Ea, bei ökologischer Produktion von 88 m²/Ea.

Tabelle 185: Futterflächenbedarf der Erzeugung von Milchprodukten in Deutschland pro Kilogramm und pro Einwohner im Zeittraum 2011-2015 *

Milcherzeugnis	Verbrauch 2011-2015	m²/kg ökol.	m²/kg konv.	m²/Ea ökol.	m²/Ea konv.
Vollmilch	24,7	1,3	0,7	31,0	17,4
Teilentrahmte Milch	25,9	0,7	0,4	19,1	10,4
Entrahmte Milch / Magermilch	0,7	0,6	0,3	0,4	0,2
Buttermilch	1,3	0,7	0,4	0,9	0,5
Milchmischerzeugnisse	17,4	0,9	0,5	15,3	8,7
Naturjoghurt	4,9	1,3	0,7	6,1	3,4
Joghurt mit 15% Obst **	12,5	1,2	0,7	15,0	8,8
Sahne	5,7	7,7	4,1	43,8	23,2
Hartkäse	2,2	9,7	5,1	21,0	10,7
Schnittkäse	6,8	6,6	3,4	45,3	23,2
Weichkäse	2,1	6,1	3,1	12,6	6,4
Sauermilch-, Koch- und Molkenkäse	0,5	5,8	3,0	2,9	1,5
Frischkäse	7,0	3,1	2,2	21,9	11,1
Pasta Filata	3,9	5,9	3,1	23,4	12,1
Schmelzkäse	1,5	6,6	3,4	10,0	5,1
Butter	5,9	16,8	9,3	98,9	53,9
Mager-/Buttermilchpulver	1,3	7,2	3,8	9,4	5,0
Molkenpulver	1,4	9,0	4,6	12,6	6,4
Magermilch-Überschuss, Pulverwert**	8,7	7,2	3,8	63,2	33,3
Molken-Überschuss, Pulverwert**	6,6	9,0	4,6	59,4	30,4
SUMME	**141,0**	**3,2**	**2,0**	**512,3**	**271,7**

* Unterstellt wurden Milchleistungen von 7.235 kg/ha in der ökologischen Milchviehhaltung und 14.000 kg/ha in der konventionellen Milchviehhaltung
** Flächenangabe umfasst Futterfläche und Obstanlagenfläche. Unterstellt wurden mittlere Obsterträge von 13,2 t/ha im konventionellen Anbau und 9,4 t/ha im ökologischen Anbau.
*** Unterstellt wurde, dass 28 Prozent der Überschüsse verfüttert werden. Die übrigen Anteile gehen überwiegend in den Export
Quelle: Eigene Berechnung

[80] Ohne Berücksichtigung des Fleischertrags liegt der Flächenbedarf der Erzeugung von 390 kg Milch bei 539 m²/Ea. Davon sind 26,7 m² für die Fleischproduktion abzuziehen.

Den größten Anteil am Verbrauch von Milchprodukten, der sich auf knapp 126 kg/Ea beläuft, haben Frischmilcherzeugnisse mit 70 Prozent. Ihr Anteil am Futterflächenbedarf beträgt dagegen nur 18 Prozent. Den größten Anteil am Flächenbedarf des Milchkonsums hat der Verbrauch von Käse mit 27 Prozent. Der Anteil von Käse am Verbrauch von Milchprodukten liegt bei 19 Prozent. Auf den Butterkonsum, dessen Anteil am Milchproduktkonsum bei rund 5 Prozent liegt, entfallen rund 20 Prozent des Flächenbedarfs. Auf die überschüssigen Nebenprodukte Magermilch, Buttermilch und Molke, die großenteils exportiert oder verfüttert werden, entfallen rund 23 Prozent der Flächeninanspruchnahme.

Tabelle 186: Anteile der Produktgruppen an Verbrauch und Futterflächenbedarf

Produktgruppe	Anteil am Verbrauch	Anteil am Flächenbedarf
Frischmilcherzeugnisse	70%	18%
Sahne	5%	8%
Käse	19%	27%
Butter	5%	20%
Pulver	2%	4%
Überschüsse (Magermilch, Buttermilch, Molke etc.)	0%	23%

Quelle: Eigene Berechnung

Allein eine Reduktion des Verbrauchs von Käse und Butter um 50 Prozent würde den Gesamtflächenbedarf daher bereits auf 58 Prozent des heutigen Flächenbedarfs senken, was in der konventionellen Landwirtschaft eine Reduktion auf 158 m²/Ea bedeutet. In der ökologischen Landwirtschaft beträgt der entsprechende Flächenbedarf in diesem Fall 297 m²/Ea.

10.5.2.3.3.3.4 Vergleich mit anderen Studien

Woitowitz (2007) beziffert den gesamten Milchverbrauch auf 334 kg Milch (Vollmilchwert) pro Person und Jahr, was etwa der Milchanlieferung bei den Molkereien im Jahr 2007 entspricht (vgl. Anhang II, Tabelle 457)[81]. Um diesen Bedarf ökologisch zu decken, wird nach Woitowitz eine Futterfläche von 714 m³/Ea benötigt (Woitowitz, 2007 S. 192). Somit geht Woitowitz davon aus, dass die ökologische Milchviehhaltung ca. 4.680 kg Milch pro Hektar für den Verbrauch zur Verfügung stellen kann (Milchanlieferung bei Molkereien). Wakamiya (2011) gibt für eine „Jährliche Verzehrmenge“ von 347 kg pro Kopf einen Flächenbedarf der ökologischen Landwirtschaft von 748 m² an. Das entspricht einer Marktmilchbereitstellung von ca. 4.640 kg/ha. Die von Woitowitz und Wakamiya unterstellten Flächenleistungen entsprechen einer vergleichsweise extensiven Flächennutzung, die z. B. nach Eilers (2013), auch ohne Kraftfut-

[81] Die Milchanlieferung durch inländische Erzeuger ist, gemessen in Kilogramm pro Einwohner, zwischen 2005 und 2015 um 15 Prozent gestiegen (vgl. Tabelle 221).

tereinsatz bzw. bei geringem Kraftfuttereinsatz eine vergleichbare Marktmilchproduktion erreichen kann. Bei üblichem Kraftfuttereinsatz ist die Milchleistung pro Kuh im Durchschnitt der ökologischen Betriebe in Baden-Württemberg (Ø MLP B.-W.) mit rund 6.700 kg/Kuh um 12 Prozent höher als in der kraftfutterreduzierten Milchviehhaltung (Eilers, 2013). Allerdings liegen für den Durchschnitt des Gesamtbestandes der ökologischen Betriebe keine Angaben zur aufgewendeten Futterfläche pro Milchkuh vor, sodass ihre Flächenleistung nicht berechnet werden konnte. Legt man der Flächenbedarfsberechnung deshalb die jeweiligen Angaben in der Literatur zugrunde, bewegt sich der Flächenbedarf der ökologischen Landwirtschaft bei heutigem Milchverbrauch, je nach Nutzungsintensität, zwischen 372 und 876 m²/Ea. (Vgl. Tabelle 187)

Tabelle 187: Flächenbedarf der ökologischen Milchversorgung nach Angaben zur Flächenleistung in der Literatur

Quelle	Angaben zur Futterbasis	Flächenleistung Milch (kg/ha)	Flächenertrag Marktmilch (kg/ha)	Flächenbedarf pro Einwohner (m²/Ea)
Eilers, 2013	Kraftfutterreduziert	5.239	4.450	876
Leisen & Mersch, 2013	Weide	8.476	6.766	576
Verhoeven et al, 2018	Kurzrasenweise	12.108	10.488	372
Ø ökologisch	**Kraftfutterreduziert**	**8.608**	**7.235**	**539**

Nach den von Woitowitz (2007) und Wakamiya (2011) angegebenen Marktmilcherträgen der ökologischen Landwirtschaft werden pro Einwohner ca. 834 m² bzw. 841 m² jährlich benötigt, um einen Bedarf von 390 kg Vollmilch pro Einwohner und Jahr zu decken (vgl. Tabelle 188). Woitowitz geht zudem im Falle der konventionellen Landwirtschaft von einem Flächenbedarf von 604 m²/Ea aus, was einem Ertrag von ca. 6.460 kg/ha entspricht. Auch dieser Wert liegt deutlich unter den Werten, die in der konventionellen Landwirtschaft sowohl auf Grünlandstandorten (ca. 7.000 bis 13.000 kg/ha) als auch bei einer Fütterung mit hohem Kraftfutteranteil (ca. 10.000 bis 18.000 kg/ha) tatsächlich erzielt werden (Gräfe, 2010; Sutter, et al., 2013; Dorfner, 2013; LfL Bayern, 2013-2017). Die von Woitowitz und Wakamiya angegebenen Flächenbedarfswerte erscheinen daher zu hoch angesetzt.

Tabelle 188: Angaben zum Flächenbedarf der Milchversorgung in der Vergleichsliteratur

Quelle	Angaben zur Futterbasis, Wirtschaftsweise	Flächenleistung Milch (kg/ha)	Flächenertrag Marktmilch (kg/ha)	Flächenbedarf pro Einwohner (m²/Ea)
Wakamiya, 2011	k. A., ökologisch	k. A.	4.640	841
Woitowitz, 2007	Rau- und Kraftfutter, ökologisch	k. A.	4.678	834
Woitowitz, 2007	Rau- und Kraftfutter, konventionell	k. A.	6.460	604

10.5.2.3.4 Einfluss des Energiebedarfs auf den Flächenbedarf

Neben dem Bedarf an Futterfläche wird mit der Energiewende und dem Umstieg auf erneuerbare Energien auch der Bedarf an Fläche zur Bereitstellung der benötigten Produktionsenergie als Produktionsfaktor an Bedeutung gewinnen, der nicht zuletzt den Flächenbedarf der Nahrungsmittelversorgung beeinflussen wird. Der Energieaufwand der landwirtschaftlichen Produktion entsteht vor allem durch den Futterbau, die Pflege der Weiden und den Stallbetrieb.

10.5.2.3.4.1 Energieaufwand Futterbau

Der Energiebedarf des Futterbaus im unterstellten Anbausystem (ökologisch, nicht wendend, Gülle) variiert je nach Futterpflanze zwischen 2.292 und 21.863 MJ pro Hektar. Die Energieerträge liegen zwischen 30 und 116 GJ pro Hektar (KTBL, 2019). Weidegras weist sowohl den niedrigsten Energieaufwand pro Hektar als auch den höchsten energetischen Erntefaktor auf. Mit einem Input-Output-Verhältnis von 1:37,6 ist der Erntefaktor von Weidegras neunmal so hoch wie der des Kraftfutteranbaus ohne Berücksichtigung von Koppelprodukten (vgl. Tabelle 105 und Tabelle 458).

Tabelle 189: Energie-Input, Energie-Output und Erntefaktoren des ökologischen Futterbaus ohne Koppelprodukte

Futterart	Input: MJ/ha [1)]	Ertrag: t/ha [1)]	Ertrag: NEL [GJ/ha]	Ertrag: ME [GJ/ha]	Erntefaktor MJ ME/MJ [3)]
Raufutter/Grundfutter					
Dauergrünland-Weidegras	2.292	9,0	[1)] 52	[1)] 86	37,6
Dauergrünland-Frischfutter	6.285	7,0	[1)] 54	[1)] 90	14,4
Heu	6.406	7,5	[1)] 33	[1)] 57	8,9
Maissilage	8.051	12,3	[1)] 67	[1)] 116	14,3
Kleegrassilage	6.194	8,4	[1)] 40	[1)] 68	11,0
Grassilage	5.921	8,8	[1)] 40	[1)] 68	11,4
Ø Grundfutter	[3)] **5.858**	[3)] **8,8**	[3)] **48**	[3)] **81**	[3)] **13,8**
Kraftfutter					
Ackerbohne	11.952	3,9	[2)] 29	[2)] 50	4,2
Futtererbsen	13.080	3,5	[2)] 26	[2)] 47	3,6
Gerste	11.254	4,0	[2)] 28	[2)] 45	4,0
Hafer	10.715	3,0	[2)] 18	[2)] 30	2,8
Luzerne/Kleegras	10.090	8,6	[2)] 34	[2)] 60	6,0
Körnermais	21.863	7,0	[2)] 50	[2)] 80	3,7
Weizen	12.975	4,0	[2)] 29	[2)] 46	3,5
Ø Kraftfutter	[3)] **13.039**	[3)] **4,9**	[3)] **31**	[3)] **51**	[3)] **4,1**

Quellen: (1) KTBL, 2019 (Verfahrensrechner Pflanzenbau), Wirtschaftsweise: Ökologisch, Anbausystem: nicht wendend, Gülle; (2) Eigene Berechnung n. KTBL, 2019, und LfL Bayern, 2017b, S. 75 (3) Eigene Berechnung

Geht man z. B. von einem Weizenstrohertrag von 4,4 t/ha aus, steigt der Energieertrag von 46 auf 71 GJ ME. Für das Ballenpressen und den Abtransport des Strohs wurden ca. 840 MJ/ha

als Energieaufwand angenommen (190 MJ pro Tonne)[82]. Somit ergibt sich ein Erntefaktor von 11,4 MJ ME/MJ, was einem Drittel der Energieeffizienz von Weidegras auf Dauergrünland entspricht. Anhand der Futterrationen I bis VII, die in Tabelle 190 dargestellt sind, wurde untersucht, wie sich hohe Anteile von grünlandbasierten Futtermitteln einerseits und Kraftfutter andererseits auf den Energiebedarf des Futterbaus in der ökologischen Milchviehhaltung auswirken. Dazu wurde unter anderem auf Angaben von Gräfe (2010) zurückgegriffen, die sich auf Futtereinsatz und Milchleistungen in der konventionellen Milchviehhaltung beziehen. In der ökologischen Landwirtschaft ist die durchschnittliche Milchleistung pro Kuh um etwa ein Fünftel geringer als in der konventionellen Landwirtschaft. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Tiere mehr Auslauf haben und in der Regel nur etwa halb so viel Kraftfutter erhalten. Bei gleicher Futterration und gleichem Umfang des Weidegangs erzielen beide Systeme etwa gleiche Milchleistungen pro Kuh (Leisen, 2011). Folglich lassen sich die Angaben von Gräfe (2010) zu verschiedenen Futterrationen (hier mit IV bis VII bezeichnet) und den mit ihnen verbundenen Brutto-Milchleistungen auf den ökologischen Landbau übertragen, um den Energieaufwand des ökologischen Futterbaus pro Kuh und pro Kilogramm Milch zu berechnen. Des Weiteren wurden diese mit dem berechneten Energieaufwand der Futterration I nach Woitowitz (2007) sowie zwei weiteren Futterrationen (II und III) nach LfL Bayern (o. J.) und Hybrimin (2012) verglichen. Die jeweiligen Zusammensetzungen sind in Tabelle 190 dargestellt.

Tabelle 190: Zusammensetzung verschiedener Futterrationen für Milchkühe

Rationskomponente	I	II	III	IV	V	VI	VII
Weidegras	42 %						
Heu	16 %	7 %					
Maissilage	13 %	19 %	11 %	25 %	24 %	23 %	22 %
Kleegrassilage	15 %						
AWS/GL				47 %	44 %	42 %	39 %
Grassilage	2 %	47 %	42 %				
Grascobs		6 %					
Stroh + Heu				2 %	2 %	1%	1 %
Stroh		5 %					
Biertrebersilage		3 %	15 %				
Kraftfutter (Mischung)	11 %	13 %	31 %	26 %	30 %	34 %	38 %
SUMME	**100%**	**100%**	**100 %**	**100 %**	**100 %**	**100 %**	**100 %**
Quelle	(1)	(2)	(3)	(4)	(4)	(4)	(4)

Quellen: (1) Woitowitz, 2007; (2) LfL Bayern, o. J.; (3) Hybrimin, 2012; (4) Gräfe, 2010

Die Futterrationen weisen deutlich unterschiedliche Anteile von Weidegras, sonstiger grünlandbasierter Futtermittel und Kraftfuttermittel auf. Der Kraftfutteranteil der Rationen IV bis VII

[82] Für das Pressen und den Abtransport von 8,2 t Weizenstroh kann nach Angaben des KTBL mit einem Energieaufwand von 1.562 MJ gerechnet werden (KTBL, 2019: Verfahrensrechner Pflanzenbau - Winterweizen - Korn und Stroh (thermische Nutzung)).

steigt stufenweise an, während die Anteile von Maissilage und Anwelksilage/GL dementsprechend reduziert wurden. Die Milchleistung der Ration II wurde anhand der Energiegehalte auf das Niveau der Ration IV geschätzt. Somit wurde eine Milchleistung von 24 kg pro Kuh und Laktationstag unterstellt. Auf Basis dieser Annahmen ergibt sich, dass sich sowohl Weidegras als auch Reste aus der Lebensmittelverarbeitung deutlich auf den Energieaufwand des Futterbaus pro Kuh auswirken und dementsprechend auch zu einem deutlich niedrigeren Energieaufwand pro Kilogramm Milch führen. Die berechnete Energieeffizienz der Futtermischungen ist in Tabelle 191 dargestellt. Schätzungen sind in Klammern angegeben.

Tabelle 191: Energieeffizienz von Futterbau und Futterverwertung in der ökologischen Milchviehhaltung

Futterration	I	II	III	IV	V	VI	VII
Futteraufwand pro Kuh (t TM)	[1] 5,2	[2] 6,3	[3] 7,6	[4] 6,0	[4] 6,4	[4] 6,7	[4] 7,1
Energiegehalt Futter pro t TM (GJ ME)	[5] 9,2	[5] 8,8	[5] 10,1	[5] 9,1	[5] 9,2	[5] 9,3	[5] 9,5
Energiegehalt Futter pro Kuh (GJ ME)	[5] 48,4	[5] 55,0	[5] 77,3	[5] 54,7	[5] 59,3	[5] 62,4	[5] 67,1
Energieaufwand Futterbau pro t TM (kWh)	[5] 222	[5] 322	[5] 245	[5] 397	[5] 432	[5] 457	[5] 491
Energieaufwand Futterbau pro Kuh (kWh)	[5] 1.163	[5] 2.023	[5] 1.864	[5] 2.389	[5] 2.772	[5] 3.054	[5] 3.475
Brutto-Milchleistung pro Kuh und Tag* (kg)	[5] 16	[7] (24)	[3] 35	[5] 24	[5] 27	[5] 30	[5] 33
Brutto-Milchleistung pro Kuh und Jahr (kg)	[1] 5.000	[7] (7.278)	[3] 10.675	[4] 7.251	[4] 8.175	[4] 9.065	[4] 9.950
Marktmilchleistung pro Kuh und Jahr (kg)	[1] 4.800	[6] (6.378)	[6] 9.775	[6] 6.351	[6] 7.275	[6] 8.165	[6] 9.050
Futterverwertung (kg Milch/kg)	0,92	1,02	1,28	1,05	1,13	1,22	1,28
Futtereffizienz (MJ ME/kg Milch)	[5] 10,08	[7] (8,62)	[5] 7,91	[5] 8,62	[5] 8,15	[5] 7,64	[5] 7,42
Erntefaktor (MJ/MJ)**	3,22	2,46	4,09	2,07	2,05	2,08	2,03
Energieaufwand Futterbau pro kg Marktmilch (MJ)	0,87	1,14	0,69	1,35	1,37	1,35	1,38
Energieaufwand Futterbau pro kg Marktmilch (Wh)	[5] 242	[7] (317)	[5] 191	[5] 376	[5] 381	[5] 374	[5] 384
Energieaufwand Futterbau pro 1.000 kcal (Wh)	[5] 362	[7] (473)	285	561	569	558	573

* Pro Laktationstag (Angenommen wurde eine Laktationsperiode von 305 Tagen). ** Energiegehalt von einem Kilogramm Milch mit 670 kcal entspricht 2,81 MJ.
Quellen: (1) Woitowitz, 2007, S. 39; (2) Schätzung n. LfL Bayern, o. J., S. 4, 5; (3) Hybrimin, 2012; (4) Gräfe, 2010, S. (5) Eigene Berechnung; (6) Eigene Berechnung: Unterstellt wurde ein Vollmilchaufwand von 900 kg/Kuh für die Kälberfütterung; (7) Schätzung, da keine Angaben zur Milchleistung vorhanden. Werte wurden daher in Klammern gesetzt.

Zwar steigt mit der Energiedichte des Futters auch der Milchertrag je kg Futter (vgl. Tabelle 191, Futterverwertung), doch kann damit der im Vergleich zur Weidehaltung höhere Energieaufwand nicht kompensiert werden. Der Vergleich der Futtermittelmischungen IV bis VII zeigt

aber auch, dass die Energieeffizienz durch eine Erhöhung des Kraftfutteranteils sogar gesteigert werden kann, wenn die Futtermischungen kein Weidegras, sondern siliertes Gras enthalten. Dies deutet daraufhin, dass die Weidehaltung zwar die Haltungsform mit der höchsten Energieeffizienz ist, die Nutzung der sonstigen grünlandbasierten Futtermittel aber nicht grundsätzlich energieeffizienter ist als der Einsatz von Kraftfutter.

Umgerechnet werden somit Erntefaktoren von 2,0 bis 4,1 erreicht. Dabei weist die Milchproduktion mit Futterration I mit 1:3,2 aufgrund des hohen Weideanteils ein günstiges Input-Output-Verhältnis auf. Einen noch höheren Erntefaktor weist Futterration III auf, die einen relativ hohen Anteil eines Nebenproduktes aus der Lebensmittelverarbeitenden Industrie (Biertreber) enthält, welcher sich positiv auf die Energiebilanz auswirkt. Können keine Reststoffe als Futtermittel eingesetzt werden, erhöht vor allem ein hoher Weideanteil den Erntefaktor. Geht man bei einer Vollweidehaltung von einer Milchleistung von 7.235 kg/ha und einem Energieaufwand von 2.292 MJ/ha aus, ergibt dies einen Erntefaktor von 8,9 MJ ME/MJ. Ein höherer Kraftfutteranteil wirkt sich dagegen negativ auf den Erntefaktor aus.

Pro Kuh liegt der Energiebedarf des ökologischen Futterbaus bei rund 1,2 bis 3,5 MWh, pro Tonne Milch ergibt sich ein Energiebedarf von 242 bis 384 kWh. Bei reiner Weidehaltung werden 88 Wh pro kg Milch benötigt. Bei einem Milchverbrauch von 390 kg/Ea ergibt sich somit ein Energiebedarf zwischen 34 und 150 kWh/Ea. Um diesen Endenergiebedarf mit Energiepflanzen zu decken, werden ca. 4,5 bis 50 m² pro Person und Jahr benötigt. Der Flächenbedarf der Milchproduktion steigt somit um ca. 1 bis 9 Prozent. Wird die Energie mittels durchschnittlicher Photovoltaikfreiflächenanlagen gewonnen, beträgt der Flächenbedarf der Energiebereitstellung, je nach Speicherverlust ein Zehntel bis ein Sechstel, also weniger als 0,5 bis ca. 9,0 m²/Ea. Der Flächenbedarf der Milchproduktion steigt in diesem Fall nur um maximal 2 Prozent.

10.5.2.3.4.2 Energieaufwand der Stallhaltung

Als Faustzahlen für den Energiebedarf kann man nach Angaben des KTBL pro Tierplatz mit einem Strombedarf zwischen 234 und 409 kWh/a und einem Wärmebedarf zwischen 83 und 105 kWh/a rechnen. Pro Tonne Milch entspricht dies einem Strombedarf zwischen 28 und 49 kWh/a und einem Wärmebedarf von 10 und 12 kWh/a. (KTBL, 2014a S. 32) Bezogen auf den jährlichen Milchverbrauch von rund 390 kg/Ea entspricht dies einem Gesamtenergiebedarf von 15 bis 24 kWh/Ea. Um diesen Energiebedarf zu decken, benötigt man z. B. ca. 1,9 bis 3,1 m² Miscanthus-Anbaufläche pro Person und Jahr. Bei weniger ertragreichen Energiepflanzen kann der Flächenbedarf 8,0 m²/Ea und mehr betragen. Der Energiebedarf der Stallhaltung erhöht den Flächenbedarf der Milchviehhaltung somit um deutlich weniger als 1 Prozent.

10.5.2.3.4.2.1 Energiebedarf der Verarbeitung zu Pulver

Der Energiebedarf der weiteren Verarbeitung der Milch zu fertigen Milchprodukten für den Handel konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht erhoben werden. Beispielhaft wird hier lediglich der Energieverbrauch betrachtet, der bei der Verarbeitung der Nebenprodukte Magermilch, Buttermilch und Molke zu Pulver entsteht. Da dieser vergleichsweise hoch ist und bei einem direkten Verbrauch dieser Nebenprodukte vermieden werden kann, ist dieser im Vergleich zu nicht vermeidbaren Energieaufwendungen, wie der Kühlung von Milch, besonders relevant. Der Gesamtenergieverbrauch für die Milchpulver-Produktion liegt aktuell bei ungefähr 10 MJ/kg Pulver (Moejes, et al., 2017). Nach Moejes & van Bostel ist eine Reduktion um bis zu 60 Prozent auf 4-5 MJ/kg Pulver möglich (Moejes, et al., 2017). Pro Tonne Pulver liegt der Energiebedarf somit zwischen 1.250 und 2.780 kWh.[83] Bei einem Pulveraufkommen von 17 kg pro Person und Jahr ergibt sich ein Energiebedarf von 18,9 bis 47,2 kWh/Ea (68 bis 170 MJ/Ea). Um diese Energiemenge zu gewinnen, benötigt man eine Energiepflanzen-Anbaufläche von 2,4 bis 15,7 m² oder eine Freiflächen-PV-Anlagenfläche von 0,4 bis 1,0 m². Allein die Verarbeitung der Nebenprodukte Magermilch, Buttermilch und Molke zu Pulver benötigt somit 16 bis 135 Prozent der Energie, die zur Erzeugung des Milchverbrauchs von 390 kg/Ea erforderlich sind.

Mit Blick auf den Flächenbedarf ist die direkte Nutzung von Magermilch, Buttermilch und Molke als Nahrungsmittel der Verarbeitung zu Pulver aufgrund des hohen Energieaufwandes vorzuziehen. Ist dies nicht möglich, ist eine Nutzung der Pulver als Nahrungsmittel der Verwendung als Futtermittel aus den zuvor dargestellten Gründen vorzuziehen.

Insgesamt werden für die Energiebereitstellung für Futterbau, Stallhaltung und Verarbeitung von Überschüssen zu Pulver noch einmal rund 10 bis 60 m² LNF benötigt, wenn der Energiebedarf mit Energiepflanzen gedeckt werden soll. Wird die Energie mittels Photovoltaikanlagen bereitgestellt, beträgt der Flächenbedarf ungefähr ein Zehntel bis ein Sechstel dessen, also 1 bis 10 m² LNF.

[83] Um eine Tonne ökologisch produzierte Milch zu Pulver zu verarbeiten, benötigt man folglich ca. 100 bis 300 kWh, was etwas mehr als der Hälfte des Energieaufwandes ihrer Erzeugung entspricht.

10.5.2.4 Schweinehaltung

10.5.2.4.1 Weidehaltung von Schweinen

Die Schweinehaltung ist, wie bereits dargestellt, grundsätzlich auch im Freiland möglich. Dabei ist die Freilandhaltung von der Waldweide, die im Mittelalter weit verbreitet war, zu unterscheiden. Die Waldweide entspricht den natürlichen Verhaltensweisen der Tiere, die dort vor allem Eicheln, Bucheckern, Wurzeln und Insekten suchen. Waldweide erfordert jedoch Beifutter und muss zeitlich begrenzt werden[84]. Heutzutage wird die Waldweide, abgesehen von wenigen Pilotversuchen, nicht mehr praktiziert (Menke, et al., 2016 S. 6). Freilandhaltung (ohne feste Stallgebäude und mit Schutzhütten) von Schweinen ist dagegen ganzjährig möglich und „kann sowohl auf Grünland als auch auf Ackerflächen (z.B. Kleegrasschlägen) erfolgen, wobei bei letzterem die Freilandhaltung als Fruchtfolgeglied genutzt werden kann“ (Menke, et al., 2016 S. 6). Weidehaltung von Schweinen auf Grünland ist überall dort möglich, „wo gute Milchviehweiden möglich sind“ (Menke, et al., 2016 S. 11). Auf Grünland ist beispielsweise eine Besatzdichte von 10 Sauen pro Hektar möglich, die in 6 bis 8 einzelnen Koppeln gehalten werden, wobei ein regelmäßiger Umtrieb nach 4 bis 6 Tagen erfolgt (Mayer, 1978, zit. n. Menke, et al., 2016, S. 19). Je nach Qualität des Weidestandortes wird ein zusätzlicher Futterbedarf der Sauen von 400 bis 1.000 Stärkeeinheiten und zwischen 0 und 100 g verdauliches Eiweiß je Tier/Tag angegeben (Ludwig, 1956, zit. n. Menke, et al. 2016, S. 26). Die Freilandhaltung als Fruchtfolgeglied ist „in die Ackerbewirtschaftung zu integrieren und insofern von der insgesamt zur Verfügung stehenden Nutzfläche abhängig. In ökologisch bewirtschafteten Betrieben muss die nicht zur Schweinehaltung verwendete Ackerfläche ausreichen, um die Futterversorgung der Tiere entsprechend der EG-Öko-Verordnung und der Verbandsrichtlinien sicherzustellen.“ (KTBL, 2011)[85] Nach den Vorgaben der EG-Öko-Verordnung dürfen „maximal 6,5 Sauen (inklusive Saugferkel) oder 74 Absetzferkel oder 14 Mastschweine je Hektar und Jahr gehalten werden“. (KTBL, 2011)

10.5.2.4.2 Stallhaltung von Schweinen

Schweine sind Rudeltiere, die ein klares Rangordnungs- und Sozialverhalten zeigen. Von Tierschutzverbänden wird deshalb empfohlen, die Tiere in stabilen Stallgruppen von etwa 10 bis 20 Tieren zu halten. Da Schweine tagaktiv sind, ist Tageslichteinfall für das Wohlbefinden und

[84] Eine dauerhafte Beweidung ist aufgrund des begrenzten Grasangebotes und der Bitterstoffe in den Eicheln, die zu Verdauungsproblemen führen können, nicht möglich. (Ludwig, 1956, zit. n. Menke, et al. 2016, S. 6)

[85] „Bei der Freilandhaltung kann keine gezielte Dungausbringung erfolgen, da die Tiere Kot und Harn direkt auf dem Boden absetzen. Grundwasserbelastungen und Nährstoffanreicherungen im oden können deshalb nur mit einer Begrenzung der Besatzdichte und regelmäßigem Flächenwechsel vermieden werden. Richtwerte für die maximale Belegung leiten sich aus der Düngeverordnung ab. Die EG-Öko-Verordnungen begrenzen den möglichen Tierbesatz auf die im Betrieb verfügbare Fläche.“ (KTBL, 2011)

ein natürliches Verhalten der Tiere wichtig. Zur artgerechten Haltung gehört zudem ein freier Zugang zu einem an den Stall angegliederten Auslauf (Pankatz, o. J.). Insbesondere, wenn die Tiere im Stall der Außenluft ausgesetzt sind, benötigen sie einen wärmegedämmten Untergrund und Einstreu, welches ihnen z. B. den Bau von Nestern ermöglicht (Pankatz, o. J.). In der Intensivmast werden Schweine meist in geschlossenen Stallsystemen gehalten. Immer häufiger werden die Tiere dort durch Klimatisierung vor ungünstigen Temperaturen und möglichen Infektionen geschützt. Die Gruppen sind deutlich größer als natürliche Rudelgrößen. „Bei der Schweinemast ist der Einsatz von automatischen Sortieranlagen mit Gruppengrößen von 300 bis 400 Tieren ein übliches Verfahren geworden“ (Ellersiek, 2008). In diesen Gruppen werden die Tiere ab der 13. Lebenswoche bis zu einem Alter von 6 bis 7 Monaten auf ein Endgewicht von 110 bis 125 kg gemästet und noch im Jugendalter geschlachtet. Etwas länger ist die Mastdauer in der ökologischen Landwirtschaft, in der zum Teil auch alte Schweinerassen genutzt werden. Beispielsweise werden Schwäbisch-Hällische Mastschweine im Alter von acht bis zehn Monaten geschlachtet, wenn sie ein Gewicht zwischen 110 und 150 Kilogramm erreicht haben. Die natürliche Lebenserwartung von Schweinen unter günstigen Bedingungen wird mit 15 (10 bis 21) Jahren und mehr angegeben. (Bäuerliche Erzeugergemeinschaft Schwäbisch Hall w. V., 2019; VIER PFOTEN Österreich, 2017). Um ein Mastendgewicht von ca. 120 kg zu erreichen, werden bei modernen Mastschweinen zwischen 250 und 275 kg Futter benötigt. Moderne Mastschweine wurden mit dem Ziel gezüchtet, möglichst futtereffizient viel mageres Fleisch zu liefern. Die Schlachtausbeute beträgt ca. 75 - 80 Prozent des Lebendgewichts (Omlor, 2010), die Muskelfleischausbeute beträgt i. d. R. zwischen 55 und 60 Prozent. Ein Kilogramm Schweinefleisch enthält ca. zwischen 1.000 und 3.000 kcal. Im Mittel aller Teilstücke[86] wurde ein Kaloriengehalt von 1.450 kcal angenommen, für Muskelfleisch ein Mittelwert von 1.600 kcal. Alte Nutzrassen benötigen mehr Futter pro Kilogramm Fleisch, ihr Fleisch ist dafür reicher an Fett und somit auch an Kalorien. So weist beispielsweise das Angler Sattelschwein in ökologischer Haltung einen intramuskulären Fettgehalt von 3,7 Prozent auf, eine Kreuzung aus Piétrain und Angler Sattelschwein kommt auf 3,2 Prozent (Weißmann, et al., 2009). Hybridmastschweine aus dem Bundeshybridzuchtprogramm (BHZP) erreichen auch in ökologischer Haltung lediglich einen Wert von 2,3 Prozent (Weißmann, et al., 2009). Da keine verlässlichen Angaben zum genauen Kaloriengehalt des Fleisches der alten Rassen vorlagen, wurde dieser über den intramuskulären Fettgehalt geschätzt. Für Muskelfleisch moderner Mastschweine wurde dabei ein durchschnittlicher Kaloriengehalt von 1.600 kcal/kg und für Schweinefett von 8.820 kcal/kg angenommen. Nach dieser Schätzung enthält das Fleisch des Angler Sattelschweins in ökologischer Haltung 6 Prozent mehr Kalorien als Fleisch von

[86] Angenommen wurden folgende Anteile am Mastendgewicht: 15 Prozent Schinken, 11 Prozent Bauch, 7 Prozent Schulter, 6 Prozent Lachs, 61 Prozent Sonstige.

ökologisch gehaltenen Hybridmastschweinen und zwölf Prozent mehr als Fleisch von Hybridmastschweinen aus konventioneller Mast (vgl. Tabelle 192).

Tabelle 192: Geschätzter Kaloriengehalt von Schweinefleisch nach Schweinerasse und Wirtschaftsweise

Schweinerasse, Wirtschaftsweise	Intramuskulärer Fettgehalt [1)]	kcal/kg Muskelfleisch [2)]	Kalorien-gehalt [2)]
Hybridmastschwein, konventionell	1,0%	1.600	100%
Hybridmastschwein, ökologisch	2,3%	1.695	106%
Angler Sattelschwein, ökologisch	3,7%	1.797	112%
Piétrain x Angler Sattelschwein, ökologisch	3,2%	1.760	110%

Quellen: (1) Weißmann, et al., 2009; (2) Eigene Berechnung

Bei einem Mastendgewicht von ca. 120 kg wird mit modernen Mastschweinen in der konventionellen Landwirtschaft in der Regel eine Futterverwertung von 2,5 bis 2,9 kg pro Kilogramm Schlachtgewicht erreicht (LfL Bayern, o. J. a, S. 2; Bühler & Postler, 2004, S. 27; Lindermayer, et al., 2010, S. 7; Meyer & Vogt, 2016). Bei einem höheren Mastendgewicht sinkt die Futtereffizienz und beträgt z. B. bei einem Endgewicht von 140 kg ca. 3 kg/kg SG (Meyer, et al., 2016). In der ökologischen Schweinemast erreichen Mastschweine aus dem Bundeshybridzuchtprogramm (BHZP) eine Futterverwertung von ca. 3,0 kg/kg SG. Alte Schweinerassen, wie das Schwäbisch-Hällische Landschwein mit einer Futterverwertung von rund 3,3 kg/kg SG oder das Angler Sattelschwein mit rund 3,6 kg/kg SG, benötigen 10 - 20 Prozent mehr Futter pro Kilogramm Schlachtgewicht (Weißmann, et al., 2009). Kreuzungen von Piétrain und Schwäbisch-Hällischem Landschwein oder von Piétrain und Deutschem Edelschwein weisen mit 3,0 bzw. 3,1 fast die gleiche Futterverwertung auf wie Mastschweine aus dem Bundeshybridzuchtprogramm (Weißmann, et al., 2009). Allerdings ist bei ihnen auch der intramuskuläre Fettgehalt ähnlich gering (Weißmann, et al., 2009). Die geringere Futterverwertung alter Schweinerassen im Vergleich zu den Kreuzungen und Hybriden wird somit zumindest teilweise durch den höheren Fettgehalt ihres Fleisches kompensiert. Mit Blick auf den Kalorienertrag ist die Flächeneffizienz folglich nicht ganz proportional zur Futterwertung, die bisher üblicherweise in Kilogramm Futter pro Kilogramm Schlachtgewicht erfasst wird. Sinnvoller erscheint deshalb eine Bewertung der Futtereffizienz anhand des energetischen Erntefaktors, z. B. gemessen in MJ/MJ oder kcal/kcal.

Mit Blick auf die Flächeneffizienz ist der Kalorienertrag ebenfalls von höherer Aussagekraft als der in Kilogramm Fleisch gemessene Flächenertrag. Neben der Futtereffizienz ist der Nutzungsgrad der Schlachtausbeute ein entscheidender Faktor für die Flächeneffizienz. Wird von Verbrauchern nur Muskelfleisch nachgefragt, ist der Futteraufwand pro Kilogramm Fleisch um rund 45 Prozent höher als bei einer Nutzung der gesamten Schlachtausbeute. Heute ist die Nachfrage nach Innereien im deutschsprachigen Raum gering, Nieren oder Kutteln stehen

immer seltener auf dem Speiseplan. Der Deutsche Fleischerverband schätzt den Anteil des Innereienverzehrs am Fleischverzehr auf rund 0,2 Prozent (0,1 kg/Ea) (Deutscher Fleischer-Verband, 2019 S. 78). Deshalb werden Innereien großenteils in Länder mit einer höheren Nachfrage exportiert, etwa nach China und Russland.[87] Zu einem erheblichen Teil werden sie auch zu Wurst (z. B. Leberwurst, Zungenwurst, usw.) oder zu Tierfutter verarbeitet (Deutscher Fleischer-Verband, 2019 S. 79). Der Einfluss der Futtermischungen auf den Flächenbedarf der Fleischproduktion wurde anhand von fünf verschiedenen Futtermitteln und den mit ihnen erzielten Mastleistungen untersucht. Die Futtermischungen I und II nach Meyer und Vogt (2016) sind in Ihrer Zusammensetzung während der Mast identisch (Meyer, et al., 2016). Die unterschiedlichen Anteile am Gesamtfutterverbrauch ergeben sich lediglich aus der unterschiedlichen Mastdauer, da den Tieren während der Ferkelzucht (bis zum 25. Tag) eine andere Futterration verabreicht wird als während der eigentlichen Mast, die erst nach diesen 25 Tagen beginnt. Da Meyer & Vogt (2016) keine Angaben zur Ferkelfütterung machen, wurde ein Verbrauch von 23 kg Futtermittel pro Ferkel unterstellt. Dabei wurde eine Zusammensetzung entsprechend der Futtermischungen III und IV angenommen. Die Futtermischungen III und IV wurden von Lindermayer et al. (2010) übernommen (Lindermayer, et al., 2010 S. 3). Bei Futtermischung V nach Meyer & Vogt (2017) wurde auf Soja verzichtet. Die Futtermischungen I – IV enthalten zwischen 5 und 17 Prozent Sojaprodukte.

Tabelle 193: Zusammensetzung der Futtermischungen

Futtermischung	I	II	III	IV	Ø I-IV	V (ohne Soja)
Weizen	20,4%	20,0%	37,0%	37,1%	**28,2%**	18,5%
Gerste	17,6%	17,2%	41,3%	41,3%	**28,7%**	15,6%
Roggen	16,6%	16,9%	4,7%	4,7%	**11,0%**	17,7%
Triticale	16,6%	16,9%			**8,8%**	17,7%
Brotmehl						1,1%
Sojaöl	0,1%	0,1%	0,1%	0,1%	**0,1%**	
Sojaschrot	5,7%	5,4%	16,9%	16,8%	**10,9%**	
Rapsschrot	4,0%	4,1%			**2,1%**	6,2%
Sonnenblumenschrot						2,9%
Weizennachmehl	4,7%	4,8%			**2,5%**	5,2%
Weizenkleberfutter	7,1%	7,2%			**3,8%**	7,3%
Weizenkleie	7,2%	7,3%			**3,8%**	4,9%
Getreideschlempe						2,9%
SUMME	**100%**	**100%**	**100%**	**100%**	**100%**	**100%**
Quellen	(1; 2)	(1; 2)	(2)	(2)	(1; 2)	(3)

Quellen: (1) Meyer & Vogt, 2016; (2) Lindermayer, et al., 2010; (3) Meyer & Vogt, 2017

[87] Einer Brutto-Eigenerzeugung von 556 Megatonnen (Mt) und einer Einfuhr von 162 Mt stand ein Export von 674 Mt gegenüber (Deutscher Fleischer-Verband, 2019, p. 78).

Die Kenndaten der verschiedenen Fütterungsvarianten sind in Tabelle 194 dargestellt. Pro Schwein werden bis zur Schlachtung rund 257 bis 320 kg Futter benötigt. Die Mastendgewichte betragen bei diesen Fütterungsvarianten im Durchschnitt rund 123 (116 – 139) kg.

Tabelle 194: Fütterungsvarianten Schweinemast

Fütterungsvariante	I	II	III	IV	Ø I-IV	V (ohne Soja)
Endgewicht (kg)	121,7	138,8	117,2	116,1	123,5	123,3
Futteraufwand Ferkelzucht	23,0	23,0	23,9	22,0	23,0	23,0
Futteraufwand Mast (kg)	238,4	297,9	233,0	240,0	252,3	249,7
Futteraufwand Gesamt (kg)	[4] 261,3	[4] 320,9	256,9	262,0	275,3	272,6
Futteraufwand Mast (kg)	238,4	297,9	233,0	240,0	252,3	249,6
Futteraufwand Gesamt (kg)	261,3	320,9	256,9	262,0	275,3	272,6
Schlachtkörpergewicht (kg)	94,7	108,7	95,3	94,4	98,3	96,2
Fleischausbeute (kg)	65,3	75,0	65,8	65,1	67,8	66,4
Schlachtausbeute (%)	78%	78%	81%	81%	80%	78%
Quellen	(1; 2)	(1; 2)	(2)	(2)	(1; 2; 4)	(3)

Quellen: (1) Meyer & Vogt, 2016; (2) Lindermayer, et al., 2010; (3) Meyer & Vogt, 2017 (4) Eigene Berechnung

Aus diesen Werten ergeben sich für den Futteraufwand in der konventionellen Schweinemast Werte zwischen 2,7 und 3,0 kg pro Kilogramm Schlachtgewicht. Bei dem Vergleich zeigt sich, dass der Futteraufwand bei einem Verzicht auf Soja etwas höher liegt. Je nach Mastdauer bzw. Mastendgewicht ergibt sich ohne Soja ein Mehraufwand von ca. 1 bis 5 Prozent. Der Futteraufwand der ökologischen Schweinemast wurde anhand der Vergleichswerte für Schweine aus dem Bundeshybridzuchtprogramm (BHZP) nach Weißmann et al. (2009) geschätzt. Nach dieser Berechnung liegt er zwischen 3,3 und 3,6 kg/kg SG. Im Mittel kann man von einem Aufwand von 3,4 kg/kg SG ausgehen. Nutzt man anstelle von Schweinen aus dem Bundeshybridzuchtprogramm eine alte Schweinerasse, wie das Schwäbisch-Hällische Landschwein oder das Angler Sattelschwein, so liegt der Bedarf um 10 bzw. 20 Prozent höher, schätzungsweise also bei ca. 3,9 (3,6 – 4,3) kg/kg SG. Da Halter alter Schweinerassen zu einer längeren Mastdauer tendieren als in der Schweinemast ansonsten üblich ist, dürften Werte zwischen 3,9 und 4,3 realistisch sein. Dettmer (2011) gibt für das Bunte Bentheimer Schwein sogar eine Futterverwertung von 4,5 kg/kg an (Dettmer, 2011).

Tabelle 195: Futteraufwand der Schweinemast pro Kilogramm Schlachtgewicht (kg/kg SG)

Fütterungsvariante	I	II	III	IV	Ø I - IV	V (o. Soja)
Futteraufwand konventionell	2,76	2,95	2,70	2,77	2,80	2,83
Futteraufwand ökologisch, BHZP	3,34	3,57	3,26	3,36	3,39	3,43
Futteraufwand ökologisch, AS	4,01	4,29	3,92	4,03	4,06	4,12
Futteraufwand ökologisch, SH	3,68	3,93	3,59	3,70	3,72	3,78

BHZP = Bundeshybridzuchtprogramm; AS = Angler Sattelschwein, SH = Schwäbisch Hällisches Landschwein
Quelle: Eigene Berechnung n. Weißmann, et al., 2009

Betrachtet man nur das Muskelfleisch und lässt sämtliche Nebenprodukte unberücksichtigt, so steigen die Futteraufwendungen in der konventionellen Landwirtschaft auf Werte zwischen 3,9 und 4,3 kg pro Kilogramm Fleisch. In der ökologischen Landwirtschaft liegen die Werte in diesem Fall je nach Genotyp zwischen 4,7 und 6,2 kg/kg Fleisch.

Tabelle 196: Futteraufwand der Schweinemast pro Kilogramm Muskelfleisch ohne Berücksichtigung von Nebenprodukten (kg/kg Fleisch)

Fütterungsvariante	I	II	III	IV	Ø I - IV	V (o. Soja)
Futteraufwand konventionell	4,00	4,28	3,91	4,02	4,06	4,11
Futteraufwand ökologisch	4,84	5,18	4,73	4,87	4,91	4,97
Futteraufwand ökologisch, AS	5,81	6,22	5,68	5,85	5,89	5,97
Futteraufwand ökologisch, SH	5,33	5,70	5,21	5,36	5,40	5,47

Quelle: Eigene Berechnung n. Weißmann, et al., 2009

Auf Basis der jeweiligen Futteraufwendungen und Kaloriengehalte pro Kilogramm Schlachtgewicht ergeben sich in der konventionellen Schweinemast mit Hochleistungsmastschweinen Erträge von 2.188 bis 2.257 kg Schlachtgewicht pro Hektar, was etwa 3.173 bis 3.273 Mcal/ha entspricht. In der ökologischen Landwirtschaft fallen die Erträge mit 1.111 bis 1.128 kg SG pro Hektar um etwa 49 Prozent geringer aus. Aufgrund des höheren Kaloriengehaltes ökologisch gehaltener Mastschweine pro Kilogramm Schlachtgewicht erzielt die ökologische Landwirtschaft 53 Prozent des konventionellen Kalorienertrags pro Hektar. Folglich werden in der konventionellen Landwirtschaft etwa 3,1 m² für 1.000 kcal aufgewendet, während der Flächenbedarf der ökologischen Schweinemast ca. 5,8 m²/1.000 kcal beträgt. (Vgl. Tabelle 197)

Tabelle 197: Hektarertrag der Schweinemast mit Hybridmastschweinen (kg; kcal); Flächenbedarf je Kilogramm und je 1.000 kcal (m²) nach Fütterungsvariante und Wirtschaftsweise ohne Koppelprodukte.

Fütterungsvariante	Wirtschaftsweise	Ertrag in kg SG/ha	Ertrag in kcal/ha	m²/kg SG	m²/1.000 kcal
I	konventionell	2.257	3.272.518	4,43	**3,06**
III	konventionell	2.188	3.172.710	4,57	3,15
V	konventionell	2.194	3.181.609	4,56	3,14
I	ökologisch	1.119	1.705.992	8,94	5,86
III	ökologisch	1.128	1.732.523	8,87	**5,77**
V	ökologisch	1.111	1.705.992	9,00	5,86
Ø	**konventionell**	**2.213**	**3.208.946**	**4,52**	**3,12**
Ø	**ökologisch**	**1.119**	**1.714.835**	**8,93**	**5,83**

Quelle: Eigene Berechnung

Für eine Schätzung der Flächeninanspruchnahme unter Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte wurde vereinfachend eine energetische Nutzung des jeweiligen Strohaufkommens der Futterpflanzen angenommen. Unterstellt wurde dabei, dass nach Thrän et al. (2016, S. 294) bis zu 43 Prozent des Getreide-, Raps und Sojastrohs energetisch nutzbar sind. Das Strohaufkommen von Mais und Sonnenblume wurde dagegen als vollständig nutzbar eingeschätzt, da das Gärsubstrat anschließend als Dünger genutzt werden kann. Im Durchschnitt ergeben sich daraus für die konventionellen Futtermittel Flächengutschriften von ca. 15 Prozent und für die ökologischen Futtermittel von ca. 10 Prozent. Bei der Berücksichtigung der Koppelprodukte zeigt sich, dass die vergleichsweise geringen Stroherträge des Sojaanbaus so sehr ins Gewicht fallen, dass sich die Flächeneffizienz des sojafreien Futtermittels V im Vergleich deutlich verbessert und im ökologischen Anbau sogar die der anderen Futtermischungen knapp übersteigt. (Vgl. Tabelle 198)

Tabelle 198: Flächenbedarf der Schweinemast mit Hybridmastschweinen je Kilogramm und je 1.000 kcal (m²) nach Fütterungsvariante und Wirtschaftsweise unter Berücksichtigung von Koppelprodukten.

Fütterungsvariante	Wirtschaftsweise	m²/kg SG	m²/1.000 kcal
I	konventionell	3,79	2,61
III	konventionell	3,97	2,74
V	konventionell	3,82	2,64
I	ökologisch	8,10	5,27
III	ökologisch	8,12	5,29
V	ökologisch	8,08	5,26
Ø	**konventionell**	**3,86**	**2,66**
Ø	**ökologisch**	**8,10**	**5,27**

Quelle: Eigene Berechnung

Zum Vergleich mit heutigen Hochleistungsmastschweinen wurde beispielhaft der Flächenertrag einer auf hohe Futtereffizienz ausgerichteten Mast von Angler Sattelschweinen berechnet (Mastendgewicht von ca. 120 kg). Je 1.000 kcal werden bei konventioneller Produktion 3,33 m² benötigt. In der ökologischen Schweinemast beträgt der entsprechende Wert 6,26 m².

Tabelle 199: Hektarertrag der Schweinemast mit Angler Sattelschweinen (kg; kcal); Flächenbedarf je Kilogramm und je 1.000 kcal (m²) nach Fütterungsvariante und Wirtschaftsweise ohne Koppelprodukte.

Fütterungsvariante	Wirtschaftsweise	Ertrag in kg SG/ha	m²/kg SG	Ertrag in kcal/ha	m²/1.000 kcal
I	konventionell	1.881	5,32	3.062.735	3,27
III	konventionell	1.823	5,48	2.969.325	3,37
V	konventionell	1.829	5,47	2.977.654	3,36
I	ökologisch	933	10,72	1.596.662	6,26
III	ökologisch	940	10,64	1.609.400	6,21
V	ökologisch	926	10,80	1.584.754	6,31
Ø	**konventionell**	**1.844**	**5,42**	**3.003.238**	**3,33**
Ø	**ökologisch**	**933**	**10,72**	**1.596.939**	**6,26**

Quelle: Eigene Berechnung

Berücksichtigt man mögliche Koppelprodukte, in diesem Fall Stroh als Energieträger, so sinken die Werte auf 2,82 m² (konventionell) und 5,64 m² (ökologisch) pro 1.000 kcal (vgl. Tabelle 200).

Somit liegt der Flächenbedarf der Schweinemast pro Kilogramm bei einer Nutzung des Angler Sattelschweins um 20 Prozent über dem Bedarf, der bei der Mast moderner Mastschweine entsteht. Auf 1.000 kcal bezogen fällt die Differenz mit einem Mehraufwand von 7 Prozent jedoch deutlich geringer aus.

Tabelle 200: Flächenbedarf der Schweinemast mit Angler Sattelschweinen je Kilogramm und je 1.000 kcal (m²) nach Fütterungsvariante und Wirtschaftsweise unter Berücksichtigung von Koppelprodukten.

Fütterungsvariante	Wirtschaftsweise	m²/kg SG	m²/1.000 kcal
I	konventionell	4,43	2,72
III	konventionell	4,77	2,93
V	konventionell	4,59	2,82
I	ökologisch	9,53	5,57
III	ökologisch	9,75	5,69
V	ökologisch	9,69	5,66
Ø	**konventionell**	**4,59**	**2,82**
Ø	**ökologisch**	**9,66**	**5,64**

Quelle: Eigene Berechnung

Unterstellt man eine längere Mastdauer bis zu einem Mastendgewicht von 140 kg, wie sie in der ökologischen Schweinemast durchaus üblich ist, steigen die hier dargestellten Werte um ca. 8 Prozent auf ca. 10,4 m²/kg SG und 6,1 m²/1.000 kcal. Strebt man eine ökologische Tierhaltung an, muss man also insgesamt mit einem Flächenbedarf von 5,3 bis 6,1 m² je 1.000 kcal rechnen.

10.5.2.4.3 Einfluss des Energieaufwands auf den Flächenbedarf der Schweinemast

10.5.2.4.3.1 Energieaufwand Futterbedarf

Die Schätzung des Energiebedarfs wurde am Beispiel der Fütterungsvariante I durchgeführt. Der Hektarertrag beträgt in diesem Fall konventionell ca. 2.257 kg SG und ökologisch ca. 1.119 kg SG. Konventionell werden dabei 6,23 t pflanzliche Futtermittel aufgewendet, ökologisch 3,74 t. Der Energiebedarf pro Tonne Futtermittel nach Futterpflanze wurde anhand von Angaben des KTBL (2019) zum Energiebedarf des Futterbaus geschätzt (vgl. Tabelle 201).

Tabelle 201: Energieaufwand der konventionellen Schweinehaltung im Futterbau

Futterpflanze	Futterbau Insgesamt [1] (kWh/ha)	Futterbau Diesel [1] (Liter/ha)	Ertrag Futterbau [2] (t/ha)	Energiebedarf pro Hektarertrag [3] (kWh/2.257 kg SG)	Energiebedarf pro kg SG [3] (kWh/kg SG)
Weizen	7.913	81,8	7,7	2.275	1,1
Gerste	6.566	77,7	7,0	913	0,5
Roggen	5.632	75,9	5,7	881	0,5
Triticale	5.664	76,1	6,4	797	0,4
Soja/Sojaöl	4.274	89,7	3,2	388	0,2
Raps	5.279	83,9	3,8	292	0,2
SUMME				**5.546**	**2,81**

Quellen: (1) KTBL, 2019; (2) Eigene Berechnung n. div. Quellen, vgl. Abschnitt 10.5.1 (3) Eigene Berechnung

Für den Anbau der in der konventionellen Mast benötigten 6,23 t Futter benötigt man im konventionellen Futterbau 5.546 kWh Endenergie. Pro Kilogramm Schlachtgewicht ergibt sich daraus ein Energiebedarf von 2,81 kWh/kg SG. Rund 12 Prozent des Energieaufwandes entfallen auf den Dieselverbrauch. Im Anbau der hier dargestellten Futtermittel erreicht die ökologische Landwirtschaft etwa 63 Prozent der Erträge der konventionellen Landwirtschaft und benötigt dafür etwa 55 Prozent des Energieaufwandes der konventionellen Produktion. Für die Bereitstellung der benötigten 3,74 t Futter werden somit rund 2.453 kWh benötigt. Pro Kilogramm Schlachtgewicht ergibt sich somit ein Energieaufwand von ca. 2,91 kWh (vgl. Tabelle 202). Rund 25 Prozent des Energieaufwandes entfallen auf den Dieselverbrauch.

Tabelle 202: Energieaufwand der ökologischen Schweinehaltung im Futterbau

Futterpflanze	Futterbau Insgesamt [1] (kWh/ha)	Futterbau Diesel [1] (Liter/ha)	Ertrag Futterbau [2] (t/ha)	Energiebedarf pro Hektarertrag [2] (kWh/1.119 kg SG)	Energiebedarf pro kg SG [2] (kWh/kg SG)
Weizen	3.619	83,0	4,4	934	1,1
Gerste	3.141	79,6	3,9	402	0,5
Roggen	2.988	77,7	3,4	408	0,5
Triticale	3.299	75,2	3,7	424	0,5
Soja/Sojaöl	3.439	96,4	2,8	193	0,2
Raps	2.204	88,6	2,2	92	0,1
SUMME				**2.453**	**2,91**

Quellen: (1) KTBL, 2019; (2) Eigene Berechnung

Der Flächenbedarf der Dieselbereitstellung wurde anhand des Energieertrags des Rapsanbaus (Öl, Stroh und Presskuchen) geschätzt. Da der sonstige Energiebedarf nicht nach Energieträgern differenziert wird, wurde vereinfachend Strom als Energieträger angenommen. Um den Bedarf an Rapsdiesel zu decken, werden in der konventionellen Landwirtschaft rund 132 m² LNF benötigt. Um den Strombedarf zu decken, werden rund 123 m² PV-Freiflächenanlage benötigt. Der Flächenbedarf des Futterbaus erhöht sich dadurch um 2,6 Prozent.

In der ökologischen Landwirtschaft werden 234 m² Rapsanbaufläche und 55 m² PV-Freiflächenanlage benötigt. Der Flächenbedarf des Futterbaus erhöht sich somit um 2,9 Prozent.

10.5.2.4.3.2 Energieaufwand der Stallhaltung

Der Stallbetrieb während der Ferkelaufzucht nimmt nach Feller (2011) rund 1 bis 4 kWh Strom pro Ferkel in Anspruch. In der Schweinemast werden 15 - 40 kWh Strom pro Mastschwein benötigt (Feller, 2011 S. 3). Die Mastdauer einschließlich Ferkelaufzucht beträgt ca. 127 (120 – 130) Tage (Meyer & Vogt, 2016; Lindermayer, et al., 2010; Meyer & Vogt, 2017). Unterstellt man in der ökologischen Schweinemast eine Mastdauer einschließlich Ferkelaufzucht von ca. 8 Monaten, so ist der Energieaufwand pro Schwein dementsprechend größer.

Der auf Basis dieser Annahmen geschätzte mittlere Gesamtenergiebedarf der Mastschweinehaltung pro Kilogramm Schlachtgewicht ist in Tabelle 119 dargestellt.

In der ökologischen Landwirtschaft werden pro Kilogramm Schlachtgewicht etwa 11 Prozent mehr Energie benötigt, was vor allem auf die längere Mastdauer und die damit verbundene Dauer der Stallhaltung zurückzuführen ist. Eine Schätzung für alte Schweinerassen, die keinen beheizten Stall benötigen, wurde nicht durchgeführt.

Tabelle 203: Geschätzter Energiebedarf der Schweinehaltung nach Wirtschaftsweise (kWh/kg SG)

Wirtschafts-weise	Futterbau, Diesel	Futterbau, Sonstige EE	Stallbetrieb, Strom	SUMME
konventionell	0,35	2,46	0,32	**3,12**
ökologisch	0,72	2,19	0,55	**3,46**

Quelle: Eigene Berechnung

Für den Stallbetrieb werden nach der vorliegenden Schätzung in der konventionellen Schweinemast rund 15,9 m² benötigt, in der ökologischen Mast rund 13,6 m². Diese Werte beziehen sich jeweils auf den Hektarertrag Schlachtgewicht. Die Erhöhung des Flächenbedarfs um 0,16 bzw. 0,14 Prozent, die aus dem Stallbetrieb resultiert, ist somit praktisch vernachlässigbar.

10.5.2.4.4 Flächenbedarf des Schweinefleischkonsums

Berücksichtigt man, dass in Deutschland fast ausschließlich Muskelfleisch verzehrt wird, stehen potenziell 31 Prozent des Schlachtgewichtes für den Export oder für andere Verwendungen zur Verfügung. Da das Muskelfleisch schätzungsweise drei Viertel der gesamten Kalorien enthält, entfallen drei Viertel der Flächeninanspruchnahme auf 69 Prozent des produzierten Schlachtgewichts. Legt man unter Berücksichtigung von Koppelprodukten eine ökologische Haltung von Hybridmastschweinen mit einer Fütterung nach der Variante I zugrunde, entfällt somit auf ein Kilogramm Muskelfleisch ein Futterflächenbedarf von 8,4 m², während für ein Kilogramm der sonstigen Teilstücke im Durchschnitt ein Futterflächenbedarf von 5,9 m² anzurechnen ist. In der konventionellen Mast liegen die entsprechenden Werte bei 4,2 m² und 2,9 m². Geht man nach DVF (2018, S.78) von einem Gesamtverbrauch von rund 50 kg Schweinefleisch pro Person aus und unterstellt einen vollständigen Export der sonstigen Teilstücke mit anschließendem Verzehr in den Zielländern, so liegt der Futterflächenbedarf in Deutschland somit zwischen 209 m² pro Einwohner bei konventioneller Produktion und 422 m² pro Einwohner bei ökologischer Produktion. Würde der Anteil der sonstigen Teilstücke am Verbrauch ihrem Anteil am Aufkommen entsprechen, so lägen die entsprechenden Werte pro Einwohner bei 189 m² (konventionell) bzw. 382 m² (ökologisch).

Berücksichtigt man den Energiebedarf und unterstellt eine Energiebereitstellung aus erneuerbaren Quellen, so sind die genannten Werte, wie zuvor erläutert, um 3,2 Prozent (konventionell) bzw. 3,7 Prozent (ökologisch) zu erhöhen.

10.5.2.5 Geflügelhaltung

Die Geflügelhaltung liefert Fleisch, Eier, Daunen und diverse Nebenprodukte, wie z. B. Futtermittel, die u. a. in der Fischzucht eingesetzt werden. Der Verbrauch von Geflügelfleisch ist in Deutschland von 19,2 kg im Jahr 2014 auf 20,9 kg im Jahr 2017 gestiegen. Der Anteil am gesamten Fleischverbrauch betrug 23,8 Prozent (BVDF, 2018). Am Geflügelfleischverbrauch

hatte Hühnerfleisch mit 66,4 Prozent mit Abstand den größten Anteil. 28,2 Prozent entfielen auf Puten und sonstiges Geflügel, auf Enten 3,7 Prozent und auf Gänse 1,7 Prozent (Thobe, 2018 S. 5). Die Schlachtungen von Jungmasthühnern stiegen im Zeitraum 2005 bis 2017 um 71 Prozent (Thobe, 2018 S. 4), an der Bruttoeigenerzeugung hatten Masthühner einen Anteil von 78,9 Prozent (Thobe, 2018 S. 5). Der Eiermarkt wird ebenfalls klar von Hühnereiern dominiert. Die Schätzung der Flächenbedarfe der Geflügelfleisch- und Eiererzeugung wurde daher anhand des Beispiels der Hühnerhaltung durchgeführt.

In der Hühnerhaltung kommen heute fast ausschließlich sogenannte Hybridhühner zum Einsatz. So werden in der Fleischproduktion durch Züchtung optimierte Masthybride mit einem hohen Fleischzuwachs eingesetzt, während in der Eierproduktion sogenannte Legehybride eingesetzt werden. Bei diesen sogenannten Hybriden handelt es sich um Kreuzungen, die jeweils für einen dieser beiden Zwecke optimiert wurden. Zwischen Legeleistung und Fleischansatz gibt es einen genetischen Widerspruch. „Dies bedeutet, dass die Zucht auf reine Legeleistung den Fleischansatz reduziert und umgekehrt“ (Proplanta/FBN, 2016). Die Fleischproduktion mit den männlichen Tieren der Legehybride ist so gering, dass sie noch am ersten Lebenstag getötet und für die Heimtier-Futtermittelproduktion genutzt werden (Urselmans, et al., 2015). Da dies in der Gesellschaft zunehmend auf Ablehnung trifft, wird aktuell an der Optimierung sogenannter Zweinutzungshühner gearbeitet, mit denen ein Kompromiss zwischen Legeleistung und Fleischproduktion gefunden werden soll. Zweinutzungshühner liefern sowohl einen guten Fleischansatz als auch eine gute Legeleistung, weisen dabei jedoch eine deutlich geringere Futtereffizienz auf als die spezialisierten Zuchtlinien.

10.5.2.5.1 Masthähnchenhaltung

10.5.2.5.1.1 Freilandhaltung

Die Freilandhaltung hat in Deutschland nur einen geringen Anteil an der Hähnchenmast. In der extensiven Langmast von Hähnchen im Freiland wird jedoch „eine für den Eigenbedarf und die Direktvermarktung interessante Nische der Geflügelmast“ gesehen (Kästner, 2016). Ihr Ziel ist die Erzeugung qualitativ hochwertiger Produkte. Neben einer Getreideration nehmen die Tiere im Freiland tierisches Eiweiß (z. B. Regenwürmer, Nacktschnecken) und Grünfutter auf. Laut Kästner erreichen männliche Masthähnchen in der 20. Lebenswoche ein Lebendgewicht von 6,0 kg, die Hennen kommen auf ein Gewicht von 5,0 kg. Die Schlachtkörpergewichte variieren bei einer Schlachtausbeute von 69 Prozent zwischen 3,5 und 4,0 kg. „Aus einem 4 kg schweren Schlachtkörper eines Hahnes ergeben sich ca. 1,3 kg Keulen (mit Knochen), 1,2 kg Brustfilet und 1,2 kg Geflügelklein (Hühnersuppe), 80 g Leber und 150 g Fett“. (Kästner, 2016)

10.5.2.5.1.2 Stallhaltung

In der konventionellen Haltung ist eine ganzjährige Stallhaltung in zwangsgelüfteten Ställen die Regel. Die Mastdauer beträgt zwischen 32 und 56 Tage, wobei die Kurzmast mit ca. 34 Tagen das häufigste Mastverfahren ist, die verlängerte Mast beträgt 39 Tage. In der ökologischen Hähnchenmast beträgt die Mindestmastdauer 81 Tage. (Bioland e. V., 2013; KTBL, 2009, S. 763; KTBL, 2015, S. 543) Pro Kilogramm Lebendgewicht werden in der Kurzmast 1,55 kg, in der verlängerten Mast 1,77 kg und in der Langmast (ökologisch) 3,00 (2,8 – 3,2) kg Futter benötigt (KTBL, 2009, S. 764; Bremer & Günther, 2016, S. 8). Die Schlachtausbeute liegt in der Regel zwischen 60 und 74 Prozent, sodass bei konventioneller Haltung mit einem Futteraufwand von 2,1 bis 2,2 kg pro Kilogramm Schlachtgewicht gerechnet werden kann. Der Anteil der wertvollen Teilstücke Brust und Schenkel liegt bei etwa 54 bis 58 Prozent des Schlachtgewichts. In der ökologischen Haltung kann man einen Futteraufwand von ca. 4,1 kg/kg SG erwarten. (KTBL, 2009, 764; Simon, I., 2011)

Für die Schätzung des Futterflächenbedarfs wurde eine Futtermischung für Hähnchen nach Angaben der LWK Niedersachsen gewählt (Hiller, 2018), deren Zusammensetzung in Tabelle 204 dargestellt ist.

Tabelle 204: Futtermittelbedarf Masthähnchen (kg/kg SG)

Futtermittel	Anteil [1)]	konventionell [2)]	ökologisch [2)]
Mais	40%	0,86	1,63
Weizen	27%	0,58	1,10
Gerste	5%	0,11	0,20
Sojaextraktionsschrot	20%	0,43	0,82
Sojaöl	3%	0,05	0,10
Bierhefe	3%	0,06	0,12
Vormischung	2%	0,04	0,08
SUMME	**100%**	**2,15**	**4,06**

Quellen: (1) Hiller, 2018 (2) Eigene Berechnung

Auf Basis des Futterbedarfs und der Erträge im Futterbau wurde der Futterflächenbedarf der Hähnchenmast abgeschätzt. Bleiben mögliche Koppelprodukte unberücksichtigt, ergibt sich für die konventionelle Hähnchenmast ein Flächenbedarf von 3,4 m² pro Kilogramm Schlachtgewicht. Unter Berücksichtigung der Koppelprodukte – in diesem Beispielfall Stroh als Energieträger – sinkt die Flächeninanspruchnahme auf 2,6 m²/kg SG. In der ökologischen Landwirtschaft liegen die entsprechenden Werte bei 9,2 m²/kg (ohne Koppelprodukte) und 8,0 m² (unter Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte). Wenn das Stroh der Futterpflanzen jeweils energetisch genutzt wird, werden in der ökologischen Landwirtschaft somit 207 Prozent mehr Futterfläche in Anspruch genommen als in der konventionellen Landwirtschaft.

Tabelle 205: Futterflächenbedarf der Masthähnchenzucht nach Wirtschaftsweise und Berücksichtigung von Koppelprodukten (m²/kg SG)

Futtermittel	konventionell ohne Koppelprodukte	Ökologisch ohne Koppelprodukte	konventionell inkl. Koppelprodukte	Ökologisch inkl. Koppelprodukte
Mais	0,87	1,45	0,49	1,07
Weizen	0,76	1,32	0,63	1,19
Gerste	0,16	0,28	0,13	0,26
Sojaextraktionsschrot	1,37	1,54	1,14	1,44
Sojaöl	0,17	0,19	0,14	0,18
Vormischung	0,07	0,10	0,05	0,08
SUMME	**3,39**	**9,22**	**2,60**	**7,97**

Quelle: Eigene Berechnung

Die Hektarerträge fallen dementsprechend sehr unterschiedlich aus: Mit mehr als 2,95 t Fleisch pro Hektar übertrifft die konventionelle Hähnchenmast die Erträge der ökologischen Hähnchenmast von knapp 1,09 t/ha um 172 Prozent (vgl. Tabelle 206). Davon handelt es sich bei 1,59 t/ha (konventionell) bzw. 0,59 t/ha (ökologisch) um wertvolles Fleisch (Brust & Schenkel)

Tabelle 206: Fleischertrag der Hähnchenmast pro Hektar LNF nach Wirtschaftsweise (kg/ha)

Produkt	Wirtschaftsweise	
	konventionell	ökologisch
Fleisch (kg/ha)	2.946	1.085

Quelle: Eigene Berechnung

Für die Schätzung des Kalorienertrags pro Hektar wurde ein mittlerer Kaloriengehalt von 1.100 kcal pro Kilogramm rohes Hühnerfleisch angenommen. Fleisch von ökologisch gemästeten Hähnchen könnte aufgrund der deutlich längeren Mastdauer von mindestens 81 Tagen einen höheren Kaloriengehalt aufweisen. Hierzu lagen jedoch keine verlässlichen Daten vor. Da den Tieren in der ökologischen Mast aber auch mehr Auslauf geboten wird, dürfte der Unterschied ohnehin gering ausfallen, weshalb für die vorliegende Berechnung der gleiche Kaloriengehalt wie in der konventionellen Produktion angenommen wurde. Damit ergibt sich in der konventionellen Landwirtschaft ein Kalorienertrag von 3.241 Mcal/ha. Der geschätzte Ertrag der ökologischen Landwirtschaft liegt bei 1.193 Mcal/ha. Der Flächenbedarf der konventionellen Hähnchenmast beträgt somit 3,1 m² pro 1.000 kcal. Unter Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte (Stroh für energetische Nutzung) sinkt der Bedarf auf 2,4 m²/1.000 kcal. In der ökologischen Hähnchenmast liegen die entsprechenden Werte bei 8,4 und 7,2 m²/1.000 kcal (vgl. Tabelle 207). Die ökologische Hähnchenmast erreicht beim Kalorienertrag folglich ca. 37

Prozent der Flächeneffizienz der konventionellen Hähnchenmast. Berücksichtigt man mögliche Koppelprodukte, werden ca. 33 Prozent der Flächeneffizienz erreicht. Hühnerfleisch aus der Masthähnchenhaltung weist somit unter allen untersuchten Lebensmitteln die größte Ertragsdifferenz zwischen konventioneller und ökologischer Landwirtschaft auf.

Tabelle 207: Flächeninanspruchnahme der Hähnchenmast je 1.000 kcal nach Wirtschaftsweise und Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte (m²/1.000 kcal)

Kennwert	Wirtschaftsweise und Koppelproduktnutzung			
	konventionell ohne Koppelprodukte	ökologisch ohne Koppelprodukte	konventionell inklusive Koppelprodukte	ökologisch inklusive Koppelprodukte
Flächenbedarf in m²/1.000 kcal	3,09	8,38	2,36	7,24

Quelle: Eigene Berechnung

Die Flächeneffizienz der Mast hängt zudem, wie auch bei anderen Tierarten, in hohem Maße davon ab, ob und wie Innereien der Tiere genutzt werden. Werden, wie in Deutschland üblich, nur die wertvollen Teile (Brust und Schenkel) genutzt, sinkt der für die menschliche Ernährung relevante Kalorienertrag pro Hektar um rund zwei Fünftel. Mit Blick auf die globale Ernährungssicherheit ist es daher sinnvoll, einen möglichst großen Anteil der für den Verzehr geeigneten Innereien als Lebensmittel zu nutzen anstatt ihn stofflich oder für die Tierfutterproduktion zu verwenden.

10.5.2.5.1.3 Zweinutzungshuhn

Die Nutzung von Zweinutzungshühnern stellt, wie bereits erläutert, einen Kompromiss zwischen Mast- und Legeleistung dar. Die Mastleistung von drei verschiedenen Zweinutzungshühnern wurde durch Urselmans et al. (2015) im Rahmen einer Leistungsprüfung verglichen. Dabei handelte es sich um die Züchtungen Lohmann Dual (LD), Walesby Specials (WS) Dominant Red Barred (DRB). Das durchschnittliche Zielgewicht der männlichen Tiere betrug 2,3 kg. (Urselmans, et al., 2015) Die dabei durch Urselmans et al. festgestellten Mastleistungskennzahlen sind in Tabelle 124 dargestellt.

Tabelle 208: Mastleistungskennzahlen männlicher Zweinutzungshühner in der konventionellen Landwirtschaft (Urselmans, et al., 2015)

Mastleistungskennzahlen	Züchtung		
	LD	WS	DRB
Lebendgewicht (g)	3.165	2.423	1.818
Schlachtgewicht (g)	2.305	1.744	1.235
Ausschlachtung (%)	73,0	72,0	67,9
Brust (g)	441	294	170
Schenkel (g)	777	583	430
Anteil wertvolle Teilstücke (%)	52,9	50,3	48,6
Fleischausbeute (kg)	1,22	0,9	0,6
Futterverbrauch (kg)	7,0	6,7	5,2
Futterverwertung LG (kg/kg Lebendgewicht)	2,21	2,77	2,88
Futterverwertung SG (kg/kg Schlachtgewicht) (B)	3,04	3,84	4,21

Quellen: Urselmans, et al., 2015; (B) Eigene Berechnung.

Da keine Daten zur ökologischen Mast von Zweinutzungshühnern vorlagen, wurde das gleiche Verhältnis angenommen, das sich zwischen konventioneller zu ökologischer Mast von Hybridmasthähnchen gezeigt hat. Der Futterbedarf der ökologischen Mast je Kilogramm Fleisch liegt demnach um 92 Prozent über dem Bedarf in der konventionellen Mast, woraus sich für Hühner der Züchtung Walesby Specials (WS) ein Wert von 7,39 kg Futter je kg Fleischansatz ergibt. Bei konventioneller Haltung ergibt sich daraus ein Flächenbedarf von 6,0 m² pro Kilogramm Fleischansatz, in der ökologischen Haltung von 16,7 m²/kg SG. Die Fleischerträge liegen somit konventionell bei 1,66 t/ha und ökologisch bei 0,60 t/ha.

Tabelle 209: Fleischerträge der Zweinutzungshähnchenmast (kg SG/ha)

Fleischertrag	Wirtschaftsweise	
	konventionell	ökologisch
Ertrag in kg SG/ha	1.657	599

SG=Schlachtgewicht
Quelle: Eigene Berechnung

Die Kalorienerträge liegen mit 1.823 Mcal/ha (konventionell) bzw. 659 Mcal/ha (ökologisch) um ca. 45 Prozent unter denen der Hybridhähnchenmast. Daraus ergibt sich ein Flächenbedarf von 5,5 m²/1.000 kcal (konventionell) bzw. von 15,2 m²/1.000 kcal (ökologisch). Berücksichtigt man eine energetische Nutzung der Koppelprodukte (Stroh), so sinkt der Flächenbedarf in der konventionellen Landwirtschaft auf 4,2 m²/1.000 kcal und in der ökologischen Landwirtschaft auf 13,1 m²/1.000 kcal.

Tabelle 210: Flächenbedarf der Fleischproduktion mit Zweinutzungshühnern je Kilogramm Schlachtgewicht und je 1.000 kcal nach Wirtschaftsweise und Koppelproduktnutzung (m²)

Flächenbedarfskennwert	Wirtschaftsweise			
	konventionell ohne Koppelprodukte	ökologisch ohne Koppelprodukte	konventionell inklusive Koppelprodukte	ökologisch inklusive Koppelprodukte
Flächenbedarf in m²/kg SG	6,03	16,68	4,61	14,42
Flächenbedarf in m²/1.000 kcal	5,49	15,17	4,19	13,11

Quelle: Eigene Berechnung

Der mit Blick auf das Tierwohl als erstrebenswert eingeschätzte Umstieg von spezialisierten sogenannten Hybridhühnern auf Zweinutzungshühner ist mit einem erheblichen Effekt auf die Flächeneffizienz der Hühnerfleischproduktion verbunden.

10.5.2.5.1.4 Einfluss des Energieaufwands auf den Flächenbedarf der Hähnchenmast

10.5.2.5.1.4.1 Energieaufwand Futterbau

Der berechnete Energiebedarf der Hühnermast für den Futterbau pro Kilogramm Schlachtgewicht beträgt in der konventionellen Landwirtschaft 2,37 kWh. 12 Prozent des Energiebedarfs entfallen auf den Dieselverbrauch. Die Anteile der einzelnen Futterpflanzen sind in Tabelle 211 dargestellt. Auch hier wurde wieder unterstellt, dass der Dieselbedarf mit Rapsöl und der sonstige Energiebedarf mit Strom aus Photovoltaik-Freiflächenanlagen gedeckt werden. Der Flächenbedarf steigt in diesem Fall um 2,7 Prozent.

Tabelle 211: Energieaufwand der konventionellen Hühnermast im Futterbau

Futterpflanze	Futterbau Insgesamt [1] (kWh/ha)	Futterbau Diesel [1] (Liter/ha)	Ertrag Futterbau [2] (t/ha)	Energiebedarf pro Hektarertrag [2] (kWh/2.946 kg SG)	Energiebedarf pro kg SG [2] (kWh/kg SG)
Mais	11.080	82,5	9,9	2.854	0,97
Weizen	7.913	81,8	7,7	1.774	0,60
Gerste	6.566	77,7	7,0	300	0,10
Sojaprodukte	4.274	89,7	3,2	1.935	0,65
Vormischung [3]				122	0,04
SUMME				**6.986**	**2,37**

Quellen: (1) KTBL, 2019 (2) Eigene Berechnung (3) Schätzung (Mittelwert sonstiger Futtermittel)

In der ökologischen Hähnchenmast beträgt der Energiebedarf des Futterbaus ca. 3,91 kWh/kg SG. Etwa 21 Prozent des Energiebedarfs entfallen auf den Dieselverbrauch. Die Anteile der einzelnen Futterpflanzen sind in Tabelle 212 dargestellt. Der Flächenbedarf steigt durch die Nutzung erneuerbarer Energien um 3,3 Prozent.

Tabelle 212: Energieaufwand der ökologischen Hühnermast im Futterbau

Futterpflanze	Futterbau Insgesamt [1)] (kWh/ha)	Futterbau Diesel [1)] (Liter/ha)	Ertrag Futterbau [2)] (t/ha)	Energiebedarf pro Hektarertrag [2)] (kWh/1.085 SG)	Energiebedarf pro kg SG [2)] (kWh/kg SG)
Mais	6.034	97,7	6,0	1.796	1,66
Weizen	3.619	83,0	4,4	978	0,90
Gerste	3.141	79,6	3,9	180	0,17
Sojaprodukte	3.439	96,4	2,8	1.21	1,13
Vormischung [3)]				66	0,06
SUMME				**4.242**	**3,91**

Quellen: (1) KTBL, 2019 (2) Eigene Berechnung (3) Schätzung (Mittelwert sonstiger Futtermittel)

Setzt man den Endenergieaufwand des Futterbaus zum Energiegehalt des produzierten Fleisches ins Verhältnis, liegt das Input-Output Verhältnis im konventionellen System bei 0,54 und im ökologischen System bei 0,33. In beiden Fällen entsteht sozusagen ein erheblicher Energieverlust. Die Differenz zwischen konventioneller und ökologischer Haltung ist vor allem auf die unterschiedliche Mastdauer und den zusätzlichen Auslauf der Masthähnchen in der ökologischen Haltung zurückzuführen, die zu einer schlechteren Umsetzung von Futter in Fleisch (Futterverwertung) führen.

Tabelle 213: Verhältnis von Energie-Input zu Energie-Output

Wirtschaftsweise	Input (MJ/kg)	Output (MJ/kg)	Erntefaktor
konventionell	8,54	4,61	0,54
ökologisch	14,08	4,61	0,33

Quelle: Eigene Berechnung

10.5.2.5.1.4.2 Energieaufwand Stallhaltung

Der Energieaufwand der Stallhaltung in der Hähnchenmast konnte mangels Datengrundlage nicht berechnet werden. Es ist aber wahrscheinlich, dass er einen ähnlich geringen Einfluss auf den Flächenbedarf der Fleischproduktion hat, wie im Falle der Milchvieh- und Schweinehaltung.

10.5.2.5.2 Legehennenhaltung

10.5.2.5.2.1 Hybridlegehennen

Etwa 11 Prozent der Legehennen in Deutschland werden nach Bräunig (2019) ökologisch gehalten und erbringen rund 10 Prozent der Legeleistung (Bräunig, 2019). Nach Angaben der LWK Nordrhein-Westfalen und des KTBL beträgt die Differenz in der Produktion vermarktungsfähiger Eier rund 13 Prozent. In der konventionellen Legehennenhaltung kann man mit ca. 285 vermarktungsfähigen Eiern pro Henne und Jahr rechnen, was etwa 18,8 kg Eimasse (EM) entspricht (LWK NRW, 2011). In der ökologischen Haltung sind pro Henne etwa 249 vermarktungsfähige Eier mit einer Eimasse von 16,2 kg zu erwarten (KTBL, 2010 S. 646). Der Futterverbrauch beträgt konventionell ca. 43,2 kg pro Henne und Jahr, ökologisch liegt er bei ca. 45,0 kg pro Henne und Jahr. Daraus ergibt sich eine Futterverwertung von 2,3 kg/kg (konventionell) bzw. 2,8 kg/kg (ökologisch). (LWK NRW, 2011; KTBL, 2011, S. 646)

Tabelle 214: Kennwerte Eiproduktion der Legehennenhaltung nach Wirtschaftsweise

Kennwerte	Wirtschaftsweise	
	konventionell [1)]	ökologisch [2)]
Eier je Durchschnittshenne (Stück/Jahr)	317	266
Ø Eigewicht (g)	65,9	65,0
Vermarktungsfähige Eier je DH (Stück/Jahr)	285	249
Eimasse vermarktungsfähige Eier (kg)	18,81	16,18
Nutzungsdauer (Tage)	504	358
Futterverbrauch pro DH (kg/Jahr)	43,2	45,0
Futterverbrauch (g/Tier/Tag)	118,4	123,2
Futterverwertung (kg/kg vermarktungsfähige Eimasse)	2,30	2,78

DH = Durchschnittshenne
Quellen: (1) LWK NRW, 2011; (2) KTBL, 2010,S. 646/656

Die Kennwerte, die der Berechnung der Fleischproduktion zugrunde gelegt wurden, sind in Tabelle 215 dargestellt. Pro Henne und Jahr kann man konventionell etwa 0,44 kg Fleisch erwarten, ökologisch etwa 0,32 kg.

Tabelle 215: Kennwerte Fleischproduktion der Legehennenhaltung nach Wirtschaftsweise

Kennwerte	Wirtschaftsweise	
	konventionell 1)	ökologisch 2)
Lebendgewicht (g)	2.243	2.000
Ausschlachtung (%)	72,1	65,0
Schlachtgewicht (g)	1.617	1.300
Fleischausbeute (%)	52	52
Nutzungsdauer (Tage)	504	365
Fleischausbeute (kg SG/Jahr)	1,17	1,30
Ausbeute wertvolles Fleisch (kg/Jahr)	0,84	1,04

Quellen: (1) LWK NRW, 2011; (2) KTBL, 2010, S. 646/656

Für die Berechnung des Flächenbedarfs wurde das Legehennen-Alleinfutter nach Angaben der LWK Nordrhein-Westfalen gewählt, das den Legeleistungen zugrunde liegt, auf welchen die in Tabelle 214 dargestellten Kennwerte beruhen. Seine Zusammensetzung ist in Tabelle 216 dargestellt.

Tabelle 216: Zusammensetzung des gewählten Legehennen-Alleinfutters

Futtermittel	Anteil	Bedarf konventionell	Bedarf ökologisch
Mais	40 %	0,91	1,11
Weizen	15 %	0,34	0,41
Gerste	5 %	0,11	0,14
Sojaextraktionsschrot	12 %	0,27	0,33
Sojaöl	12 %	0,06	0,07
Sonnenblumenschrot	3 %	0,27	0,33
Bierhefe	3 %	0,07	0,08
Steinkalk	8 %	0,18	0,22
Vormischung	2 %	0,05	0,06

Quelle: LWK NRW, 2011;

Ohne Berücksichtigung von Koppelprodukten aus dem Futterbau wird aufgrund der unterstellten Futterverwertung und der Erträge der Futterpflanzen in der konventionellen Landwirtschaft mit Hybrid-Legehennen (Braune Hybriden) ein Eimasseertrag von 2,64 t EM/ha und ein Fleischertrag von 0,17 t/ha erzielt. In der ökologischen Landwirtschaft erreicht man 1,65 t Eimasse und 0,14 t Fleisch pro Hektar.

Tabelle 217: Hektarerträge der Legehennenhaltung nach Wirtschaftsweise (kg und kcal) ohne Koppelprodukte aus dem Futterbau

Wirtschaftsweise	Ei (kg/ha)	Fleisch (kg SG/ha)	Ei (kcal/ha)	Fleisch (kcal/ha)
konventionell	2.643	165	4.254.438	180.957
ökologisch	1.645	132	2.647.969	145.329

Quelle: Eigene Berechnung

Pro Kilogramm vermarktungsfähige Eimasse werden in der konventionellen Landwirtschaft 3,6 m² LNF benötigt. In der ökologischen Landwirtschaft sind 5,8 m²/kg erforderlich. Fleisch aus der Legehennenhaltung (z. B. Suppenhuhn) ist mit einer vergleichsweise geringen Flächeninanspruchnahme verbunden. Der Flächenbedarf der Erzeugung von 1.000 kcal liegt in der konventionellen Legehennenhaltung somit bei 2,25 m², in der ökologischen Haltung beträgt er 3,58 m². Die Fleischnutzung (Schlachtgewicht) trägt zwischen 4 und 5 Prozent zum gesamten Kalorienertrag bei.

Tabelle 218: Futterflächenbedarf der Legehennenhaltung je Produkt und je 1.000 kcal nach Wirtschaftsweise ohne Koppelprodukte aus dem Futterbau

Wirtschaftsweise	Flächenbedarf je kg Ei (m²)	Flächenbedarf je kg Fleisch (m²)	Flächenbedarf je 1.000 kcal (m²)
konventionell	3,63	2,48	2,25
ökologisch	5,76	3,94	3,58

Quelle: Eigene Berechnung

Unter Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte aus dem Futterbau (Stroh für energetische Nutzung), sinkt die Flächeninanspruchnahme im konventionellen System auf 1,74 m²/1.000 kcal und im ökologischen System auf 2,96 m²/1.000 kcal (vgl. Tabelle 219).

Tabelle 219: Futterflächeninanspruchnahme der Legehennenhaltung je Produkt und je 1.000 kcal nach Wirtschaftsweise unter Berücksichtigung von Koppelprodukten aus dem Futterbau

Wirtschaftsweise	Flächenbedarf je kg Ei (m²)	Flächenbedarf je kg Fleisch (m²)	Flächenbedarf je 1.000 kcal (m²)
konventionell	2,80	1,91	1,74
ökologisch	4,77	3,26	2,96

Quelle: Eigene Berechnung

Die konventionelle Legehennenhaltung benötigt somit rund 41 Prozent weniger Fläche für die Bereitstellung von 1.000 kcal als die ökologische Alternative. Die Differenz zwischen konventioneller und ökologischer Wirtschaftsweise ist somit deutlich geringer als im Falle der Hähnchenmast.

10.5.2.5.2.2 Zweinutzungshuhn

Die Legeleistung von Zweinutzungshühnern liegt bei ca. 250 bis 265 vermarktungsfähigen Eiern pro Durchschnittshenne und Jahr. Bezüglich der Legeleistung gibt es keine nennenswerten Unterschiede zwischen konventioneller und ökologischer Haltung. Nach Schmidt & Damme (2016) sind allerdings die Eigewichte bei ökologischer Haltung etwas geringer, während der Futterenergiebedarf pro kg Eimasse ca. 20 Prozent höher ist (Schmidt, et al., 2016). Nach LfL Bayern (2018b) liegt die Futterverwertung in der konventionellen Haltung bei 2,61 kg pro Kilogramm Eimasse (LfL Bayern, 2018b). (Vgl. Tabelle 220)

Tabelle 220: Legeleistung und Futterverwertung von Zweinutzungshühnern

Kennwerte	Konventionell [1)]
Eier je Anfangshenne (Stück/Jahr)	265
Eimasse je Anfangshenne (kg)	15,3
Ø Eigewicht (g)	57,8
Vermarktungsfähige Eier (Stück/Jahr)	257
Eimasse vermarktungsfähige Eier (kg)	14,8
Legeleistung/Anfangshenne (%)	72,8
Futterverbrauch (g/Tier/Tag)	110,3
Futterverbrauch pro Henne	38,7
Futterverwertung (kg/kg Eimasse) *	[2)] 2,61

* Bezogen auf vermarktungsfähige Eimasse
Quellen: (1) LfL Bayern, 2018b; (2) Eigene Berechnung

Unterstellt man die Nutzung der gleichen Futterzusammensetzung läge der Bedarf in der ökologischen Haltung bei einem Mehrbedarf von 20 Prozent bei rund 3,1 kg pro Kilogramm vermarktungsfähige Eimasse. Bei einem Anteil von 8 Prozent Kalk in der Futterration ergeben sich so pflanzliche Futtermittelbedarfe von 2,39 kg/kg EM (konventionell) und 2,84 kg/kg EM (ökologisch). Daraus ergibt sich in der konventionellen Landwirtschaft ein Ertrag von 2,35 Tonnen pro Hektar. In der ökologischen Legehennenhaltung liegt der berechnete Ertrag bei 1,49 t/ha. Zweinutzungshühner bleiben somit um ca. 11 Prozent unter den Hektarerträgen, die mit Hybrid-Legehennen erzielt werden.

Infolge der Kreuzung einer Mast- und einer Legelinie ist das Fleisch der Legehennen am Ende der Legeperiode noch fleischig, sodass sie sich „gut als Suppenhenne in der Direktvermarktung absetzen lassen“ (LfL Bayern, 2018b). Für die Schätzung des Fleischertrags wurde eine Schlachtausbeute von 72,5 Prozent angenommen (Tabelle 221).

Tabelle 221: Unterstellte Schlachtausbeute der Legehennennutzung mit Zweinutzungshühnern

Fleisch (Suppenhenne)	kg	%
Lebendgewicht	2,14	
Schlachtgewicht (	1,55	
Ausschlachtung		72,5
Fleischausbeute		52,0

Quellen: Eigene Schätzung nach LfL Bayern, 2018b

Der Fleischertrag ist bei einer Nutzung von Zweinutzungshühnern höher als bei den auf Legeleistung spezialisierten Hybridlegehennen. Der geschätzte Anteil des Fleisches am Kalorienertrag liegt demnach bei knapp 7 Prozent (vgl. Tabelle 222).

Tabelle 222: Hektarerträge der Eierproduktion mit Zweinutzungshühnern

Wirtschaftsweise	Eimasse (kg/ha)	Fleisch (kg/ha)	Kalorien Ei (kcal/ha)	Kalorien Fleisch (kcal/ha)
konventionell	2.350	245	3.783.437	269.851
ökologisch	1.487	158	2.393.458	174.196

Quelle: Eigene Berechnung

Bezogen auf die Eimasse liegt der Flächenbedarf konventionell bei rund 4,0 m² Futterfläche pro Kilogramm, ökologisch ist eine Fläche von ca. 6,3 m²/kg erforderlich. Für die Bereitstellung von 1.000 kcal benötigt man konventionell rund 2,5 m², ökologisch muss man mit ca. 3,9 m² rechnen. (Vgl. Tabelle 223)

Tabelle 223: Flächenbedarf der Eierproduktion mit Zweinutzungshühnern je Kilogramm Produkt und je 1.000 kcal ohne Koppelprodukte aus dem Futterbau (m²)

Wirtschaftsweise	Flächenbedarf je kg Eimasse (m²)	Flächenbedarf je kg Fleisch (m²)	Flächenbedarf je 1.000 kcal (m²)
konventionell	3,97	2,71	2,47
ökologisch	6,27	4,28	3,89

Quelle: Eigene Berechnung

Berücksichtigt man die Nutzung möglicher Koppelprodukte aus dem Futterbau, in diesem Beispielfall Stroh als Energieträger, so sinkt die Flächeninanspruchnahme konventionell um 23 Prozent, ökologisch um 17 Prozent. Für die Bereitstellung von 1.000 kcal werden konventionell folglich noch 1,9 m² benötigt, ökologisch liegt der Bedarf bei 3,2 m².

Tabelle 224: Flächenbedarf der Eierproduktion mit Zweinutzungshühnern je Kilogramm Produkt und je 1.000 kcal unter Berücksichtigung von Koppelprodukten aus dem Futterbau (m²)

Wirtschaftsweise	Flächenbedarf je kg Eimasse (m²)	Flächenbedarf je kg Fleisch (m²)	Flächenbedarf je 1.000 kcal (m²)
konventionell	3,06	2,09	1,90
ökologisch	5,19	3,54	3,22

Quelle: Eigene Berechnung

10.5.2.5.2.3 Einfluss des Energieaufwands auf den Flächenbedarf der Legehennenhaltung

10.5.2.5.2.3.1 Energieaufwand Futterbau

Der Energieaufwand der Hybrid-Legehennenhaltung für den Futterbau beträgt in der konventionellen Landwirtschaft 2,65 kWh/kg Eimasse und in der ökologischen 2,57 kWh/kg Eimasse

(vgl. Tabelle 225). Der Flächenaufwand erhöht sich dadurch in der konventionellen Landwirtschaft um 2,7 Prozent und in der ökologischen um 3,3 Prozent.

Tabelle 225: Energieaufwand der Hybrid-Legehennenhaltung für den Futterbau (kWh/kg EM)

Wirtschaftsweise	**Diesel** (kWh/kg EM)	**Sonstige EE** (kWh/kg EM)	**EE Gesamt** (kWh/kg EM)
konventionell	0,29	2,36	2,65
ökologisch	0,54	2,03	2,57

Quelle: Eigene Berechnung

Setzt man den Endenergieaufwand des Futterbaus zum Energiegehalt des produzierten Erzeugnisses ins Verhältnis, liegt das Input-Output Verhältnis sowohl im ökologischen als auch im konventionellen System bei ca. 1:0,7. Der Energieverlust ist in der Hybrid-Legehennenhaltung somit deutlich geringer als in der Hybrid-Hähnchenmast. Bei einer Nutzung von Zweinutzungshühnern ist der Erntefaktor konventionell um 12 Prozent und ökologisch um 10 Prozent niedriger als bei einer Nutzung von Hybridhühnern.

Tabelle 226: Verhältnis von Energie-Input zu Energie-Output in der Hybrid-Legehennenhaltung

Wirtschaftsweise	**Input** (MJ/kg)	**Output** (MJ/kg)	**Erntefaktor**
konventionell	8,53	6,74	0,71
ökologisch	9,24	6,74	0,73

Quelle: Eigene Berechnung

10.5.2.5.2.3.2 Energieaufwand Stallhaltung

Der Energieaufwand der Stallhaltung in der Legehennenhaltung konnte mangels Datenzugänglichkeit nicht berechnet werden. Es ist aber wahrscheinlich, dass er einen ähnlich geringen Einfluss auf den Flächenbedarf der Fleischproduktion hat, wie im Falle der Milchvieh- und Schweinehaltung.

10.5.3 Agroforstsysteme

Mit dem Begriff Agroforst werden verschiedene Landnutzungssysteme zusammengefasst, bei dem land- und forstwirtschaftliche Elemente auf einer Fläche kombiniert werden. Dabei werden vorteilhafte Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Elementen angestrebt. Eine traditionelle Form eines Agroforstsystems sind Streuobstwiesen, die eine Grünlandnutzung (Viehhaltung) und Obstbau kombinieren. Wie im Textabschnitt „10.5.1.4.1.2 Streuobst“ beschrieben, erreichen Streuobstwiesen zwar eine beachtliche Flächeneffizienz, bleiben jedoch teils deutlich hinter der Flächeneffizienz von Obstanlagen zurück. Ihre Vorteile liegen vor allem in ihrer hohen Produktvielfalt und ihrer positiven Wirkung auf die Artenvielfalt, die sie insgesamt unempfindlicher machen und das Risiko von Totalausfällen bei den Erträgen reduzieren. Die größere Vielfalt der Obstbäume und die artenreiche Fauna reduzieren Gefahren durch Schädlingsbefall und die Bäume schützen zugleich die Wiesen vor negativen Witterungseinflüssen. Nach Böhm (2018) weisen Agroforstsysteme eine große Zahl von Vorteilen auf, von denen nachfolgend nur eine Auswahl aufgeführt ist, die für die Ertragspotenziale und die Ökologie von erheblicher Bedeutung sind:

- Erweiterung der landwirtschaftlichen Produktpalette (Produktdiversifizierung)
- Positive Ertragseffekte und höhere Ertragsstabilität bei annuellen Kulturen aufgrund eines verbesserten Mikroklimas (z.B. durch Windschutzwirkung der Baumstreifen)
- Verbesserter Schutz der Ackerkulturen gegen Witterungsunbilden
- Reduzierung des flächenbezogenen Düngemittel- und Pflanzenschutzmittelverbrauchs
- Verminderung von Bodenerosion durch Wind und Wasser
- Reduzierung des Stoffaustrages aus landwirtschaftlich genutzten Flächen in Grund- und Oberflächengewässer
- Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit durch stärker geschlossene Nährstoffkreisläufe und Humus-Anreicherung
- Erhöhung der Struktur- und Habitatvielfalt in landwirtschaftlich geprägten Regionen.
- Erhöhung der Biodiversität
- Förderung von Nützlingen im Ackernahbereich
- Schaffung von Rückzugsgebieten für Wild (insbesondere Niederwild)
- Nachhaltige Bereitstellung holzartiger Energierohstoffe

Aufgrund dieser Vorteile wächst aktuell vor allem das Interesse an einer Nutzung von Bäumen auf Ackerflächen. Negativ kann sich allerdings die „Konkurrenz zwischen Gehölzen und Ackerkulturen um Licht, Nährstoffe, Wasser und Wuchsraum [...] auf das Pflanzenwachstum“ auswirken (Böhm, 2018). Möndel (2007) geht daher „ab dem Jahr 15 von einer kontinuierlichen Reduktion der Kornerträge“ aus (Möndel, 2007), weshalb er annimmt, dass der Kornertrag auf dem Ackerstreifen nach 50 Jahren bei 70 Prozent des heutigen Niveaus liegt.

Gleichzeitig wird aber durch „die Schutzwirkung der Bäume [..] das Mikroklima auf dem Feld verbessert und die Verdunstung verringert. Hierdurch können positive Ertragseffekte und eine

höhere Ertragsstabilität der Ackerkulturen erzielt werden. In verschiedenen Studien zu Feldfruchterträgen wurden an Gehölzstreifen – je nach Standortseigenschaften und Ackerkulturart – Mehrerträge von bis zu 50 % ermittelt“ (Böhm, 2018a). Aktuell werden verschiedene Agroforstsysteme erprobt. Dabei können sowohl langsam wachsende Bäume für die Wertholzproduktion als auch schnellwachsende Bäume für die Energiegewinnung genutzt werden. Die Wertholzproduktion birgt mit Blick auf den Klimaschutz zusätzlich den Vorteil der langfristigen Kohlenstoffbindung. Die Ertragspotenziale von Agroforstsystemen variieren je nach gewählter Pflanzenkombination deutlich. Aufgrund der großen Vielfalt der Kombinationsmöglichkeiten wurde keine mehrjährige Fruchtfolge verschiedener Pflanzen hinsichtlich ihrer Flächeneffizienz untersucht, sondern nur eine beispielhafte Kombination aus Walnussbäumen und zwei einjährigen Ackerkulturpflanzen. Somit wurde ein ackerbauliches Zwei-Kulturen-System aus Getreide und Energiegras (Sudangras) mit Wahlnussbäumen zu einem Drei-Kulturen-Agroforstsystem erweitert. In einer 2. Variante wurde anstelle von Sorghum Nutzhanf verwendet.

10.5.3.1 Erträge der Baumpflanzung

Angenommen wurde nach Möndel eine Zahl von 26 Wahlnussbäumen pro Hektar (Möndel, 2007). Wie bereits dargestellt, erhält man bei dieser Anzahl von Bäumen über eine Nutzungsdauer von 50 Jahren rechnerisch etwa 546 kg Walnüsse pro Hektar und Jahr. Bei einem Kernanteil von 45 bis 50 Prozent (Walker, 2011) kann man folglich mit ca. 257 kg Walnusskernen pro Hektar rechnen. Dabei sind die Erträge jedoch, wie in Tabelle 227 dargestellt, sehr ungleich auf die Altersphasen der Bäume verteilt. Etwas geringer dürften die Nusserträge ausfallen, wenn der Wuchs mit Blick auf den Wertholzertrag optimiert wird. Der Holzzuwachs liegt dann nach Möndel bei ca. 1 m³ pro Baum (Möndel, 2007), was rund 0,52 m³ Wertholz pro Hektar und Jahr entspricht. Pro Kubikmeter Wertholz werden somit etwa 1.540 m² in Anspruch genommen. Der Wertholzzuwachs pro Quadratmeter Baumfläche übertrifft in diesem Fall den Holzzuwachs von forstwirtschaftlich genutzten Eichen, die ca. 5,4 m³ Holz pro Hektar liefern, was einer Flächeninanspruchnahme von 1.852 m² pro Kubikmeter entspricht.

Tabelle 227: Walnusserträge in Agroforstsystemen

Standjahre	kg pro Baum und Jahr [1)]	kg Gesamt pro Baum [2)]	kg pro Hektar [3)]	kg/ha*a
16.-20. Standjahr:	10	50	1.300	260
21.-25. Standjahr:	15	75	1.950	390
26.-35. Standjahr:	25	250	6.500	650
36.-50. Standjahr:	45	675	17.550	1.170
SUMME 1.-50. Standjahr	**21**	**1.050**	**27.300**	**546**

Quellen: (1) WBI, o. J.; (2) Eigene Berechnung n. WBI, o. J. (3) Eigene Berechnung n. WBI, o. J., und Möndel, 2007.

Als Abfallprodukt der Walnussproduktion fallen pro Hektar rund 289 kg Nussschalen an, die den gleichen Heizwert wie Holz haben, sofern sie gesammelt und energetisch genutzt werden.

10.5.3.1.1 Erträge des Ackerbaus

Nach Möndel (2007) wird für die Pflanzung der Bäume eine Fläche von 8 Prozent der Agroforstfläche benötigt. Die Erträge des Ackerbaus liegen zunächst auf dem Niveau des herkömmlichen Ackerbaus. Beim Anbau von Wintergerste kann man auf einer Ackerfläche von 0,92 Hektar demnach in den ersten Jahren mit einem Kornertrag von 6,4 t rechnen. Geht man nach Thrän et al. (2016) von einem nutzbaren Strohanteil von bis zu 43 Prozent aus, erhält man zudem ca. 2,8 t Stroh.

Geht man nach Möndel (2007) davon aus, dass die Erträge ab dem 15. Standjahr der Bäume im Laufe der Jahre nächsten 35 Jahre auf ca. 70 Prozent (4,5 t Korn und 1,9 t Stroh) im 50. Standjahr sinken, erhält man über die Umtriebsdauer von 50 Jahren im Durchschnitt theoretisch 5,7 t Korn und 2,5 t Stroh pro Jahr. Dies entspricht rund 82 Prozent des Getreideertrags im herkömmlichen Ackerbau. Auf andere Pflanzen in der Fruchtfolge dürfte ein ähnliches Verhältnis zutreffen. Da die Getreideernte aufgrund des Klimawandels immer häufiger bereits im Juni erfolgt, bietet sich nach Gerste bei ausreichender Wasserversorgung ein anschließender Anbau von Sorghum oder Hanf als Sommerzwischenfrucht an. Sorghum liefert als Zwischenfrucht ca. 30 (5 – 45) t FM als Substrat für Biogasanlagen. Berücksichtigt man die möglichen Ertragsrückgänge bis zum 50. Nutzungsjahr, ist mit einem Ertrag von 27 (4 – 40) t FM pro Hektar und Jahr zu rechnen.

10.5.3.1.2 Kalorienertragspotenzial

Der Kaloriengehalt von Walnüssen wird mit 675 (654 bis 696) kcal je 100 g angegeben, der von Gerstenkorn mit 320 kcal/100g. Der Kalorienertrag des Agroforsts liegt somit bei ca. 20 Mio. kcal pro Hektar. Der Anteil der Walnusskerne am Kalorienertrag beträgt, wie in Tabelle 228 dargestellt, rund 9 Prozent. Der Gesamtertrag liegt somit um 11 Prozent unterhalb des Kalorienertrags, der im herkömmlichen Gerstenanbau pro Hektar erzielt wird.

Tabelle 228: Kalorienertrag eines Agroforstsystems mit Gerste und Walnuss bei konventioneller Wirtschaftsweise

Kennwert	Walnusskerne	Gerstenkorn	SUMME
kg/ha	256	5.719	5.975
kcal/kg	6.750	3.200	3.352
kcal/ha	1.729.213	18.299.985	20.029.198
Anteil am Kalorienertrag	9%	91%	100%

Quelle: Eigene Berechnung nach genannten Quellen (vgl. Text)

In der ökologischen Landwirtschaft sinkt der Kornertrag auf ca. 3,2 t/ha*a während der Walnussertrag unverändert bleibt. Der Kalorienertrag liegt somit bei rund 12 Mio. kcal pro Hektar und Jahr. Der Anteil der Walnusskerne am Kalorienertrag beträgt, wie in Tabelle 229 dargestellt, rund 14 Prozent. Der Gesamtertrag liegt somit lediglich um 4 Prozent unterhalb des Kalorienertrags, der im herkömmlichen ökologischen Gerstenanbau pro Hektar erzielt wird.

Tabelle 229: Kalorienertrag eines Agroforstsystems mit Gerste und Walnuss bei ökologischer Wirtschaftsweise

Kennwerte	Walnusskerne	Gerstenkorn	SUMME
Ertrag in kg/ha	256	3.186	3.442
Kaloriengehalt in kcal/kg	6.750	3.200	3.464
Ertrag in kcal/ha	1.728.000	10.195.706	11.923.706
Anteil am Kalorienertrag	14%	86%	100%

Quelle: Eigene Berechnung nach genannten Quellen (vgl. Text)

10.5.3.1.3 Energieertragspotenzial

Nutzt man das jährliche Aufkommen von ca. 2,5 t Gerstenstroh thermisch, beträgt der Heizwert des Brennstoffs ca. 9,3 MWh pro Hektar und Jahr. Der Biogasertrag von Sorghum als Zwischenfurcht beträgt ca. 16 (3 – 24) MWh/ha (KTBL, 2012 S. 249). Abzüglich der Baumpflanzfläche und der möglichen Ertragsrückgänge während der Umtriebsdauer (auf 70 Prozent des Ausgangsniveaus) ist über die gesamte Umtriebsdauer mit einem Jahresertrag aus Sorghum von ca. 14,2 MWh/ha zu rechnen. Geht man zudem von einer energetischen Nutzung der Walnussschalen aus, so erhält man bei einem Heizwert von ca. 4 kWh/kg einen Energieertrag von etwa 1,16 MWh/ha.

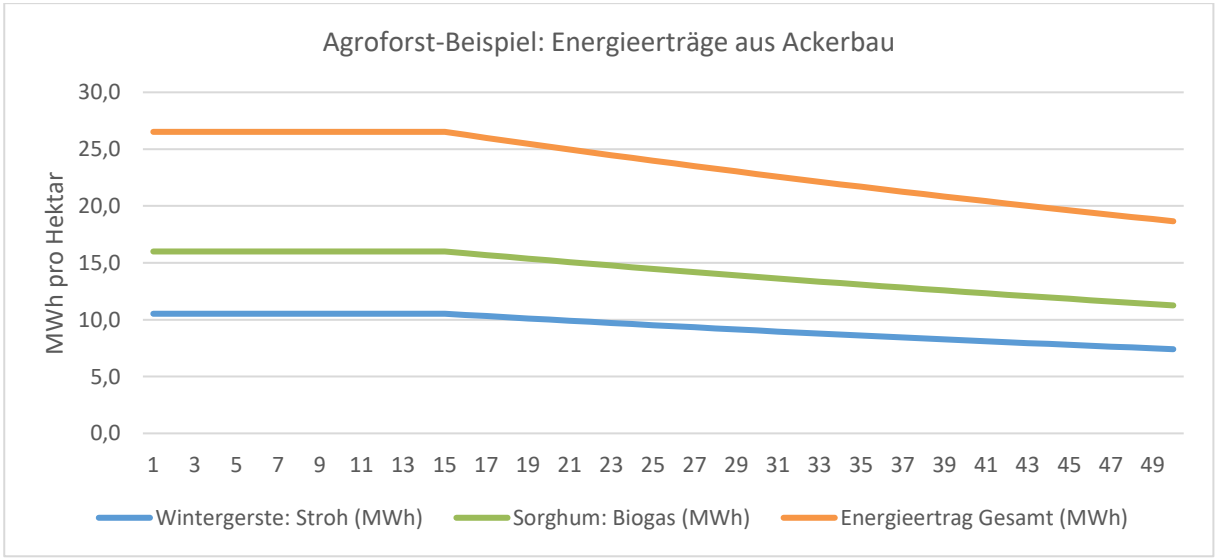


Abbildung 117: Voraussichtliche Entwicklung der Brutto-Energiegewinnung in konventionellen Agroforstsystemen (MWh/ha)

In der Summe liefert ein Hektar somit einen Brutto-Energieertrag von ca. 24,7 MWh pro Jahr als Koppelprodukt der Nahrungsproduktion. In der ökologischen Landwirtschaft kann man mit ca. 20,6 MWh/ha*a rechnen, da das vergleichsweise unempfindliche Sorghum hier ähnliche Erträge liefern dürfte, wie im konventionellen Anbau. Ist eine rechtzeitige Aussaat von Sorghum nicht möglich, bietet sich Hanf als Zwischenfrucht an. Nutzt man das Hanfstroh für die ressourcenschonende Produktion von Festbrennstoffen, so ist bei einem ähnlichen Ertragsrückgang (auf ca. 70 Prozent) im Durchschnitt mit einem Strohertrag von ca. 2,0 t pro Hektar und Jahr zu rechnen (vgl. Möndel, 2007; Borchert, 2015). Als Brennstoff genutzt liefert dieses ca. 8 MWh pro Hektar und Jahr. Alternativ lassen sich aus dem Hanfstroh auch bis zu 53 m³ Dämmstoff pro Hektar und Jahr herstellen.

In Tabelle 230 ist das gesamte Ertragspotenzial des beschriebenen Agroforstsystems mit Gerste, Walnuss und Sorghum bei konventioneller Bewirtschaftung dargestellt.

Tabelle 230: Ertragspotenzial eines Agroforstsystems bei konventioneller Bewirtschaftung

Produkt	Ertrag pro Hektar	Kaloriengehalt als Lebensmittel (kcal/ha)	Energiegehalt als Energieträger (kWh/ha)
Gerstenkorn	5.700 kg	18.299.985	
Gerstenstroh	5.200 kg		9.300
Walnusskerne	256 kg	1.728.000	
Walnussschalen	289 kg		1.160
Sorghum	26.700 kg		14.200
Walnuss-Wertholz	0,52 m³		

Quelle: Eigene Berechnung

In Tabelle 231 ist das gesamte Ertragspotenzial des beschriebenen Agroforstsystems mit Gerste, Walnuss und Sorghum bei konventioneller Bewirtschaftung dargestellt.

Tabelle 231: Ertragspotenzial eines Agroforstsystems bei ökologischer Bewirtschaftung

Produkt	Ertrag pro Hektar	Kaloriengehalt als Lebensmittel (kcal/ha)	Energiegehalt als Energieträger (kWh/ha)
Gerstenkorn	3.400 kg	10.195.706	
Gerstenstroh	2.500 kg		5.200
Walnusskerne	256 kg	1.728.000	
Walnussschalen	289 kg		1.160
Sorghum	26.700 kg		14.200
Walnuss-Wertholz	0,52 m³		

Quelle: Eigene Berechnung

Legt man den Fokus auf die Nahrungsmittelproduktion (Gerstenkorn & Walnusskerne), können für die Koppelprodukte, die sich als Energieträger (Gerstenstroh, Sorghum, Nussschalen) oder

als Dämmstoff (Hanfstroh) nutzen lassen, insgesamt Flächengutschriften von bis 5.226 m² pro Hektar angerechnet werden. In der Agroforstsystem-Variante I, in der Gerste, Walnuss und Sorghum kombiniert werden, fallen die Flächengutschriften insgesamt höher aus, als in der Variante II, in der anstelle von Sorghum Hanf als Zwischenfrucht angebaut wird, da in diesem Agroforstsystem lediglich 53 m³ Hanfdämmstoff erzeugt werden können. Wird Hanf herkömmlich als Hauptfrucht angebaut, sind Dämmstofferträge von bis zu 274 m³ pro Hektar möglich.

Die Flächengutschriften für die einzelnen Koppelprodukte der verschiedenen Agroforstsysteme sind in Tabelle 232 im Einzelnen dargestellt.

Tabelle 232: Flächengutschriften für energetisch und stofflich nutzbare Koppelprodukte in zwei verschiedenen Agroforstsystemen nach Wirtschaftsweise

Produkt	AF-System Variante I, konventionell	AF-System Variante I, ökologisch	AF-System Variante II, konventionell	AF-System Variante II, ökologisch
Wertholz	984	984	984	984
Dämmstoff			1.934	1.934
Festbrennstoff Stroh	1.197	709	1.197	709
Festbrennstoff Schalen	149	149	149	149
Biogassubstrat	2.897	2.897		
SUMME	**5.226**	**4.739**	**4.264**	**3.776**

Quelle: Eigene Berechnung

Aufgrund der Flächengutschriften reduziert sich die Flächeninanspruchnahme je 1.000 kcal deutlich. In der Systemvariante I mit Sorghum als Zwischenfrucht sinkt sie bei konventioneller Bewirtschaftung von 0,50 auf 0,24 m²/1.000 kcal. In Systemvariante II mit Hanf als Zwischenfrucht sinkt sie immerhin auf 0,29 m²/1.000 kcal. Dies entspricht einer Reduktion des Flächenbedarfs um 42 – 52 Prozent. Bei ökologischer Bewirtschaftung wird eine Reduktion um 38 bis 48 Prozent erreicht. (Vgl. Tabelle 233)

Tabelle 233: Flächeninanspruchnahme der Nahrungsmittelproduktion in zwei verschiedenen Agroforstsystemen nach Wirtschaftsweise (m²/1.000 kcal)

Kennwert	Agroforstvariante			
	AF-System Variante I, konventionell	AF-System Variante I, ökologisch	AF-System Variante II, konventionell	AF-System Variante II, ökologisch
Flächeninanspruchnahme ohne Koppelprodukte (m²/1.000 kcal)	0,50	0,84	0,50	0,84
Flächeninanspruchnahme inkl. Koppelprodukte (m²/1.000 kcal)	0,24	0,44	0,29	0,52

Quelle: Eigene Berechnung

Ohne den Anbau energetisch oder stofflich nutzbarer Zwischenfrüchte liegt die Flächeninanspruchnahme eines Agroforstsystems mit Gerste und Walnuss in konventioneller Bewirtschaftung bei 0,38 m²/1.000 kcal. Dies entspricht fast exakt dem Wert, der im reinen Anbau von Wintergerste (ohne eine Kombination mit Walnussbäumen) erzielt wird. In ökologischer Bewirtschaftung liegt der Flächenbedarf mit 0,68 m²/1.000 kcal etwas unterhalb des Wertes von 0,75 m²/1.000 kcal, der im reinen Anbau von Wintergerste erzielt wird.

10.5.3.1.4 Zwischenfazit Agroforstsystem

In der konventionellen Landwirtschaft können Agroforstsysteme unter den aktuellen klimatischen Bedingungen mit geringen Einbußen bezüglich der Flächeneffizienz verbunden sein. Insgesamt scheint sich die Flächeneffizienz der konventionellen Landwirtschaft durch Agroforstsysteme kaum zu verändern. Allerdings bieten Agroforstsysteme Vorteile wie z. B. eine höhere Lebensraumqualität für Wildtiere, besseren Erosionsschutz sowie eine größere Produktdiversifizierung in Verbindung mit einer höheren Resilienz gegenüber Witterungsschwankungen.

In der ökologischen Landwirtschaft scheint bei einer Nutzung von Wahlnüssen zur gleichzeitigen Erzeugung von Nüssen und Holz sogar eine leichte Erhöhung der Flächeneffizienz wahrscheinlich. So werden nach der beschriebenen Schätzung 96 Prozent des Kalorienertrags des herkömmlichen ökologischen Wintergerstenanbaus erzielt, wobei die Walnussbäume 14 Prozent des Kalorienertrags beitragen. Durch die Koppelprodukte, wie z. B. Wertholz und Energieholz (inkl. Nussschalen) und andere zusätzliche Produkte, wird die Flächeneffizienz merklich gesteigert. Allerdings zeigt der Vergleich auch, dass stofflich oder energetisch nutzbare Zwischenfrüchte einen größeren Einfluss auf die Flächeneffizienz haben als die Bäume des Agroforstsystems.

Des Weiteren ist in der Praxis noch zu prüfen, wie sich die Nusserträge tatsächlich entwickeln, wenn der Fokus auf der Wertholzproduktion liegt, da noch keine Informationen zu den Wechselwirkungen von Nuss- und Wertholzproduktionen vorlagen. Zudem ist es auch nicht unwahrscheinlich, dass die verschiedenen Nutzpflanzen, wie z. B. Getreide, Mais, Hackfrüchte, Eiweißpflanzen, Gemüse, Hanf oder Sorghum, unterschiedlich auf die Kombination mit den Wahlnussbäumen reagieren. Weiterer Forschungsbedarf besteht auch insbesondere mit Blick auf eine Kombination mit Energie- und Rohstoffpflanzen.

10.6 Urbane Landwirtschaft

10.6.1 Arten der Urbanen Landwirtschaft

Urbane Landwirtschaft ist ein Überbegriff für eine Vielzahl von Produktionssystemen, die sich mit Blick auf Ressourcenaufwand (Wasser, Energie, Nährstoffe etc.), Flächendarf und Arbeitsintensität deutlich unterscheiden.

Das breit gefächerte Spektrum an Arten des Urban Farmings reicht vom Gärtnern auf dem Gebäudedach über Ackerbau auf innerstädtischen Brachflächen bis hin zum sogenannten Vertical Farming in mehrgeschossigen Gebäuden mit hochtechnologischer Ausstattung. In der Regel wird dabei ausschließlich Pflanzenzucht betrieben. Immer häufiger kommen aber auch aquaponische Systeme zum Einsatz, die die Pflanzenzucht mit einer Fisch- oder Garnelenzucht verbinden. Aufgrund des hohen Gewichts der Fischbecken, die meist im Erdgeschoss untergebracht werden müssen, sind für die Aquaponik aber relativ wenige Gebäude geeignet. In Städten mit hoher Nachfrage nach Baugrund werden bevorzugt Flachdächer mit ausreichender Tragfähigkeit genutzt. Zunehmend werden aber auch Systeme entwickelt, um Gebäudefassaden nutzbar zu machen.

Mit Blick auf die Erträge der reinen Pflanzenzucht nutzen Gewächshäuser und vertikale Farmen den Quadratmeter deutlich effizienter als Anlagen unter freiem Himmel. Es erscheint daher sinnvoll, solche offenen Systeme unter freiem Himmel von den weitgehend oder vollkommen geschlossenen Systemen in Gewächshäusern zu unterscheiden.

10.6.1.1 Offene Systeme

Unter dem Begriff „Offene Systeme“ werden im Rahmen dieser Untersuchung solche Produktionssysteme zusammengefasst, die nicht durch ein Gewächshaus oder eine andere Gebäudehülle von der Außenwelt und der Witterung abgeschottet sind. Ihre Vorteile bestehen unter anderem darin, dass sie zahlreichen Insekten und Tieren Lebensraum bieten können, Niederschlagswasser auffangen, städtische Räume und Gebäude kühlen und zudem einen sehr geringen Energiebedarf aufweisen. So wird z. B. in Permakulturgärten die vollständige Vermeidung der Nutzung fossiler Energien gezielt angestrebt.

10.6.1.2 Geschlossene Systeme

Unter dem Begriff „Geschlossene Systeme“ werden im Folgenden solche Produktionssysteme zusammengefasst, die sich in einem Gewächshaus oder einem anderen Gebäude befinden und eine von der Witterung weitgehend unabhängige Pflanzenproduktion erlauben. Neben dem Schutz vor ungünstigen Witterungsbedingungen bieten die Gebäude auch Schutz vor einem möglichen Schädlingsbefall, weshalb auf chemischen Pflanzenschutz verzichtet werden kann. In der Regel ist der Einsatz sogenannter Nützlinge (z. B. Marienkäfer) zum Schutz der Pflanzen völlig ausreichend. Nachfolgend werden die drei wichtigsten Systeme skizziert:

- **Hydroponische Dachfarmen**:
  Gewächshäuser für die Produktion von Salat und Gemüse auf Gebäudedächern, die meist mit herkömmlichen Gewächshäusern vergleichbar sind. Es bietet sich eine Nutzung von Gebäudeabwärme an.
- **Aquaponische Dachfarmen:**
  Die Aquaponik kombiniert Pflanzen- und Fischproduktion. Dabei werden meist Gewächshäuser auf Dachflächen genutzt, während sich die Fischzuchtbecken auch in tieferen Geschossen befinden können. Genutzt werden auch ehemalige Industriehallen oder Bierbrauereien, deren Braubecken sich für eine Fischzucht eignen.
- **Vertikale Farmen:**
  Vertikale Farmen produzieren auf mehreren übereinander liegenden Geschossebenen. Im Falle des hier betrachteten Beispiels handelt es sich ebenfalls um ein aquaponisches System mit Fischproduktion. Vertikale Farmen nutzen in der Regel künstliches Licht, das mit Hilfe von LED-Lampen erzeugt wird, als Tageslichtersatz. Dies ist einer der wesentlichen Gründe für den hohen Strombedarf vertikaler Farmen. Da sie keine lichtdurchlässigen Dächer und Wände benötigen, ist dafür eine sehr effiziente Wärmeisolierung möglich.

10.6.2 Flächenpotenziale

Neben städtischen Frei- und Brachflächen eignen sich vor allem ungenutzte Flachdachflächen für die urbane Landwirtschaft. Sogenannte Rooftop-Farmen (Dachfarmen) bieten den Vorteil, dass weder innerstädtische Freiflächen noch knappes Bauland in Anspruch genommen werden müssen und somit eine Konkurrenz zur Wohnungswirtschaft vermieden wird.

Das sogenannte Vertical Farming produziert, im Gegensatz zu Dachfarmen, Gemüse und Salate auf mehreren, übereinanderliegenden Geschossebenen, und kann dadurch, bezogen auf die Grundfläche des Gebäudes, sehr hohe Nahrungsmittelerträge pro Hektar liefern. Da sie jedoch auf den Geschossebenen unterhalb des Dachgeschosses meist auf künstliches Licht angewiesen sind und vergleichsweise aufwändige Technik benötigen, sind sie bisher mit einem hohen Energieaufwand und entsprechenden Energiekosten verbunden. In diesem Kapitel wird daher der Fokus auf die Potenziale offener und geschlossener Dachfarmen gelegt. Trotzdem wurde der Versuch unternommen, den Flächenbedarf bzw. die Flächeneffizienz aller hier betrachteten Systeme zu vergleichen.

10.6.2.1 Städtische Freiflächenpotenziale

Da die Anteile von nutzbaren Freiflächen von Stadt zu Stadt sehr verschieden sind, können keine Richtwerte zu städtischen Freiflächenpotenzialen angegeben werden. Für eine Schätzung der Potenziale müssen die geeigneten Flächen jeweils vor Ort erhoben werden.

10.6.2.2 Dachflächenpotenziale

Wichtigste Voraussetzungen für die Nutzung von Dachfarmen sind eine geeignete Größe der einzelnen Flachdächer und eine ausreichende Tragfähigkeit der Gebäude. Für eine wirtschaftliche Nutzung ist eine Mindestgröße der Anlagen erforderlich, die jedoch von Land zu Land unterschiedlich sein kann und von den ökonomischen Rahmenbedingungen (Steuerlast, Lohnniveau, Kosten für Bauland, Energie, Wasser etc.) vor Ort abhängt.

Allerdings stehen für Dachfarmen genutzte Dachflächen großenteils nicht mehr für die Gewinnung von Solarenergie mittels Photovoltaik oder Solarthermie zur Verfügung. Dies ist neben ihrem hohen Energieaufwand einer der wesentlichen Nachteile von Dachgewächshäusern. Offene Dachfarmen verursachen zwar nur einen sehr geringen Energieaufwand, liefern aber auch deutlich geringere Erträge und stehen ebenfalls in Konkurrenz zur Photovoltaiknutzung.

In Deutschland gibt es nach Angaben des Fraunhofer-Instituts für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT „rund 1200 Millionen Quadratmeter an Flachdächern von Nicht-Wohngebäuden. Rund 360 Millionen Quadratmeter können davon für den Anbau von Pflanzen in Gewächshäusern genutzt und so rund 28 Millionen Tonnen CO_2 pro Jahr gebunden werden“ (Fraunhofer UMSICHT, o. J.). Die gleichen Zahlen werden durch die Deutsche Gesellschaft für Hydrokultur genannt (DGHK Deutsche Gesellschaft für Hydrokultur, 2015). Bei rund 83 Millionen Einwohnern ergibt sich daraus ein Potenzial von ca. 4,3 m² pro Person.

Nach Angaben der Urban Farmers AG stehen in der Stadt Basel rund zwei Millionen Quadratmeter ungenutzte Dachflächen zur Verfügung. Würden davon 100.000 m² für sogenannte Dachfarmen genutzt, reicht dies laut Urban Farmers AG aus, um „ein Viertel der Baseler Bevölkerung das ganze Jahr hindurch mit Fisch, Obst und Gemüse“ zu versorgen (Urban Farmers AG zit. n. Schiessl, 2011). Eine Fläche von 100.000 m² entspricht bei einer Bevölkerung von rund 194.000 Personen[88] im Jahr 2011 rund 0,5 m² pro Einwohner.

In einer Schätzung für die Stadt Berlin wurde im Jahr 2011 eine für kommerzielles Rooftop Farming geeignete Potenzialfläche von 8.317.935 m² identifiziert (ZFarm, Forschungsverbund, 2011). Dabei wurden nur geeignete Dachflächen mit einer jeweiligen Mindestgröße von 500 Quadratmetern berücksichtigt. Dachflächen dieser Art sind vor allem in Gewerbe- und Industriegebieten zu finden. Bei einer Bevölkerung von 2,92 Millionen Einwohnern im Jahr 2011 ergibt sich aus dieser Schätzung für Berlin eine Potenzialfläche von 2,85 m²/EW.

Durchschnittswerte dichtbesiedelter Städte können jedoch nicht ohne Weiteres auf weniger dicht besiedelte und teils eher ländlich geprägte Landkreise übertragen werden. Vergleicht man die pro Person vorhandenen Siedlungsflächen, so zeigt sich, dass gerade die weniger

[88] Schätzung auf Basis der öffentlichen Bevölkerungsdaten von 2013 bis 2017. Zum Jahresanfang 2014 lag die Einwohnerzahl Basels bei 195.459.

dicht besiedelten Landkreise besonders große Wohnbau- und Gewerbegebietsflächen aufweisen. Im Falle des nicht sehr dicht besiedelten Landkreises Sigmaringen sind die Gewerbeflächen pro Einwohner sogar fast zehnmal so groß wie in Basel und Berlin (vgl. Tabelle 234). Deutlich größer sind auch die Wohngebietsflächen pro Einwohner. Dörfer, aber auch Innenstädte und Wohngebiete kleinerer und mittelgroßer Städte in Baden-Württemberg weisen aber in der Regel einen deutlich geringeren Anteil von Flachdächern auf als Großstädte wie Berlin, Stuttgart oder Basel, die über große Verwaltungs- und Bürogebäude sowie über eine große Zahl mehrgeschossiger Mehrfamilienhäuser verfügen.

Tabelle 234: Wohn- und Gewerbegebietsflächen pro Einwohner im Vergleich*

Stadt/Landkreis	Bevölkerung (EW)	Wohnbau & Mischnutzung gesamt (ha)	Gewerbe & Industrie gesamt (ha)	Wohnbau pro Einwohner (m²)	Gewerbe pro Einwohner (m²)
Basel, Stadt [1)]	195.459	972	227	50	12
Berlin, Stadt [2)]	2.918.072	21.044	3.456	72	12
Bodenseekreis [3)]	209.386	3.087	1.303	147	62
LK Esslingen [3)]	524.127	5.712	2.377	109	45
LK Konstanz [3)]	273.407	3.688	1.076	135	39
LK Sigmaringen [3)]	130.275	2.876	1.493	221	115

* Die Daten für Berlin beziehen sich auf das Erhebungsjahr der ZFarm-Studie 2011. Die Daten für Basel beziehen sich auf den Jahresbeginn 2014, da für die Jahre 2006 bis 2013 keine Daten zur Flächennutzung vorlagen. Die Daten zu den Landkreisen in Baden-Württemberg beziehen sich aus Gründen der Vergleichbarkeit auf das Jahr 2013.
Quellen: (1) (Kanton Basel-Stadt, 2017) (2) (Statistisches Bundesamt, 2017c) (3) Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Regionaldatenbank

Eine genaue Bestandsaufnahme der Dachflächenpotenziale der betrachteten Landkreise konnte im Rahmen dieser Studie nicht durchgeführt werden. Mit Blick auf die Dachlandschaften anhand von Luftbildern erscheint es jedoch nicht wahrscheinlich, dass das Potenzial Berlins von rund 2,85 m² Eignungsfläche pro Einwohner in einem der Landkreise deutlich übertroffen wird. Vereinfachend wird daher im betreffenden Kapitel (6.4.1.2.3) berechnet, wie sich die Nutzung von zwei Quadratmetern Dachfarm pro Einwohner auf die möglichen Autonomiegrade auswirken könnte. Dies bietet eine gute Vergleichbarkeit mit den Potenzialen anderer Technologien.

10.6.2.3 Flächenpotenziale für Vertikale Landwirtschaft

Allgemeine Aussagen zu Flächenpotenzialen für die Vertikale Landwirtschaft können nicht getroffen werden, da zwar die benötigte Grundfläche sehr gering ist, aber die Anforderungen an den Untergrund wegen des hohen Gebäudegewichts relativ hoch sind. Zudem sind die Voraussetzungen für die Integration von Hochhäusern in das Stadtbild von Stadt zu Stadt sehr unterschiedlich.

10.6.3 Ertragspotenziale

10.6.3.1 Offene Produktionssysteme

Der Vorteil offener Gärten besteht vor allem darin, dass sie kaum auf von außen zugeführte Ressourcen angewiesen sind und sehr kostengünstig eingerichtet werden können. Sie können Regenwasser nutzen und dadurch die städtische Kanalisation entlasten. Durch ihre Evapotranspiration wirken sie zugleich kühlend auf ihre Umgebung, was in Städten den Energiebedarf der Gebäudeklimatisierung senkt und sich positiv auf das Stadtklima auswirkt. Zudem bieten sie vielen Tieren und Insekten Lebensraum und Nahrung. Zu unterscheiden sind Gärten auf Freiflächen von Gärten auf Gebäudedächern. Im Prinzip und in den Ertragspotenzialen unterscheiden sie sich nicht von traditionellen Gemüsegärten. Offene Gärten liefern Erträge, die ungefähr den Erträgen herkömmlicher Landwirtschaft entsprechen. Zudem bietet sich neben der klassischen Bewirtschaftung eine Bewirtschaftung nach Permakulturprinzipien an.

10.6.3.1.1 Klassisch bewirtschaftete Stadtfarmen

Die Erträge klassisch bewirtschafteter Stadtfarmen auf städtischen Freiflächen entsprechen den Erträgen, die auch in der herkömmlichen Landwirtschaft bzw. im herkömmlichen Gartenbau außerhalb des Stadtgebiets erzielt werden. Ihre Ertragspotenziale werden in der Regel und im Gegensatz zu Dachfarmen nicht durch die Tragfähigkeit des Untergrundes eingeschränkt. Einzelne Gemüsesorten liefern folglich sehr hohe Hektarerträge, wie z. B. im konventionellen Anbau Weißkohl (78 t/ha), Rotkohl (60 t/ha), Möhren/Karotten (54 t/ha), Speisezwiebeln (49 t/ha), Rote Beete (47 t/ha), Chinakohl (40 t/ha) (Statistisches Bundesamt, 2011 S. 7). Im Mittel kann man ca. 31 Tonnen Gemüse oder rund 13 Tonnen Obst pro Hektar erwarten Im ökologischen Anbau sind die Erträge, wie bereits dargestellt um ca. 30 Prozent niedriger. Möglicherweise lässt sich diese Differenz im Urban Farming aber durch höheren Arbeitseinsatz reduzieren.

10.6.3.1.2 Permakultur-Stadtfarmen

Eine spezielle Form des ökologischen Gartenbaus, die sogenannte Permakultur, versucht, die Vorteile offener Gärten gezielt zu optimieren, um vor allem das Verhältnis von Ressourcenaufwand und Ertrag weiter zu verbessern. In sogenannten Permakultur-Systemen vergemeinschaftet man Pflanzen so gezielt, dass sie sich gegenseitig fördern, indem sie sich gegenseitig vor Schädlingen schützen oder ein besseres Mikroklima erzeugen. Ein Ziel der Permakultur ist es, dabei den Anteil mehrjähriger Nutzpflanzen deutlich zu erhöhen, weil dies nicht nur ökologisch vorteilhaft ist, sondern auch den Arbeitsaufwand reduzieren kann. Nicht selten werden auch Pflanzen auf mehreren Ebenen genutzt, wie z. B. Gemüse am Boden und rankende Pflanzen (z. B. Wein) an Rankhilfen darüber. Nach der Sonne ausgerichtete Hoch- und Hügelbeete optimieren Sonneneinstrahlung, Durchwurzelung und Wasserhaushalt. Auf diese

Weise wird auch die Resistenz der Pflanzen erhöht. Vögel und nützliche Insekten werden durch die hohe Pflanzen- und Blütenvielfalt angezogen und reduzieren ebenfalls die Gefahr des Schädlingsbefalls. So kann weitestgehend auf maschinelle Unterstützung und vollständig auf Pflanzenschutzmittel verzichtet werden. Gleichzeitig fördert die Permakultur die Artenvielfalt. Ein Unternehmen, das nach den Prinzipien der Permakultur arbeitet, ist die Ferme biologique du Bec Hellouin in Le Bec Hellouin, Frankreich. Dort arbeitet man mit der Wissenschaft zusammen und erste Forschungsergebnisse zu Anbau und Wirtschaftlichkeit sind bereits veröffentlicht (Ferme biologique du Bec Hellouin, o. J.). Im Permakultur-Anbau lassen sich innerstädtisch auch bei minimalem Ressourceneinsatz Erträge von rund 20 t/ha und mehr erzielen (Chauffrey, 2017).

10.6.3.1.3 Klassisch bewirtschaftete Dachfarmen

Offene Gärten und Dachfarmen können prinzipiell die gleichen Hektarerträge liefern wie die herkömmliche Landwirtschaft. Bei Dachfarmen wird das Ertragspotenzial jedoch durch die Tragfähigkeit der Gebäude eingeschränkt. Der Anbau in klassischen Bodensubstraten belastet die Gebäude mit einem deutlich höheren Gewicht als die Produktion in hydroponischen Anlagen. Sofern die Tragfähigkeit für das Anlagengewicht ausreichend ist, sind die gleichen Erträge wie in ebenerdigen Gärten möglich.

Beispielhaft wurden drei Kombinationen aus zehn verschiedenen Gemüsesorten berechnet, die jeweils auf einem Zehntel der Fläche ökologisch produziert werden. Die erste Kombination aus Zucchini, Broccoli, Blumenkohl, Grünkohl, Porree, Bohnen, Möhren, Gurken, Salat und Kürbis lässt einen Ertrag von rund 21 t/ha erwarten. Baut man in einer zweiten Variante anstelle von Kürbis Tomaten unter einer unbeheizten Überdachung an, ist ein Gesamtertrag von rund 34 t/ha möglich. Wählt man in einer dritten Variante anstelle von Broccoli und Bohnen weitere Kohlsorten oder Rote Beete, lassen sich die Erträge jeweils um zwei bis sieben Tonnen steigern. Im Mittel kann man somit von etwa 25 t/ha ausgehen.

In Deutschland mangelt es noch an Erfahrungen mit kommerziell genutzten Dachfarmen. In der Stadt Boston in Massachusetts (USA) gibt es sowohl Erfahrungen mit offenen Dachfarmen als auch mit Dachgewächshäusern. Deshalb erscheint ein Vergleich mit den Dachfarmen in Boston sinnvoll. Das Klima dort „ähnelt in den Grundzügen dem von Deutschland“ (Merkel, 2018). Die mittlere Tageshöchsttemperatur im Jahresverlauf liegt bei 15,0 °C, die mittlere Tagestiefsttemperatur bei 6,6 °C. Dies entspricht fast genau den Mittelwerten der Stadt Freiburg im Breisgau. Im Jahresdurchschnitt beträgt die Temperatur in Boston 9,8 °C, in Esslingen 9,2 °C, in Konstanz und Sigmaringen 8,4 °C. Dabei sind die Winter in Esslingen, Konstanz und Sigmaringen etwas milder als in Boston, während im Sommer niedrigere Durchschnittstemperaturen erreicht werden. So liegen die Durchschnittswerte der Städte Esslingen, Konstanz und Sigmaringen im Monat Juli bei 18,1 °C, 19,0 °C und 17,7 °C. In Boston werden dagegen

22,4 °C erreicht (AM Online Projects, 2018). Die Dachfarm im Fenway Park produziert in Boston eine Vielzahl von Kräutern, Salaten und Gemüsesorten und erzielt auf einer Fläche von 465 m² einen Ertrag von 2.680 kg (5.900 pounds). Dies entspricht 5,8 kg/m² bzw. 58 t/ha (Green City Growers, 2016). Dies ist für den Anbau verschiedener Gemüsearten außerhalb von Gewächshäusern ein hoher Ertragswert.

10.6.3.1.4 Permakultur Dachfarmen

Offene Dachfarmen können ebenfalls nach den Prinzipien der Permakultur angelegt und bewirtschaftet werden. Bei ausreichender Tragfähigkeit sind die gleichen Erträge möglich wie am Boden.

10.6.3.2 Geschlossene Produktionssysteme

10.6.3.2.1 Dachfarmen mit Gewächshaus

Dachgewächshäuser liefern Erträge, die den Erträgen herkömmlicher ebenerdiger Gewächshäuser entsprechen. In Gewächshäusern kann durch den gezielten Einsatz geeigneter Nützlinge zur Schädlingsbekämpfung ebenfalls auf chemischen Pflanzenschutz verzichtet werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass in Gewächshäusern durch sogenannte Hydrokultur-Systeme der Bedarf an Wasser und Düngemitteln minimiert werden kann, indem eine Nährstofflösung gezielt an die Wurzeln herangeführt werden kann. Zudem wird in einigen Systemen versucht, über Kondensationsflächen Wasserverluste aus der Oberflächenverdunstung und der pflanzlichen Transpiration zurückzugewinnen. Der größte Nachteil besteht in Deutschland im vergleichsweise hohen Energieaufwand, der nachfolgend genauer betrachtet wird. Da es in Deutschland bisher nur wenige Dachfarmen gibt, wurden Erträge eines großen Gemüsebaubetriebs mit modernen Gewächshäusern als Referenzwerte genommen. Ein erstes größeres Forschungsprojekt von Fraunhofer UMSICHT mit dem Projektnamen InFarming bestätigt diese Ertragspotenziale (Keuter, 2017) und erreicht auf einer Fläche von 1.000 m² Erträge von bis zu 45 t (DGHK Deutsche Gesellschaft für Hydrokultur, 2015).

10.6.3.2.2 Aquaponik

Um die Nährstoff- und Frischwasserbedarfe zu reduzieren, werden in sogenannten Aquaponik-Systemen Nährstoff- und Wasserkreisläufe eingerichtet. Zu diesem Zweck werden Pflanzenbau und Fischzucht kombiniert. Die Ausscheidungen der Fische liefern den Pflanzen wichtige Nährstoffe. Die Pflanzen reinigen bei der Nährstoffaufnahme wiederum das Wasser, bevor es nach der Filterung größtenteils wieder für die Fischzucht genutzt werden kann. Bei Aquaponikanlagen hängen die Erträge erheblich vom Mengenverhältnis zwischen Pflanzen- und Fischproduktion ab. Das optimale Mengenverhältnis von Fisch zu Gemüse hängt wiederum vom Hauptziel des Betreibers ab. Sofern der Schwerpunkt auf der Fischzucht liegt und die

Pflanzenzucht lediglich eine Ergänzung ist, so reicht nach Angaben des Leibniz-Instituts für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB) ein Verhältnis von 1:2 bis 1:3 aus (Staaks, 2018). Liegt der Schwerpunkt auf dem Pflanzenbau können durch zusätzliche Düngung auch Verhältnisse von 1:10 bis 1:15 erreicht werden (Staaks, 2018). Je nach angestrebtem Verhältnis unterscheiden sich auch die Flächenanteile von Pflanzen- und Fischzucht. Bisher gibt es in Mitteleuropa nur wenige Anlagen, die bereits mehrjährig in Betrieb sind. Die Firma ecco-jäger Früchte und Gemüse AG in Bad Raggaz produziert seit dem Jahr 2015 auf einer Fläche von 1.200 m² rund 25 bis 30 t Gemüse und 14 t Fisch. Dabei nimmt die Fischzucht mit rund 200 m² ein Sechstel der Anlagenfläche ein. Die Urban Farmers AG, die Firma ECF Farmsystems und andere Betreiber versuchen, weitere Anlagen überwiegend im deutschsprachigen Raum und in den Niederlanden zu etablieren. Die Anlage LokDepot in Basel wurde vor ihrer Aufgabe zumindest für einige Jahre betrieben. Die verglichenen Systeme sind in Tabelle 235 dargestellt.

Tabelle 235: Flächen und Erträge der verschiedenen Produktionssysteme im Urban Farming

	Nutzfläche (m²)	Gemüse-ertrag (t)	Obst-ertrag (t)	Fisch-ertrag (t)
Aquaponik-Anlagen				
Urban Farmers AG UF LokDepot, Basel [1)]	255	5,0		0,85
Urban Farmers AG UF Rooftop Farm [2)]	1.000	9,8		7,30
Urban Farmers AG UF Rooftop Farm, NYC [3)]	2.000	63,5		11,34
Urban Farmers AG UF Rooftop Farm, Den Haag [4)]	1.900	45,0		19,00
ECF Farm Berlin [5)]	1.800	35,0		30,00
ecco-jäger Früchte und Gemüse AG, Bad Raggaz [6)]	1.200	25,0		14,00
Dachfarmen/Gewächshäuser				
Fraunhofer UMSICHT InFarming [7)]	1.000	40,0		
Gewächshaus, System Steiner, Insgesamt [8)]	196.000	5.400,0	200,00	
Gewächshaus, System Steiner, Tomaten [8)]	118.000	4.000,0		
Gewächshaus, System Steiner, Paprika [8)]	60.000	1.400,0		
Gewächshaus, System Steiner, Erdbeeren [8)]	18.000	200,0		
Offene Gärten				
Permakultur-Garten Chauffrey [9)]	150	0,30		

Quellen: (1) (Gisler, 2013); (Gisler, et al., 2014); (Urban Farmers AG, 2018a); (2) (Urban Farmers AG, 2018c); (3) (Urban Farmers AG, o. J.); (4) (Urban Farmers AG, 2018b); (5) (ECF Farmsystems, 2018); (Vattenfall GmbH, 2016) (6) (ecco-jäger Früchte und Gemüse AG, 2017); (ecco-jäger Früchte und Gemüse AG, 2018); (7) (Fraunhofer UMSICHT, o. J.); (Keuter, 2017) (8) (Gemüsebau Steiner GmbH & Co KG, 2017); (Gemüsebau Steiner GmbH & Co KG, 2017a); (9) (Chauffrey, 2017)

In Tabelle 236 sind die Erträge der verschiedenen Produktionssysteme umgerechnet auf einen Hektar Anlagenfläche dargestellt. Im Durchschnitt produzieren die Aquaponikanlagen 209 t Gemüse und 91 t Fisch pro Hektar Anlagenfläche. Gewächshäuser ohne Fischzucht erzeugen etwa 312 t Gemüse oder 111 t Erdbeeren pro Hektar.

Tabelle 236: Hektarerträge der verschiedenen Produktionssysteme im Urban Farming (t/ha Anlagenfläche)

	Gemüse-ertrag (t/ha)	Obst-ertrag (t/ha)	Fisch-ertrag (t/ha)
Aquaponik-Anlagen			
Urban Farmers AG UF LokDepot, Basel [1)]	196		33
Urban Farmers AG UF Rooftop Farm [2)]	98		73
Urban Farmers AG UF Rooftop Farm, NYC [3)]	318		57
Urban Farmers AG UF Rooftop Farm, Den Haag [4)]	237		100
ECF Farm Berlin [5)]	194		167
ecco-jäger Früchte und Gemüse AG, Bad Raggaz [6)]	208		117
Dachfarmen/Gewächshäuser			
Fraunhofer UMSICHT InFarming [7)]	>400		
Gewächshaus, System Steiner, Insgesamt [8)]	276	10	
Gewächshaus, System Steiner, Tomaten [8)]	339		
Gewächshaus, System Steiner, Paprika [8)]	233		
Gewächshaus, System Steiner, Erdbeeren [8)]	111		
Offene Gärten			
Permakultur-Garten Chauffrey [9)]	20		

Quellen: (1) (Gisler, 2013); (Gisler, et al., 2014); (Urban Farmers AG, 2018a); (2) (Urban Farmers AG, 2018c); (3) (Urban Farmers AG, o. J.); (4) (Urban Farmers AG, 2018b); (5) (ECF Farmsystems, 2018); (Vattenfall GmbH, 2016) (6) (ecco-jäger Früchte und Gemüse AG, 2017); (ecco-jäger Früchte und Gemüse AG, 2018); (7) (Fraunhofer UMSICHT, o. J.); (Keuter, 2017) (8) (Gemüsebau Steiner GmbH & Co KG, 2017); (Gemüsebau Steiner GmbH & Co KG, 2017a); (9) (Chauffrey, 2017)

10.6.3.2.3 Vertical Farming

Eine weitere Idee, der Verknappung von Anbauflächen für Nahrungsmittel entgegenzuwirken, ist das Konzept des Vertical Farmings. „Der Anbau von Nutzpflanzen erfolgt dabei auf vertikal gestapelten Ebenen in (meist hohen) Gebäuden, den Vertikalen Farmen. [...] Entkoppelt von ihrer natürlichen Umgebung werden die Nutzpflanzen unter exakt kontrollierten Umgebungsbedingungen mit Hilfe von sogenannten Controlled Environment Agriculture (CEA) Technologien angebaut“ (Zeidler, et al., 2014). Ein Beispiel für CEA-Technologien sind die Hochleistungs-LED-Systeme die es ermöglichen, „die Beleuchtungsverhältnisse für die Kulturpflanzen in der Vertikalen Farm optimal zu steuern“ (Zeidler, et al., 2014) und auf mehreren übereinanderliegenden Stockwerken unabhängig von Tageslicht zu produzieren. Solche Systeme benötigen jedoch im Vergleich zu anderen Systemen sehr viel elektrische Energie.

10.6.4 Bilanzierung Aquaponik

Um die Flächeneffizienz der Aquaponik zu ermitteln, muss neben der Anlagenfläche nicht nur die Futterbaufläche berücksichtigt werden, sondern auch der Flächenbedarf der Energiegewinnung, der mit dem Umstieg auf erneuerbare Energien erheblich an Bedeutung gewinnt. Im

Folgenden ist daher eine Schätzung des Flächenbedarfs dargestellt, die auch die Energiegewinnung berücksichtigt. Entscheidend sind hier vor allem der Fischfutterbedarf, die Zusammensetzung des Fischfutters, die Energieeffizienz der Anlagen und die gewählten Energieträger.

10.6.4.1 Fischfutterbedarf der Aquaponik

Die Fischproduktion in Aquaponikanlagen gilt als flächeneffiziente Alternative zur Fleischproduktion mit Schweinen, Rindern oder Geflügel. Um in Aquaponiksystemen ein Kilogramm Fisch zu produzieren, benötigt man nach Angaben des IGB Berlin durchschnittlich rund 1,23 kg Fischfutter (WIS Wiley Information Services GmbH, o. J.). Nach ECF Farmsystems liegt der Bedarf zwischen 1,20 kg und 1,40 kg, was einem Mittelwert von 1,30 kg entspricht (ECF Farmsystems, 2018). Der Durchschnitt dieser Mittelwerte liegt somit bei 1,27 kg. Neben dem Futterbedarf variiert auch die Fleischausbeute von Fischart zu Fischart (Chefs Resources Inc., 2017). Da die Fleischausbeute bei Tilapia zwischen 30 und 35 Prozent liegt (Pacific Seafood zit. n. Chef's Ressources Inc., 2017), ergibt sich ein Futterbedarf von rund 3,5 bis rund 4,3 kg Futter pro Kilogramm Fischfleisch. Daraus ergibt sich ein rechnerisches Mittel von 3,89 kg/kg (vgl. Tabelle 237). Der so errechnete Mittelwert wurde von der Firma ecco-jäger Früchte und Gemüse AG auf Nachfrage als realistisch bestätigt (ecco-jäger Früchte und Gemüse AG, 2018). Das Maximum kann jedoch auch über dem Wert von 4,33 liegen, z. B. wenn die Fische nicht zum optimalen Zeitpunkt verkauft werden können und in der Folge mehr Futter verbrauchen. Um in Aquaponikanlagen pro Hektar Anlagenfläche jährlich 91 t Fisch zu produzieren, benötigt man folglich ca. 116 t Fischfutter pro Jahr. Damit erhält man ca. 30 t Fischfleisch (Filet) pro Hektar und Jahr.

Tabelle 237: Futtermittelbedarf je Kilogramm Fischfleisch

Kennwert	MW Niedrig	MW Mittel	MW Hoch
Futterbedarf pro kg Fisch Fanggewicht (kg)	1,23 (1)	1,27	1,30 (2)
Fleischausbeute (3)	35%	33%	30%
Futterbedarf pro kg Fischfleisch (kg) (4)	3,51	3,89	4,33

MW = Mittelwert
Quellen: (1) IGB Berlin zit. n. WIS; (2) ECF Farmsystems, 2018; (3) Pacific Seafood zit. n. Chef's Ressources Inc., 2017

10.6.4.2 Zusammensetzung der Futtermittel

Je nach Zusammensetzung der Futtermittel und der Produktionsweise der einzelnen Bestandteile variiert die Fläche, die für die Produktion einer Tonne Fischfutter benötigt wird. So reduziert ein höherer Anteil von Fisch- oder Insektenmehl den Anbauflächenbedarf. Dies gilt jedoch nur dann ohne Bedingung, wenn das Fischmehl aus Produktionsabfällen der Fischverarbeitung oder aus Beifang hergestellt wird und das Insektenmehl aus Insekten hergestellt wird, die

mit Lebensmittel- und Grünabfällen gefüttert werden, die ansonsten nicht für die Produktion von Lebensmitteln nutzbar sind. Der Anbauflächenbedarf ergibt sich aus der Zusammensetzung der Futtermittel und den Erträgen der gewählten Anbaumethode/Bewirtschaftungsweise.

Die meisten Betreiber von Aquaponikanlagen nutzen für ihre Fischzucht Tilapia (Orechromis niloticus). Als Tilapia werden mehr als 50 Spezies aus der Familie der Buntbarsche (Cichlidae) bezeichnet. Tilapia gelten als effiziente Futterverwerter und können auch pflanzliche Proteine gut verwerten. „Bis zu einer Größe von ca. 6gr. benötigt das Fischfutter allerdings einen geringen Fischmehl-Anteil“ (ecco-jäger Früchte und Gemüse AG, 2017). Da Tilapia anschließend rein pflanzlich ernährt werden können, gilt ihre Zucht als vergleichsweise nachhaltig. Die in den verglichenen Aquaponiksystemen überwiegend verwendeten pflanzlichen Futterbestandteile sind Mais, Soja, Weizen und Gerste.

Allerdings sind die Wachstumsraten der Fische ohne tierische Proteine aufgrund eines Mangels an essentiellen Aminosäuren geringer (Kloas, 2017). Es gibt daher auch Versuche, Fischmehl durch Insektenlarvenmehl oder Nebenprodukte aus der Geflügelproduktion zu ersetzen. Dabei zeigte sich, dass ein teilweiser Ersatz des Fischmehls durch Geflügelnebenprodukte gut möglich ist, während ein vollständiger Ersatz erhebliche Auswirkungen auf die Wachstumsraten der Fische haben kann (Elsayed Mickdam, 2012). Ein vielversprechender Ansatz scheint der Ersatz des Fischmehls durch Insektenmehl zu sein. Versuche mit Insektenmehl aus Präpuppen der Fliege Hermetia illucens als Futtermittel für Karpfen, Lachs, Steinbutt und Broilern in der Starter- und Growerphase zeigten, dass es als Alternative zu Fischmehl gut geeignet sein könnte (Hermetia Futtermittel GbR, o. J. S. 15-20). Besonders nachhaltig ist die Produktion von Insektenmehl, wenn als Futtersubstrat für die Insektenzucht nur solche Biomassen verwendet werden, die als Abfall- oder Nebenprodukte anfallen und keine zusätzlichen Anbauflächen in Anspruch nehmen. Allerdings steht die Verfütterung solcher Biomassen in Konkurrenz zur Kompostierung und der Bioenergiegewinnung durch Fermentierung in Biogasanlagen.

Setzt man voraus, dass bei einer nachhaltigen Produktion von Fisch- und Insektenmehl kein Fischfleisch und keine Futtersubstrate verwendet wurden, die auch für den direkten menschlichen Verzehr geeignet wären, sondern nur biogene Reststoffe, so ist der Anteil der pflanzlichen Futterbestandteile entscheidend für den Flächenbedarf der Fischfutterproduktion.

Für die vorliegende Schätzung zum Flächenbedarf der Fischzucht in Aquaponiksystemen wurden, ausgehend von dieser Grundannahme, Fischfuttermischungen mit unterschiedlichen tierischen Anteilen verglichen. Die Futtermischung I nach Daudpota et al. (2016) enthält mehr als ein Drittel Fischmehl und 13 Prozent Sojakuchen (Daudpota, et al., 2016 S. 811). Im Fall der Futtermischung II wurde der Reisanteil durch lokal produzierte Gerste ersetzt, um den Flächenbedarf bei ausschließlich lokal produziertem Futter abschätzen zu können. Der Ersatz

des Reisanteils durch Gerste lässt jedoch den Kaloriengehalt des Fischfutters etwas ansteigen. Mischung III nach Mickdam et al. (2012) enthält nur ein Zehntel Fischmehl und 50 Prozent Sojakuchen. In Variante IV nach Mickdam et al. (2012) wurde der Fischmehlanteil durch Geflügelnebenprodukte ersetzt, die ebenfalls aus lokalen Quellen bezogen werden könnten (Mickdam, et al., 2012). Die genaue Zusammensetzung der Futtermischungen ist in Tabelle 238 dargestellt.

Tabelle 238: Zusammensetzung der Fischfuttermischungen

Futtermischung	I	II	III	IV
Fischmehl	34,5%	34,5%	10,0%	0,0%
Weizen	16,0%	16,0%		
Reis	11,0%			
Gerste		11,0%		
Mais			32,5%	30,0%
Maisöl			4,4%	5,2%
Sojakuchen	13,0%	13,0%	50,6%	51,1%
Weizenmehl	20,0%	20,0%		
Vitamin-Mineral-Mix	2,5%	2,5%		
Fischöl	3,0%	3,0%		
Huhn-Nebenprodukte				10,8%
Gemahlener Kalkstein			1,5%	1,9%
Methionin			0,2%	0,3%
Premix			0,3%	0,3%
Chromoxid			0,5%	0,5%
SUMME	**100%**	**100%**	**100%**	**100%**
Quelle:	(1)	(2)	(3)	(3)

Quellen: (1) Daudpota et al., 2016 (2) Abgewandelt n. Daudpota et al., 2016 (3) Mickdam et al., 2012

10.6.4.3 Anbauflächenbedarf der Fischfutterproduktion

Durch eine Reduktion des Anteils von tierischen Reststoffmehlen steigt der Flächenbedarf der Futterproduktion – zumindest, sofern man die Energiegewinnung für die Futterproduktion noch außer Acht lässt. Wird statt des Fischmehls vor allem Sojakuchen verfüttert, ist der Flächenbedarf pro kg Futtermischung höher als bei einem Ersatz durch Mais, Weizen oder Gerste. Der Flächenbedarf der verglichenen Futtermischungen lässt sich über die vom KTBL angegebenen Hektarerträge und die Anteile der Futtermittel an den Futtermischungen schätzen. Danach liegt er bei konventionellem Anbau in Deutschland zwischen 0,102 und 0,182 Hektar pro Tonne. Dies ergibt einen Mittelwert von 0,145 Hektar pro Tonne. Bei ökologischem Anbau liegen die entsprechenden Werte zwischen 0,164 und 0,281 ha/t, was einen Mittelwert von 0,227 ha/t ergibt. Im ökologischen Anbau ist der Flächenbedarf somit um durchschnittlich 57

Prozent größer. Die Flächeninanspruchnahme der einzelnen Futterbestandteile im konventionellen Anbau ist in Tabelle 239 dargestellt. Tabelle 240 zeigt die jeweilige Flächeninanspruchnahme im ökologischen Anbau.

Tabelle 239: Flächenbedarf pro Tonne Fischfutter bei konventionellem Anbau

Komponenten	Futtermischung			
	I	II	III	IV
	Flächenbedarf in Hektar			
Weizen	0,022	0,022		
Reis	0,028			
Gerste		0,016		
Mais			0,033	0,031
Maisöl			0,004	0,005
Sojakuchen	0,037	0,037	0,144	0,146
Weizenmehl	0,027	0,027		
SUMME (ha/t Futtermittel)	**0,113**	**0,102**	**0,182**	**0,182**
Mittelwert	**0,145**			

Quelle: Eigene Berechnung

Tabelle 240: Flächenbedarf pro Tonne Fischfutter bei ökologischem Anbau

Komponenten	Futtermischung			
	I	II	III	IV
	Flächenbedarf in Hektar			
Weizen	0,041	0,041		
Reis	0,037			
Gerste		0,016		
Mais			0,056	0,052
Maisöl			0,004	0,005
Sojakuchen	0,057	0,057	0,220	0,222
Weizenmehl	0,051	0,051		
SUMME (ha/t Futtermittel)	**0,185**	**0,164**	**0,281**	**0,279**
Mittelwert	**0,227**			

Quelle: Eigene Berechnung

10.6.4.4 Flächenbedarf zur Produktion von Fischfleisch

Die Größe der für die Produktion von einem Kilogramm Fischfleisch benötigten Fläche ist vor allem von der Zusammensetzung der Futtermischung und der landwirtschaftlichen Produktionsweise abhängig. Ein weiterer Faktor ist die Fleischausbeute, die bei Tilapia in der Regel zwischen 30 und 35 Prozent liegt. Für die vier verglichenen Futtermischungen liegt der Flächenbedarf im konventionellen Anbau zwischen 3,68 m²/kg und 7,67 m²/kg (vgl. Tabelle 241).

Im Durchschnitt ergibt sich ein Flächenbedarf von 5,67 m² pro Kilogramm Fischfleisch, was einem Bedarf von 0,567 ha pro Tonne Tilapiafilet entspricht. Bei einem Kaloriengehalt von ca. 80 kcal/100g ergibt sich damit ein Flächenbedarf von 7,09 m²/1.000 kcal.

Tabelle 241: Flächenbedarf pro Kilogramm Fischfleisch bei konventionellem Anbau

Flächenbedarf	Futtermischung			
	I	II	III	IV
m² je kg Futtermittel	1,13	1,02	1,82	1,82
m² je kg Fisch	1,43	1,29	2,30	2,30
m² je kg Fischfleisch (Ausbeute 35%)	4,09	3,68	6,59	6,58
m² je kg Fischfleisch (Ausbeute 30%)	4,78	4,29	7,68	7,67
m² je kg Fischfleisch Mittelwert	**4,44**	**3,98**	**7,13**	**7,13**
m² je kg Fleisch Mittelwert Insgesamt	**5,67**			

Quelle: Eigene Berechnung

Da die Erträge im ökologischen Landbau geringer ausfallen, liegt der Flächenbedarf hier zwischen 5,92 und 11,78 m²/kg (vgl. Tabelle 242). Insgesamt ergibt sich ein Mittelwert von 8,89 m² pro Kilogramm Fischfleisch. Dies entspricht pro Tonne Fischfleisch einem Bedarf von 0,89 ha. Somit ergibt sich ein Flächenbedarf von 11,11 m²/1.000 kcal.

Tabelle 242: Flächenbedarf pro Kilogramm Fischfleisch bei ökologischem Anbau

Flächenbedarf	Futtermischung			
	I	II	III	IV
m² je kg Futtermittel	1,85	1,64	2,81	2,79
m² je kg Fisch	2,33	2,07	3,55	3,54
m² je kg Fischfleisch (Ausbeute 35%)	6,67	5,92	10,14	10,10
m² je kg Fischfleisch (Ausbeute 30%)	7,78	6,91	11,83	11,78
m² je kg Fischfleisch Mittelwert	**7,23**	**6,41**	**10,99**	**10,94**
m² je kg Fleisch Mittelwert Insgesamt	**8,89**			

Quelle: Eigene Berechnung

Anhand der ermittelten Flächenbedarfe pro Kilogramm Fisch bzw. pro Kilogramm Fischfleisch kann sowohl die für Fischproduktion benötigte Fläche je nach verwendetem Aquaponiksystem als auch die vom durchschnittlichen Verzehr abhängige Anbaufläche pro Einwohner berechnet werden.

Die jeweils für die Fischfutterproduktion benötigten Anbauflächen der verglichenen Aquaponiksysteme sind in Tabelle 243 dargestellt. Bei den untersuchten Systemen liegt der

Futteranbauflächenbedarf pro Hektar Anlagenfläche zwischen 1,3 und 30,6 Hektar bei konventioneller Wirtschaftsweise sowie zwischen 2,0 und 47,9 Hektar bei ökologischer Wirtschaftsweise. Der Mittelwert für eine ausreichende Futtermittelversorgung mittels konventionellen Anbaus liegt bei 14,7 Hektar Futterfläche pro Hektar Aquaponikanlage, bei einer Versorgung mittels ökologischen Landbaus liegt der Mittelwert bei rund 23,0 Hektar Futterfläche pro Hektar Aquaponikanlagenfläche (ha FF/ha AF).

Tabelle 243: Anbauflächenbedarf der Aquaponik-Systeme für Fischfutter pro Hektar Anlagenfläche

Aquaponik-Systeme	**Fischfleisch-ertrag** (t/ha)	**Futterbe-darf** (t/ha)	**Futterflächen-bedarf konventi-onell** (ha FF/ha AF)	**Futterflächen-bedarf ökolo-gisch** (ha FF/ha AF)
Urban Farmers AG UF LokDepot, Basel	10,7	41,6	6,1	9,5
Urban Farmers AG UF Rooftop Farm	2,3	8,9	1,3	2,0
Urban Farmers AG UF Rooftop Farm, NYC	18,5	72,0	10,5	16,4
Urban Farmers AG Rooftop Farm, Den Haag	32,5	126,4	18,3	28,7
ECF Farmsystems, Berlin	54,3	211,2	30,6	47,9
ecco-jäger, Bad Raggaz	38,0	147,8	21,4	33,6
DURCHSCHNITT	**26,1**	**101,5**	**14,7**	**23,0**

FF = Futterfläche, AF = Anlagenfläche, ha FF/ha AF = Hektar Futterfläche pro Hektar Anlagenfläche
Quelle: Eigene Berechnungen

10.6.4.5 Energiebedarf der Fischfutterproduktion

Um den Flächenbedarf der Fischfutterproduktion zu schätzen, muss bei einer auf erneuerbaren Energien basierenden Energieversorgung auch der Flächenbedarf der Energiebereitstellung für die Futterproduktion berechnet werden.

Der Primärenergiebedarf von Tilapiafutter ist bisher unbekannt. Von Pelletier und Tyedmers (2007) wurde aber der Energiebedarf der Lachsfutterproduktion ermittelt. Die meisten der in der Lachszucht eingesetzten Futtermittel werden auch in Futtermischungen für andere Fische, wie z. B. Tilapia, verwendet, sodass diese Daten prinzipiell gut für eine Schätzung genutzt werden können. Da es sich dabei jedoch um Daten zu Produkten aus Nord- und Südamerika handelt, wurde der Energieaufwand der landwirtschaftlichen Produktion mit Daten des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft für Deutschland (KTBL, 2018) verglichen. Weil das KTBL für alle unverarbeiteten pflanzlichen Erzeugnisse aus Deutschland höhere Werte als Pelletier und Tyedmers angibt, wurden diese höheren Werte übernommen. Im Fall von Rapsöl, Rapskuchen, Sojaöl, Sojakuchen und Getreidemehl wurde zudem der jeweils typische Energieaufwand der Müllerei addiert, der in Deutschland durchschnittlich pro Tonne anfällt.

10.6.4.5.1 Pflanzliche Futtermittel

Der Energieaufwand für den Anbau von Weizen, Gerste, Mais und Soja wurde anhand von Daten des KTBL berechnet: Im konventionellen Landbau werden für Weizen 1.126 kWh/t benötigt, für Gerste 1.090 kWh/t, für Mais 943 kWh/t, für Soja 1.177 kWh/t und für Raps 1.717 kWh/t benötigt. Im ökologischen Landbau belaufen sich die Werte für Weizen auf 1.076 kWh/t und für Gerste auf 951 kWh/t. Für Mais werden 930 kWh/t, für Soja 1.458 kWh/t und für Raps 1.104 kWh/t benötigt. (KTBL, 2018)

Für die Verarbeitung von Rapssaat zu Rapsöl und Rapskuchen wird in der Literatur ein Energiebedarf der Müllerei zwischen 60 und 120 kWh pro Tonne Rapssaat angegeben (Ferchau, et al., 2009). Diese Werte wurden durch einen befragten Produzenten bestätigt, der für Rapsöl/Rapskuchen einen Bedarf von 60 kWh pro Tonne Rapssaat sowie für Sojaöl/Sojakuchen rund 80 kWh pro Tonne Sojasaat angibt (Ölmühle Garting, 2018). Maisöl (auch Maiskeimöl) wird als Nebenprodukt der Maisstärkeproduktion gewonnen. Dabei kommen unterschiedliche Verfahren zur Anwendung. Das häufig angewendete nasse Mahlen von Mais (Corn Wet Milling) ist einer der energieintensivsten Prozesse in der nahrungsmittelverarbeitenden Industrie. Im Jahr 2003 gingen 15 Prozent des Energieverbrauchs der gesamten Nahrungsmittelindustrie der Vereinigten Staaten allein darauf zurück (Galitsky, et al., 2003 S. iii). Pro Tonne Mais werden 4,58 Mio. Btu (British thermal unit) verbraucht (Galitsky, et al., 2003 S. 14), was rund 1.344 kWh/t entspricht.

Für Getreidemehl gibt der Verband Deutscher Mühlen einen Energiebedarf von 70 bis 100 kWh pro Tonne vermahlenes Getreide an (VDM Verband Deutscher Mühlen, 2014 S. 4). Reis wird in Deutschland bisher nicht kommerziell angebaut und muss daher importiert werden. Der Energiebedarf des Reisanbaus variiert je nach Region und Sorte. Angenommen wurde für die Berechnung ein Energiebedarf von 5.980 kWh/ha und 2.136 kWh/t. Dabei handelt es sich um Mittelwerte der Angaben, die Iqbal (2007) zit. n. Alipour et al. (2012) und Chaichana et al. (2014) für den Reisanbau in Asien machen. So wurde von Chaichana et al. für die Provinz Phatthalung in Thailand ein Wert von rund 5.470 kWh/ha sowie ein Ertrag von 2,7 t/ha berechnet (Chaichana, et al., 2014). Von Iqbal (2007) zit. n. Alipour et al. (2012) wurde in Bangladesch ein Durchschnittswert von rund 6.490 kWh/ha berechnet, wo im Jahr 2016 ein Durchschnittsertrag von 2,9 t/ha erzielt wurde. In anderen Weltregionen ist der Energieverbrauch des Reisanbaus zum Teil deutlich höher, wie etwa im Iran (Provinz Guilan) oder in den USA, wo er mit über 13 MWh/ha mehr als doppelt so viel Energie benötigt (Alipour, et al., 2012). Im Iran (Provinz Guilan) werden trotz des höheren Energieaufwandes keine wesentlich höheren Erträge erreicht. Im Landesdurchschnitt werden dort rund 3 t Rohreis pro Hektar und Jahr geerntet (FAOSTAT zit. n. GBI-Genios, 2019). In den USA wurden dagegen im Erhebungsjahr 1996 mit 6,9 t Rohreis pro Hektar, auch etwa doppelt so hohe Erträge erzielt (im Jahr 2016 wurden nach FAOSTAT sogar mehr als acht Tonnen Rohreis pro Hektar geerntet), sodass der

Energieaufwand pro Tonne mit rund 2,0 MWh/t ähnlich ausfiel, wie in Thailand und Bangladesch (FAOSTAT zit. n. GBI-Genios, 2019). Bei den wichtigsten bzw. größten Reisexporteuren handelt es sich hauptsächlich um asiatische Länder (Indien, Thailand, Vietnam, Pakistan, China, Myanmar) und die USA. Ein Energiebedarf des Anbaus von rund 2,1 MWh pro Tonne Importrohreis erscheint daher realistisch. Der Energieaufwand des Transports konnte allerdings nicht berücksichtigt werden, da hierzu keine ausreichenden Informationen vorlagen.

10.6.4.5.2 Fischöl und Geflügelmehl

Da für Fischöl und Geflügelmehl aus deutscher Produktion keine Daten erhältlich waren, wurden die Werte von Pelletier und Tyedmers (2007) übernommen: Angegeben wird für Peruanisches Fischöl ein Energieaufwand von 7.500 kWh/t und für US Fischöl von 5.055 kWh/t. Bei der Herstellung von Mehl aus Geflügelnebenprodukten werden 14.028 kWh/t benötigt. (Pelletier, et al., 2007)

10.6.4.5.3 Fischmehl

Da Fischmehl aufgrund des im Vergleich zu Fischöl und Geflügelmehl höheren Mengenanteils den größten Einfluss auf den Energieaufwand der Fischfuttermischungen hat, wurde in diesem Fall ein Vergleich der Rohstoffquellen und ihres Einflusses auf den Energieaufwand vorgenommen. So wurde in einer Variante (Tabelle 245) der Energiebedarf der Fischmehlproduktion nach Pelletier und Tyedmers angenommen. In einer zweiten Variante (Tabelle 246) wurde angenommen, dass das Fischmehl nicht aus Fischverarbeitungsabfällen, sondern ausschließlich aus eigens dafür gefangenem Rohfisch oder Beifang hergestellt wird.

Um eine Tonne Fischmehl herzustellen, werden zwischen vier und fünf Tonnen Fisch benötigt (Miles, et al., 2006). Für Energieaufwand und Umweltbilanz ist entscheidend, welche Rohstoffe für die Produktion genutzt werden. Weltweit wird Fischmehl sowohl aus eigens dafür gefangenem Fisch als auch aus Beifang der Fischerei und aus Fischresten hergestellt, die in der verarbeitenden Industrie anfallen (FAO, Fishery Industries Division, 1986). Im Jahr 2012 wurden weltweit rund 136 Millionen Tonnen Fisch gefangen (FAO, 2014 S. 7). Im Jahr 2014 betrug die gefangene Menge rund 146 Millionen Tonnen. Davon wurden 81,6 Millionen Tonnen auf offener See gefangen, 11,9 Millionen Tonnen in Binnengewässern (FAO, 2016 S. 15/17). 21,7 Millionen Tonnen Fisch wurden im Jahr 2012 (FAO, 2014) nicht für den direkten menschlichen Verbrauch genutzt, im Jahr 2014 waren es rund 21 Millionen Tonnen. 76 Prozent dieser Menge (15,8 Millionen Tonnen) wurden zu Fischmehl und Fischöl verarbeitet, die übrigen 24 Prozent (5,2 Millionen Tonnen) wurden überwiegend direkt verfüttert. (FAO, 2016 S. 6)

Effiziente Schiffe benötigen nach Angaben des Scientific, Technical and Economic Committee for Fisheries (STECF) nur 400 Liter Treibstoff pro Tonne angelandetem Fisch. Der Energieverbrauch durchschnittlicher Trawler lag im Jahr 2014 in den Niederlanden bei 800 bis 1.400

Litern Treibstoff pro Tonne angelandetem Fisch (STECF Scientific, Technical and Economic Committee for Fisheries, 2016 S. 336). Nach Boopendranath und Hameed (2013) liegt der Energieverbrauch motorisierter Fangschiffe (Mechanised trawling) bei Werten von 31,40 bis 36,97 GJ pro angelandeter Tonne Fisch (Boopendranath, et al., 2013). Anhand dieser Quellen ergibt sich eine Spanne von rund 8.800 kWh bis 15.400 kWh pro Tonne. Nimmt man jeweils den Mittelwert beider Verbrauchsangaben als Basis, ergibt sich daraus ein mittlerer Energieverbrauch von 10.800 kWh pro Tonne angelandetem Fisch. Der Energiebedarf pro Tonne angelandeten Fischs muss sowohl für eigens für die Fischmehlproduktion gefangenen Fisch als auch für Beifang in vollem Umfang angerechnet werden. Wenn pro Tonne Fischmehl rund 4,4 Tonnen Rohfisch verbraucht werden, ergibt dies einen Energiebedarf der Rohstoffbereitstellung von 47.500 kWh pro Tonne Fischmehl. Die Verarbeitung von Fisch zu Fischmehl weist dagegen einen vergleichsweise geringen Energiebedarf auf. Er beträgt heute in effizienten Produktionsanlagen mit 400 kWh pro Tonne Rohfisch (Hedinn, 2018) rund 1.760 kWh pro Tonne Fischmehl. So ergibt sich ein Energieverbrauch von rund 49,3 MWh pro Tonne Fischmehl. Kann ein Teil des Rohfischs durch Produktionsabfälle aus einer benachbarten Speisefischverarbeitung ersetzt werden, reduziert sich der Energiebedarf dementsprechend. Einer der größten Fischmehlexporteure der Welt ist Peru. Von Pelletier und Tyedmers (2007) wird pro Tonne peruanischen Fischmehls ein Mittelwert von 4.300 kWh (15.500 MJ) angegeben. Ein deutlich höherer Wert wurde für kanadisches Fischmehl aus Nebenprodukten der Hering Fischerei in British Columbia (CDN by-product fish meal) ermittelt, für das rund 11.100 kWh/t (40.000 MJ/t) aufgewendet werden müssen (Pelletier, et al., 2007). Die große Spanne von 4,3 bis 49,3 MWh pro Tonne Endprodukt zeigt, welche entscheidende Bedeutung dem verwendeten Rohstoff bei der Fischmehlproduktion zukommt.

10.6.4.5.4 Mineralische Futtermittel und sonstige Futterzusätze

Für die Herstellung von Kalksteinmehl ist ein Energieaufwand von 180 kWh/t erforderlich (BMG Engineering AG, o. J.). Für die Futterzusätze Methionin, Premix und Chromoxid konnten keine Daten zum Energieaufwand in Erfahrung gebracht werden, ihr Anteil an den Futtermischungen beträgt aber nur rund ein Prozent.

10.6.4.5.5 Energieaufwand der Fischfuttermittelproduktion

Anhand der ermittelten Daten wurde der Energieaufwand für Anbau bzw. Fang und Verarbeitung der einzelnen Futtermittel abgeschätzt, wie er bei einer Produktion in Deutschland anfallen dürfte. Die Einzelposten und die jeweiligen Summen sind in Tabelle 244 in einer Übersicht neben den Angaben von Pelletier und Tyedmers dargestellt. In diesem Vergleich wird ersichtlich, dass im Falle mehrerer Futtermittel allein durch den landwirtschaftlichen Anbau in Deutschland bereits ein höherer Energieaufwand entsteht, als er von Pelletier und Tyedmers insgesamt angegeben wird. Lediglich für den Anbau von Raps zur Ölproduktion und die

Ölpressung geben das KTBL und deutsche Ölhersteller in der Summe deutlich geringere Werte als Pelletier und Tyedmers an. Die Werte von Tyedmers wurden daher nur für jene Futtermittel übernommen, in deren Fall keine Werte für Deutschland erhoben werden konnten. Werte für den Transport wurden nicht berechnet, da diese je nach Standort variieren können. Da von einer möglichst dezentralen und regionalen Versorgung ausgegangen wird, dürften lediglich bei der Verwendung von Reis, Fischmehl und Fischöl längere Transporte von deutlich über 100 km in jedem Fall notwendig sein. Bei einem Transport per Lastkraftwagen werden aktuell rund 140 MJ pro 100 tkm benötigt, per Bahn müssen 30 MJ/100 tkm aufgewendet werden (Umweltbundesamt, 2016). Der Transport fällt damit bei den pflanzlichen, regional erzeugten Futtermitteln nur mit einem Zusatzaufwand von zwei bis vier Prozent ins Gewicht. Werden Reis oder Fischprodukte beispielsweise von Bremerhaven bis in die betrachteten Landkreise in Süddeutschland transportiert, beträgt die Transportstrecke dagegen zwischen 650 und 900 km. Per Lkw würde sich der Energiebedarf pro Tonne Futtermittel somit um 900 bis 1.260 MJ erhöhen, per Bahn um 190 bis 270 MJ/t (Umweltbundesamt, 2016). Für konventionellen Reis betrüge der Energieaufwand ohne Schifftransport damit zwischen 6.170 und 7.240 MJ/t.

Tabelle 244: Energieaufwand der Fischfuttermittelproduktion (MJ/t)

Futtermittel	Ackerbau / Fischerei (soweit bekannt)	Verarbeitung (soweit bekannt)	SUMME für Produktion in Deutschland	Vergleichswert nach Pelletier und Tyedmers, 2007
Pflanzlich, konventionell				
Weizen [1)]	4.054		4.054	3.020
Weizenmehl [1) 8)]	4.054	437	4.491	k. A.
Mais [1)]	3.395		3.395	k. A.
Maisglutenmehl [1)]	3.395		k. A.	12.800
Maisöl [1) 5)]	3.395	4.842	8.237	k. A.
Reis* [2) 3)]	5.980		5.980	k. A.
Soja [1)]	4.237		4.237	k. A.
Sojakuchen [1) 7)]	4.237	288	4.525	k. A.
Sojamehl [1)]	4.237	k. A.	k. A.	3.990
Rapskorn [1)]	6.180		6.180	5.510
Rapsmehl [1)]	6.180	k. A.	k. A.	4.630
Rapsöl [1) 6) 7)]	5.325	216	5.541	9.860
Pflanzlich, ökologisch				
Weizen [1)]	3.875		3.875	1.290
Weizenmehl [1) 8)]	3.875	437		k. A.
Mais [1)]	3.347		3.347	k. A
Maisglutenmehl [1)]	3.347		k. A.	11.400
Maisöl [1) 5)]	3.347	4.842	8.189	k. A.
Soja [1)]	5.250		5.250	k. A.
Sojakuchen [1) 7)]	5.250	288	5.538	k. A.
Sojamehl [1)]	5.250	k. A.	k. A.	3.440
Rapskorn [1)]	3.976		3.976	2.860
Rapsmehl [1)]	3.976	k. A.	k. A.	2.860
Rapsöl [1) 6) 7)]	3.976	216	4.191	5.980
Tierisch				
Rohfisch, effiziente Trawler [9)]	14.400			k. A.
Rohfisch, durchschnittliche Trawler [8) 9)]	38.880		38.880	k. A.
Fischmehl aus Rohfisch/Beifang [9) 10) 11) 12)]	171.072	6.336	177.408	k. A.
Peruanisches Fischmehl			k. A.	15.500
Kanadisches Fischmehl aus Nebenprodukten			k. A.	40.000
Peruanisches Fischöl			k. A.	27.000
US Fischöl			k. A.	18.200
Geflügelnebenproduktmehl			k. A.	50.500
Mineralisch				
Kalksteinmehl [13)]			648	k. A.

* ohne Transport

Quellen: (1) KTBL, 2018; (2) Chaichana et al. (2014); (3) Iqbal, 2007, zit. n. Alipour et al., 2012; (4) Chaichana et al., 2014; (5) Galitsky et al., 2003; (6) Ferchau et al, 2009; (7) Ölmühle Garching, 2018; (8) VDM, 2014; (9) Boopendranath and Hameed, 2013; (10) STECF, 2016; (11) Hedinn, 2018 (12) Miles & Chapman, 2006; (13) BMG, o. J.

10.6.4.5.6 Energiebedarf der Futterherstellung pro Tonne Fischfuttermischung

Bei der Fütterung von Tilapia in Aquaponikanlagen werden unterschiedliche Futtermittel eingesetzt. Die meisten fertigen Mischungen enthalten mehr oder weniger große Mengen Fischmehl. Zu Insektenmehl, das künftig eine Alternative zu dem ökologisch nicht immer unbedenklichen Fischmehl sein könnte, liegen bisher noch keine Öko- und Energiebilanzen vor. Wendet man die in Tabelle 244 dargestellten Werte zur Berechnung des Energieaufwandes der vier zuvor verglichenen Futtermischungen an, so wird deutlich, dass mit Blick auf den Energieverbrauch möglichst geringe Anteile von Reis, Maisöl sowie Geflügel- und Fischprodukten erstrebenswert sind. Ein Ersatz des Fischmehlanteils durch Mehl aus Geflügelnebenprodukten führt zu einem höheren Energieaufwand. So kommt die Mischung III mit 10 Prozent Fischmehl auf den mit Abstand niedrigsten Energieaufwand der vier Mischungen, während die vergleichbare Mischung mit 10,8 Prozent Geflügelmehl den höchsten Energieaufwand erfordert. Nutzt man peruanisches Fischmehl nach Pelletier und Tyedmers, liegt der Energiebedarf der vier Futtermischungen bei rund 1,6 bis 2,5 MWh/t (vgl. Tabelle 245). Deutlich wird an dieser Bilanzierung aber auch, dass Tilapiafutter im Durchschnitt einen erheblich niedrigeren Energieaufwand erfordert als beispielsweise Lachsfutter, für das Pelletier und Tyedmers einen Energieaufwand von 2.740 bis 7.470 kWh pro Tonne ermittelt haben (Pelletier, et al., 2007 S. 406).

Tabelle 245: Energieaufwand Futterherstellung Variante 1, mit peruanischem Fischmehl, ökologischer Landbau (kWh/t)

Futtermittel	Energiebedarf Rohstoff (kWh/t)	Futtermischung			
		I	II	III	IV
Fischmehl [1)]	4.306	1.485	1.485	431	0
Weizen [2)]	1.076	172	172	0	0
Reis [3) 4)]	2.136	235	0	0	0
Gerste [2)]	951	0	105	0	0
Mais [2)]	930	0	0	302	279
Maisöl [2) 5)]	2.274	0	0	100	118
Sojakuchen [2) 6)]	1.538	200	200	778	786
Weizenmehl [2) 7)]	1.198	240	240	0	0
Vitamin-Mineral-Mix	0	0	0	0	0
Fischöl [1)]	5.056	152	152	0	0
Huhn-Nebenprodukte [1)]	14.028	0	0	0	1.515
Gemahlener Kalkstein [8)]	180	0	0	3	3
Methionin	k. A.	0	0	0	0
Premix	k. A.	0	0	0	0
Chromoxid	k. A.	0	0	0	0
SUMME (kWh/t)		**2.484**	**2.354**	**1614**	**2.701**
MITTEL (kWh/t)			**2.288**		

Quellen: (1) Pelletier and Tyedmers, 2007; (2) KTBL, 2018; (3) Iqbal, 2007, zit. n. Alipour et al., 2012; (4) Chaichana et al., 2014; (5) Galitsky et al., 2003; (6) Ölmühle Garching, 2018; (7) VDM, 2014; (8) BMG, o. J.

Wird der Fisch für die Fischmehlproduktion eigens dafür gefangen oder aus Beifang gewonnen, liegt der Energieverbrauch pro Tonne Fischmehl mit rund 49 MWh um das Elffache höher als im Fall des peruanischen Fischmehls nach Pelletier und Tyedmers. Dies wirkt sich erheblich auf die Energiebilanzen der Fischfuttermischungen mit Fischmehlanteilen aus. Der Energiebedarf der beiden Mischungen I und II mit einem Fischmehlanteil von 34,5 Prozent liegt dann bei rund 18 MWh/t. Mischung III mit 10 Prozent Fischmehl benötigt immer noch 6,1 MWh/t, sodass in diesem Fall Mischung IV mit Geflügelrestmehl mit 2,7 MWh/t den geringsten Energieaufwand aufweist. Die Ergebnisse der Energieaufwandsschätzung sind in Tabelle 246 dargestellt.

Tabelle 246: Energieaufwand Futterherstellung Variante 2, Fischmehl aus ganzem Fisch, ökologischer Landbau (kWh/t)

Futtermittel	Energiebedarf Rohstoff (kWh/t)	Futtermischung			
		I	II	III	IV
Fischmehl [1)]	49.269	16.998	16.998	4.927	0
Weizen [2)]	1.076	172	172	0	0
Reis [3) 4)]	2.136	235	0	0	0
Gerste [2)]	951	0	105	0	0
Mais [2)]	930	0	0	302	279
Maisöl [2) 5)]	2.274	0	0	100	118
Sojakuchen [2) 6)]	1.538	200	200	778	786
Weizenmehl [2) 7)]	1.198	240	240	0	0
Vitamin-Mineral-Mix	0	0	0	0	0
Fischöl [1)]	5.056	152	152	0	0
Huhn-Nebenprodukte [1)]	14.028	0	0	0	1.515
Gemahlener Kalkstein [8)]	180	0	0	3	3
Methionin	0	0	0	0	0
Premix	0	0	0	0	0
Chromoxid	0	0	0	0	0
Summe (kWh/t)		**17.996**	**17.866**	**6.110**	**2.702**
Durchschnitt (kWh/t)			**11.168**		

Quelle: (1) Eigene Berechnung nach VDM, 2014; Boopendranath and Hameed, 2013; STECF, 2016; Hedinn, 2018; Miles & Chapman, 2006 (2) KTBL, 2018; (3) Iqbal, 2007, zit. n. Alipour et al., 2012; (4) Chaichana et al., 2014; (5) Galitsky et al., 2003; (6) Ölmühle Garching, 2018; (7) VDM, 2014; (8) BMG, o. J.

Im Vergleich zur Herkunft des Fischmehls wirkt sich die Produktionsweise der Landwirtschaft kaum auf den Energiebedarf aus. Im Durchschnitt fällt er nach Angaben des KTBL minimal niedriger aus, wenn die pflanzlichen Futtermittel aus konventionellem Landbau stammen.

Tabelle 247: Energieaufwand Futterherstellung Variante 1 mit peruanischem Fischmehl, konventioneller Landbau

Energiebedarf	Futtermischung			
	I	II	III	IV
Summe (kWh/t)	2.465	2.350	1.476	2.563
Durchschnitt (kWh/t)	**2.214**			

Quelle: Eigene Berechnung

Tabelle 248: Energieaufwand Futterherstellung Variante 2, Fischmehl aus ganzem Fisch, konventioneller Landbau

Energiebedarf	Futtermischung			
	I	II	III	IV
Summe (kWh/t)	17.977	17.863	5.973	2.563
Durchschnitt (kWh/t)	**11.094**			

Quelle: Eigene Berechnung

10.6.4.6 Energiebedarf von Gewächshäusern

Der Energieverbrauch von Gewächshäusern liegt in Deutschland in der Regel zwischen 290 und 700 kWh/m² (KTBL, 2014 S. 134). Befragte Gewächshausbetreiber geben Werte von 400 bis 420 kWh/m² an. Der Strombedarf beträgt rund drei kWh/m² (Steiner, 2017). Nach Angaben der Zukunftsinitiative Niedrigenergie-Gewächshaus (ZINEG) lässt sich der Energiebedarf bei der Produktion von Paprika und Tomaten in Niedrigenergiegewächshäusern durch moderne Effizienztechnologien auf Werte zwischen 130 und 146 kWh/m² senken (KTBL, 2014, S. 134/135). Dies wird bestätigt durch Kempkes und Janse, die einen Erdgasbedarf von 12,6 m³/m² für ein 2SaveEnergie-Gewächshaus und von 15,5 m³/m² für Praxisbetriebe angeben (Kempkes, et al., 2016 S. 25), was Energieverbräuchen von 136 bzw. 168 kWh/m² entspricht. In Tabelle 249 ist der Energiebedarf von Gewächshäusern dargestellt, der bei den weiteren Berechnungen angenommen wurde.

Tabelle 249: Energiebedarf von Gewächshäusern

Gewächshaustyp	Energiebedarf
Standardgewächshaus [1) 2)]	400 kWh/m²
Niedrigenergiegewächshaus [1) 3)]	140 kWh/m²

Quellen: Quellen: (1) KTBL, 2014; (2) Steiner, 2017; (3) Kempkes & Hanse, 2016

10.6.4.7 Flächenbedarf der Energieversorgung von Gewächshäusern

Als Energieträger werden bei der Beheizung häufig noch fossile Energieträger oder Holz genutzt. Bei der Beheizung mit Erdöl entsteht in Deutschland kein zusätzlicher Flächenbedarf,

da Erdöl nahezu vollständig aus dem Ausland importiert wird. Unter Umständen ist jedoch mit der Nutzung von importiertem Erdöl ein relevanter Flächenverbrauch verbunden, wenn das Öl beispielsweise aus Quellen wie den Ölsandabbaugebieten in Alberta, Kanada, stammt. Dieser ist mit erheblichen Umweltwirkungen verbunden und voraussichtlich irreversibel. Werden Gewächshäuser dagegen mit Energie aus einheimischen, erneuerbaren Energiequellen versorgt, lassen sich schädliche Umweltwirkungen auf ein geringes Maß reduzieren. Dabei gilt aber sowohl für biogene Energieträger als auch für die Photovoltaik, dass sie die ökologische Qualität der genutzten Flächen nicht negativ beeinflussen, wenn sie umweltgerecht erzeugt und angewendet werden. Der Flächenbedarf ist jedoch je nach Energiequelle sehr unterschiedlich. Bei Holz/Holzpellets aus der forstwirtschaftlichen Produktion werden rund 20 MWh/ha gewonnen. Mit Energiepflanzen liegen die Netto-Energieerträge zwischen 6 MWh/ha (Raps, nur Pflanzenölnutzung) und ca. 80 MWh/ha (Miscanthus) (vgl. KTBL, 2012 und KTBL, 2018). Bioenergie bietet den Vorteil, dass keine weiteren Speichermedien benötigt werden und die Speicherverluste minimal sind. Geht man von einem mittleren Ertrag von rund 50 MWh/ha aus, liegt der Flächenbedarf je nach Energiestandard demnach zwischen 28 und 80 Hektar LNF pro Hektar Gewächshausfläche. Erzeugt man synthetisches Erdgas aus Solarstrom, kann man von einem Wirkungsgrad der Umwandlung zwischen 49 bis 77 Prozent ausgehen (Kersten, 2012). Eine neue Power-to-Gas-Anlage in Frankfurt am Main erzielt bereits 77 Prozent, bezogen auf den Brennwert (IWR, 2015). Bisher sind solche hohen Wirkungsgrade im industriellen Maßstab allerdings noch nicht die Regel (FIZ Karlsruhe, 2016). Im Rahmen dieser Schätzung wurde deshalb von einem Wirkungsgrad von 60 Prozent ausgegangen. Um die benötigte Endenergie für einem Hektar Gewächshaus bereitzustellen, werden demnach 4,7 bis 13,3 Hektar Freiflächenphotovoltaik oder 1,9 bis 5,6 Hektar Dachflächenphotovoltaik auf geneigten Dächern benötigt. Nutzt man Freiflächen-Solarthermie als Wärmequelle, dürfte man in Deutschland bei einem Ertrag von 1,3 bis 1,7 GWh/ha (vgl. Simon & Szaguhn, 2017, S. 129) von einem Flächenbedarf für die Solaranlage von mindestens 1,0 bis 2,9 Hektar ausgehen können, sofern die Wärmeverluste des saisonalen Wärmespeichers (SWS) nicht mehr als 20 Prozent betragen. Nach Angaben der Firma Cupasol sind die Verluste geringer als 20 Prozent.

Tabelle 250: Angenommene Wirkungsgrade von Speichertechnologien

Speichertechnologie	Wirkungsgrad
Power-to-Gas [1) 2)]	60%
Saisonale Wärmespeicher [3)]	>80%

Quelle: Annahmen basierend auf den Angaben von: (1) Kersten, 2012 (2) FIZ Karlsruhe, 2016 (3) Cupasol

Vernachlässigbar ist der Flächenbedarf der Heizenergiebereitstellung nur, wenn beispielsweise Geothermie oder Abwärme als Wärmequelle genutzt werden können und keine Nut-

zungskonkurrenz um die Energie besteht, weil am Ort ihres Aufkommens keine anderen Nutzungen möglich sind. Im Vergleich zur Beheizung nimmt der Stromverbrauch von 38 MWh/ha mit 0,085 ha PV-Freiflächenanlage nur wenig Fläche in Anspruch.

In Tabelle 251 ist der Flächenbedarf der Energiebereitstellung dargestellt, der sich aus den verschiedenen Energiequellen und Speichertechnologien pro Quadratmeter Gewächshausfläche ergibt.

Tabelle 251: Flächenbedarf der Energiegewinnung zur Beheizung von Gewächshäusern (m² Energieerzeugungsfläche/m² Gewächshausfläche)

Flächenbedarf zur Energiegewinnung		
Energiequelle	**Standardgewächshaus**	**Niedrigenergiegewächshaus**
Bioenergie, Energiepflanzen	80,0	28,0
Freiflächen-PV & Power-to-Gas	13,3	4,7
Dachflächen-PV & Power-to-Gas	5,6	1,9
Freiflächen-Solarthermie & SWS	2,9	1,0

SWS=Saisonaler Wärmespeicher
Quelle: Eigene Berechnung

10.6.4.8 Energiebedarf Aquaponik

Zum Energiebedarf der Aquaponik liegen bisher nur wenige veröffentlichte Daten vor. Nach Love et al. liegt der jährliche Strombedarf einer kleinen Aquaponikanlage (Small Scale Aquaponic) mit 116 m² Fläche bei 10.874 kWh Strom und 8.502 kWh Propan (Love, et al., 2015). Hochgerechnet auf einen Hektar entspricht dies 937.414 kWh Strom und 732.931 kWh Propan. Der Endenergieverbrauch beträgt somit 1.670.345 kWh/ha.

Die Urban Farmers AG gibt für eine Standard-Dachfarm mit einer Fläche von 2.000 m² in New York City, USA, einen jährlichen Strombedarf von 150.000 kWh und einen Wärmebedarf von 600.000 kWh an (Urban Farmers AG, o. J.). Daraus ergibt sich ein jährlicher Endenergiebedarf von 3.750.000 kWh/ha. Für die Anlage LokDepot der Urban Farmers AG wurde im Jahr 2013 eine Ökobilanz berechnet (Gisler, 2013). Nach Gisler wurde dabei ein Strombedarf von 19.272 kWh/a und ein Wärmebedarf von 48.000 kWh ermittelt (Gisler, 2018). Bei einer Fläche von 255 m² ergibt dies einen Strombedarf von 755.765 kWh pro Hektar und einen Wärmebedarf von 1.882.353 kWh/ha, was einem Endenergiebedarf von 2.638.118 kWh/ha entspricht.

Eine Aquaponikanlage der Firma ecco-jäger in Bad Raggaz hat nur einen sehr geringen Anteil am gesamten Betrieb des Unternehmens. Sie fällt daher nach Aussage des Betreibers beim gesamten Energieverbrauch „nicht ins Gewicht“ und wird daher auch nicht separat aufgeführt. Bei einer internen Berechnung wurde allerdings ein Stromverbrauch der gesamten Aquaponikanlage von 50.370 kWh ermittelt. Davon entfallen 13.140 kWh auf das Gewächshaus und 37.230 kWh auf die Aquakultur (ecco-jäger Früchte und Gemüse AG, 2018). Dies entspricht

einem jährlichen Stromverbrauch von 419.750 kWh/ha. Aussagen zum Wärmeverbrauch konnten nicht gemacht werden.

Der Strombedarf der Aquaponik ist somit deutlich höher als in Gewächshäusern mit reiner Pflanzenzucht, während sich der Wärmeverbrauch zwischen dem von herkömmlichen Gewächshäusern und Niedrigenergiegewächshäusern bewegt. Dies ist insofern beachtlich, da für die Fischzucht konstant eine geeignete Wassertemperatur gehalten werden muss.

Tabelle 252: Energiebedarf verschiedener Aquaponikanlagen

Anlage	**Strom** (kWh)	**Wärme** (kWh)	**Endenergie Gesamt** (kWh)
Small Scale Aquaponic, Baltimore [1)]	(937.414)	(732.931)	(1.670.345)
Urban Farmers AG UF Rooftop Farm, NYC [2)]	750.000	3.000.000	3.750.000
Urban Farmers AG UF LokDepot, Basel [3)]	755.765	1.882.353	2.638.118
ecco-jäger, Bad Raggaz [4)]	419.750	(k. A.)	(k. A.)
Durchschnitt der Anlagen >250 m²	**641.838**	**2.441.177**	**3.194.059**

In Klammern: Nicht in den Durchschnitt einbezogene Werte
Quellen: (1) Love et al., 2015; (2) Urban Farmers AG, o. J.; (3) Gisler, 2018; (4) ecco-jäger Früchte und Gemüse AG, 2018;

10.6.5 Bilanzierung Vertical Farming

In einer Designstudie des Instituts für Raumfahrtsysteme des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) wurde ein Konzept für ein Produktionsgebäude entwickelt, das eine quadratische Grundfläche von 44 x 44 m^2 besitzt, aus 37 Stockwerken besteht und eine Gesamthöhe von 168 m aufweist. Fünf der 37 Etagen befinden sich unter der Erdoberfläche. Produziert werden in der Vertikalen Farm insgesamt zehn verschiedene Kulturpflanzen (z.B. Salat, Kohl, Radieschen, Tomaten, Erdbeeren). Der jährliche Gesamternteertrag beträgt ca. 4.900 t. Hinzu kommen rund 100 t Fischfilet, was bei einer Filetausbeute von 32,5% einer Gesamtproduktion von ca. 308 t Fisch entspricht. Der Energiebedarf beträgt mehr als 21 GWh pro Hektar Geschossfläche (Zeidler, et al., 2014). Die Kenndaten des Projekts sind in Tabelle 253 dargestellt. Der sich daraus ergebende Energiebedarf von 30,3 MWh pro Tonne Gemüse liegt um das 42-fache höher als in der herkömmlichen Landwirtschaft, wo er bei ca. 0,7 MWh/t liegt (Spanne: 0,2 bis 3,1 MWh/t).

Tabelle 253: Kennwerte eines Vertical Farming Projekts

Kennwert	Projektdaten
Produktion	Tomaten, Radies, Erdbeeren, Salate, Fisch
Grundfläche (m²)	1.936
Stockwerke	37
Geschossfläche Insgesamt (m²)	71.632
Gemüseproduktion (t/a)	4.900
Gemüseertrag pro Hektar Geschossfläche (t/ha)	684
Fischfiletproduktion (t/a)	100
Fischfiletertrag / Hektar Geschossfläche (t/ha)	14
Strombedarf pro Jahr (kWh/a)	150.800.000
Strombedarf pro Hektar Geschossfläche (kWh/ha)	21.052.044
Strombedarf pro Tonne Gemüse (kWh/t)	30.776

Quelle: Zeidler und Schubert, 2014

10.6.5.1 Flächenbedarf Vertical Farming

Zeidler und Schubert geben an, dass auf einem „offenen Feld“ ein „um den Faktor 1.115 größeres Areal an Fläche benötigt (0,19 ha vs. 215,87 ha)“ wird als durch eine Vertical Farm in Anspruch genommen wird. Allerdings scheinen in dieser Bilanz nicht die Flächen der Energiegewinnung berücksichtigt zu sein, obwohl Zeidler und Schubert (2014) schreiben, dass weitere Forschung betrieben werden muss, „um den Energiebedarf zu senken“. Um den Strombedarf des Vertical Farmings von 21,05 GWh pro Hektar Geschossfläche zu decken, benötigt man im Mittel ca. 46,8 Hektar Freiflächenphotovoltaik, wenn man von einem Netto-Ertrag von 450 MWh/ha ausgeht. Bei einer Gesamtgeschossfläche von 7,16 ha würden folglich 335 Hektar PV-Freiflächenanlage zur Stromerzeugung benötigt. Auf geneigten Dachflächen müssten bei

einem Netto-Ertrag von 111,4 kWh/m² (Brutto-Ertrag von rund 120 kWh/m²) rund 18,9 Hektar Dachfläche in Anspruch genommen werden. Alternativ würde pro Hektar Geschossfläche der Jahresertrag von dreieinhalb bis zehn Windenergieanlagen benötigt, mit einem durchschnittlichen Jahresertrag von 2,1 bis 6,0 GWh/a.

Fraglich ist auch, ob in der Flächenbilanz des Vertical Farmings die Futterflächen der Fischzucht ausreichend berücksichtigt werden, die benötigt werden, wenn pflanzliche Futtermittel und nicht ausschließlich Meeresfischmehle eingesetzt werden. Für die Fischfutterproduktion zur Zucht von 14 t Fischfilet pro Hektar Geschossfläche werden ca. 54,5 t Fischfutter benötigt, deren Produktion rund 5,55 bis 15,3 Hektar Anbaufläche in Anspruch nimmt. Für die Fischfutterproduktion werden zudem, je nach Futtermischung, 8,2 bis 275,0 MWh Energie benötigt. Bei ökologischem Anbau ist ein mittlerer Futterflächenbedarf von 12,4 Hektar und ein mittlerer Energiebedarf von 124,6 MWh wahrscheinlich. Im Mittel ist somit von einem PV-Freiflächenbedarf der Futterproduktion von 0,28 Hektar auszugehen. Etwaig entstehende Speicherverluste von 20 bis 40 Prozent erhöhen den Flächenbedarf auf 0,35 bis 0,46 ha. Für die vorliegende Schätzung wurde das Power-to-Gas-Verfahren mit einem Wirkungsgrad von 60 Prozent als Speichertechnologie angenommen. Der Freiflächenbedarf des Vertical Farming, der pro Hektar Geschossfläche außerhalb des Farmgebäudes entsteht, liegt somit irgendwo zwischen 5,55 Hektar (nur Futteranbau) und 62,54 Hektar (Futter- und Energiebereitstellung bei hohem Energieverbrauch). Dabei ist eine Freiflächeninanspruchnahme der Energieversorgung von Null Hektar in einem auf regenerativen Energiequellen basierenden Energiesystem rein hypothetisch. Realistischer scheint ein Bedarf von rund 46,78 Hektar Freiflächenphotovoltaik für den Anlagenbetrieb, etwa 12,4 Hektar ökologische Fischfutteranbaufläche sowie 0,46 Hektar für die Energiebereitstellung der Futterproduktion, was eine Summe von 59,62 Hektar ergibt. Von Vorteil ist, dass mit 12,4 Hektar nur ein kleiner Anteil (21 Prozent) dieses Flächenbedarfs auf Ackerflächen entfällt, sofern ausreichend andere Flächen zur Verfügung stehen, z. B. für die benötigten PV-Anlagen. Da aber das Potenzial der erneuerbaren Energien in Deutschland nicht ausreicht, um den Endenergiebedarf Deutschlands zu decken, ist auch in diesem Fall eine Konkurrenz um Flächen nicht zu vermeiden.

10.6.6 Urbane Landwirtschaft und herkömmliche Landwirtschaft im Vergleich

Vergleicht man urbane und herkömmliche Landwirtschaft, ist nur ein solcher Vergleich sinnvoll, der den Flächenbedarf für Futtermittel- und Energieproduktion einbezieht und transparent macht.

Der hier durchgeführte Vergleich basiert auf der zuvor dargestellten Datengrundlage. Da es bisher nur wenige Aquaponikanlagen und keine vertikalen Farmen in Deutschland gibt, sind die Daten noch mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Nachfolgend werden die wesentlichen Ergebnisse des Vergleichs dargestellt. Die vollständigen Berechnungstabellen sind im Anhang II zu finden. (Tabelle 465 bis Tabelle 470)

Die betrachteten Aquaponikanlagen produzieren Gemüse und Fischfilet im Verhältnis von 7,1:1,0. (Das Verhältnis von Gemüse zu Fisch[89] liegt bei 2,3:1,0.) Um ein Mengenverhältnis von 7,1 t Gemüse zu 1,0 t Schweinefleisch (Schlachtgewicht) zu erzielen, müssen im konventionellen Landbau ca. 66 Prozent der Anbaufläche für den Futtermittelanbau aufgewendet werden. Im ökologischen Landbau muss der Anteil des Futterbaus bei knapp 74 Prozent liegen. Im betrachteten Beispiel einer vertikalen Farm liegt das Verhältnis von Gemüse zu Fischfilet bei 49:1.

10.6.6.1 Herkömmliche Landwirtschaft

Mit einem höheren Anteil der Fleischproduktion an der Ackerflächennutzung sinkt in der Regel der Kalorienertrag, den die Landwirtschaft pro Hektar erzielen kann. Setzt man die konventionelle Produktion von Gemüse und Schweinefleisch mit einem Futterbauanteil von 66 Prozent als Maßstab (100 Prozent) an, so liefert der ökologische Anbau bei gleicher Flächenverteilung in diesem Vergleich um 37 Prozent niedrigere Kalorienerträge. Wird im ökologischen Anbau nicht ein gleiches Verhältnis der Flächenanteile, sondern ein gleiches Mengenverhältnis von Gemüse zu Fleisch (7,1:1) angestrebt, sind die Kalorienerträge im ökologischen Landbau um 48 Prozent geringer als im konventionellen System. Der reine Gemüseanbau ist im Freiland deutlich flächeneffizienter als eine Kombination aus Gemüse und Fleisch: konventionell erzielt der reine Gemüseanbau um 50 Prozent höhere Kalorienerträge als die kombinierte konventionelle Produktion von Gemüse und Fleisch, im ökologischen Anbau übertrifft der reine Gemüseanbau die kombinierte Produktion von Gemüse und Fleisch immerhin um 16 Prozent. Reduziert man den Flächenanteil der Futterproduktion sowohl im konventionellen als auch im ökologischen Landbau jeweils auf 25 Prozent, steigen die Kalorienerträge im konventionellen System um 34 Prozent und im ökologischen Landbau um 93 Prozent. In der Folge übertrifft das ökologische System mit reduziertem Futterflächenanteil den Ertrag der konventionellen

[89] Fanggewicht inkl. aller nicht essbaren Bestandteile

Landwirtschaft mit hohem Futterflächenanteil um ein Prozent. Dies verdeutlicht, zu welchen Effizienzverlusten die ackerlandbasierte Fleischproduktion führt.

Tabelle 254: Flächeneffizienz von Gemüse- und Fleischproduktion in herkömmlicher Landwirtschaft

Kennwert	Konv. Futter auf 66% der Fläche	Ökol. Futter auf 74% der Fläche	Konv. Gemüse auf 100% der Fläche	Ökol. Gemüse auf 100% der Fläche	Konv. Futter auf 25% der Fläche	Ökol. Futter auf 25% der Fläche
Verhältnis Gemüse zu Fleisch	7,1 : 1	7,1 : 1	-	-	41,9 : 1	59,2 : 1
Flächenbedarf für Energiegewinnung (ha/ha)	0,31	0,29	0,67	0,53	0,54	0,41
Flächenaufwand Gesamt (ha)	1,31	1,29	1,67	1,53	1,54	1,41
Kalorienertrag Gemüse (kcal)	3.816.624	2.127.685	11.359.000	8.029.000	8.519.250	6.021.750
Kalorienertrag Fleisch (kcal)	2.118.160	1.172.325	0	0	797.500	398.750
Kalorienertrag Gesamt (kcal/ha)	4.524.763	2.561.122	6.261.659	4.932.491	6.027.583	4.859.815
Flächeneffizienz*	**100%**	**57%**	**150%**	**116%**	**134%**	**101%**
Ernährbare Personen / ha GF	5,90	3,08	8,86	6,85	7,91	5,96
Ackerfläche je 1.000 kcal (m²)	2,21	3,90	1,47	1,91	1,65	2,18

GF = Grundfläche
* Konventioneller Landbau mit Futterflächenanteil von 66 Prozent = 100 Prozent Flächeneffizienz
Quelle: Eigene Berechnung

Der reine Gemüseanbau erreicht in diesem Vergleich sowohl konventionell als auch ökologisch mit 150 Prozent bzw. 116 Prozent die höchsten Kalorienerträge und übertrifft das konventionelle System mit einem Futterflächenanteil von 66 Prozent hinsichtlich der Flächeneffizienz jeweils deutlich.

10.6.6.1.1 Einfluss der regenerativen Energiequellen auf den Flächenbedarf

Bei der zuvor dargestellten Berechnung handelt es sich um eine konservative Berechnung, bei der ein hoher Flächenbedarf für die regenerative Energiegewinnung unterstellt wurde. Dabei fällt besonders der hohe Flächenbedarf für die Bereitstellung von Rapsdiesel ins Gewicht. Nach Abzug des Energieaufwands des Rapsanbaus wurde ein Netto-Energieertrag des Rapsanbaus von 7,9 MWh/ha (konventionell) bzw. 5,3 MWh/ha (ökologisch) ermittelt. Berücksichtigt man zusätzliche Energiepotenziale, die sich aus einer Nutzung des Rapsstrohs oder des Rapsschrots ergeben, so nimmt der Flächenbedarf der Produktion deutlich ab. Dies wirkt sich wiederum deutlich auf die Flächeneffizienz der verschiedenen Produktionssysteme aus.

Unterstellt man neben der energetischen Nutzung des Rapsöls auch eine energetische Nutzung des Strohs, welches heute noch häufig ungenutzt bleibt, so steigt der Netto-Energieertrag des Rapsanbaus konventionell auf knapp 40 MWh/ha und ökologisch auf über 23 MWh/ha. Die Zahl der Menschen, die jeweils pro Hektar LNF ernährt werden können, steigt durch den reduzierten Flächenbedarf der Energiegewinnung deutlich - je nach System um 20 bis 45 Prozent. Dies macht ersichtlich, welch große Bedeutung eine flächeneffiziente Energiegewinnung für die Flächeneffizienz der Landwirtschaft hat. Zukünftig könnten daher auch vermehrt Elektrotraktoren eingesetzt werden. Bei einem reduzierten Flächenbedarf der Treibstoffbereitstellung vergrößert sich der Abstand zwischen dem reinen Gemüseanbau gegenüber einer kombinierten Produktion von Gemüse und Fleisch weiter. (Vgl. Tabelle 255)

Tabelle 255: Flächeneffizienz von Gemüse- und Fleischproduktion in herkömmlicher Landwirtschaft bei reduziertem Flächenbedarf für regenerative Energiegewinnung

Kennwert	Konv. Futter auf 66% der Fläche	Ökol. Futter auf 74% der Fläche	Konv. Gemüse auf 100% der Fläche	Ökol. Gemüse auf 100% der Fläche	Konv. Futter auf 25% der Fläche	Ökol. Futter auf 25% der Fläche
Verhältnis Gemüse/Fleisch	7,1 : 1	7,1 : 1	-	-	41,9 : 1	59,2 : 1
Flächenbedarf für Energie (ha/ha)	0,07	0,07	0,16	0,13	0,13	0,10
Flächenaufwand Gesamt (ha)	1,07	1,07	1,16	1,13	1,13	1,10
Kalorienertrag Gemüse (kcal)	3.816.624	2.127.685	11.359.000	8.029.000	8.519.250	6.021.750
Kalorienertrag Fleisch (kcal)	2.118.160	1.172.325	0	0	797.500	398.750
Kalorienertrag Gesamt (kcal/ha)	5.524.185	3.076.395	9.822.800	7.084.911	8.277.930	5.829.417
Flächeneffizienz*	**100%**	**56%**	**178%**	**128%**	**150%**	**106%**
Ernährbare Personen/ha GF	6,76	3,76	12,01	8,67	10,12	7,13
Ackerfläche pro 1.000 kcal (m²)	1,81	3,25	1,02	1,41	1,21	1,72

* Konventioneller Landbau mit Futterflächenanteil von 66 Prozent = 100 Prozent Flächeneffizienz

Die konventionelle Landwirtschaft mit Futterbau auf 66 Prozent der Produktionsfläche wird nachfolgend auch als Referenzwert für den Vergleich mit der urbanen Landwirtschaft verwendet. 100 Prozent Flächeneffizienz entsprechen folglich 5.524.185 kcal/ha. Für die Bereitstellung von 1.000 kcal werden in diesem Fall 1,81 m² Ackerfläche benötigt.

10.6.6.2 Aquaponik

Die verglichenen Aquaponik-Systeme benötigen im Vergleich zur klassischen Landwirtschaft große Mengen an Strom und Wärme. Aufgrund dieses hohen Energiebedarfs erzielen Sie nur

dann eine höhere Flächeneffizienz, wenn Sie Energiequellen nutzen können, die nur eine geringe oder keine Flächenrelevanz besitzen, wie etwa fossile Energien, Geothermie oder Abwärme. Diese besitzen allerdings nur dann keine Flächenrelevanz, wenn keine Nutzungskonkurrenzen bestehen. In diesem Fall ist die Flächeneffizienz um etwa ein Drittel höher als in der herkömmlichen Landwirtschaft. Fossile Energien stehen in einem klimaneutralen, auf erneuerbaren Energien basierenden Energiesystem jedoch nicht mehr zur Verfügung. Da an vielen Standorten auch keine (oder keine ausreichende) Nutzung von Geothermie oder Abwärme möglich sein wird, lässt sich die benötigte Wärme am besten aus Solarthermie oder Photovoltaik-Power-to-Gas-Systemen gewinnen.

Solarthermie erzielt pro Hektar zwar deutlich höhere Erträge, dürfte aber aufgrund der benötigten Speichervolumina im Gebäudebestand kaum nutzbar sein. Power-to-Gas-Systeme haben demgegenüber den Vorteil der höheren Flexibilität der Wärmegewinnung, nicht zuletzt durch die auf langen Strecken deutlich bessere Transportfähigkeit von Gas im Vergleich zu Fernwärme.

Erfolgt die Energiegewinnung aus Gas, das mittels Freiflächenphotovoltaik und Power-to-Gas erzeugt wurde, wird eine niedrigere Flächeneffizienz erreicht, als in der klassischen Landwirtschaft. Auch die energieeffizienteste Systemvariante mit Niedrigenergiegewächshausstandard erreicht mit 71 Prozent nicht die Flächeneffizienz des herkömmlichen Landbaus. Eine gewisse Steigerung der Flächeneffizienz lässt sich erzielen, wenn unterhalb der benötigten Solaranlagen ebenfalls eine landwirtschaftliche Nutzung in sogenannten Agrophotovoltaik-Systemen erfolgt. Im berechneten Beispiel wurde angenommen, dass die PV-Anlagen auf Grünland errichtet werden und mindestens 50 Prozent der sonst üblichen Grünfuttererträge erzielt werden. Tatsächlich dürften Erträge von ca. 80 bis 90 Prozent der sonst üblichen Erträge möglich sein. Diese Maßnahme steigert die Flächeneffizienz um wenige Prozentpunkte.

Die energieintensivere Produktion im Gewächshaus führt somit zu einer Verlagerung des Flächenbedarfs von Ackerland zu Grünland oder anderen Flächenarten. Hinsichtlich der Flächeninanspruchnahme besteht in dieser Verlagerung der Flächeninanspruchnahme der größte Unterschied der urbanen Aquaponik gegenüber der herkömmlichen Landwirtschaft. Im Falle der energieeffizientesten Systeme muss nur für 65 bis 75 Prozent des Flächenbedarfs Ackerland in Anspruch genommen werden. Somit werden im Vergleich zur herkömmlichen Landwirtschaft bei konventioneller Produktionsweise 30 Prozent weniger Ackerland pro Nahrungskalorie benötigt. Bei ökologischer Produktionsweise sinkt der Bedarf an Ackerfläche immerhin um 28 Prozent. Dies ist vor allem für Regionen interessant, die über wenig Ackerfläche verfügen oder ungünstige Bedingungen für Ackerbau aufweisen (schlechte Böden oder wenig Niederschlag), aber ausreichende Flächen für Solaranlagen bereitstellen können.

In Tabelle 256 sind die Flächeninanspruchnahme und die Flächeneffizienz der Kalorienproduktion durchschnittlicher und energieeffizienter Aquaponikanlagen dargestellt.

Tabelle 256: Flächeneffizienz der Aquaponik bei durchschnittlichem Pflanzen-Fisch-Verhältnis bei regenerativer Energieversorgung

Kennwert	Aquaponik konventionell mit Restfischmehl und Futter-Produktion unter PVA	Aquaponik ökologisch mit Restfischmehl und Futter-Produktion unter PVA	Aquaponik effizient, konventionell mit Restfischmehl und Futter-Produktion unter PVA	Aquaponik effizient, ökologisch mit Restfischmehl und Futter-Produktion unter PVA
Grundfläche (ha)	0,25	0,25	0,25	0,25
Produktionsfläche (ha)	1,00	1,00	1,00	1,00
Gemüseproduktion (t)	209	209	209	209
Fischproduktion (t)	91	91	91	91
Flächenbedarf Energie (ha)	11,5	11,5	8,9	8,9
Flächenbedarf Futterbau (ha)	16,7	26,1	16,7	26,1
Flächenbedarf Gesamt (ha)	**28,3**	**37,8**	**25,8**	**35,3**
Kalorienertrag Gemüse (kcal)	77.330.000	77.330.000	77.330.000	77.330.000
Kalorienertrag Fisch (kcal)	23.660.000	23.660.000	23.660.000	23.660.000
Kalorienertrag Milch (kcal)	1.810.898	1.871.977	1.810.898	1.871.977
Kalorienertrag pro Hektar Grundfläche (kcal)	3.595.373	2.702.754	3.945.048	2.895.574
Flächeneffizienz*	**65%**	**49%**	**71%**	**52%**
Ernährbare Personen/ha GF	4,40	3,31	4,83	3,54
Verhältnis Gemüse zu Fischfleisch	7,1:1	7,1:1	7,1:1	7,1:1
Ackerfläche	16,68	26,12	16,68	26,12
Ackerfläche pro 1.000 kcal (m²)	1,64	2,56	1,64	2,56

* 100 Prozent Flächeneffizienz = Konventioneller Landbau mit Futterflächenanteil von 66 Prozent
PVA = Photovoltaikanlage
Quelle: Eigene Berechnung

Wie in der herkömmlichen Landwirtschaft lässt sich die Flächeneffizienz der Kalorienproduktion deutlich steigern, wenn man das Verhältnis von Pflanzenproduktion zu Fischproduktion (P-F-Verhältnis) in Richtung Pflanzenproduktion verschiebt. In Tabelle 257 ist dargestellt, wie sich die Flächeneffizienz verändert, wenn das Pflanzen-Fisch-Verhältnis nicht 7:1, sondern 14:1 oder 20:1 beträgt

Tabelle 257: Flächeneffizienz der Aquaponik bei verändertem Pflanzen-Fisch-Verhältnis (P-F-Verhältnis)

Kennwert	Aquaponik effizient, P-F-Verhältnis 14:1, konventionell mit Restfischmehl und Futterproduktion unter PVA	Aquaponik effizient, P-F-Verhältnis 14:1, ökologisch mit Restfischmehl und Futterproduktion unter PVA	Aquaponik effizient, P-F-Verhältnis 20:1, konventionell mit Restfischmehl und Futterproduktion unter PVA	Aquaponik effizient, P-F-Verhältnis 20:1, ökologisch mit Restfischmehl und Futterproduktion unter PVA
Grundfläche (ha)	0,25	0,25	0,25	0,25
Produktionsfläche (ha)	1,00	1,00	1,00	1,00
Gemüseproduktion (t)	245	245	260	260
Fischproduktion (t)	55	55	40	40
Flächenbedarf Energie (ha)	8,5	9,0	8,3	8,3
Flächenbedarf Futterbau (ha)	10,1	15,8	7,3	11,5
Flächenbedarf Gesamt	**18,84**	**25,05**	**15,93**	**20,09**
Kalorienertrag Gemüse (kcal)	90.650.000	90.650.000	96.200.000	96.200.000
Kalorienertrag Fisch (kcal)	14.300.000	14.300.000	10.400.000	10.400.000
Kalorienertrag Milch (kcal)	1.094.499	1.131.414	795.999	822.847
Kalorienertrag pro Hektar Grundfläche (kcal)	5.556.227	4.192.997	6.637.376	5.281.044
Flächeneffizienz* (Kalorienertrag)	**101%**	**76%**	**120%**	**96%**
Ernährbare Personen / ha GF	6,80	5,13	8,12	6,46
Verhältnis Gemüse zu Fleisch	14:1	14:1	20:1	20:1
Ackerfläche (ha)	10,08	15,78	7,33	11,48
Ackerfläche pro 1.000 kcal (m²)	0,96	1,50	0,69	1,08

* 100 Prozent Flächeneffizienz = Konventioneller Landbau mit Futterflächenanteil von 66 Prozent
Quelle: Eigene Berechnung

10.6.6.3 Vertical Farming

Zumindest auf dem heutigen Stand der Technik lässt sich feststellen, dass auch im Vertical Farming die Flächeneffizienz der herkömmlichen Landwirtschaft nicht übertroffen wird, wenn die benötigte Energie aus flächenrelevanten erneuerbaren Energiequellen stammt. Wird die Energie mittels PV-Freiflächenanlage und Power-to-Gas gewonnen, wird im Vergleich zum konventionellen Landbau (Gemüsebau + Schweinemast) bei konventioneller Fischfutterproduktion eine Flächeneffizienz von 87 Prozent erreicht, bei ökologischem Anbau wird ein Wert von 80 Prozent erzielt. Die höhere Flächeneffizienz des Vertical Farming im Vergleich zur Aquaponik liegt weniger in der technologischen Effizienz oder der Architektur begründet, sondern vor allem im Mengenverhältnis von Gemüse- zu Fischfleischproduktion. Dieses beträgt

im gewählten Beispiel 49:1 und weist somit einen deutlich höheren Gemüseanteil auf, als die betrachteten Aquaponikanlagen. Strebt man ein Gemüse-Fleisch-Verhältnis von 49:1 auch im herkömmlichen Landbau an, erreicht dieser eine höhere Flächeneffizienz als das Vertical Farming: Im konventionellen Landbau liegt der Flächenanteil der Viehzucht dann lediglich bei 22,2 Prozent, wodurch eine Flächeneffizienz von 155 Prozent des Referenzwertes erreicht wird. Wenn auch im ökologischen Anbau ein Gemüse-Fleisch-Verhältnis von 1:49 angestrebt wird, liegt der Flächenanteil der Futterproduktion bei 28,7 Prozent. In diesem Fall wird im ökologischen Freilandanbau eine Flächeneffizienz von 99 Prozent erreicht. Vertical Farming bewirkt daher bei den heutigen Energieerträgen keine erhebliche Steigerung der Flächeneffizienz gegenüber der herkömmlichen Landwirtschaft, wenn die Energie aus flächenrelevanten erneuerbaren Energiequellen stammt. Bedenkt man zudem den hohen Energieaufwand der Gebäuderichtung (Graue Energie), dürfte sich die Flächeneffizienz des Vertical Farmings noch einmal deutlich reduzieren. Damit Vertical Farming eine deutlich höhere Flächeneffizienz als der herkömmliche Landbau erreichen kann, muss entweder der Energiebedarf des Systems deutlich gesenkt oder der Energieertrag des Photovoltaikanlagenbestandes pro Hektar deutlich gesteigert werden.

Allerdings ermöglicht Vertical Farming bereits heute eine erhebliche Reduktion des Ackerflächenbedarfs, weil der Anteil der Ackerflächen am Gesamtflächenbedarf bei ökologischem Futterbau nur 21 Prozent und bei konventionellem Futterbau nur 14 Prozent beträgt. Im herkömmlichen ökologischen Anbau beträgt der Anteil der Ackerflächen am Gesamtflächenbedarf dagegen bis zu 100 Prozent, wenn die benötigte erneuerbare Energie für die eingesetzten Landmaschinen z. B. durch Ölpflanzenanbau gewonnen wird[90]. Somit werden im Vertical Farming konventioneller Wirtschaftsweise mit 0,3 m² statt 1,2 m² pro 1.000 kcal rund 75 Prozent weniger Ackerfläche benötigt als in der Landwirtschaft auf offenem Feld. (Vgl. Tabelle 255 und Tabelle 258)

10.6.6.4 Dachfarm mit reiner Gemüseproduktion

Das flächeneffizienteste Produktionssystem im Vergleich ist die Dachfarm mit reiner Gemüseproduktion im Gewächshaus. Sie benötigt pro Hektar Produktionsfläche (Gewächshaus) rund 5,3 Hektar für die Gewinnung der benötigten Energie. Da aber der Gemüseertrag den Ertrag des konventionellen Freilandanbaus um das Zehnfache übertrifft, ist der Kalorienertrag pro Hektar Flächeninanspruchnahme um 262 Prozent höher als im Freilandanbau. Zudem wird für keines der Produktionsmittel Ackerfläche benötigt, sodass Dachfarmen mit reiner Gemüseproduktion ohne Fischzucht den Bedarf der Lebensmittelproduktion an Ackerfläche am deutlichsten reduzieren. (Vgl. Tabelle 258)

[90] Möglich ist auch der Einsatz von Traktoren mit Elektromotoren. Dies redutziert den Bedarf an Ackerfläche für die Energiegewinnung.

Tabelle 258: Dachfarm und Vertikale Farm im Vergleich

Kennwerte	Dachfarm, nur Gemüse-produktion	Vertical Farming, konventionell	Vertical Farming, ökologisch
Grundfläche (ha)	0,25	0,03	0,03
Produktionsfläche (ha)	1,00	1,00	1,00
Flächenbedarf Energie (ha)	5,30	46,80	46,80
Flächenbedarf Futterbau (ha)	0,00	7,90	12,30
Flächenbedarf Gesamt (ha)	5,50	55,10	59,60
Kalorienertrag pro Hektar Grundfläche (kcal/ha)	20.006.346	4.790.961	4.431.929
Flächeneffizienz*	**362%**	**87%**	**80%**
Ernährbare Personen pro Hektar Grundfläche	26,10	6,25	5,78
Verhältnis Gemüse zu Fleisch		49 : 1	49 : 1
Ackerfläche (ha)	0,00	7,87	12,33
Ackerfläche pro 1.000 kcal (m²)	0,00	0,30	0,47

* 100 Prozent Flächeneffizienz = Konventioneller Landbau mit Futterflächenanteil von 66 Prozent
Quelle: Eigene Berechnung

10.6.6.5 Flächeneffizienz und Ackerflächenbedarf urbaner Landwirtschaft im Vergleich

Die Flächeneffizienz zeigt an, wie viele Nahrungskalorien pro Hektar in Anspruch genommener Fläche produziert werden. Einhundert Prozent (100%) entsprechen der Flächeneffizienz des konventionellen Landbaus mit einem Anteil des Futterbaus von 66 Prozent. Dieser Anteil ergibt bei einer Kombination aus Gemüsebau und Schweinezucht ein Mengenverhältnis zwischen Gemüse und Fleisch von 7:1, das dem Durchschnitt der betrachteten Aquaponikanlagen entspricht. Mit 66 Prozent kommt dieser Wert dem Anteil, den der Futterpflanzenanbau an der durch Deutschland für Ernährungszwecke genutzten Fläche hat, sehr nah. Dieser Anteil lag in Deutschland im Jahr 2010 bei rund 67 Prozent (Statistisches Bundesamt, 2013 S. 9). [91] Die Berechnung der Flächeneffizienz zeigt, dass elf Systeme eine höhere Flächeneffizienz erzielen als diese konventionell betriebene Landwirtschaft mit einem hohen Anteil an Fleischproduktion. Dabei wird ersichtlich, dass in einem auf erneuerbaren Energien basierenden Energiesystem der Anteil der tierischen Nahrungsmittel immer noch der wichtigste Faktor für die Flächeneffizienz ist. Von allen Systemen, die mehr als 100 Prozent erreichen, weist nur ein einziges System das herkömmliche Verhältnis von pflanzlicher zu tierischer Produktion auf: Eine Aquaponikanlage, die keine flächenrelevanten Energiequellen nutzt und damit im zukünftigen, klimaneutralen Energiesystem eher eine Ausnahme sein dürfte.

[91] Für Ernährungszwecke wurden insgesamt 14.660 Hektar belegt, wovon 9 819 Hektar auf Futterpflanzen entfielen (Statistisches Bundesamt, 2013, S. 9). Anders als im dargestellten Beispiel umfasst diese Futterpflanzenfläche jedoch auch Grünland. Für die im Beispiel gewählte Schweinefleischproduktion wird heute jedoch üblicherweise ackerbaulich erzeugtes Futter genutzt.

Vertical Farming auf dem heutigen Stand der Technik ist kein Mittel, um den Flächenbedarf der Nahrungsproduktion insgesamt wesentlich zu reduzieren. Offene Dachfarmen konnten in dieser Betrachtung/Darstellung nicht berücksichtigt werden, weil keine verlässlichen Daten zum Energieverbrauch (für Bewässerung etc.) vorlagen. Da offene Dachfarmen jedoch in der Regel ohne stark motorisierte Maschinen auskommen und die Transportwege sehr kurz sind, dürfte ihr Energieverbrauch sehr gering sein. Offene Dachfarmen dürften deshalb in diesem Vergleich sicher im oberen Drittel, oberhalb der Flächeneffizienz des ökologischen Landbaus liegen und wahrscheinlich Werte von 140 Prozent und mehr erreichen.

Tabelle 259: Flächeneffizienz der urbanen Landwirtschaft im Vergleich
(100% = Konventioneller Landbau mit einem Futterflächenanteil von 66 Prozent)

Produktionssystem	Flächen-effizienz
Dachfarm, nur Gemüse-Produktion	362%
Konventioneller Landbau, nur Gemüse	178%
Konventioneller Landbau, Gemüse auf 75% & Fleisch auf 25% der Fläche	150%
Ökologischer Landbau, nur Gemüse	128%
Aquaponik effizient, P-F-V 20:1, konventionell mit Restfischmehl und Futterproduktion unter PV-Anlagen	120%
Ökologischer Landbau, Gemüse auf 75% & Fleisch auf 25% der Fläche	104%
Aquaponik effizient, P-F-V 14:1, konventionell mit Restfischmehl und Futterproduktion unter PV-Anlagen	101%
Konventioneller Landbau, Gemüse auf 34% & Fleisch auf 66% der Fläche	100%
Vertical Farming, ökologisch, ohne Fischproduktion	98%
Aquaponik effizient, P-F-V 20:1, ökologisch mit Restfischmehl und Futterproduktion unter PV-Anlagen	96%
Vertical Farming, P-F-V 49:1, konventionell	87%
Vertical Farming, P-F-V 49:1, ökologisch	80%
Aquaponik effizient, P-F-V 14:1, ökologisch mit Restfischmehl und Futterproduktion unter PV-Anlagen	76%
Aquaponik effizient, konventionell mit Restfischmehl und Futterproduktion unter PV-Anlagen	71%
Aquaponik konventionell mit Restfischmehl und Futterproduktion unter PV-Anlagen	65%
Aquaponik konventionell mit Restfischmehl	64%
Ökologischer Landbau, Gemüse auf 26% & Fleisch auf 74% der Fläche	56%
Aquaponik konventionell mit Fangfischmehl	53%
Aquaponik effizient, ökologisch mit Restfischmehl und Futterproduktion unter PV-Anlagen	52%
Aquaponik ökologisch mit Restfischmehl und Futterproduktion unter PV-Anlagen	49%
Aquaponik ökologisch mit Restfischmehl	48%
Aquaponik ökologisch mit Fangfischmehl	42%

Quelle: Eigene Berechnung

Ist nicht eine möglichst hohe Flächeneffizienz das Ziel der Nahrungsproduktion, sondern eine möglichst geringe Inanspruchnahme von Ackerfläche, so sind Dachfarmen ohne Fischproduktion, Vertical Farming sowie Aquaponikanlagen mit einem geringen Anteil an Fischproduktion die am besten geeigneten Produktionssysteme. Alle übrigen Aquaponikanlagen mit einem Pflanzen-Fischfleisch-Verhältnis von 7:1 benötigen pro bereitgestellter Nahrungskalorie mehr Ackerfläche als der reine Gemüseanbau in konventioneller Landbewirtschaftung.

Tabelle 260: Ackerflächenbedarfe verschiedener Produktionssysteme im Vergleich

Produktionssysteme	Ackerfläche je 1.000 kcal (m²)
Dachfarm, nur Gemüse-Produktion	0,00
Vertical Farming, P-F-V 49:1, konventionell	0,30
Vertical Farming, P-F-V 49:1, ökologisch	0,47
Aquaponik effizient, P-F-V 20:1, konventionell mit Restfischmehl und Futterproduktion unter PV-Anlagen	0,69
Aquaponik effizient, P-F-V 14:1, konventionell mit Restfischmehl und Futterproduktion unter PV-Anlagen	0,96
Konventioneller Landbau, nur Gemüse	1,02
Aquaponik effizient, P-F-V 20:1, ökologisch mit Restfischmehl und Futterproduktion unter PV-Anlagen	1,08
Konventioneller Landbau Gemüse & Fleisch, Futterbau auf 25% der Fläche	1,21
Ökologischer Landbau, nur Gemüse	1,41
Aquaponik effizient, P-F-V 14:1, ökologisch mit Restfischmehl und Futterproduktion unter PV-Anlagen	1,50
Aquaponik konventionell mit Restfischmehl und Futterproduktion unter PV-Anlagen	1,64
Aquaponik effizient, konventionell mit Restfischmehl und Futterproduktion unter PV-Anlagen	1,64
Aquaponik konventionell mit Fangfischmehl	1,66
Aquaponik konventionell mit Restfischmehl	1,67
Ökologischer Landbau Gemüse & Fleisch, Futterbau auf 25% der Fläche	1,72
Konventioneller Landbau Gemüse & Fleisch, Futterbau auf 66% der Fläche	1,81
Aquaponik ökologisch mit Restfischmehl und Futterproduktion unter PV-Anlagen	2,56
Aquaponik effizient, ökologisch mit Restfischmehl und Futterproduktion unter PV-Anlagen	2,56
Aquaponik ökologisch mit Fangfischmehl	2,60
Aquaponik ökologisch mit Restfischmehl	2,60
Ökologischer Landbau Gemüse & Fleisch, Futterbau auf 74% der Fläche	3,25

Quelle: Eigene Berechnung

10.7 Unsicherheiten und Datenlücken

Der Nahrungssektor verfügt im Vergleich zu den anderen beiden Sektoren über die umfassendste und am besten gesicherte Datenbasis. Dies gilt jedoch vor allem für die herkömmliche, konventionell wirtschaftende Landwirtschaft. Urbane Landwirtschaft ist dagegen noch kaum verbreitet, die bisher verfügbaren Daten stammen von einigen wenigen Anlagen. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick zur Datenbasis mit Blick auf die wichtigsten Unsicherheiten und Datenlücken gegeben.

Unsicherheiten

Die Ertragspotenziale der Landwirtschaft sind vor allem infolge des sich bereits vollziehenden Klimawandels mit gewissen Unsicherheiten verbunden. Nach Zhao et al. werden die Hektarerträge der wichtigsten Feldfrüchte (Weizen, Reis, Mais, Soja) im globalen Durchschnitt mit jedem Grad globalen Temperaturanstiegs sinken (Zhao, et al., 2017). Wie sich die klimatischen Veränderungen auf die Erträge in Süddeutschland auswirken werden, lässt sich bisher kaum abschätzen. Allerdings könnten zunehmende Trockenheit und häufiger auftretende Dürrephasen in den Sommermonaten auch hier zu sinkenden Erträgen in Land- und Forstwirtschaft führen. Möglichweise könnte ein Teil der Einbußen zumindest im ökologischen Landbau kompensiert werden, wenn mit einer weiteren Verbreitung der ökologischen Wirtschaftsweise und zunehmenden Erfahrungswerten die Flächeneffizienz des ökologischen Anbaus gesteigert werden kann.

Noch mit gewissen Unsicherheiten sind allerdings auch die Angaben zu den aktuellen Ertragspotenzialen der ökologischen Landwirtschaft verbunden. Da die Ertragspotenziale der ökologischen Landwirtschaft nicht regelmäßig von den statistischen Ämtern erhoben bzw. veröffentlicht werden, mussten sie in mehreren Fällen wissenschaftlichen Studien entnommen werden. Zudem ist der Anteil des ökologischen Landbaus an der landwirtschaftlichen Nutzfläche noch gering. Die Datenbasis ist daher deutlich kleiner als im Falle der konventionellen Landwirtschaft. Mit Blick auf weniger verbreitete Nutzpflanzen unterschiedet sich die Datenbasis zwischen konventioneller und ökologischer Landwirtschaft jedoch kaum, da hier in beiden Fällen oftmals kein zweiter Kontrollwert für einen Vergleich herangezogen werden konnte. Aufgrund der hohen Verlässlichkeit von Datenquellen wie des KTBL und der Landesanstalten für Landwirtschaft dürften sich damit verbundene Unsicherheiten jedoch in engen Grenzen halten. In Tabelle 261 ist die durchschnittliche Datenübereinstimmung der vorliegenden Quellen dargestellt. Der Prozentwert gibt jeweils die durchschnittliche Übereinstimmung des niedrigsten Ertragswertes mit dem höchsten Ertragswert an. Abgesehen von den Angaben zu den Getreideerträgen ist die Datenabweichung im Falle der ökologischen Landwirtschaft nicht größer als im Falle der konventionellen Landwirtschaft. Zudem ist diese höhere Abweichung der Daten

nicht unbedingt mit einer geringeren Datenqualität gleichzusetzen. Vielmehr deutet die Auswertung der vorliegenden Quellen daraufhin, dass noch Steigerungspotenzial besteht und die Flächeneffizienz des ökologischen Landbaus bisher möglicherweise unterschätzt wurde.

Tabelle 261: Datenübereinstimmung bei Angaben zu Erträgen wichtiger pflanzlicher Nahrungsmittel

Kulturpflanze	Konventionell	Ökologisch
Getreide & Hackfrüchte		
Winterweizen	96%	66%
Roggen und Wintermenggetreide	93%	72%
Wintergerste	95%	82%
Sommergerste	91%	72%
Hafer	89%	70%
Triticale	88%	70%
Dinkel	*	61%
Körnermais	96%	92%
Kartoffeln	87%	89%
Zuckerrüben	76%	85%
Öl- und Eiweißpflanzen		
Winterraps	85%	83%
Sonnenblumen	67%	84%
Soja	77%	73%
Ölkürbis	*	*
Öllein	*	*
Hanf	*	*
Walnuss	*	*
Lupinen	*	85%
Linsen	*	*
Gemüse, Obst & Nüsse		
Gemüse**	85%	*
Apfel	92%	*
Birnen	68%	*
Pflaumen/Zwetschgen	99%	*
Süßkirschen	83%	*
Sauerkirschen	82%	*
Mirabellen/Renekloden	91%	*
Erdbeeren	99%	*
Haselnüsse	*	*
Walnüsse	*	*

Eigene Darstellung. Quelle: Eigene Berechnung
Der Prozentwert gibt jeweils die durchschnittliche Übereinstimmung des niedrigsten Wertes mit dem höchsten Wert an.
Geringe Unsicherheit (grün): Datenübereinstimmung von 85 Prozent und mehr.
Mittlere Unsicherheit (gelb): Datenübereinstimmung zwischen 75 und 85 Prozent.
Größere Unsicherheit (rot): Datenübereinstimmung von weniger als 75 Prozent.
* Nur eine Datenquelle vorhanden.
** Durchschnittswert aller der gesamten Nahrungsmittelgruppe

In Tabelle 262 ist die durchschnittliche Datenübereinstimmung nach Nahrungsmittelgruppen zusammengefasst dargestellt. Größere Unterschiede bestehen vor allem bei den Angaben der Getreideerträge, ansonsten sind hinsichtlich der Datenabweichungen keine nennenswerten Unterschiede zwischen konventionellem und ökologischem Anbau festzustellen.

Tabelle 262: Durchschnittliche Datenübereinstimmung bei Angaben zu pflanzlichen Nahrungsmittelerträgen nach Nahrungsmittelgruppen

Nahrungsmittelgruppe	konventionell	ökologisch
Getreide und Hackfrüchte	90%	76%
Öl- und Eiweißpflanzen	76%	81%
Gemüse	85%	*
Obst	88%	*
Nüsse	*	*

Der Prozentwert gibt jeweils die durchschnittliche Übereinstimmung des niedrigsten Wertes mit dem höchsten Wert an.
Geringe Unsicherheit (grün): Datenübereinstimmung von 85 Prozent und mehr.
Mittlere Unsicherheit (gelb): Datenübereinstimmung zwischen 75 und 85 Prozent.
Größere Unsicherheit (rot): Datenübereinstimmung von weniger als 75 Prozent.
* Nur eine Quelle vorhanden.

Im Bereich der Urbanen Landwirtschaft weisen die verwendeten Quellen eine hohe Übereinstimmung auf. Aufgrund der geringen Zahl der Anlagen sind die Daten dennoch mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Die größte Unsicherheit besteht aber sicherlich mit Blick auf die weitere Entwicklung der Energieeffizienz aquaponischer Anlagen, die Entwicklung des Energiebedarfs Vertikaler Landwirtschaft und die künftigen Energieerträge photovoltaischer Anlagen. Heute sind bereits PV-Anlagen in Betrieb, deren Erträge deutlich über dem Durchschnitt des aktuellen Anlagenbestandes liegen. Im Laufe der Zeit dürfte daher der Durchschnitt des Bestandes auch infolge eines Repowerings nach und nach ansteigen.

Allgemeine Aussagen sind zudem kaum möglich, weil der Flächenbedarf und die Flächeneffizienz in Abhängigkeit von mehreren Faktoren stark variieren können. Dabei fallen neben dem Energiestandard der Anlagen insbesondere der Anteil der Fischzucht an der Produktion, die verwendeten Futtermischungen und die genutzten Energieträger ins Gewicht.

Datenlücken

Im Bereich der Produktion pflanzlicher Lebensmittel liegen zu allen relevanten Lebensmittelgruppen ausreichende Daten vor, um eine Schätzung der Ertragspotenziale und möglicher Autonomiegrade von Landkreisen in Südwestdeutschland durchzuführen. Allerdings differenzieren die veröffentlichten Statistiken der statistischen Ämter von Bund und Ländern nicht nach Wirtschaftsweise.

Datenlücken liegen vor allem bezüglich der ökologischen Haltung von Zweinutzungsrassen sowie generell im Bereich der Weidehaltung von Schweinen und Hühnern vor. Dies betrifft insbesondere jene Kennwerte, die für eine Beurteilung der Flächeneffizienz erforderlich sind, wie z. B. die Zusammensetzung der aufgenommenen Futtermittel und die Futterverwertung je nach Wirtschaftsweise. Auch zu den Auswirkungen der Haltungsform und des damit verbundenen Auslaufs der Tiere mangelt es noch an vergleichbaren Daten. Hier lag der Fokus bisher eher auf der Futterverwertung als auf der Flächeneffizienz. Die Erhebung flächenbezogener Kennwerte ist noch nicht die Regel. Die Weidehaltung von Schweinen und Hühnern konnte daher im Rahmen der vorliegenden Berechnungen nicht berücksichtigt werden.

Des Weiteren ist die Datengrundlage für einen Vergleich alter und moderner Nutztierrassen hinsichtlich der energetischen Erntefaktoren und Kalorienerträge unzureichend. Die meisten Kalorientabellen beziehen sich ausschließlich auf Fleisch von Hochleistungszüchtungen aus konventioneller Produktion. Da insbesondere alte Rinder- und Schweinerassen sich häufig durch höhere Fett- und Kaloriengehalte auszeichnen, sollte dies bei einem Vergleich der Flächeneffizienz berücksichtigt werden.

Die genannten Datenlücken betreffen einen relevanten Teil der Tierhaltung, weshalb der mögliche Einfluss einer überwiegend grünlandbasierten ökologischen Schweine- und Geflügelhaltung auf die Flächenbedarfe und die möglichen regionalen Autonomiepotenziale noch zu prüfen wäre.

11 Rohstoffe

11.1 Rohstoffproduktion

Die Produktion nachwachsender Rohstoffe erfolgt vor allem durch Forst- und Landwirtschaft. Mit der Algenproduktion dürfte künftig aber auch die urbane Produktion im Rohstoffsektor eine gewisse Bedeutung gewinnen. Aufgrund der hohen Nutzungsvielfalt und der Vielzahl der Produkte erfolgt zunächst eine genauere Betrachtung der forstwirtschaftlichen Produktion. Sie ist eine wichtige Grundlage für eine nach Rohstoffen und Endprodukten differenzierte Erhebung der Ertragspotenziale. Die genauere Betrachtung der Ertragspotenziale landwirtschaftlicher Nutzpflanzen erfolgt in den Abschnitten zu den einzelnen Produktgruppen in Kapitel 11.2.

11.1.1 Forstwirtschaft

11.1.1.1 Grundlagen und Rahmenbedingungen

Holz ist einer der wichtigsten und vielseitigsten Rohstoffe. Als nachwachsender Rohstoff bietet seine Nutzung vor allem mit Blick auf den Klimawandel große Vorteile gegenüber anderen Rohstoffen. „Der Naturstoff Holz [...] ist Kohlenstoff- und Energiespeicher, substituiert treibhausfördernde Materialien und Energieträger, schont fossile Ressourcen und erfüllt die Anforderungen an intelligentes Kreislaufwirtschaften, um nur einige Aspekte zu nennen“ (DGfH, 2001 S. 2). Darüber hinaus spielt auch das Ökosystem Wald als potenzielle CO_2-Senke eine wichtige Rolle beim Klimaschutz und bei der Anpassung an die Folgen des Klimawandels. Die Forstwirtschaft sieht sich daher mit wachsenden Erwartungen aus Politik und Gesellschaft sowie mit einer gleichzeitig zunehmenden Nachfrage durch unterschiedliche Branchen konfrontiert. Pro Person werden in Deutschland jährlich rund 0,9 m³ Rohholz stofflich verarbeitet oder energetisch genutzt (Hennig, et al., 2015 S. 5). Die größten Anteile an der stofflichen Nutzung haben die Produktion holzbasierter Baustoffe (Schnittholz, Furnier- und Sperrholz, Span- und OSB-Platten etc.) und die Papierproduktion. Sonstige Nutzungen haben bisher nur geringe Anteile, bieten aber große Potenziale für eine zukünftige, stärker auf nachwachsenden Rohstoffen basierenden Kreislaufwirtschaft. Zu nennen sind hier beispielsweise Kleidung aus Viskosefasern, Dämmstoffe aus Holzfasern, transparente Bauteile für den Hochbau und transparentes Holzfaserpapier für die Herstellung von Solarzellen. Transparentes Holz hat eine Lichtdurchlässigkeit von mehr als 80 Prozent und eine Opazität von über 70 Prozent (Li, et al., 2018 S. 11). „Durchsichtiges Holz ist ein gutes Material für Solarzellen, weil es eine kostengünstige, leicht verfügbare und erneuerbare Quelle darstellt“ (Berglund zit. n. KTH The Royal Institute of Technology, 2016). Lignin, das unter anderem bei der Papierherstellung in großen Mengen als Abfallprodukt anfällt, wird heute meist als Brennstoff verwertet. In Zukunft könnte es stattdessen auch für die Herstellung von Kunststoffen oder für die Bereitstellung kostengünstiger und nachhaltiger organischer Elektrolyte für Redox-Flow-Batterien genutzt werden (3N

Kompetenzzentrum, 2017). Es ist wahrscheinlich, dass mit den Einsatzmöglichkeiten auch die Nachfrage nach Holz als Rohstoff für die stoffliche Nutzung zunehmen wird, insbesondere, da die Kritik an erdölbasierten Kunststoffen zugenommen hat. Bei den wichtigsten stofflich genutzten Baumarten handelt es sich bisher vor allem um die Nadelbäume Fichte, Tanne, Kiefer und Lärche. Die Douglasie ist mit rund 19 Kubikmetern pro Hektar zwar die ertragreichste Baumart in Deutschland, hat aber bisher nur eine geringe Bedeutung für die stoffliche Holznutzung. Die Verfügbarkeit von Nadelholz dürfte jedoch infolge des Klimawandels künftig abnehmen. Bei der energetischen Nutzung überwiegen schon heute mit 57 Prozent Laubhölzer wie Buche und Eiche. Für die Produktion von Energieholz eignen sich auch schnellwachsende Gehölze wie Pappeln und Weiden, die in sogenannten Kurzumtriebsplantagen hohe Energieholzerträge liefern. Nicht heimisch ist der Blauglockenbaum (Paulownia tomentosa), der ebenfalls sehr hohe Zuwachsraten aufweist und im Vergleich zu Pappel und Weide ein höherwertiges Holz liefert, das auch für verschiedene stoffliche Nutzungen geeignet ist (vgl. Abschnitt 11.1.2.4.1). Der Blauglockenbaum wird jedoch noch selten genutzt. Mit dem zunehmenden Bedarf an nachwachsenden Rohstoffen und dem Fortschreiten des Klimawandels werden schnellwachsende Laubbaumarten wie Pappel, Weide oder Blauglockenbaum, die z. B. in Kurzumtriebsplantagen angebaut werden, eine immer wichtigere Alternative.

11.1.1.1.1 Baumbestand

Deutschland verfügt über eine Waldfläche von rund elf Millionen Hektar. Die größten Anteile am Baumbestand haben Fichten mit mehr als 25 Prozent und Kiefern mit über 22 Prozent. Danach folgen Buchen mit mehr als 15 Prozent und Eichen mit über 10 Prozent als häufigste Laubbäume (vgl. Tabelle 263).

Tabelle 263: Baumbestand in Deutschland

Baumart	Fläche (ha)	Anteil
Eiche	1.129.706	10,4%
Buche	1.680.072	15,4%
Andere Laubbäume	1.917.482	17,6%
Fichte	2.763.219	25,4%
Tanne	182.757	1,7%
Kiefer	2.429.623	22,3%
Douglasie	217.604	2,0%
Lärche	307.050	2,8%
Lücke	219.625	2,0%
Blöße	40.852	0,4%
Alle Baumarten	**10.887.990**	**100,0%**

Quelle: BMEL, 2016, S. 35

Die sehr ertragreiche Douglasie hat mit zwei Prozent nur einen geringen Anteil (BMEL, 2016a S. 35). Aufgrund des Klimawandels wird vor allem der Anteil der Fichten im Besonderen wie auch der Nadelhölzer im Allgemeinen abnehmen. Dies wird insbesondere für den Bausektor von Bedeutung sein, wenn zukünftig der Anteil des Holzbaus an Neubau und Bestandsersatz erhöht werden soll. Im Bausektor verwendet man bisher fast ausschließlich Nadelhölzer.

11.1.1.1.2 Holzzuwachs

Der Holzzuwachs wird in Vorratsfestmetern sowie in Erntefestmetern erfasst. Ein Vorratsfestmeter umfasst den Holzvorrat „eines stehenden Baumes oder eines stehenden Baumbestandes inklusive Rinde mit Durchmessern >7cm einschließlich der bei Holzernte im Wald verbleibenden Baumkompartimente (Stockholz, Kronen-/Astderbholz)“ (Unseld, 2013 S. 8). Im Rahmen der Bundeswaldinventur 2012 wurde der Gesamtzuwachs auf einer Waldfläche von 11,4 Millionen Hektar auf 121,6 Millionen Kubikmeter pro Jahr beziffert. Dies entspricht 10,7 Kubikmetern pro Hektar und Jahr. Je nach Baumartengruppe variiert der Zuwachs zwischen 6,4 Vorratsfestmetern (Laubbäume niedriger Lebensdauer) und 18,9 Vorratsfestmetern (Douglasie) pro Hektar und Jahr (BMEL, 2016a S. 154/155). Die vorliegenden Erhebungsdaten beziehen sich auf die Zuwachsleistungen im Zeitraum 2002 bis 2012. Durch die Länge der Umtriebszeiten kann die Zuwachsleistung beeinflusst werden. Längere Umtriebszeiten erhöhen zwar zunächst den mittleren Vorrat, lassen aber die jährliche Zuwachsleistung sinken. Infolge des Klimawandels können sich aufgrund veränderter Temperaturen und Niederschläge die Zuwachsraten ebenfalls ändern.

Tabelle 264: Holzzuwachs nach Baumart in Vorratsfestmetern (Vfm) und Erntefestmetern (Efm)

Baumart	Vorratsfestmeter Deutschland Vfm/ha*a [1)]	Erntefestmeter Deutschland Efm/ha*a [2)]	Vorratsfestmeter Baden-Württemberg Vfm/ha*a [1)]	Erntefestmeter Baden-Württemberg Efm/ha*a [2)]
Eiche	8,3	6,1	7,7	5,7
Buche	10,3	8,8	10,3	8,8
Fichte	15,3	12,4	15,1	12,2
Tanne	16,3	13,2	16,1	13,0
Douglasie	18,9	14,5	19,4	14,9
Kiefer	9,5	7,3	6,8	5,2
Lärche	10,7	7,6	8,2	5,8
Andere Laubbäume	7,4	5,6	7,9	6,0
Alle Bäume	**10,9**	**8,6**	**11,7**	**9,3**

Quellen: (1) BMEL, 2016, S. 14/15 und S. 154/155; (2) Eigene Berechnung nach bwi.info[92] zit. n. Gößwein, 2018a

[92] Abgeleitet aus Daten der dritten Bundeswaldinventur für den Vorrat des Hauptbestandes in Bayern. Quelle: https://bwi.info; 77Z1JI_L244of_2012_bi

11.1.1.1.3 Nachhaltigkeit

Aus ökologischer Sicht ist es möglich, den Zuwachs nahezu vollständig zu nutzen, sofern eine ausreichende Strukturvielfalt erhalten bleibt und der Nährstoffhaushalt nicht zu sehr gestört wird. Für eine ausreichende Strukturvielfalt muss unter anderem „eine Verteilung alter, reifer Bäume auf der Fläche gesichert sein“ (Müller, 2005a S. 180), da eine Beschränkung alter Bäume auf wenige Altholzinseln im Wirtschaftswald für wichtige Vogelarten keinen ausreichenden Nutzen bringt (Müller, 2005a S. 180). Mit Blick auf den Klimawandel ist die stoffliche Nutzung als Baumaterial besonders sinnvoll, weil Kohlenstoff in verarbeitetem Holz z. B. in Gebäuden und Möbeln langfristig gebunden werden kann und eine Verjüngung des Baumbestandes die Anpassung der Wälder an den Klimawandel erleichtert. Für die Biodiversität kann die Holznutzung von Vorteil sein, wenn es gelingt, eine große Strukturvielfalt zu erhalten oder herzustellen, da eine Stabilisierung des globalen Klimas mithilfe erneuerbarer Energien und nachwachsender Rohstoffe auch zur Stabilisierung der Ökosysteme und zum Erhalt der an sie angepassten Artenvielfalt beiträgt.

Bei einer überwiegend oder vollständig energetischen Nutzung kann eine umfangreiche Holznutzung den Klimawandel allerdings befördern: „Ist der Zuwachs größer als die Holznutzungen, steigen die Vorräte und der Wald wirkt als CO_2-Senke. Liegen die Holznutzungen über dem Zuwachs, sinken die Vorräte und der Wald wird zur CO_2-Quelle. Die Kohlenstoffbilanz hängt entscheidend vom Altersklassenaufbau ab.“ [93] (BMELV Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2011 S. 11)

11.1.1.1.4 Nutzung des Holzzuwachses

Insgesamt 79 Prozent des Holzes sind als Stamm- und Industrieholz nutzbar, bei 21 Prozent handelt es sich um potenziell nutzbares Waldrestholz (Mantau, 2008 S. 13). Das Restholz und die Rinde können energetisch oder industriell genutzt werden. Als mögliche künftige Nutzung der Baumrinde bietet sich auch die Verarbeitung zu Dämmstoffen an (Kain, 2013). Eine andere könnte darin bestehen, hochwertige Tannine aus der Rinde zu gewinnen, um daraus Kleb- und Verbundstoffe herzustellen (SNF Schweizerischer Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung, 2018). In Deutschland verblieben im Zeitraum 2002 bis 2012 rund 22 Prozent des jährlichen Zuwachses zum Vorratsaufbau oder als Totholz im Wald. Die theoretische Nutzung lag bei 62 Prozent (BMEL, 2016a S. 168). In den betrachteten Landkreisen Baden-Württembergs werden rund 90 Prozent des Zuwachses genutzt (Forst BW, 2018).

[93] „Junge Wälder besitzen eine starke Senkenleistung, während sich in alten Wäldern, bezogen auf die oberirdische Biomasse, langfristig ein Gleichgewicht zwischen CO_2-Aufnahme (Wachstum) und Abgabe (Verrottung) einstellt“ (BMELV Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, 2011 S. 11).

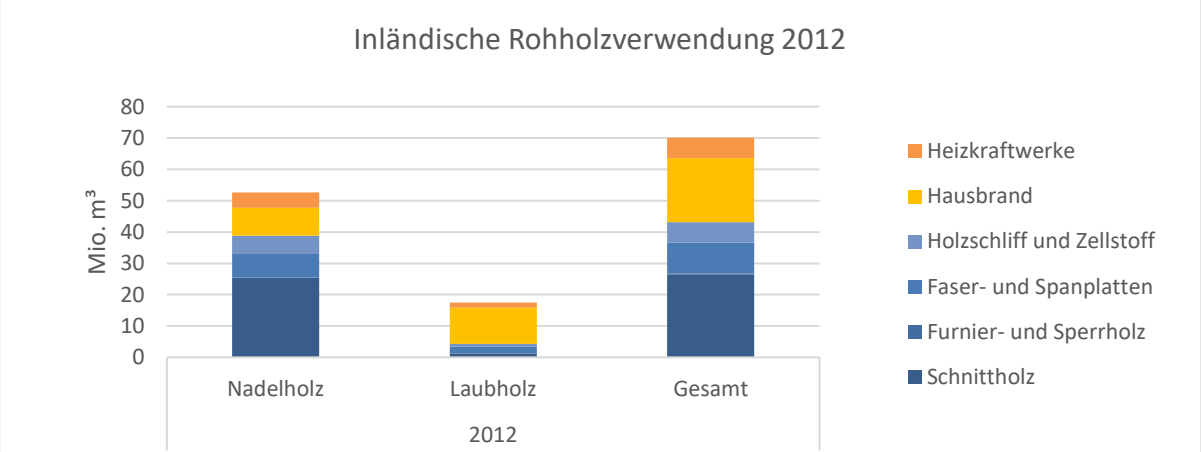
Tabelle 265: Nutzung des Holzzuwachses in Deutschland 2002-2012

Nutzung des Holzzuwachses	Insgesamt (Mio. m³/Jahr)	Pro Hektar (m³/ha*a)	Anteil
Vorratsaufbau im Wald	15,3	1,3	13%
Totholz im Wald verbleibend	10,4	0,9	9%
Ernteverluste und Rinde	20,2	1,8	17%
Theoretische Nutzung	75,7	6,6	62%
SUMME	121,6	10,7	100%

Quelle: BMEL, 2016, S. 168

11.1.1.1.5 Rohholzverwendung

Im Jahr 2012 wurden in Deutschland 70 Millionen Kubikmeter Rohholz verwendet. Insgesamt entfielen jeweils 38 Prozent der Rohholzverwendung auf die Produktion von Schnittholz und die Energiegewinnung. Nur knapp 24 Prozent wurden anderen stofflichen Nutzungen zugeführt. Bei 75 Prozent des Gesamtverbrauchs handelte es sich um Nadelholz. An der stofflichen Verwendung hatte Nadelholz einen Anteil von rund 90 Prozent, an der energetischen Nutzung von rund 51 Prozent. Nadelholz wurde zu 74 Prozent stofflich genutzt, Laubholz zu 75 Prozent energetisch. Schnittholz wurde zu 96 Prozent aus Nadelholz hergestellt, Rohstoffe für die Produktion von Papier (Holzschliff und Zellstoff) zu 86 Prozent. (Hennig, et al., 2015 S. 5) Die meistgenutzte und ertragreichste Baumart ist die Fichte. „Bei einem Flächenanteil von 25 % liefert die Fichte 51 % des gesamten Rohholzaufkommens in Deutschland“ (Polley, et al., 2015 S. 4).



Grafik: Eigene Darstellung. Quelle: Hennig & Seintsch, 2015

Abbildung 118: Inländische Rohholzverwendung 2012

Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Bedeutung der Fichte deutlich zurückgehen wird. „Unter den Bedingungen des Klimawandels ist die Fichte durch Stürme und Trockenheit besonders gefährdet, weil sie flach wurzelt und viel Niederschlag benötigt. Hingegen haben 84

% der heutigen Buchenwälder eine naturnahe oder sehr naturnahe Baumartenzusammensetzung“ (Polley, et al., 2015 S. 2). Daher ist es wahrscheinlich, dass die Bedeutung der Buche und anderer Laubhölzer bei der Produktion von Schnittholz und Holzplatten für den Bausektor und die Möbelindustrie zunehmen wird.

Im Jahr 2006 lag die inländische Rohholzverwendung bei 67,5 Millionen Kubikmetern (Seintsch, et al., 2012) und ist zwischen den Jahren 2006 und 2012 um 3,7 Prozent angestiegen. Infolge der Energiewende hat jedoch vor allem die energetische Nutzung von Holz zugenommen. Wie Abbildung 119 zeigt, gilt dies für Laub- und Nadelholz nahezu gleichermaßen. Die stoffliche Nutzung hat dagegen um 12 Prozent abgenommen. Besonders deutlich ist der Rückgang bei der Schnittholzproduktion mit einer Abnahme um 16 Prozent (Nadelholz: -17 Prozent, Laubholz: -8 Prozent). So wird das Potenzial der CO_2-Absorption durch die Verwendung von Holz als Baustoff immer weniger genutzt (vgl. Abbildung 119).

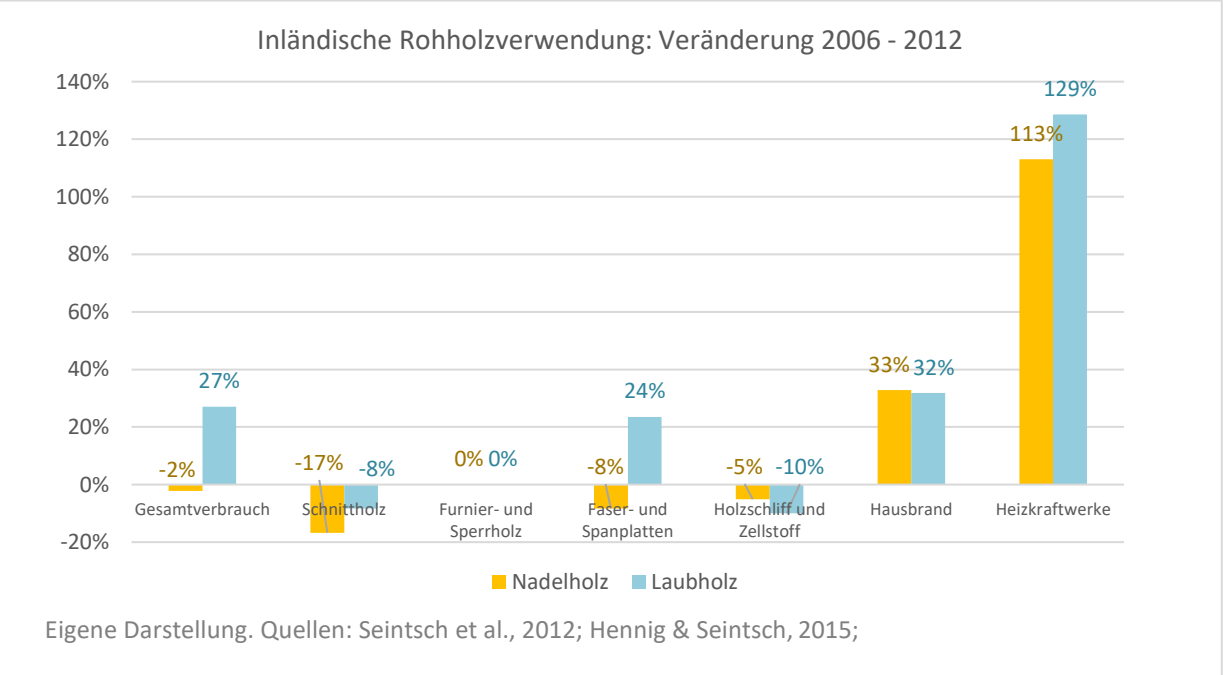


Abbildung 119: Inländische Rohholzverwendung: Veränderung 2006 - 2012

11.1.1.1.6 Raumdichte, Feuchte und Gewicht von Holz

Um mögliche Autonomiegrade abschätzen zu können, müssen die in Kubikmetern bzw. in Festmetern erfassten Zuwächse ins Verhältnis zu unterschiedlichen Bedarfsangaben verschiedener Branchen gesetzt werden, die sowohl Angaben in Kubikmetern als auch gewichtsbezogene Werte umfassen. Dabei sind die Raumdichte und unterschiedliche Feuchtegehalte der von den verschiedenen Branchen verwendeten Holzmengen zu berücksichtigen. Die Rohdichte der hier betrachteten Holzarten bewegt sich, je nach Baumart, zwischen Grenzwerten von 0,33 und 0,96 t/fm (Grosser, 2007 S. 67). Die von Oehmichen et al. (2011) angegebenen Mittelwerte der einzelnen Baumarten nach IPCC (2003), Kollmann (1982) und Knigge & Schulz

(1966) sind in Tabelle 266 dargestellt. „Die Raumdichten der Hölzer schwanken zwischen den Baumarten und in den Baumarten selbst“ (Oehmichen, et al., 2011 S. 76). Astholz ist dichter als Stammholz und eignet sich daher sowie aufgrund der geringeren Durchmesser besser für andere Verwendungszwecke als Stammholz.

Tabelle 266: Raumdichte von Holz nach Kollmann (1982), IPCC (2003) und Knigge & Schulz (1966)

Baumartengruppe	Stamm (IPCC)	Ast (IPCC)	Stamm (Kollmann)	Ast (Kollmann)	Ast, Stamm (Knigge & Schulz)
	Raumdichte rd in g/cm²				
Fichte	0,40	0,54	0,38	0,51	0,38
Tanne	0,40	0,54	0,36	0,49	0,37
Douglasie	0,45	0,60	0,41	0,56	0,41
Kiefer	0,42	0,56	0,43	0,58	0,43
Lärche	0,46	0,62	0,49	0,66	0,49
Eiche	0,58	0,62	0,57	0,61	0,56
Buche	0,58	0,64	0,56	0,61	0,55
Andere Laubbäume	0,58	0,64	0,56	0,61	0,38

Quellen: Kollmann (1982), IPCC (2003) und Knigge & Schulz (1966) zit. n. Oehmichen et al. (2011)

Aufgrund der Vollständigkeit der Daten sowie der hohen Übereinstimmung mit anderen Quellen basieren die folgenden Berechnungen auf den Angaben von Kollmann und Lignum Holzwirtschaft Schweiz (vgl. Tabelle 268).

Die mittleren Raumgewichte lufttrockenen Holzes der hier betrachteten Baumartengruppen sind in Tabelle 268 dargestellt und liegen nach Lignum zwischen 0,45 und 0,69 (Lignum, 2018). Lufttrockenes Holz hat einen Wassergehalt von 15 bis 20 Prozent. Die Holzfeuchte liegt somit bei 18 bis 25 Prozent. Dies entspricht der „Gleichgewichtsfeuchte zur Umgebungsluft bei Normalklima“ (Schardt, 2006). Bauholz wird von Herstellern häufig auf eine Holzfeuchte von ca. 15 Prozent getrocknet. Je nach Verwendungsort kann die Verarbeitungsholzfeuchte jedoch höher oder niedriger liegen.

Im Innenraum genutzte Möbel sollen eine Verarbeitungsholzfeuchte von 7 bis 12 Prozent aufweisen (GD Holz, 2018). Die sogenannte Sollfeuchte von Holz am Verwendungsort nach GD Holz (2018) ist in Tabelle 267 dargestellt.

Tabelle 267: Sollfeuchte von Holz am Verwendungsort

Verwendungszweck	Verarbeitungs-holzfeuchte
Bauholz im Freien	16 bis 25%
Bauholz für überdachte, offene Bauwerke	16 bis 18%
Gartenmöbel, Gartengeräte	16 bis 18%
Sportgeräte, Werkzeuge und Gegenstände, die überwiegend im Freien verwendet werden	12 bis 16%
Fenster, Außentüren	12 bis 15%
Möbel, Innentüren, Parkett, Täfelungen in Räumen mit Ofenheizung	10 bis 12%
Möbel, Innentüren, Parkett, Täfelungen in zentralbeheizten Räumen	7 bis 10%
Holz für Heizungsbekleidungen	6 bis 7%
Furniere, Sperrplatten, Schichtholz	6 bis 8%

Quelle: GD Holz, 2018

Für die vorliegenden Berechnungen von Flächenbedarfen und Autonomiegraden wurde vereinfachend für Bauholz eine mittlere Holzfeuchte von 14,0 Prozent und für Möbel von 8,0 Prozent angenommen. Daraus folgt eine eher konservative Schätzung des Flächenbedarfs von Bauholz und Holzmöbeln. Das Raumgewicht von Holzmöbeln bei acht Prozent Restfeuchte ist in Tabelle 268 dargestellt.

Tabelle 268: Raumgewicht von waldfrischem und lufttrockenem Holz

Baumartengruppe	Waldfrisch (Lignum)	Lufttrocken (Lignum)	Lufttrocken (Grosser)	Innenraumtrocken mit 8% RF (Ber. n. Kollmann)
Eiche	1,00	0,69	0,68	0,62
Buche	1,00	0,72	0,71	0,60
Fichte	0,84	0,47	0,47	0,41
Tanne	0,94	0,45	0,47	0,39
Douglasie	0,80	0,51	0,58	0,44
Kiefer	0,85	0,52	0,52	0,47
Lärche	0,80	0,59	0,59	0,53
Andere Laubbäume	0,87	0,65	k. A.	0,60

Quellen: Lignum, 2018; Grosser, 2007; Kollmann, 1982, zit. n. Oehmichen et al., 2011;

11.1.1.2 Forstwirtschaftliche Rohstoffe

Anhand der jährlichen Zuwachsraten und der Raumdichten lässt sich der potenzielle Hektarertrag nach Art des Rohstoffs abschätzen.

Da die einzelnen Branchen und Verwendungen unterschiedliche Holzeigenschaften und Qualitäten bevorzugen oder benötigen, ist es erforderlich, die Holzzuwächse theoretisch nach Stammholz und Astholz, Starkholz und Schwachholz, Durchforstungsholz, Restholz und Rinde zu differenzieren. Zu berücksichtigen ist zudem, dass die Aufkommen an Ast- und Durchforstungsholz erhebliche Mengen an Schwachholz umfassen, deren Entrindung sich in der Regel nicht lohnt, weil die Durchmesser zu gering sind. Eine Entrindung ist bis zu einem Durchmesser von 6,0 cm gut möglich. Nach Baumarten und Durchmesser differenzierte Daten zu den Astholz- und Durchforstungsholzaufkommen lagen allerdings nicht vor. Nach Mantau (2008) liegt der Anteil des potenziell nutzbaren Waldrestholzes bei 21 Prozent (Mantau, 2008 S. 13). Für das Aufkommen von Durchforstungsholz lagen jedoch nur Daten zum Gesamtbaumbestand vor, weshalb eine Differenzierung nach Baumartengruppen im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht möglich war.

Da Astholz theoretisch bis zu sehr geringen Durchmessern auch stofflich nutzbar ist (Grigoriou, et al., 1994), wurde hierfür ein pauschaler Schätzwert von 60 Prozent des Laubbaumastholzes angenommen, entsprechend den Angaben des BMEL zum Industrieholzaufkommen für Buche und Eiche (BMEL, 2016b S. 13). Für Astholz von Nadelbäumen wurde weiterhin eine ausschließlich energetische Nutzung angenommen, weil Astholz in der Produktion von Bauholzplatten (OSB, Spanplatten usw.) ohnehin kaum Verwendung findet und die Durchmesser im Vergleich zu Laubbaumastholz noch geringer sind. Theoretisch sind aber auch Anteile des Nadelbaumastholzes als Industrieholz nutzbar, die jedoch nur einen geringen Anteil am gesamten Holzaufkommen haben (BMEL, 2016b S. 13).

11.1.1.2.1 Stammholz

Stammholz ist das wichtigste forstwirtschaftliche Produkt, welches für zahlreiche stoffliche Holznutzungen benötigt wird. Es liefert sowohl für die Bauholzproduktion (Massivholz, OSB, Spanplatten usw.) als auch für die Produktion von Zellstoff für die Papier- und Viskosefaserproduktion die beste Qualität. Der Landesbetrieb HessenForst gibt Mittelwerte zu den Stammholzerträgen an: „Abhängig von der Baumart und dem Alter des Baumes beträgt der Stammholzanteil etwa zwei Drittel der oberirdischen Holzmasse beim Nadelholz und ein Drittel beim Laubholz. Insgesamt wird mehr als die Hälfte des verkauften Holzes als Stammholz vermarktet und somit einer langfristigen Nutzung zugeführt“ (HessenForst, 2018). Nach Straub (2012) werden bei Nadelholz mehr als 80 Prozent und bei Laubholz 35 bis 50 Prozent Stammholzanteil erreicht (Straub, 2012 S. 13). Höhere Anteile gibt das BMEL für Gesamtdeutschland an: „Die Stammholzanteile liegen bei den Nadelbaumarten über 80 %, bei den Laubbaumarten unter 60 %“ (BMEL, 2016b S. 12). Für die folgenden Ertragspotenzialschätzungen wurden Mittelwerte für Nadelbäume (NB) und Laubbäume (LB) zwischen den niedrigsten und höchs-

ten Angaben dieser drei Quellen verwendet. Diese sind in Tabelle 269 dargestellt. Die Baumartengruppe Buche, die in Deutschland bereits einen Anteil von 36 Prozent am Laubbaumbestand hat und in Zukunft vor allem im Bausektor noch an Bedeutung gewinnen dürfte, hat nach BMEL (2016) einen Stammholzanteil von etwa 55 Prozent (BMEL, 2016b S. 12). Somit könnte der tatsächliche Stammholzertrag pro Hektar auch über den hier berechneten Ertragswerten liegen.

Tabelle 269: Stammholz- und Astholzanteile von Nadel- und Laubbäumen

Holzart	Niedrigste Angabe	Höchste Angabe	Mittel
NB-Stammholz	67% [1)]	88% [2)]	78%
NB-Astholz	12% [2)]	33% [1)]	22%
LB-Stammholz	33% [1)]	58% [2)]	46%
LB-Astholz	42% [2)]	67% [1)]	54%

Quellen: (1) Hessen-Forst, 2018; (2) BMEL, 2016b

11.1.1.2.2 Astholz

Astholz wird heute zwar überwiegend energetisch verwertet. Starkes Astholz kann jedoch auch stofflich genutzt und zur Herstellung von Spanplatten, Massivholzdielen, Dachschindeln (z. B. Spaltholzschindeln), Fahrradrahmen, Werkzeugstielen, Holzspielzeug und vieler weiterer Produkte verwendet werden. Bei Eiche und Buche sind rund 30 Prozent des Holzaufkommens (rund 60 Prozent des Astholzes) als Industrieholz nutzbar. Bei Fichte und Kiefer hat das als Industrieholz nutzbare Astholz einen Anteil von weniger als 10 Prozent am gesamten Holzaufkommen (BMEL, 2016b S. 13).

Auch Astholz mit Durchmessern unter 6,0 cm kann theoretisch zu Spanplatten verarbeitet werden (Grigoriou, et al., 1994), allerdings wird heute meistens darauf verzichtet. Spanplatten können nach Herstellerangaben bis zu drei Prozent Rindenanteil enthalten, ohne eine erhebliche Beeinträchtigung der Qualität zu erleiden (Pfleiderer, 2018). Spanplatten hoher Qualität sind jedoch rindenfrei (Pfleiderer, 2018). Heute nutzen große Spanplattenhersteller kein Astholz. Auch für die Herstellung von OSB-Platten oder Zellstoff wird ausschließlich entrindetes Holz verwendet. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Hackgut, das aus dem Verschnitt der Sägewerke oder aus Altholz besteht. Das anfallende Astholz einschließlich der Rindenanteile wird meist energetisch verwertet. Nach Durchmesser differenzierte Daten zu den jeweiligen Astholzaufkommen werden daher von den befragten Unternehmen nicht statistisch erfasst.

11.1.1.2.3 Rinde

Die Rindenanteile variieren von Baumart zu Baumart und sind zudem abhängig vom Durchmesser des Rundholzes. Auch der Standort kann z. B. bei Eichen den Rindenanteil beeinflussen. „Für die Abschätzung des Rindenanteiles gibt es einerseits traditionelle Tabellen und andererseits in die Rundholzvermessung integrierte Funktionen. [...] Altherr, Unfried, J. Hradetzky und V. Hradetzky von der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA) in Freiburg haben für viele Baumarten Koeffizienten zur Schätzung von Rindenstärke und Rindenanteilsprozenten am Volumen berechnet.“ (Rössler, 2008)

Der prozentuale Rindenanteil am Stammvolumen wurde nach der folgenden Formel berechnet (DM in cm):

$$Ri(\%) = 20 \times \left[\frac{A}{DM} + B + C \times DM\right] \times \left[1 - 0{,}05 \times \left(\frac{A}{DM} + B + C \times DM\right)\right]$$

Dabei muss für DM der Durchmesser in cm eingegeben werden. Die durchschnittlichen Koeffizienten, die für die Berechnung in Baden-Württemberg benötigt werden, sind in Tabelle 270 angegeben. Demnach ergeben sich nach Rössler (2008) „für einen 50 cm dicken Fichtenstamm ein gerundeter Volumenanteil der Rinde von 10 % und eine einfache Rindenstärke von etwa 13 mm. Bei einer Traubeneiche auf Muschelkalk erhält man dagegen fast 20 % Rindenanteil und eine Rindendicke von etwa 25 mm“ (Rössler, 2008).

Tabelle 270: Durchschnittliche Koeffizienten aus Baden-Württemberg für die Berechnung des Rindenanteils (nach FVA)

Baumart	A	B	C
Fichte	0,85149	0,60934	-0,00228
Tanne	1,76896	0,59175	0
Weißkiefer	1,59099	0,50146	0
Schwarzkiefer	5,27169	1,12602	0
Lärche	3,58012	1,03147	0
Douglasie	-2,13785	0,91597	-0,00375
Rotbuche	2,61029	0,28522	0
Traubeneiche (Lehm)	9,88855	0,56734	0
Traubeneiche (Muschelkalk)	14,31589	0,72699	0
Bergahorn	-0,62466	0,73312	-0,00482
Esche	-7,97623	1,40182	-0,01011

Quelle: FVA zit. n. Rössler, 2008

Die Ergebnisse der Schätzung des Rindenaufkommens sind in Tabelle 271 dargestellt. Für die Berechnung wurde ein mittlerer Stammdurchmesser von 50 cm zum Zeitpunkt der Ernte

angenommen. So ergibt sich mit 10,7 Prozent ein etwas höherer Rindenanteil für den Gesamtbestand, als in den befragten Sägewerken anfällt. Die befragten Unternehmen gaben als Mittelwert jeweils rund zehn Prozent Rindenanteil an. Dies dürfte nicht zuletzt mit dem hohen Fichtenanteil der inländischen Schnittholzproduktion zusammenhängen.

Tabelle 271: Rindenanteile und geschätztes Rindenaufkommen pro Hektar

Baumartengruppe	Rindenabzug (Prozent)	Aufkommen Rinde (m³/ha)
Eiche (auf Lehm)	14,7	1,2
Buche	6,6	0,7
Fichte	10,0	1,5
Tanne	12,1	1,9
Douglasie	13,2	2,5
Kiefer	10,4	1,0
Lärche	20,8	2,2
Andere Laubbäume	13,2	1,0
Alle Bäume	**10,7**	**1,2**

Quelle: Eigene Berechnung nach FVA zit. n. Rössler, 2008

Bei Schwachholz ist der Rindenanteil im Vergleich zu Starkholz deutlich höher. So steigt der Rindenanteil nach dieser Schätzung bei einem Durchmesser von 15 cm bei Eiche (auf Lehm) auf 23,0 Prozent, bei Buche auf 9,0 Prozent, bei Fichte auf 12,2 Prozent, bei Tanne auf 13,7 Prozent, bei Douglasie auf 13,8 Prozent, bei Kiefer auf 11,8 Prozent und bei Lärche auf 23,8 Prozent.

11.1.1.2.4 Restholz

Die Schätzung der Erntereste, die entweder im Wald verbleiben oder energetisch genutzt werden können, erfolgte anhand von Daten der Datenbank der Bundeswaldinventur (BWI) 2012 (bwi.info). Hierfür wurden die geschätzten Rindenanteile von der jeweiligen Differenz zwischen Vorratsfestmeterzuwachs und Erntefestmeterzuwachs abgezogen. Die in den weiteren Kapiteln folgenden Ertragsschätzungen fallen jeweils etwas geringer aus, weil davon ausgegangen wurde, dass 10 Prozent des jährlichen Zuwachses im Wald verbleiben und maximal 90 Prozent entnommen werden.

Tabelle 272: Geschätztes Restholzaufkommen pro Hektar

Baumartengruppe	Erntereste und Rinde (m³/ha)	Erntereste ohne Rinde (m³/ha)
Eiche (auf Lehm)	2,2	0,9
Buche	1,4	0,7
Fichte	2,9	1,3
Tanne	3,0	1,0
Douglasie	4,3	1,7
Kiefer	2,2	1,2
Lärche	3,1	0,9
Andere Laubbäume	1,8	0,8
Alle Bäume	**2,4**	**1,0**

Quelle: Eigene Berechnung n. BMEL (2016), BWI (2012) und FVA zit. n. Rössler (2008)

11.1.1.2.5 Durchforstungsholz

Die durchschnittlichen Schwachholzanteile pro Hektar und ihre Durchmesser können der Datenbank der Bundeswaldinventur 2012 (bwi.info) für die einzelnen Bundesländer entnommen werden. Nach Baumarten differenzierte Durchforstungsholzaufkommen konnten jedoch nicht ermittelt werden. Nach Angaben des TFZ Bayern kann man in Süddeutschland (Bayern) pro Hektar jährlich „knapp 3 SRm Hackschnitzel oder 800 kg lufttrockenes Hartholz bzw. 550 kg lufttrockenes Weichholz“ (TFZ Bayern, 2018) aus Durchforstungen erwarten.

11.1.1.3 Forstwirtschaftliche Ertragspotenziale nach Art der Rohstoffe

Die Ertragspotenziale der forstwirtschaftlichen Produktion sind im Verhältnis zur heutigen und künftigen Nachfrageentwicklung zu sehen. Dabei wird eine gewisse Anpassung der Nachfrage an die Rohstoffverfügbarkeit unvermeidlich sein, sofern die Nachhaltigkeit der Rohstoffbereitstellung gewährleistet und gleichzeitig hohe Deckungsgrade erreicht werden sollen. So werden in Folge des Klimawandels die Bedingungen vor allem für die Fichte zukünftig immer ungünstiger, wenn Sturmereignisse und Trockenperioden häufiger auftreten und die Temperaturen weiter ansteigen. Je nach Standort können die sich ändernden Bedingungen einen größeren Laubholzanteil und einen Ersatz von Fichten durch Weißtanne oder Douglasie erforderlich machen (Kircher, 2017). Je nach Zusammensetzung des Baumbestandes und Entwicklung der klimatischen Bedingungen können die künftigen Durchschnittserträge von den heutigen Durchschnittserträgen abweichen.

In Tabelle 273 sind die geschätzten Erträge in Festmetern nach Baumartengruppen dargestellt. Unter der Kategorie Holzernte sind Erntefestmeter einschließlich Astholz zusammengefasst, die beim forstwirtschaftlichen Holzeinschlag entnommen und einer stofflichen oder ener-

getischen Nutzung zugeführt werden können. Hinzu kommen Rinde, Erntereste und Schwachholz aus Durchforstungen. Fasst man Erntereste (Restholz) und Holzaufkommen aus Schwachholz, das vorwiegend aus Durchforstungen stammt, zusammen, erhält man jenes Holzaufkommen, das üblicherweise als Energieholz bezeichnet wird. Die Schätzung ergibt demnach im Durchschnitt des Gesamtbestandes ein Energieholzpotenzial von rund 1,9 Efm pro Hektar, was rund einer Tonne Trockenmasse oder 1,1 Tonnen lufttrockenen Holzes entspricht. Dies stimmt gut mit den Ergebnissen überein, die in einer Studie zu den Potenzialen im Landkreis Göppingen in Baden-Württemberg berechnet wurden. Dort wurde ein durchschnittliches Energieholzpotenzial von 1,8 Efm pro Hektar und Jahr ermittelt. Zusätzlich wurde ein Energieholzpotenzial von 1,0 Efm/ha*a ermittelt, das erschlossen werden kann, wenn „Teile der Krone im kleinen Durchmesserbereich noch zusätzlich mitgenutzt werden“ (Pelz, et al., 2007 S. 55).

Tabelle 273: Durchschnittliche Ertragspotenziale der Forstwirtschaft in Deutschland in Festmetern

Baumarten-gruppe	Holz-ernte	Ernte-reste	Rinde	Schwach-holz	Gesamt-ertrag o. Rinde	Σ Rest- und Schwach-holz
	Festmeter pro Hektar					
Eiche (auf Lehm)	5,4	0,9	1,2	0,6	**7,0**	1,6
Buche	7,7	0,7	0,7	0,8	**9,2**	1,5
Fichte	10,6	1,3	1,4	1,1	**13,0**	2,4
Tanne	10,6	1,0	1,8	1,1	**12,7**	2,1
Douglasie	11,9	1,7	2,3	1,4	**14,9**	3,0
Kiefer	6,7	1,2	1,0	0,8	**8,7**	2,0
Lärche	7,2	0,9	2,4	0,9	**9,0**	1,8
Andere Laub-bäume	4,8	0,8	0,9	0,6	**6,2**	1,4
Alle Bäume	**7,4**	**1,0**	**1,1**	**0,8**	**9,3**	**1,9**

Quelle: Eigene Berechnung

Nach Angaben des TFZ Bayern erreicht der jährliche Holzbrennstoffertrag aus Waldrestholz und Durchforstungsholz „selten mehr als 1.500 kg/ha“ (TFZ Bayern, 2018). Auch dies bestätigt die vorliegende Schätzung.

In Tabelle 274 sind die heutigen Ertragspotenziale in Tonnen Trockenmasse (absolut trockenes Holz) pro Hektar dargestellt. Gewichtsbezogene Angaben sind erforderlich, um die Ertragspotenziale ins Verhältnis zum Rohholzbedarf zahlreicher Branchen zu setzen, die diesen

(anders als die Baubranche) nicht in Kubikmetern, sondern in Tonnen angeben. Bei Autonomiepotenzialschätzungen sind deshalb je nach Verwendungszweck unterschiedliche Restfeuchten des verarbeiteten Rohholzes zu berücksichtigen.

Tabelle 274: Durchschnittliche Ertragspotenziale der Forstwirtschaft in Deutschland in Tonnen (Trockenmasse)

Baumarten-gruppe	Holz	Ernte-reste	Rinde	Schwach-holz	Gesamt-ertrag o. Rinde	Σ Rest- und Schwach-holz
	(Tonnen atro pro Hektar)					
Eiche (auf Lehm)	3,1	0,5	0,7	0,4	**4,0**	0,9
Buche	4,5	0,4	0,4	0,5	**5,4**	0,9
Fichte	4,2	0,5	0,6	0,5	**5,2**	1,0
Tanne	4,2	0,4	0,7	0,5	**5,1**	0,9
Douglasie	5,4	0,8	1,0	0,6	**6,7**	1,4
Kiefer	2,8	0,5	0,4	0,3	**3,7**	0,8
Lärche	3,3	0,4	1,1	0,4	**4,2**	0,8

Quelle: Eigene Berechnung

11.1.2 Landwirtschaft

11.1.2.1 Rahmenbedingungen

Die heutige Landwirtschaft sieht sich mit wachsenden Anforderungen konfrontiert, die zunehmend in Konkurrenz zu einander treten. Zum einen lassen der anhaltend hohe Flächenverbrauch und die zunehmenden Auswirkungen des Klimawandels Ackerflächen und Hektarerträge schrumpfen. Andererseits muss eine wachsende Weltbevölkerung nicht nur mit ausreichend Nahrung, sondern auch mit nachwachsenden Rohstoffen und erneuerbarer Energie versorgt werden. Gleichzeitig soll die Landwirtschaft ihren Beitrag zum Schutz von Klima, Artenvielfalt, Nutztieren, Böden, Grundwasser und Gewässern leisten. Zudem steht die Landwirtschaft unter einen großen wirtschaftlichen Druck, der die Zahl der Betriebe jährlich um mehrere Tausend abnehmen lässt. Andererseits bieten sich den Landwirten infolge von Energie- und Rohstoffwende heute mehr Optionen, mit neuen Produkten und einer größeren Diversifizierung eine größere wirtschaftliche Unabhängigkeit und Sicherheit zu erreichen. Der zunehmende Verbrauch landwirtschaftlicher Produkte hat jedoch dazu beigetragen, dass die Importabhängigkeit Deutschlands bei der Versorgung mit Ernährungsgütern allein im Zeitraum vom Jahr 2000 bis zum Jahr 2010 um 44 Prozent bzw. um 1,68 Mio. Hektar gestiegen ist – auf ein Importsaldo von 5,46 Millionen Hektar (Statistisches Bundesamt, 2013). Damit befanden sich 27 Prozent der für die Ernährung Deutschlands in Anspruch Flächen im Ausland. Der große Zuwachs der Flächenimporte wird häufig mit dem zunehmenden Anbau von Energie-

pflanzen in Verbindung gebracht, ist aber nicht vorrangig darauf zurückzuführen. Die Flächenbelegungen, die nicht Ernährungszwecken dienen (Energie, Rohstoffe, Brache, Stilllegung), haben in der Summe lediglich um 0,50 Mio. Hektar zugenommen (Statistisches Bundesamt, 2013). Neben der Flächenproduktivität rücken daher auch veränderte Konsumgewohnheiten in den Fokus, die für mögliche Autonomiegrade ebenso entscheidend sind wie die Flächennutzung. Die Höhe und die Stabilität der Hektarerträge hängen wiederum in hohem Maße von der Wirtschaftsweise, den bevorzugten Nutzpflanzen und der Nutzung von Nebenprodukten/Koppelprodukten und Reststoffen ab. Aus den genannten Gründen gewinnen neben dem klassischen Ackerbau alte und neue Nutzungskombinationen wie Streuobstwiesen, Agroforste oder Agrophotovoltaik an Bedeutung, die mehrere Produkte auf einmal liefern und dabei in vielen Fällen unempfindlicher gegenüber Witterungsschwankungen sind. Zudem hat auch eine gleichermaßen verträgliche und ertragreiche Grünlandnutzung das Potenzial, wichtige Beiträge zur Versorgung mit Nahrung, Energie und Rohstoffen zu liefern. Nachwachsende Rohstoffe werden daher meist in Kombination mit Nahrungsmitteln, Energieträgern oder anderen nachwachsenden Rohstoffen erzeugt.

11.1.2.2 Grünland

Grünland bietet ein beachtliches Potenzial, Nahrung, Energieträger und Rohstoffe für die stoffliche Nutzung nachhaltig zu produzieren. Die Produktion auf Grünland ist vergleichsweise klimafreundlich und mit Vorteilen für den Artenschutz verbunden. Dies gilt insbesondere bei extensiver Bewirtschaftung. Da die grünlandbasierte Viehhaltung vielerorts nicht mehr oder noch nicht wieder wirtschaftlich zu betreiben ist, bieten energetische und stoffliche Nutzungen interessante Alternativen, Grünland weiterhin zu bewirtschaften. Zu den wichtigsten stofflichen Nutzungen von Wiesengras zählen die Produktion von Zellstoff für die Papierproduktion und die Dämmstoffproduktion. Zudem kann Wiesengras auch für die Herstellung von Kunststoffen verwendet werden. Detaillierte Ausführungen folgen in den jeweiligen Abschnitten zu den Produktgruppen (Dämmstoffe, Papier, Kunststoffe).

11.1.2.3 Ackerbau

Ackerbaulich kultivierte Nutzpflanzen liefern Rohstoffe, die für eine große Vielzahl unterschiedlichster Produkte genutzt werden können. Zu den wichtigsten stofflich genutzten Rohstoffen zählen Zellstoff, Fasern, Stroh, Schäben, Öle, Zucker und Stärke. Bei den wichtigsten ackerbaulich kultivierten Rohstoffpflanzen handelt es sich sicherlich um Weizen, Raps, Lein, Hanf, Zuckerrübe, Mais und Kartoffel. Des Weiteren dürften vor allem Miscanthus, Sonnenblumen, Rutenhirse, Fasernessel und Paulownia an Bedeutung gewinnen, da sie gute Ertragsleistungen mit ökologischen Vorteilen verbinden.

Neben dem Rohstoff für das jeweilige Hauptprodukt liefern die meisten Pflanzen Rohstoffe für verschiedene Nebenprodukte. Zudem werden Rohstoffe für die stoffliche Nutzung auch in zunehmendem Maße aus den Pflanzenresten der Nahrungsproduktion gewonnen. Wichtigstes Beispiel hierfür ist das Stroh aus dem Getreideanbau, dass z. B. als Baustoff sowie als Rohstoff für die Ethanol- oder Zellstoffproduktion verwendet werden kann.

Aufgrund der großen Vielzahl der Verwendungsmöglichkeiten werden die geeigneten Verwendungsmöglichkeiten der Rohstoffpflanzen jeweils in den folgenden Abschnitten zu den einzelnen Produktgruppen vorgestellt und erläutert. Um eine Wiederholung zu vermeiden, wird an dieser Stelle auf eine Übersicht der verschiedenen Nutzpflanzen verzichtet. Vorgestellt werden hier lediglich Kurzumtriebsplantagen als eine mehrjährige Sonderform der Ackerflächennutzung – mit dem Fokus auf den Blauglockenbaum

11.1.2.4 Kurzumtriebsplantagen (KUP)

Üblicherweise kommen in Kurzumtriebsplantagen Weiden und Pappeln zum Einsatz, deren Holz zur Energiegewinnung genutzt wird. Sie werden in der Regel nach zwei- bis fünfjährigen Umtrieben geerntet und zu Holzhackschnitzeln verarbeitet. Sie zeichnen sich durch einen geringen Arbeitsaufwand und hohe energetische Erntefaktoren (EROI) aus. Während der mehrjährigen Standzeit bieten sie zudem vielen Wildtieren Lebensraum und Unterschlupf. Mit ihrem Wurzelwerk schützen sie den Boden vor Erosion und tragen mit Laub und Wurzeln zu Humusbildung und Belebung bei. Mittlerweile gibt es zahlreiche Veröffentlichungen zum Thema KUP mit Weiden und Pappeln, weshalb an dieser Stelle nicht ausführlicher darauf eingegangen wird. Mit dem Blauglockenbaum steht eine weitere schnellwachsende Alternative zur Verfügung, die nicht nur für eine energetische Nutzung, sondern auch für die stoffliche Verwendung in Betracht kommt.

11.1.2.4.1 Blauglockenbaum (Paulownia)

Der chinesische Blauglockenbaum (Paulownia tomentosa) wurde bereits im Jahr 1830 nach Europa eingeführt. Er gilt als relativ winter- und frosthart und kann Temperaturen bis -20 °C tolerieren. Die Baumart ist bisher sehr widerstandsfähig gegen Krankheiten und auch resistent gegen Insektenbefall. Aufgrund „ihres schnellen Wachstums, ihrer überragenden Holzeigenschaften und ihrer Angepasstheit an die zu erwartenden Klimabedingungen“ (Stimm, et al., 2013) wird der Paulownia zugetraut, in Süddeutschland „zu einer echten Bereicherung und einem Hoffnungsträger für die Forstwirtschaft“ zu werden (Stimm, et al., 2013). Der Blauglockenbaum benötigt relativ wenig Wasser und bietet dank seiner umfangreichen Wurzeln speziell in Kurzumtriebsplantagen einen hohen Erosionsschutz. Allerdings werden die sehr leichten und zahlreichen Samen des Blauglockenbaums durch Wind und Wasser verbreitet, weshalb er in Deutschland den Status einer potenziell invasiven Art erhalten hat. Er wird auf der

grauen Liste des Bundesamts für Naturschutz (BfN) aufgeführt und steht somit unter Beobachtung (Mosandl, et al., 2014). Um unvorhersehbare Risiken zu vermeiden, wird empfohlen, diese nichtheimische Baumart nicht in großem Stil anzubauen (Stimm, et al., 2013). In dreijährigen Kurzumtrieben ist das Risiko der ungewollten Ausbreitung reduziert, denn die „Paulownia blüht erst im 4. Jahr und bildet erst dann Samen aus“ (Touraev, et al., 2012).

11.1.2.4.1.1 Wertholz

Im Unterschied zu Pappel und Weide, die vor allem schnell in die Höhe wachsen, zeigt der Blauglockenbaum ein beachtliches Dickenwachstum. Nach zwei Jahren betrug der Stammdurchmesser bei Versuchen in Bulgarien ca. 10 cm, nach drei Jahren bis zu 15 cm. Auch unter den in Deutschland herrschenden Bedingungen sind Jahrringbreiten von 2 bis 3 cm möglich. Unter guten Bedingungen „ist Paulownia in der Lage in Umtrieben von 8-10 Jahren Stämme mit 40-45 cm Stärke zu bilden“ (Cathaia International, 2017a). Nach Sperr (2018) ist jedoch davon auszugehen, dass die Produktion von Stämmen mit solchen für die Schnittholzherstellung geeigneten Durchmessern in Deutschland 8 bis 15 Jahre in Anspruch nimmt, weil auch Jahre mit Rückschlägen, etwa durch Frost, einkalkuliert werden sollten (Sperr, 2018). Nach Mosandel und Stimm (2014) liegt der Zuwachs an Vorratsfestmetern zwischen den Zuwächsen von Buche und Fichte: „Bei Stammzahlen von 400-600 Bäumen/ha und einem mittleren Einzelbaumvolumen von 0,25 Vfm (im Alter von zehn Jahren) ergeben sich Gesamtwuchsleistungen von 100 bis 150 Vfm/ha“ (Mosandl, et al., 2014).

Das Holz des Blauglockenbaums kann vielfältig verwendet werden: „Es ist leicht zu verarbeiten und verfügt über gute physikalische Holzeigenschaften. Es ist hell, leicht, hart und sehr dauerhaft. Dank der Formstabilität ist es für die Herstellung von Dachauslegern, Türen, Fenstern und Trennwänden geeignet. Paulownia-Holz hat einen der niedrigsten Werte hinsichtlich der thermischen Leitfähigkeit und eignet sich daher auch für die Verwendung als Isolationsmaterial. Aufgrund hervorragender akustischer Eigenschaften wird es auch im Instrumentenbau verwendet.“ (Stimm, et al., 2013) Paulowniaholz wird zudem im Boots- und Flugzeugbau, im Wohnwagenbau sowie in vielen weiteren Bereichen verwendet, in denen leichtes Holz und ästhetisches Holz gefragt ist (Cathaia International, 2017b). „Die Dichte des Holzes (lufttrocken, Wassergehalt 15 %) liegt bei 0,26 – 0,33 g/cm³. Die Schwindung (rad., tang., vol.) liegt bei 0,105 %, 0,203 % bzw. 0,327 %. Die Druckfestigkeit parallel zur Faser beträgt 223 kgf/cm², die Biegefestigkeit 406 kgf/cm²; das Elastizitätsmodul 48 (1.000 kgf/cm²) und die Härte 183 kgf/cm².“ (Mosandl, et al., 2014)

11.1.3 Urbane Produktion

Die urbane Produktion von nachwachsenden Rohstoffen führt bisher allenfalls ein Nischendasein. Größere Relevanz könnte in absehbarer Zeit die Produktion von Algen bekommen.

11.1.3.1 Algen

Mikroalgen liefern in Deutschland die mit Abstand höchsten Ölerträge pro Hektar. Der Ölgehalt von Mikroalgen kann bis zu 50 Prozent der Trockenmasse betragen (DECHEMA, 2016). Im Mittel kann man von einem Ölgehalt von 30 – 40 Prozent ausgehen (KIT, 2009). Für die folgende Schätzung wurde mit einem Ölgehalt von 40 Prozent gerechnet, der durch Extraktion nahezu vollständig (zu 99 Prozent) gewonnen werden kann.

Die Angaben zu den möglichen Erträgen in der Literatur liegen, wie Tabelle 275 zeigt, zwischen 10 und 150 t TM pro Hektar. Für die vorliegende Schätzung des Potenzials wurden jeweils Mittelwerte der niedrigeren Angaben verwendet. Mit Mikroalgen lassen sich demnach in offenen Becken 10 bis 50 t TM pro Hektar erzeugen (Griehl, et al., 2012), während in Reaktoren 80 bis 120 t TM pro Hektar zu erwarten sind (FNR, 2018d). Daraus ergeben sich in offenen Becken mittlere Ölerträge von 12 t/ha, in Reaktoren kann man im Mittel mit 40 t/ha rechnen. Können nur 80 Prozent des Ölgehalts abgepresst werden, liegt der Ertrag bei 9,6 t/ha in offenen Becken und 32 t/ha in Reaktoren. Der bei der Ölpressung anfallende Algenpresskuchen kann z. B. als Biogassubstrat oder als Futter für Wassertiere wie Tilapia eingesetzt werden. Somit beträgt der mittlere Brutto-Energieertrag in offenen Becken nach Angaben der FNR in diesem Fall etwa 125 MWh/ha. Bei einem Ölertrag von 12 t/ha entspricht dies einem Heizwert von 10,4 kWh/kg. Griehl et al. geben für reines Algenöl eine Energiedichte von 37,9 MJ/kg an, was rund 10,5 kWh/kg entspricht (Griehl, et al., 2012).

Tabelle 275: Biomasse- und Energieerträge der Algenproduktion

Biomasse	Quelle	Ertrag in t TM/ha*a	Geb. CO_2 in t/ha*a	Energiegehalt in MWh/ha
Mikroalgen (Becken)	Griehl et al., 2012	10 - 50	k. A.	k. A.
Mikroalgen (Becken)	FNR, 2018	40 - 60	66 - 100	166 - 250
Mikroalgen (Reaktor)	Griehl et al., 2012	80 - 150	k. A.	k. A.
Mikroalgen (Reaktor)	FNR, 2018	80 - 120	130 - 200	333 - 500

Geht man von Trockenmasseerträgen von 90 t/ha aus, ergibt dies eine Ölausbeute von bis zu 36 t/ha. Allerdings wurde dieses theoretische Potenzial bisher (Stand: März 2018) noch nicht in größeren Produktionsanlagen realisiert (Posten, 2018). Eine der ersten Anlagen in industriellem Maßstab wurde im März 2018 in Österreich durch die eparella GmbH fertiggestellt und in Betrieb genommen. Die Bauzeit der Anlage betrug 11 Monate, die Kosten lagen bei 18 Millionen Euro. Auf 10.000 m² wurden dort 32 Reaktoren mit einer Produktionskapazität von

100 t Biomasse pro Jahr errichtet. (Ecoduna, 2018) Zum Energieaufwand der Anlagenerrichtung und des Anlagenbetriebs lagen noch keine veröffentlichten Daten vor.

Bisher erscheint die Nutzung von Mikroalgenreaktoren allenfalls für Ernährungszwecke sowie für stoffliche Verwendungen interessant, da der Energieaufwand der Produktion noch sehr hoch ist. Allerdings gibt es bisher nur wenige Untersuchungen. Im Jahr 2011 stellte das KIT im Falle der Biogasproduktion mittels in Reaktoren erzeugter Mikroalgen noch eine negative Energiebilanz fest. Der Energieaufwand überstieg den Energieertrag um mehr als 60 Prozent (Weiss, 2011 S. 9).

Im Falle der Biodieselproduktion fällt die Bilanz dagegen positiv aus: „Betrachtet man die Energiebilanz des gesamten Prozesses zur Herstellung von Biodiesel unter Berücksichtigung der Produktion und dem Ernten der Biomasse, der Extraktion und Umesterung der Lipide und Verwertung der Restbiomasse zur Biogaserzeugung, so zeigen vorsichtige Schätzungen für den Basisfall unter Berücksichtigung des derzeitigen Standes der Technik, dass die Bilanz zunächst positiv ist. Circa 70 % bis 77 % der Verbrennungsenthalpie des Biodiesels müssten allerdings zu dessen Erzeugung aufgewendet werden.“ (Dillschneider, 2014 S. 26) Daraus ergibt sich ein Erntefaktor von 1,36. Geht man von einem Ölertrag von 36 t/ha bei einem Heizwert von 378.000 kWh/ha aus, ergibt sich aufgrund dieser Bilanz ein Netto-Energieertrag von 86.940 bis 113.400 kWh/ha.

Während die Hektarerträge von Reaktoren die von offenen Becken deutlich übersteigen, zeigt sich bei der Energiebilanz der Gesamtsysteme ein anderes Bild. In einer Studie aus dem Jahr 2012 wurde anhand einer fiktiven Anlage die Energiebilanz einer Mikroalgenproduktion zum Zweck der Biogasproduktion in offenen Becken untersucht. Auf dieser Basis ergab sich für eine Anlage in Norddeutschland eine „Nettoenergiebilanz“ von 3,2 (ter Veld, 2012). Zudem wurde in der Studie die Flächeneffizienz von Mais und Mikroalgen verglichen. Falls beide Systeme „ohne jegliche externen fossilen Energieträger betrieben werden müssten – wozu diese Systeme eigentlich gedacht sind – dann würde Biogasmais 35 % mehr Anbaufläche in Anspruch nehmen“ (ter Veld, o. J.).

Zwischenfazit zu Öl und Biodiesel aus Algen

Im Falle der stofflichen Nutzung mag der Wert des Öls eine Produktion in Reaktoren bereits heute begründen können. Hinsichtlich der Energiegewinnung aus Algen scheint der Nutzen auf dem heutigen Stand der Technik jedoch fraglich, denn die Netto-Energieerträge von Algenreaktoren übersteigen den Netto-Energieertrag der produktivsten in Deutschland nutzbaren Landpflanze Miscanthus nur um ca. 27 (2 – 80) Prozent. Im Gegensatz zur Nutzung von Landpflanzen wie Miscanthus, Hirschgras oder Sida sind die für die Algenproduktion benötigten Becken und Reaktoren aber nicht ohne erhebliche Eingriffe in den Boden zu errichten.

Eine großflächige Nutzung erscheint daher nur auf bereits versiegelten Flächen sinnvoll, sofern die Nutzung dieser Flächen nicht in Konkurrenz zum Wohnungsbau steht und indirekt zu weiterem Flächenverbrauch führt. Andernfalls erscheint die relativ geringe Differenz im Vergleich zu den Netto-Energieerträgen von Miscanthus eine Versiegelung landwirtschaftlicher Flächen nicht rechtfertigen zu können. Denn mit Technologien wie der Agrophotovoltaik stehen Alternativen zur Verfügung, die deutlich höhere Netto-Energieerträge bei minimalen Eingriffen in die landwirtschaftlichen Böden liefern. Der Vorteil der Algenproduktion besteht vor allem darin, dass sie speicherfähige Energieträger mit hoher Energiedichte liefert und keine zusätzlichen Speichermedien benötigt. Zudem kann Algenöl dort als Treibstoff eingesetzt werden, wo Elektromotoren keine sinnvolle Alternative darstellen.

11.2 Rohstoffbedarf und Ertragspotenziale nach Produktgruppen

11.2.1 Baustoffe

11.2.1.1 Baustoffe aus Holz

Der wichtigste nachwachsende Baustoff ist Holz. Der Baustoff Holz ist mit Blick auf Klimawandel und Energiewende zugleich von zunehmender Bedeutung, weil für seine Herstellung wenig Energie benötigt wird und seine Verwendung dauerhaft CO_2 im Bauwerk bindet. Der Holzbedarf des Holzbaus unterscheidet sich je nach Gebäudetypologie und Bauweise. Den geringsten Holzanteil weisen in Holzrahmenbauweise errichtete Holzhäuser auf, deren Bodenplatten, Bodenbeläge, Treppenhäuser und Dachdeckung vollständig oder teilweise aus mineralischen Baustoffen (Stahlbeton, Stein, Ziegel etc.) hergestellt werden. Diese Mischbauweisen (z. T. auch Hybridbauweisen genannt) sind vor allem im mehrgeschossigen Wohnungsbau und bei Nichtwohngebäuden die Regel, während bei vielen Ein- und Zweifamilienhäusern lediglich die Untergeschosse aus Stahlbeton erstellt werden. Den höchsten Holzbedarf weisen Massivholzhäuser auf, die vollständig aus Holz gefertigt sind und auch über Innenwände aus Massivholz verfügen. Deshalb wurde der Holzbedarf sowohl für Einfamilienhäuser als auch für Mehrfamilienhäuser jeweils nach unterschiedlichen Bauweisen anhand bereits realisierter Beispielgebäude berechnet. Die pro Person benötigte Holzmenge hängt zudem von der pro Person genutzten Nutzfläche und der Nutzungsdauer des Gebäudes ab. Für die Berechnung wurde von einer Mindestnutzungsdauer der Gebäude von 80 Jahren ausgegangen. Für Dächer aus Holzschindeln und Dämmstoffe aus Holzfasern wurde vereinfachend eine Nutzungsdauer von 40 Jahren angenommen. Unter dem Begriff Bauholz werden hier Konstruktionsvollholz, Furnierschichtholz, Bretter, Latten, Span- und Faserplatten, OSB und ähnliche aus Holz hergestellte Baustoffe zusammengefasst. Nicht darunter fallen Holzdämmstoffe, die in der Kategorie „Dämmstoffe“ erfasst werden.

11.2.1.1.1 Koppelprodukte

Mögliche Koppelprodukte der Bauholzproduktion sind zahlreich und umfassen neben Holzfaserdämmstoffen u. a. Zellstoffe für die Papierproduktion, Zellstoffe für Textilfasern (Viskose) sowie verschiedene Brennstoffe. Da eine vollständige Darstellung aller möglichen Koppelprodukte hier nicht möglich ist, wurde sie auf die quantitativ wichtigsten Produktegruppen (Baustoffe, Möbel, Papier, Fasern, Energieträger) begrenzt. Zellstoff für die Papier- und Viskosefaserproduktion lässt sich theoretisch auch aus dem Holz der ertragreichen Douglasie gewinnen. Da dafür jedoch keine Erfahrungswerte aus der Praxis bekannt sind, wurden diese Potenziale in den folgenden Ausführungen nicht berücksichtigt.

11.2.1.1.2 Nutzungskonkurrenzen

Mit Blick auf den Rohstoff Holz als Baustoff bestehen die wichtigsten Nutzungskonkurrenzen vor allem zu energetischen und sonstigen stofflichen Nutzungen von Holz. Zwar wird Cellulose auch als Lebensmittelzusatzstoff (E 460) von der Lebensmittelindustrie eingesetzt, aber eine nennenswerte Konkurrenz zur Nahrungsversorgung besteht nicht, da es sich um vergleichsweise geringe Mengen handelt.

Da Holz als Baustoff eine besonders gute Klimabilanz aufweist und nicht ohne weiteres durch andere nachwachsende Rohstoffe ersetzt werden kann, dürfte seine Bedeutung für den Bausektor zukünftig deutlich zunehmen, womit sich die Konkurrenz zur energetischen Nutzung weiter verschärfen könnte. Zudem könnte mit der wirtschaftlichen Entwicklung der sogenannten Entwicklungs- und Schwellenländer auch die globale Nachfrage nach Zellstoff als Rohstoff für die Papierindustrie weiter ansteigen. Sollte aufgrund der zunehmenden Kritik an Kunststoffverbrauch und Mikroplastik die Nachfrage nach pflanzlichen Alternativen zu erdölbasierten Kunststofffasern zunehmen, könnte dies ebenfalls die Nutzungskonkurrenz verschärfen.

11.2.1.1.3 Holzausbeuten

Bei der Verarbeitung von Stammholz fallen rund 40 Prozent Verschnitt, Mehl und Rinde an (Baumgartner, 2018). Der Rindenanteil liegt aktuell aufgrund des hohen Fichtenholzanteils an der Schnittholzproduktion, wie bereits dargestellt, bei 10 bis 11 Prozent des angelieferten Stammholzes. Die Schnittholzausbeute hoher Qualität, die z. B. als Konstruktionsholz genutzt werden kann, liegt nach Auskunft der befragten Sägewerke im Mittel bei rund 45 Prozent des angelieferten Stammholzes mit Rinde oder rund 50 Prozent des entrindeten Stammholzes. Abweichungen sind sowohl nach oben als auch nach unten möglich. Hinzu kommen im Mittel rund 18 Prozent Schnittholz geringerer Qualität, die vor allem zu Brettern und Latten verarbeitet werden. Sägewerke nutzen heute verstärkt neue technische Möglichkeiten, den Verschnitt zu minimieren. Zerstörungsfreie Verfahren zur Untersuchung von Holz ermöglichen es, Schäden im Holz schon vor dem Sägen zu erkennen und durch eine entsprechende Schnittplanung

maximale Ausbeuten und hohe Holzqualitäten zu erzielen. Eine für diesen Zweck geeignete Technologie ist die Computertomografie. „Bis zu 8% durchschnittliche Wertsteigerung pro Stamm“ (Microtec, 2018) werden mit dieser Methode erzielt.

Übrig bleiben nach der Verarbeitung rund 9 Prozent des Ausgangsmaterials in Form von Mehl. Verschnitt und Mehl werden in der Regel energetisch genutzt. Erfolgt eine stoffliche Nutzung, so wird der Verschnitt bisher meist gehackt. Hackschnitzel ohne Rindenanteil werden von der Zellstoffindustrie oder von Herstellern von OSB, Span- oder Faserplatten genutzt (Schmitz, 2018). Einschließlich des zu Platten verarbeiteten Verschnitts können somit rund 80 Prozent des Stammholzes zu Bauholz verarbeitet werden (vgl. Tabelle 276). Aus der Rinde von Nadelbäumen oder Eichen lassen sich theoretisch Dämmstoffe herstellen (Kain, 2013), sodass die Baustoffausbeute bis zu 91 Prozent des Stammholzes mit Rinde betragen kann.

Tabelle 276: Holzausbeuten in Sägewerken

Produkt	Ausbeute
Schnittholz, hohe Qualität	45%
Schnittholz, mittlere Qualität	18%
Hackschnitzel	18%
Rinde	11%
Mehl	9%
SUMME	**100%**

Quellen: Schmitz, 2018; Baumgartner, 2018

11.2.1.1.4 Ertragspotenziale

Für die Schätzung der Bauholzerträge und möglicher Koppelprodukterträge ist eine genauere Differenzierung der Rohstoffaufkommen erforderlich, die sich zu Bauholz, Möbeln, Dämmstoffen, Papier oder Textilfasern verarbeiten lassen. Zudem sind jene Rohstoffmengen zu erfassen, die bei den jeweiligen Nutzungsvarianten anfallen und in der Regel als Brennstoff genutzt werden. In Tabelle 277 sind die Rohstoffaufkommen dargestellt, die anhand der bereits beschriebenen Zuwächse und der jeweiligen Anteile von Astholz und Stammholz sowie der durchschnittlichen Holzausbeuten der Sägewerke ermittelt wurden.

Die gewichtsbezogene Mengenermittlung ist Grundlage für die Berechnung möglicher Koppelprodukterträge und der damit verbundenen Flächengutschriften. Die pro Hektar anfallende Menge an Verschnitt, die den für die stoffliche Nutzung wertvollsten Rohstoff darstellt, liegt zwischen 0,28 t atro im Falle der Eichenholznutzung und 0,85 t atro bei der Nutzung von Douglasienholz. Im Falle des Astholzes liegen die tatsächlichen Mengen höher als in dieser Schätzung dargestellt, da Astholz im Vergleich zu Stammholz eine höhere Dichte aufweist. Da Astholz jedoch hauptsächlich energetisch genutzt wird und die stofflich nutzbaren Mengen relativ gering und zudem für die hier betrachteten stofflichen Verwendungen nur zum Teil geeignet

sind, wurde auf eine separate Massenberechnung des Astholzes verzichtet. Die tatsächlichen Astholzmengen liegen folglich aufgrund der höheren Dichten über den hier genannten Werten. Relativ kann die Differenz mit bis zu 30 Prozent zwar erheblich sein, in absoluten Mengen sind sie im Vergleich zum gesamten Biomasseaufkommen jedoch vernachlässigbar. Gerade mit Blick auf die Energiepotenziale scheint eine konservative Schätzung von Energieholzaufkommen ohnehin sinnvoll, da die Erträge mit dem Klimawandel langfristig sinken dürften. Die für das Bauholzpotenzial wichtigen Volumina (Festmeter bzw. Kubikmeter) werden in einer separaten Berechnung abgeschätzt (vgl. Tabelle 281).

Tabelle 277: Geschätzte Rohstoffausbeuten der Holzproduktion nach Baumartengruppe (t atro/ha)

Rohstoffaufkommen	Buche	Fichte/Tanne	Douglasie	Lärche
Konstruktionsholz	0,94	1,46	1,93	1,13
Holz für Bretter/Latten	0,38	0,60	0,79	0,46
Mehl Sägewerk	0,18	0,29	0,39	0,27
Verschnitt Sägewerk	0,35	0,59	0,78	0,54
Erntereste	0,36	0,45	0,64	0,37
DF-Holz	0,50	0,51	0,68	0,46
Rinde Stammholz	0,12	0,33	0,52	0,60
Rinde Astholz	0,21	0,12	0,18	0,22
Astholz stofflich	1,28	0,00	0,00	0,00
Astholz energetisch	0,85	0,84	1,12	0,68
SUMME	**5,17**	**5,19**	**7,02**	**4,73**

Quelle: Eigene Berechnung nach n. BMEL (2016), BMEL (2016b), Hessen-Forst (2018), BWI (2012), FVA zit. n. Rössler (2008), Schmitz (2018) und Baumgartner (2018)

Anhand der berechneten Rohstoffaufkommen lassen sich die daraus herstellbaren Mengen verschiedener Koppelprodukte abschätzen. Nachfolgend werden beispielhaft die Flächenkennwerte für Buche, Fichte, Douglasie und Lärche dargestellt. Auf eine Darstellung der Baumartengruppe Tanne wurde verzichtet, weil sich ihre Werte nur minimal von den Werten der Fichten unterscheiden.

11.2.1.1.4.1 Ertragspotenziale von Buchen nach Nutzungsvarianten

Da die Buche zunehmende Bedeutung für den Bausektor erlangen wird, werden im Folgenden die verschieden Ertragspotenziale der Buchenholzproduktion genauer betrachtet. Die Buchenholzerträge und mögliche Koppelprodukterträge sind in Tabelle 278 nach Nutzungsvarianten dargestellt.

Tabelle 278: Buchenbauholzerträge und mögliche Koppelprodukte nach Nutzungspfad in Tonnen pro Hektar (t/ha)

Produkt	Nutzungspfad				
	Bii	BT	BiM	BiE	BE
Konstruktionsholz (14% RF)	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
Bretter/Latten (14% RF)	0,44	0,44		0,44	0,44
OSB/Spanplatten (14% RF)	1,86	1,46	1,86	1,46	
Möbel (8% RF)			0,41		
Zellstoff					
Textilfasern (Viskose)		0,14			
Dämmstoff					
Essigsäure, Furfural, Xylose		0,04			
Brennstoff (atro)	2,22	2,40	2,22	2,57	3,85
SUMME	**5,58**	**5,53**	**5,56**	**5,53**	**5,35**
Heizwert des Brennstoffs	11.096	11.469	11.096	12.865	19.253

B=Bauholz, Bi=Bauholz inklusive Verschnitt, Bii=Bauholz inkl. Verschnitt und Astholz, M=Möbel, T=Textilfasern, E=Energie, D=Dämmstoff, P=Papierzellstoff
Quelle: Eigene Berechnung

In Tabelle 279 sind die Bauholzausbeuten ohne Koppelprodukte dargestellt. Die größten Bauholz-Hektarerträge sind selbstverständlich zu erzielen, wenn sowohl der Verschnitt der Sägewerke als auch das als Industrieholz nutzbare Astholz zu OSB, Span- oder Faserplatten verarbeitet werden.

Tabelle 279: Bauholzerträge von Buchen ohne Koppelprodukte nach Nutzungspfad in Kubikmetern pro Hektar (m³/ha)

Produkt	Nutzungspfad				
	Bii	BT	BiM	BiE	BE
Konstruktionsholz	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
Bretter/Latten	0,7	0,7	0,0	0,7	0,7
OSB/Spanplatten	2,9	2,3	2,9	2,3	0,0
GESAMT	**5,3**	**4,7**	**4,6**	**4,7**	**2,4**

B=Bauholz, Bi=Bauholz inklusive Verschnitt, Bii=Bauholz inkl. Verschnitt und Astholz, M=Möbel, T=Textilfasern, E=Energie, D=Dämmstoff, P=Papierzellstoff
Quelle: Eigene Berechnung

Werden Verschnitt und Astholz stattdessen anderen stofflichen Nutzungen zugeführt, sind dagegen höhere Flächengutschriften anzurechnen. In Tabelle 280 sind die nach der beschriebenen Methodik berechneten Flächengutschriften aller betrachteten Koppelproduktkombinationen der Buchenholznutzung im Vergleich dargestellt.

Tabelle 280: Flächengutschriften für Baubuchenholz durch Koppelproduktnutzung (m²/ha)

Produkt	Nutzungspfad				
	Bii	BT	BiM	BiE	BE
Möbel	0	0	1.711	0	0
Zellstoff	0	0	0	0	0
Textilfasern (Viskose)	0	141	0	0	0
Dämmstoff	0	0	0	0	0
Heizwert des Brennstoffs	1.423	1.470	1.423	1.649	2.468
SUMME	**1.423**	**1.611**	**3.134**	**1.649**	**2.468**

B=Bauholz, Bi=Bauholz inklusive Verschnitt, Bii=Bauholz inkl. Verschnitt und Astholz, M=Möbel, T=Textilfasern, E=Energie, D=Dämmstoff, P=Papierzellstoff
Quelle: Eigene Berechnung

Da die Produktion von Möbel- und Bauholz mit einem hohen Flächenaufwand verbunden ist, ergibt sich für die Nutzungsvariante BiM, in der das Schnittholz geringerer Qualität für die Möbelproduktion genutzt wird, die größte Flächengutschrift. Deshalb weist diese Variante letztlich auch die größte rechnerische Flächeneffizienz auf. Eine etwas geringere Flächeneffizienz wird erzielt, wenn der Verschnitt zur Produktion von Zellstoff für die Herstellung von Viskose genutzt wird. Die mit Abstand geringste Flächeneffizienz zeigt sich dagegen bei der energetischen Nutzung. Dies gilt umso mehr, wenn sich den stofflichen Nutzungsvarianten in einer Kaskadennutzung weitere stoffliche Nutzungen und im letzten Schritt eine energetische Verwertung anschließen. Maßnahmen, die die Bauholzausbeute weiter erhöhen, erscheinen daher besonders sinnvoll und sind der direkten energetischen Verwertung eindeutig vorzuziehen.

Die Nutzung des Verschnitts und geeigneter Astholzanteile für die Bauholzproduktion führt zu einer Steigerung der Flächeneffizienz um 17 bis 29 Prozent. Höhere Effizienzsteigerungen ergeben sich rechnerisch nur, wenn das Schnittholz minderer Qualität und/oder das Hackgut (Spanplatten) für die Möbelproduktion verwendet werden. Eine Nutzung des Schnittholzes minderer Qualität steigert die Flächeneffizienz der Konstruktionsholzgewinnung rein rechnerisch um 46 Prozent. Welche Nutzung letztendlich die sinnvollste ist, muss aber im Einzelfall auch anhand der zur Verfügung stehenden Alternativen entschieden werden. So könnten Biokunststoffbretter mit Cellulose aus Wiesengras eine Alternative zu Holzbrettern darstellen, sofern ungenutzte Graspotenziale vorhanden sind. Wenn regional Schwarz- oder Braunlaugen aus der Zellstoffproduktion verfügbar sind, könnte sich künftig wiederum die Produktion von Möbeln aus Lignin-Kunststoffen anbieten.

Nach Abzug der Flächen, die rechnerisch durch Koppelprodukte der Bauholzproduktion in Anspruch genommen werden, lassen sich Netto-Erträge der Buchenbauholzproduktion berechnen. Diese beziehen sich auf jene Fläche, die ausschließlich für die Bauholzproduktion in Anspruch genommen wird. Zwar handelt es sich hierbei um theoretische Werte, doch machen

sie die Effizienzsteigerung anschaulich, die sich aus der Koppelproduktnutzung des jeweiligen Nutzungspfades ergibt. Diese Steigerungen betragen, wie bereits erwähnt und in Tabelle 281 dargestellt, zwischen 17 und 46 Prozent.

Tabelle 281: Tatsächliche Bauholzerträge und theoretische Netto-Bauholzerträge von Buchen unter Berücksichtigung von Koppelprodukten in Kubikmetern pro Hektar (m³/ha)

Produkt	**Nutzungspfad**				
	Bii	BT	BiM	BiE	BE
Brutto-Hektarertrag	5,3	4,7	4,6	4,7	2,4
Netto-Hektarertrag	5,3	5,5	4,6	4,7	2,4
Effizienzsteigerung	+17%	+17%	+46%	+17%	+29%

B=Bauholz, Bi=Bauholz inklusive Verschnitt, Bii=Bauholz inkl. Verschnitt und Astholz, M=Möbel, T=Textilfasern, E=Energie.
Quelle: Eigene Berechnung

Je nach Nutzungspfad und Koppelproduktnutzung werden pro Kubikmeter Bauholz somit zwischen 0,15 und 0,42 ha in Anspruch genommen. Sämtliche stoffliche Nutzungen führen im Vergleich zur energetischen Nutzung zu einer höheren Flächeneffizienz. Die geringste Flächeneffizienz wird erreicht, wenn das gesamte Rest-, Ast- und Schwachholz energetisch verwertet wird (vgl. Tabelle 282).

Tabelle 282: Flächeninanspruchnahme pro Kubikmeter Buchenbauholz nach Nutzungspfaden und Berücksichtigung von Koppelprodukten (m²/m³)

Flächeninanspruch-nahme	**Nutzungspfad**				
	Bii	BT	BiM	BiE	BE
… ohne Koppelprodukte	1.892	2.150	2.174	2.150	4.236
… inkl. Koppelprodukte	1.623	1.804	1.492	1.795	3.190

B=Bauholz, Bi=Bauholz inklusive Verschnitt, Bii=Bauholz inkl. Verschnitt und Astholz, M=Möbel, T=Textilfasern, E=Energie, D=Dämmstoff, P=Papierzellstoff
Quelle: Eigene Berechnung

11.2.1.1.4.2 Ertragspotenziale von Fichten nach Nutzungsvarianten

Die Fichte ist die Baumart, die heutzutage am vielseitigsten genutzt wird. Aus Fichtenholz werden unter anderem sämtliche Bauholzarten (Konstruktionsholz, Bretter, Latten, Spanplatten etc.) sowie Dämmstoffe, Möbel, Textilfasern, Zellstoff, Holzstoff und Brennstoffe hergestellt. Ihr hoher Stammholzanteil macht ihre Nutzung besonders attraktiv und ermöglicht hohe Schnittholzausbeuten. Ihre Schnittholzerträge liegen somit in allen Varianten deutlich über den jeweiligen Vergleichswerten der Buche. Zudem liefert sie dementsprechend höhere Mengen an Stammholzresten, die für die Produktion von Spanplatten, Viskosefasern und Papier genutzt werden können. Ihre Rinde ist, wie die Rinde anderer Nadelhölzer, zudem für die Dämmstoffproduktion geeignet. Der Dämmstoffertrag liegt bei rund 10 Kubikmetern, wenn man Verschnitt und Rinde als Rohstoffe für die Dämmstoffproduktion verwendet.

Tabelle 283: Baufichtenholzerträge und mögliche Koppelprodukte nach Nutzungspfaden

Mögliche Koppelprodukte	Nutzungspfad					
	BiD	BTD	BiMD	BD	BED	BPD
Erträge in t/ha						
Konstruktionsholz (14% RF)	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67
Bretter/Latten (14% RF)	0,68	0,68		0,68	0,68	0,68
OSB/Spanplatten (14% RF)	0,67		0,67			
Möbel (8% RF)			0,65			
Zellstoff						0,28
Textilfasern (Viskose)		0,23				
Dämmstoff	0,37	0,37	0,37	1,02	0,37	0,37
Essigsäure, Furfural, Xylose		0,06				
Brennstoff	2,21	2,50	2,21	2,21	2,79	2,52
SUMME	**5,59**	**5,51**	**5,56**	**5,58**	**5,51**	**5,51**
Dämmstoffertrag in m³/ha						
Dämmstoff in m³	3,7	3,7	3,7	10,2	3,7	3,7
Energieertrag in kWh/ha						
Heizwert des Brennstoffs	11.467	13.349	11.467	11.467	14.529	13.090

B=Bauholz, Bi=Bauholz inklusive Verschnitt, Bii=Bauholz inkl. Verschnitt und Astholz, M=Möbel, T=Textilfasern, E=Energie, D=Dämmstoff, P=Papierzellstoff
Quelle: Eigene Berechnung

Wie im Falle der Buche führen auch bei sämtlichen Nadelhölzern jene Anteile, die für die Produktion von Möbeln und Textilfasern genutzt werden, zu den höchsten Flächengutschriften.

Tabelle 284: Flächengutschriften für Baufichtenholz durch Koppelproduktnutzung (m²/ha)

Produkte	Nutzungspfad					
	BiD	BTD	BiMD	BD	BED	BPD
Möbel	0	0	2.678	0	0	0
Zellstoff	0	0	0	0	0	302
Textilfasern (Viskose)	0	234	0	0	0	0
Dämmstoff	134	134	134	373	134	134
Brennstoff (Heizwert)	1.470	1.711	1.470	1.470	1.863	1.678
SUMME	**1.604**	**2.080**	**4.283**	**1.843**	**1.997**	**2.115**

B=Bauholz, Bi=Bauholz inklusive Verschnitt, Bii=Bauholz inkl. Verschnitt und Astholz, M=Möbel, T=Textilfasern, E=Energie, D=Dämmstoff, P=Papierzellstoff
Quelle: Eigene Berechnung

Pro Kubikmeter Bauholz werden demnach zwischen 0,11 und 0,18 ha in Anspruch genommen. Die höchste Flächeneffizienz wird mit 1.056 m² pro Kubikmeter erreicht, wenn Teile des Schnittholzes für die Möbelproduktion genutzt werden. Dies reduziert jedoch die absoluten zur Deckung des Bauholzbedarfs geeigneten Schnittholzerträge deutlich. Da sich schadstofffrei behandeltes Holz zudem für eine Kaskadennutzung anbietet und Möbel somit aus ehemaligem Bauholz hergestellt werden können, wird die Bauholzproduktion hier als vorrangig angesehen. In den folgenden Vergleichen der Flächeneffizienz wurde daher eine direkte Nutzung von Schnittholzanteilen für die Möbelproduktion ausgeklammert.

Tabelle 285: Erträge und Flächeninanspruchnahme von Fichtenbauholz nach Nutzungspfaden

Produkte	Nutzungspfad					
	BiD	BTD	BiMD	BD	BED	BPD
Bauholzerträge ohne Koppelprodukte (m³/ha)						
Konstruktionsholz	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9
Bretter/Latten	1,6	1,6	0,0	1,6	1,6	1,6
OSB/Spanplatten	1,6	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0
Bauholzertrag ohne Koppelprodukte	**6,99**	**5,44**	**5,42**	**5,44**	**5,44**	**5,44**
Flächengutschriften für Koppelprodukte (m²/ha)						
Gesamtgutschrift	1.604	2.080	4.283	1.843	1.997	2.115
Flächeninanspruchnahme pro Kubikmeter Bauholz (m²/m³)						
ohne Koppelprodukte	1.430	1.838	1.846	1.838	1.838	1.838
inkl. Koppelprodukte	1.200	1.456	1.056	1.500	1.471	1.450

B=Bauholz, Bi=Bauholz inklusive Verschnitt, Bii=Bauholz inkl. Verschnitt und Astholz, M=Möbel, T=Textilfasern, E=Energie, D=Dämmstoff, P=Papierzellstoff
Quelle: Eigene Berechnung

11.2.1.1.4.3 Flächeneffizienz von Buchen und Fichten im Vergleich mit anderen Baumarten

Nadelholz hatte im Jahr 2012 einen Anteil von mehr als 90 Prozent an der Produktion von Schnittholz, Faser- und Spanplatten sowie Furnier- und Sperrholz (Hennig, et al., 2015 S. 5). Den mit Abstand größten Anteil am dafür verwendeten Nadelholz hat das Fichtenholz. Wenn die Anteile der Fichte am Baumbestand aufgrund des Klimawandels zurückgehen und durch Buchen oder andere Laubbäume ersetzt werden, sinken damit auch die durchschnittlichen Hektarerträge der Schnittholzproduktion.

Nach Berücksichtigung der Koppelprodukte zeigt sich im Vergleich von Buchen und Fichten allerdings, dass die Flächeneffizienz von Bauholz aus Buche im Vergleich zu Bauholz aus Nadelhölzern deutlich höher liegt, als der Vergleich der reinen Stammholzerträge nahelegt. Dennoch nimmt Buchenbauholz im Vergleich der effizientesten Nutzungspfade etwa ein Drittel mehr Fläche in Anspruch als Fichtenbauholz.

Die höchste Flächeneffizienz erreicht die Douglasie mit rund 917 Quadratmetern pro Kubikmeter, während die Lärchenholz mit 1.923 Quadratmetern pro Kubikmeter mehr als die doppelte Fläche in Anspruch nimmt. Die Flächeninanspruchnahmen der vier verglichenen Baumartengruppen sind in Tabelle 286 für die Nutzungsvarianten mit der höchsten Flächeneffizienz dargestellt. Die Flächenkennwerte weiterer Nutzungsvarianten von Douglasie und Lärche sind im Anhang II in Tabelle 476 und Tabelle 477 dargestellt.

Tabelle 286: Flächeninanspruchnahme durch Bauholz verschiedener Baumarten nach Berücksichtigung von Koppelprodukten im Vergleich (m²/m³)

Produkte	Buche	Fichte	Douglasie	Lärche
	Quadratmeter pro Kubikmeter			
Konstruktionsholz, Bretter, Latten, OSB/Spanplatten	1.613	1.205	917	1.923

Quelle: Eigene Berechnung

In Abbildung 120 ist die jeweilige Flächeninanspruchnahmen von Bauholz aller Baumartengruppen und Nutzungsvarianten im Vergleich dargestellt. Der Vergleich macht deutlich, dass die Nutzung der Koppelprodukte entscheidenden Einfluss auf die Flächeneffizienz hat. Relativierend muss man allerdings feststellen, dass Miscanthus als effizientester Brennstofflieferant deutlich überdurchschnittliche Erträge liefert und Energieträger als Koppelprodukte tendenziell etwas unterbewertet erscheinen.

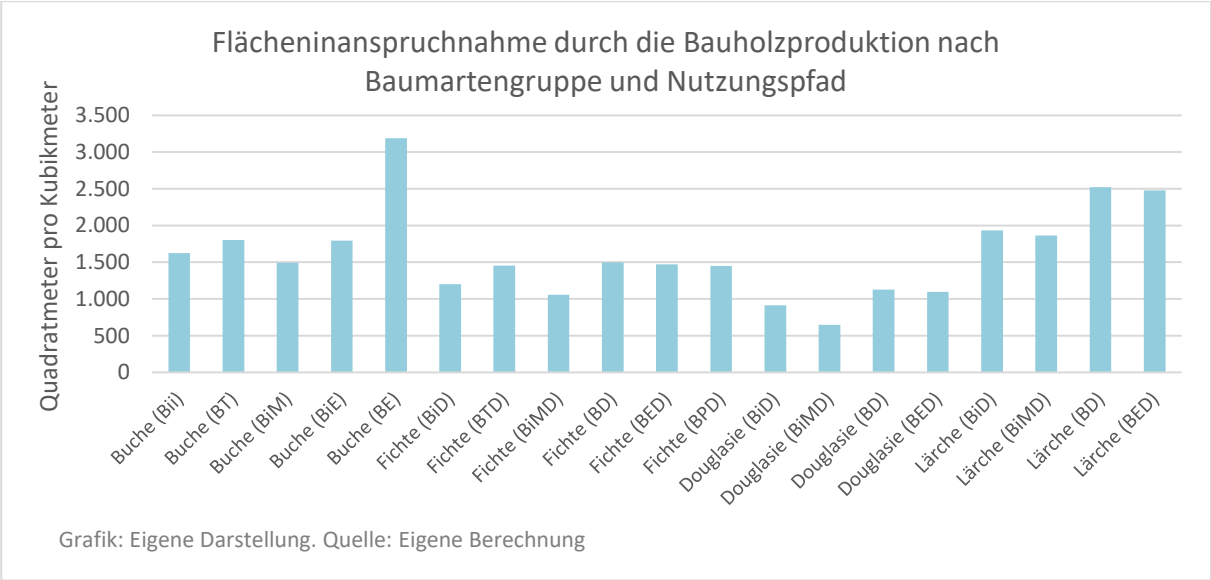


Abbildung 120: Flächeninanspruchnahme durch die Bauholzproduktion nach Baumartengruppe und Nutzungspfad (m²/m³)

Auch wird ersichtlich, dass ein Rückgang des Fichtenanteils aufgrund des Klimawandels wohl nur zu kompensieren ist, wenn eine Kombination aus Buchen und Douglasien die Ertragslücke füllt. Dies macht jedoch eine Umstellung des Holzbaus auf Bauholz aus Buche erforderlich. Unklar ist auch noch, wie stark sich die Folgen des Klimawandels auf Buchen und Douglasien auswirken werden.

11.2.1.1.5 Holzbedarf im Wohnungsbau

Im Jahr 2016 wurden in Deutschland 134.392 neue Wohn- und Nichtwohngebäude mit 240.255 Wohnungen und 25,228 Millionen Quadratmetern Wohnfläche fertiggestellt. Darunter waren 109.990 reine Wohngebäude mit 235.658 Wohnungen und 24,876 Millionen Quadratmetern Wohnfläche (Statistisches Bundesamt, 2018a). Pro neu gebautem Wohngebäude wurden somit 2,14 Wohnungen und 226 m² Wohnfläche bereitgestellt. Die durchschnittliche Wohnungsgröße betrug 105,5 m². Betrachtet man die Baufertigstellungen von Wohngebäuden nach dem überwiegend verwendeten Baustoff, so ist der Anteil des Baustoffs Holz zwischen 2011 und 2016 von 15 auf 16 Prozent gestiegen (vgl. Abbildung 121), obwohl auch die Zahl der jährlichen Baufertigstellungen in diesem Zeitraum um 14 Prozent zugenommen hat (Statistisches Bundesamt, 2017b S. 6-7).

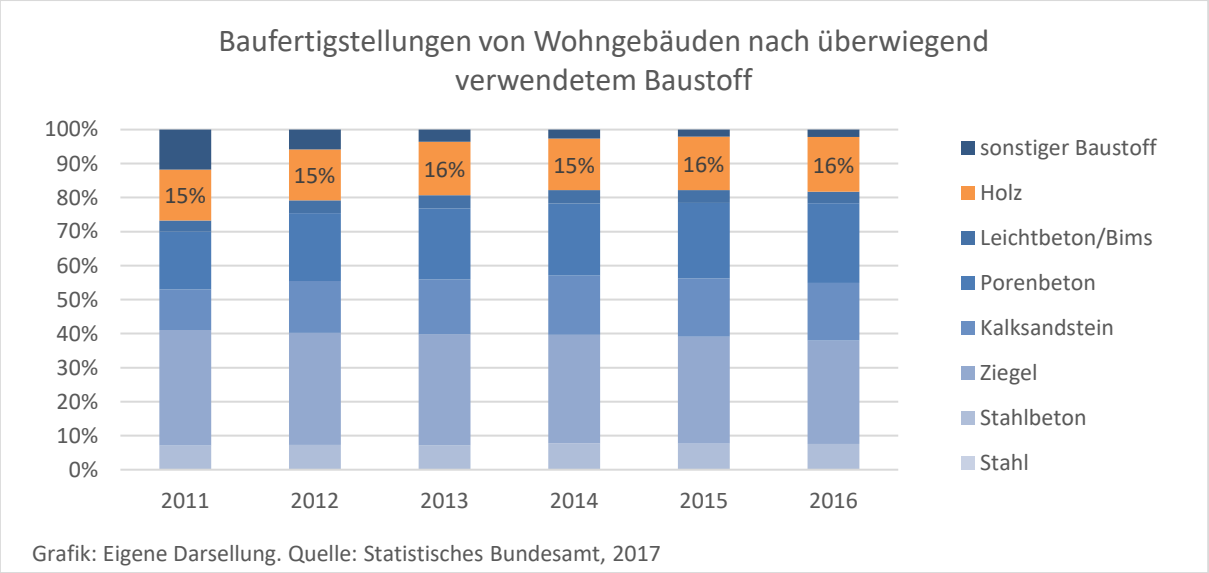


Abbildung 121: Baufertigstellungen von Wohngebäuden nach überwiegend verwendetem Baustoff

Aufgrund seiner vorteilhaften Klimabilanz erscheint es sinnvoll, einen deutlich höheren Holzanteil im Neubau anzustreben. Die Verwendung von Holz als Baustoff bietet sowohl beim Neubau als auch bei der Sanierung des Bestands energetische und ökologische Vorteile, wie einen vergleichsweise geringen Primärenergiebedarf und die Möglichkeit zur CO_2-Absorption. „Vorgefertigte, hochwärmegedämmte Holzelemente, die in kurzer Zeit vor Ort montiert werden können, stellen eine zukunftsfähige Alternative zu den gängigen Modernisierungssystemen dar und werden allen Anforderungen an moderne Gebäude gerecht“ (Pahler, et al., 2011).

Fraglich ist jedoch, wie viel Holz für den Bausektor bereitgestellt werden kann, ohne anderen Wirtschaftszweigen eine nachhaltige Rohstoffbasis zu entziehen. Betrachtet man die Auswirkungen des Bauens auf den Flächenverbrauch und andere Nachhaltigkeitsindikatoren, so muss bei einer Diskussion über den Rohstoffbedarf des Bausektors zudem über die Frage

gesprochen werden, ob angesichts der zu erwartenden Bevölkerungsentwicklung und der Verknappung der für die Ernährung unverzichtbaren Ackerflächen überhaupt noch neue Baugebiete erschlossen werden sollten. In Bayern fordert eine Initiative gegen Flächenverbrauch[94], der 26 Verbände und Organisationen beigetreten sind[95], ein Volksbegehren - mit dem Ziel, den Flächenverbrauch in Bayern von 13 auf 5 Hektar pro Tag zu reduzieren. Kritiker des anhaltend hohen Flächenverbrauchs, wie Hubert Weinzierl oder Daniel Fuhrhop, fordern aus ökologischen und sozialen Gründen ein vollständiges Umdenken der Politik. Weinzierl erklärt, dass der Flächenverbrauch ein Ende haben müsse und künftig kein Hektar freies Land mehr zugebaut werden dürfe[96]. Nach Fuhrhop sind Neubauten sozial nicht sinnvoll (Fuhrhop, 2015 S. 43-57), kaum ökologisch möglich (Fuhrhop, 2015 S. 31-42), im Vergleich zu Sanierungen energetisch und ökologisch nachteilig (Fuhrhop, 2015 S. 74-77) und ließen sich zudem weitgehend überflüssig machen (Fuhrhop, 2015 S. 87, 163). Würde die Politik dementsprechend auf die Erschließung neuer Baugebiete verzichten, entstünde eine Nachfrage nach Schnittholz für den Hochbau nur noch aufgrund von Nachverdichtungen, Sanierungen, Erneuerungen und Weiterentwicklungen des Bestandes.

Die Bundesregierung hat dagegen im Jahr 2016 eine sogenannte Wohnungsbau-Offensive beschlossen. Die damalige Bundesumweltministerin Hendricks forderte dazu: "Von gegenwärtig rund 270.000 fertiggestellten Wohnungen müssen wir uns auf mindestens 350.000 Wohnungen im Jahr steigern. Dafür gilt es, Hemmnisse zu beseitigen und Anreize zu setzen – und zwar auf allen föderalen Ebenen. Neben der Wohnungsbau-Offensive brauchen wir jetzt auch eine Baulandoffensive. Länder und Kommunen müssen dem Beispiel des Bundes folgen und Flächen zügig für den bezahlbaren Wohnungsbau zur Verfügung stellen." (BMU Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2016) Es ist daher davon auszugehen, dass der tatsächliche Bedarf sich in der genannten Größenordnung bewegen dürfte, sofern es in der Politik nicht zu dem von den Kritikern geforderten Umdenken kommt.

Um den zu erwartenden Holzbedarf des Wohnungsbaus abzuschätzen, müssen neben der Zahl der zu bauenden Wohnungen auch die Wohnfläche pro Wohnung, die Gebäudetypologie und die Bauweise bekannt sein.

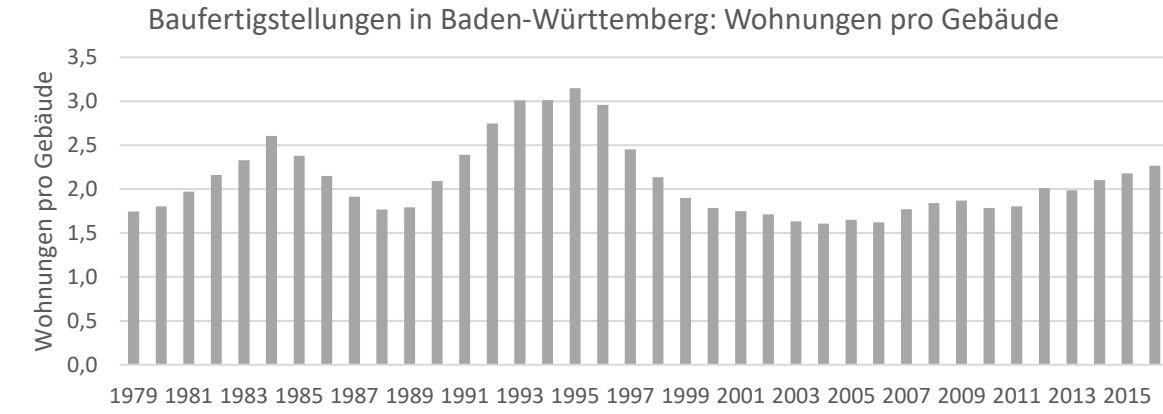
In Baden-Württemberg wurden im Jahr 2016 14.454 Wohngebäude mit 32.745 Wohnungen fertiggestellt. Dies entspricht 30 Prozent der gesamten Baufertigstellungen Deutschlands in diesem Jahr. Insgesamt wurden damit 3.511.543 m² Wohnfläche geschaffen (Statistisches

[94] Initiative Betonflut Eindämmen. Damit Bayern Heimat bleibt. Das Volksbegehren gegen den Flächenfrass. URL: betonflut-eindaemmen.de

[95] Süddeutsche Zeitung Online (2. Mai 2018): Zahl der Unterstützer für Volksbegehren steigt. URL: www.sueddeutsche.de/bayern/flaechenfrass-zahl-der-unterstuetzer-fuer-volksbegehren-steigt-1.3964105

[96] Süddeutsche Zeitung (1. Januar 2018): „Der Flächenverbrauch muss ein Ende haben“. Interview von Christian Sebald mit Hubert Weinzierl.

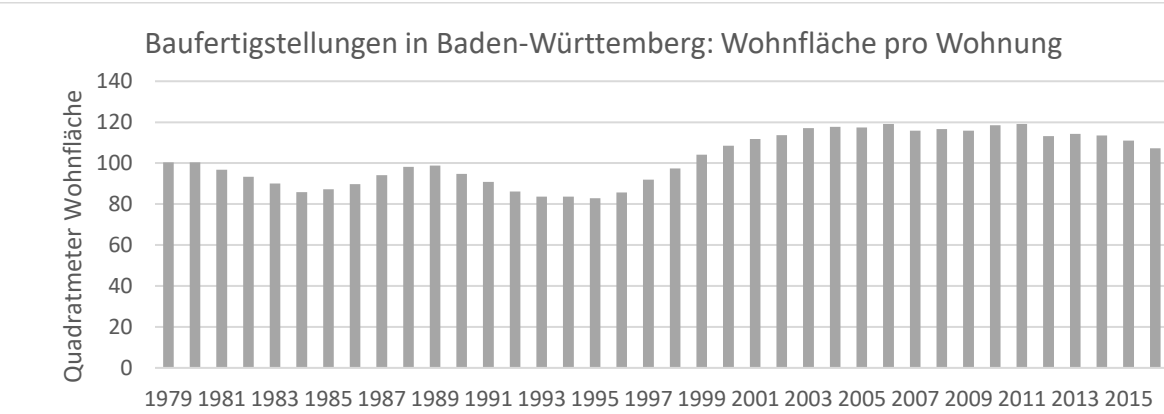
Landesamt Baden-Württemberg, 2018a). Bezogen auf die Bevölkerung von 10.879.618 Personen im Jahr 2015 wurden im Jahr 2016 rund 0,32 m² Wohnfläche neu gebaut. Im Durchschnitt wurden 2,27 Wohnungen pro Gebäude und 107,2 m² Wohnfläche pro Wohnung hergestellt. Die Zahl der Wohnungen pro Gebäude lag damit um ein Viertel niedriger als in den frühen 1990er Jahren (vgl. Abbildung 122).



Grafik: Eigene Darstellung. Quelle: Statistisches Landesamt BW, 2018a

Abbildung 122: Baufertigstellungen in Baden-Württemberg: Wohnungen pro Gebäude

Die Wohnfläche pro fertiggestellte Wohnung war dagegen im Jahr 2016 noch immer um rund 28 Prozent größer als in den Jahren 1993 bis 1995, obwohl sie nach einem Zwischenhoch (2001 bis 2011) bereits über fünf Jahre deutlich abgenommen hat (vgl. Abbildung 123).



Grafik: Eigene Darstellung. Quelle: Statistisches Landesamt BW, 2018a

Abbildung 123: Baufertigstellungen in Baden-Württemberg: Wohnfläche pro Wohnung

Den größten Anteil am Zuwachs der Haushalte hatten mit 48 Prozent Haushalte mit nur einer Person. Deutlich dahinter folgen mit 17 Prozent die Drei-Personen-Haushalte, mit 14 Prozent die Vier-Personenhaushalte. Zwei-Personen-Haushalte und Haushalte mit fünf oder mehr Personen hatten mit dreizehn und acht Prozent die geringsten Anteile an den Haushaltszuwächsen (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2018b).

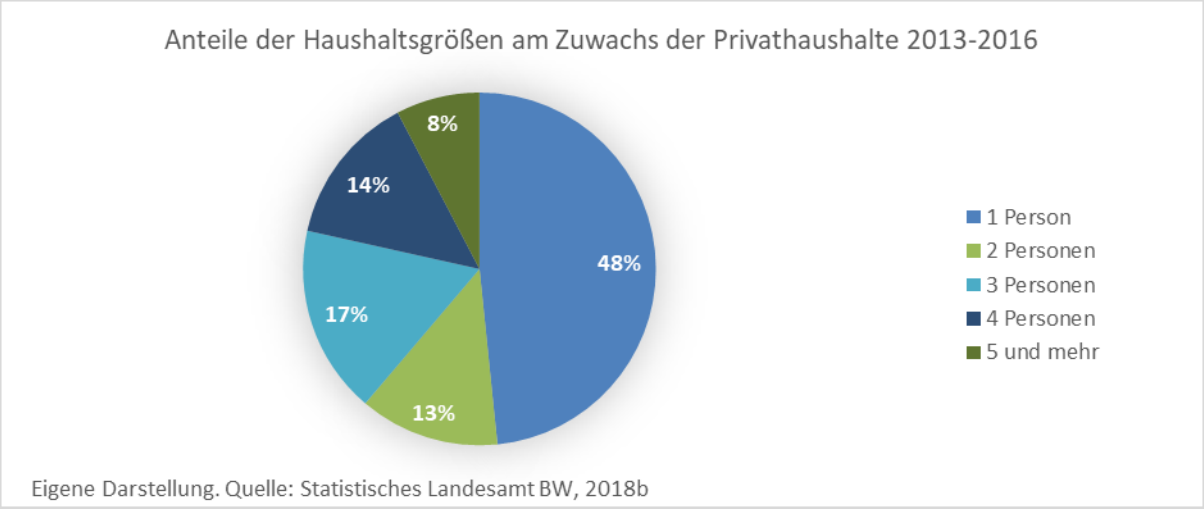


Abbildung 124: Anteile der Haushaltsgrößen am Zuwachs der Privathaushalte 2013-2016

Die in den neuen Haushalten lebenden Personen verteilen sich zur Hälfte (49 Prozent) auf Haushalte mit drei oder vier Personen. 22 Prozent der Personen wohnen alleine, 17 Prozent in einem Haushalt mit fünf oder mehr Personen. Nur zwölf Prozent leben in einem Zwei-Personen-Haushalt. Im Durchschnitt leben in den neuen Haushalten 2,2 Personen und damit nur minimal weniger als in den bereits zuvor bestehenden Haushalten (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2018b).

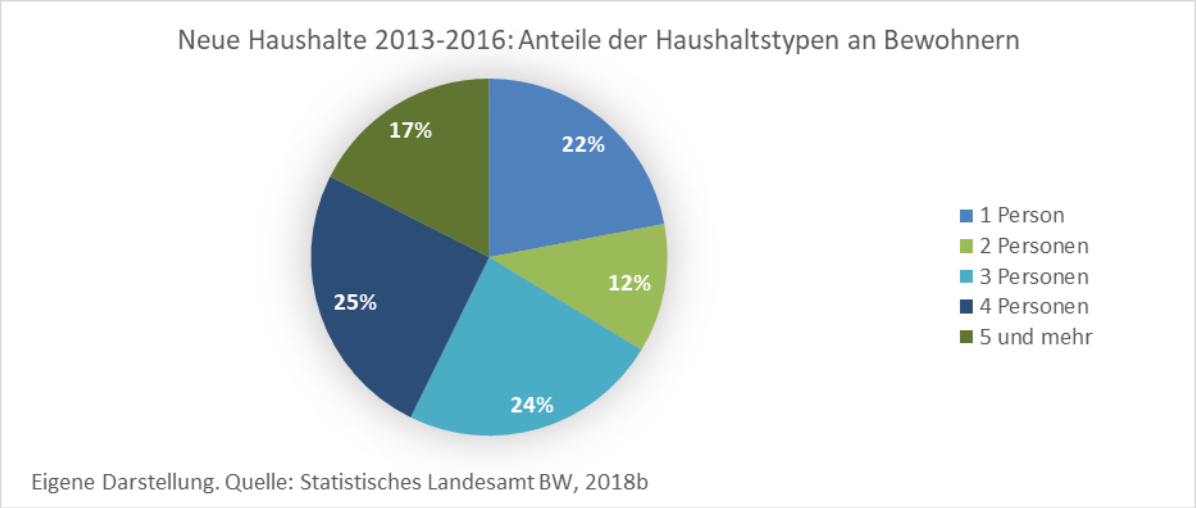


Abbildung 125: Neue Haushalte 2013-2016: Anteile der Haushaltstypen an Bewohnern

Geht man davon aus, dass die Belegungsdichte bei 2,2 Personen pro Haushalt bleibt, ergibt sich bei einem Wert von 107,2 m² Wohnfläche pro Wohnung eine Wohnfläche von 48,7 m² pro Person. Wie nachfolgend dargelegt wird, ist die pro Person beanspruchte Wohnfläche einer der wichtigsten Faktoren, die über den Baustoffbedarf entscheiden. Mögliche Autonomiegrade des Bausektors hängen in hohem Maße von ihrer Entwicklung ab.

11.2.1.1.6 Flächenbedarf des Holzbaus

Neben der pro Person genutzten Wohnfläche sind die Gebäudetypologie und die Bauweise entscheidend für den Bauholzbedarf pro Einwohner. Unter den betrachteten Beispielgebäuden für ein bis zwei Familien (Auslegung für drei bis fünf Personen) sind ein klassisches Vorarlberger Reihenhaus in Holzrahmenbauweise mit einem Energiebedarf von 46 kWh/m² (Krapmeier, 2014), ein kanadisches Blockhaus von Team-Kanada-Blockhaus (Sack, 2016), sowie zwei Ausführungen eines Massivholzhauses von Moser-Holzbau unterschiedlichen Energiestandards (Moser, 2016). Im Unterschied zur typischen Blockhausbauweise sind beim Moser-Massivholzhaus auch die Innenwände aus massivem Holz konstruiert. Bei den Mehrfamilienhäusern handelt es sich um den „Woodcube“ des Instituts für urbanen Holzbau (IfuH) in Hamburg (Deepgreen Development GmbH, 2018), das „Mehrfamilienhaus Holzhausen“ von Scheitlin_Syfrig+Partner in Steinhausen in der Schweiz (Lignum, 2008), das „e3“ von Kaden + Klingbeil in Berlin (Konradin Medien GmbH, 2008) sowie drei „Punkthäuser“ von SpineArchitects in Hamburg-Winterhude (proHolz Austria, 2018). Die Beispielgebäude sind in Tabelle 287 nach Typologie und Bauweise aufgeführt.

Tabelle 287: Gebäudetypologie und Bauweise der Beispielgebäude

Gebäude	Gebäudetyp	Geschosse	Bauweise
Klassisches Vorarlberger Reihenhaus	EFH	2	Holzrahmenbau
Kanadisches Blockhaus	EFH	2	Blockhausbau
Moser Massivholz 7-Literhaus	EFH	2	Massivholzbau
Moser Massivholz Passivhaus	EFH	2	Massivholzbau
Woodcube, Hamburg	MFH	5	Blockhausbau*
MFH Holzhausen, Steinhausen (CH)	MFH	6	Holzrahmenbau
e3, Berlin	MFH	7	Holzfachwerkbauweise mit Holz-Beton-Verbund-Decken
Punkthäuser, HH-Winterhude	MFH	4	Blockhausbau* (Brettsperrholz),

* Der Woodcube und die Punkthäuser Winterhude werden als Massivholzbau beschrieben. Die Innenwände sind jedoch in Leichtbauweise konstruiert, weshalb die Gebäude mit dem kanadischen Blockholz vergleichbar sind und hier als Blockhausbau eingeordnet wurden.
Quelle: Eigene Darstellung

Gesondert berechnet wurden zudem die Holz- und Flächenbedarfe eines Studentenwohnheims in Hamburg und eines Sozialzentrums in Feldkirch (Österreich) sowie eines gemischt genutzten Holzhochhauses in Wien (Österreich). Das Studentenwohnheim „Woodie“ in Hamburg und das „Sozialzentrum Antoniushaus“ in Feldkirch wurden in Modulbauweise gefertigt (vgl. Tabelle 298 und Tabelle 299). Beim Hochhaus „HoHo Wien“ wurde eine für den Hochhausbau geeignete Hybridbauweise mit Holz, Stahlbeton und Beton im Verbund angewendet.

Die reinen Wohnhäuser, die nicht in Modulbauweise errichtet wurden, weisen große Unterschiede bei der geplanten Wohnflächennutzung auf. Aus der geplanten Belegung ergeben sich für die Mehrfamilienhäuser „Holzhausen“ und „e3“ die mit Abstand größten Wohnflächen pro Person (vgl. Tabelle 288). Ihr Vorteil liegt folglich vor allem im effizienteren Umgang mit den Grundflächen, da sie vier und sieben Stockwerke aufweisen. Würden sie ebenfalls auf rund 30 m² pro Person ausgelegt, wäre im Vergleich zur aktuellen Auslegung eine um den Faktor 1,5 bzw. 1,8 höhere Flächeneffizienz möglich.

Tabelle 288: Wohnraumangebot und Baumaterial der Beispielgebäude

Gebäude	Wohneinheiten	Personenzahl	Wohnfläche (m²)	Wohnfläche pro Person (m²)	Verwendete Holzart
Vorarlberger Reihenhaus [1)]	1	3,0	100	33	Lärche
Kanadisches Blockhaus [2)]	1-2	4,5	160	36	Fichte
Moser Massivholz 7-Literhaus [3)]	1-2	4,5	130	29	Fichte
Moser Massivholz Passivhaus [3)]	1-2	4,5	130	29	Fichte
Woodcube, Hamburg [4)]	8	24,0	900	38	Fichte
MFH Holzhausen, Steinhausen (CH) [5) 6)]	9	37,0	1.647	45	Fichte
e3, Berlin [7)]	6	18,0	987	55	Fichte
Punkthäuser, HH-Winterhude [8)]	11	33,0	880	27	Fichte

Quellen: (1) Krappmeier, 2014; (2) Sack, 2016; (3) Moser, 2016; (4) Deepgreen Development, 2018; (5) Lignum, 2008; (6) Renggli AG, 2016; (7) Konradin Medien, 2008; (8) ProHolz Austria, 2018;

Mit >3,8 Wohnungen pro Gebäude liegen die Beispielgebäude um mehr als 67 Prozent über dem Durchschnitt der Wohnbaufertigstellungen in Baden-Württemberg im Jahr 2016, der lediglich 2,3 Wohnungen pro Gebäude umfasste.

11.2.1.1.6.1 Bauholzbedarf

Der auf die Wohnfläche bezogene Holzbedarf der Gebäude bewegt sich in einer Spanne zwischen 0,382 und 1,077 m³ Bauholz pro Quadratmeter. Die jeweils benötigten Holzmengen sind in Tabelle 289 dargestellt. Nimmt man den Durchschnitt aller Beispielgebäude, liegt der Bauholzbedarf bei etwa 0,559 m³ pro Quadratmeter Wohnfläche.

Der Holzbedarf des Vorarlberger Reihenhauses in Holzrahmenbauweise wird von Krappmeier mit 21 t (Krapmeier, 2014 S. 10) bei einer Dichte von 0,55 t/m³ angegeben (Krapmeier, 2014 S. 3), was bei Lärchenholz der Sollfeuchte von Bauholz mit weniger als 15 Prozent entspricht. Daraus ergeben sich Volumina von 38 m³ für die Holzrahmenbauweise. Der Holzbedarf des

MFH Holzhausen wurde anhand von Daten zum Materialverbrauch geschätzt, die nicht in Kubikmetern angegeben wurden[97] (Lignum, 2008 S. 1701). Daher sind leichte Abweichungen von den tatsächlichen Werten möglich. Auf Basis der vorliegenden Daten wurde ein Holzbedarf von insgesamt 669 m³ geschätzt.

Mit einem Holzbedarf von 0,382 m³ pro Quadratmeter Wohnfläche weist das Vorarlberger Reihenhaus den niedrigsten Holzbedarf aller Beispielgebäude auf. Mit geringem Abstand folgen die in Hybridbauweise errichteten e3 in Berlin und das MFH Holzhausen mit rund 0,40 und 0,41 m³/m². Mit rund 0,63 m³/m² folgen die Punkthäuser in HH-Winterhude vor dem Woodcube und dem kanadischen Blockhaus, in denen jeweils rund 0,78 m³/m² verbaut wurden. Der Holzbedarf der in Blockhausbauweise errichteten Gebäude liegt damit im Vergleich zum Holzrahmenbau etwa doppelt so hoch. Den größten Bedarf weisen Gebäude in Massivbauweise auf, die rund 1,08 m³ Holz pro Quadratmeter Wohnfläche benötigten.

Der Vergleich pro Person macht deutlich, welche Bedeutung der Belegungsdichte bzw. der pro Person genutzten Wohnfläche zukommt. Aufgrund ihrer geringen Wohnfläche von 27 m² pro Person liegen die Punkthäuser in Winterhude beim Materialbedarf pro Person an zweiter Stelle vor dem MFH Holzhausen und dem e3 in Berlin, in denen 18,1 und 21,9 m³ pro Bewohner verbaut wurden. Mit 12,2 m³ pro Person weist das Vorarlberger Reihenhaus jedoch eindeutig den geringsten Materialbedarf auf. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Vorarlberger Reihenhaus wie auch das kanadische Blockhaus und die Massivholzhäuser oberirdisch vollständig aus Holz gebaut sind. Die Erschließungskerne des Woodcube (Deepgreen Development GmbH, 2018) und des MFH Holzhausen (Lignum, 2008 S. 1699) sind dagegen aus Stahlbeton konstruiert, was den Holzbedarf im Vergleich zu den Ein- und Zweifamilienhäuern reduziert. Für das „e3“ in Berlin wurden Geschossdecken aus einem Holzbetonverbund (16 cm Brettschichtholz und 10 cm Beton) entwickelt. Zudem wurden das außenliegende Treppenhaus und sowie zwei Betonkerne für die haustechnischen Installationen nicht aus Holz konstruiert (Konradin Medien GmbH, 2008). Die Beispiele belegen, dass die Konstruktionsweise entscheidend für den Holzbedarf pro Quadratmeter Nutzfläche ist und die Gebäudetypologie keinen nennenswerten Einfluss darauf hat. Neben der Konstruktionsweise ist für den Holzbedarf pro Person vor allem die Belegungsdichte entscheidend.

[97] Rahmenbaukanteln und Brettschichtholz 155 m3, Brettstapel 29 m3; Platten: Massivholzplatten 196 mm 116 m2, Massivholzplatten 27 mm, 40 mm und 42 mm 1257 m2, OSB 12 mm und 15 mm 4869 m2, OSB 30 mm 4217 m2, Furnierschichtholz 29 m3, Gipsfaser- und Gipskartonplatten 8751 m2; Fassadenbekleidung: Zedernholz 1515 m2 (Lignum, 2008, p. 1701).

Tabelle 289: Holzbedarf der Beispielgebäude (Fichte)

Gebäude	Bauholzbedarf Gesamt (m³)	Bauholzbedarf pro Person (m³)	Bauholzbedarf pro m² Wohnfläche (m³)
Vorarlberger Reihenhaus	[1] 38	12,7	0,382
Kanadisches Blockhaus	[2] 125	27,9	0,784
Moser Massivholz 7-Literhaus	[3] 140	31,1	1,077
Moser Massivholz Passivhaus	[3] 140	31,1	1,077
Woodcube, Hamburg	[4] 700	29,2	0,778
MFH Holzhausen, Steinhausen (CH)	[5] [6] 669	18,1	0,406
e3, Berlin	[7] 395	21,9	0,400
Punkthäuser, HH-Winterhude	[8] 550	16,7	0,625
Gesamt/Durchschnitt	**2.757**	**21,5**	**0,559**

Quellen: (1) Krappmeier, 2014; (2) Sack, 2016; (3) Moser, 2016; (4) Deepgreen Development, 2018; (5) Lignum, 2008; (6) Renggli AG, 2016; (7) Konradin Medien, 2008; (8) ProHolz Austria, 2018;

Anhand des ermittelten Holzbedarfs lässt sich die nötige Waldflächeninanspruchnahme sowohl pro Quadratmeter Wohnfläche als auch pro Person und Jahr berechnen. Um eine bessere Vergleichbarkeit herzustellen, wurde angenommen, dass das Vorarlberger Reihenhaus ebenfalls aus Fichtenholz hergestellt wird.

So benötigt man für die Herstellung von einem Quadratmeter Wohnfläche im Durchschnitt der Beispielgebäude bei Verwendung von Fichtenholz den Jahresertrag von ca. 0,067 ha (671 m²) Waldfläche. Die Spanne liegt zwischen 0,0458 und 0,1293 ha/m² (vgl. Tabelle 290). Die Wohnfläche der Beispielgebäude beträgt 38 m² pro Person. Bei den dargestellten Anteilen der Bauweisen werden dafür im Durchschnitt über eine Dauer von 80 Jahren jährlich 0,0322 Hektar (322 m²) Waldfläche pro Person in Anspruch genommen. Die Spanne liegt zwischen 0,0191 und 0,0467 ha/Ea.

Tabelle 290: Waldflächenbedarf der Beispielgebäude für Fichtenholzproduktion

Gebäude	Flächenbedarf für Bauholz pro m² Wohnfläche (ha)	Flächenbedarf für Bauholz pro Person und 80 Jahre (ha)	Flächenbedarf Bauholz pro Person und Jahr bei 80 Jahren Nutzung (ha)
Vorarlberger Reihenhaus*	0,0458	1,528	0,0191
Kanadisches Blockhaus	0,0941	3,344	0,0418
Moser Massivholz 7-Literhaus	0,1293	3,735	0,0467
Moser Massivholz Passivhaus	0,1293	3,735	0,0467
Woodcube, Hamburg	0,0934	3,501	0,0438
MFH Holzhausen (CH)	0,0487	2,169	0,0271
e3, Berlin	0,0480	2,633	0,0329
Punkthäuser, HH-Winterhude	0,0750	2,001	0,0250
Gesamt/Durchschnitt	**0,0671**	**2,576**	**0,0322**

* Hergestellt aus Lärchenholz. Alle übrigen Gebäude wurden aus Fichtenholz konstruiert.
Quelle: Eigene Berechnung

Das Vorarlberger Reihenhaus weist in diesem Vergleich mit 0,0458 ha/m² bzw. 0,0191 ha/Ea die geringste Waldflächeninanspruchnahme auf. Stellt man die Beispielgebäude nicht aus Fichtenholz, sondern aus Buchenholz her, steigt der Flächenbedarf im Vergleich zu Fichtenholz um rund 36 Prozent (vgl. Tabelle 291). Dieses Verhältnis gilt jedoch nur unter den aktuellen klimatischen Bedingungen. Aufgrund des Klimawandels ist davon auszugehen, dass sich diese Bedingungen in den kommenden Jahrzehnten ändern werden. Wie bereits erwähnt, wird ein wärmeres Klima Nadelhölzer im Vergleich zu Laubbäumen weniger begünstigen und ihre Verbreitung reduzieren. Folglich wird Buchenholz als Konstruktionsholz an Bedeutung gewinnen, wenngleich auch die Buchenerträge sinken dürften. Bisher kommen im Hochbau fast ausschließlich Nadelhölzer zum Einsatz, weil diese als leichter zu verarbeiten gelten. Neue Verarbeitungsverfahren erleichtern jedoch den Einsatz von Buchenholz im Hochbau und bieten dabei sogar Vorteile gegenüber Nadelhölzern. Furnierschichtholz aus Buchenholz wird heute in einem hoch technologisierten Verfahren hergestellt, das Konstruktionen ermöglicht, die auf dem Preisniveau herkömmlicher Nadelholzkonstruktionen liegen (Pollmeier, 2018). „Dabei werden 3 mm starke Schälfurniere faserparallel bzw. kreuzweise verklebt und zu Trägern, Platten, Paneel und Fußboden weiterverarbeitet“ (Pollmeier, 2018). Solches Furnierschichtbuchenholz ermöglicht aufgrund seiner hohen Festigkeit und Steifigkeit „wesentlich schlankere Bauteile als Nadelholzwerkstoffe“ (Pollmeier, 2018). Platten und Träger können bis zu einer Länge von 18 m hergestellt werden (Pollmeier, 2018). Für die folgenden Berechnungen zum Bauholzbedarf und dem daraus folgenden Flächenbedarf wurde vereinfachend angenommen, dass für die Konstruktion aus Buchenholz die gleichen Holzvolumina benötigt werden, wie für eine Konstruktion aus Nadelholz.

Angenommen wurde auch, dass der jährliche Zuwachs an Buchenholz bei einer Begrenzung des globalen Temperaturanstiegs auf maximal 1,5°C im Vergleich zum vorindustriellen Niveau nicht deutlich abnimmt. Derzeit liegt der Bedarf an Buchenwaldfläche pro Quadratmeter Wohnfläche bei ca. 0,062 und 0,175 Hektar. Über 80 Jahre ergibt sich daraus ein Waldflächenbedarf zwischen 0,026 und 0,063 Hektar pro Person und Jahr. Nimmt man davon den Mittelwert, liegt der jährliche Waldflächenbedarf pro Person bei ca. 445 m².

Tabelle 291: Waldflächenbedarf der Beispielgebäude für Buchenholzproduktion

Gebäude	Flächenbedarf für Bauholz pro m² Wohnfläche (ha)	Flächenbedarf für Bauholz pro Person und 80 Jahre (ha)	Flächenbedarf Bauholz pro Person und Jahr bei 80 Jahren Nutzung (ha)
Vorarlberger Reihenhaus	0,0620	2,067	0,0258
Kanadisches Blockhaus	0,1272	4,521	0,0565
Moser Massivholz 7-Literhaus	0,1748	5,049	0,0631
Moser Massivholz Passivhaus	0,1748	5,049	0,0631
Woodcube, Hamburg	0,1262	4,734	0,0592
MFH Holzhausen (CH)	0,0659	2,933	0,0367
e3, Berlin	0,0649	3,560	0,0445
Punkthäuser, HH-Winterhude	0,1014	2,705	0,0338

Quelle: Eigene Berechnung

11.2.1.1.6.2 Dämmstoffbedarf

Der Dämmstoffbedarf der Beispielgebäude, für die entsprechende Daten vorliegen, beträgt zwischen 0,188 bis 0,462 m³ pro Quadratmeter Wohnfläche (vgl. Tabelle 292). Für die Dämmung der Beispielgebäude wurden in allen Fällen Holzweichfaserdämmstoffe verwendet. Der Holzfaseranteil am Endprodukt beträgt rund 95 Prozent. Der verwertbare Anteil des Holzrohstoffs liegt bei rund 92 Prozent. Die Rohdichte von Holzweichfaserdämmstoffen liegt bei rund 50 kg bis 190 kg pro Kubikmeter. Nachfolgend wurde der Mindestmaterialbedarf berechnet, der aus der Verwendung von Dämmstoffen mit einer Dichte von 50 kg/m³ entsteht. Diese eignen sich allerdings nicht für Wärmedämmverbundsysteme. Aufgrund des so berechneten Dämmstoffbedarfs erhöht sich der Holzbedarf um 9,4 bis 23 kg/m². Bei einem Bauholzbedarf von 152 bis 506 kg/m² steigert die Dämmstoffproduktion den Holz- und Waldflächenbedarf somit um zwei bis 15 Prozent.

Geht man von einem verwertbaren Fichtenstammholzertrag von 3,5 t/ha bei einer Restfeuchte von 14 Prozent und einer Faserausbeute von 92 Prozent aus, ergibt sich ein Dämmstoffertrag von rund 68 m³/ha. Berücksichtigt man mögliche Koppelprodukte (in diesem Fall Energieholz), ergibt sich eine Flächengutschrift von 0,173 ha, sodass man mit einem Dämmstoffertrag von rund 82 m³/ha rechnen kann.

Tabelle 292: Dämmstoffbedarf der Beispielgebäude

Gebäude	Dämmstoff-bedarf pro Gebäude (m³)	Dämmstoff-bedarf pro m² Wohnfläche (m³)	Dämmstoff-bedarf pro Person und 40 Jahre (m³)
Klassisches Vorarlberger Reihenhaus [1)]	42	0,422	14,1
Kanadisches Blockhaus [2)]	30	0,188	6,7
Moser Massivholz 7-Literhaus [3)]	30	0,231	6,7
Moser Massivholz Passivhaus [3)]	60	0,462	13,3
Woodcube, Hamburg	380	0,422	15,8
MFH Holzhausen, Steinhausen (CH) [4) 5)]	350	0,213	9,5

Quellen: (1) Krappmeier, 2014; (2) Sack, 2016, (3) Moser, 2016; (4) Lignum, 2008; (5) Renggli AG, 2016;

Die Waldflächeninanspruchnahme beträgt somit 147 m² pro Kubikmeter Dämmstoff ohne Berücksichtigung von Koppelprodukten und 123 m² pro Kubikmeter Dämmstoff, wenn Koppelprodukte berücksichtigt werden. Dämmstoffe aus Douglasie werden in Deutschland bisher noch nicht vermarktet. Theoretisch ließen sich aus Douglasie rund 93 m³/ha (ohne Koppelprodukte) herstellen (vgl. Tabelle 293).

Tabelle 293: Weichholfaserdämmstoffertrag pro Hektar ohne Koppelprodukte

Baumart	Zuwachs Stammholz o. R., 14% RF (t/ha)	Nutzbare Faserausbeute, 14% RF (t/ha)	Dämmstoff-ertrag, Holzbestandteil (m³/ha)	Dämmstoff-ertrag Endprodukt (m³/ha)	Flächenbedarf pro Kubikmeter (m²/m³)
Fichte	3,5	3,2	65	68	147
Tanne	3,7	3,4	68	72	139
Douglasie	4,8	4,4	89	93	107
Kiefer	2,3	2,1	42	44	227
Lärche	3,2	3,0	59	62	161

o. R. = ohne Rinde
Quelle: Eigene Berechnung

Vereinfachend wurde im Falle der Dämmstoffe von einer vierzigjährigen Nutzungsdauer ausgegangen. Wird das Gebäude über 80 Jahre genutzt, muss der Dämmstoff wahrscheinlich einmal ersetzt werden. Aufgrund des dargestellten Holzbedarfs der Dämmstoffherstellung weisen die Beispielgebäude bei einer Nutzungsdauer von 80 Jahren einen jährlichen Waldflächenbedarf von rund 0,0046 bis 0,0113 Hektar (46 bis 113 m²) pro Quadratmeter Wohnfläche auf (vgl. Tabelle 294). Pro Person ergibt sich daraus eine jährliche Flächeninanspruchnahme durch Dämmstoffproduktion von 20,3 bis 48,2 Quadratmetern. Dabei ist der Energiestandard der Gebäude der ausschlaggebende Faktor. Bei einem Passivhaus muss demnach pro Person und Jahr mit einem Flächenbedarf von ca. 40 m² Waldfläche oder mehr gerechnet werden.

Tabelle 294: Waldflächenbedarf der Beispielgebäude für Dämmstoffproduktion (Nutzungsdauer = 40 Jahre)

Gebäude	pro m² Wohnfläche und 80 Jahre (ha)	pro Person und 80 Jahre (ha)	pro Person und Jahr (ha)	pro Person und Jahr (m²)
Vorarlberger Reihenhaus	0,0103	0,343	0,0043	42,9
Kanadisches Blockhaus	0,0046	0,163	0,0020	20,3
Moser Massivholz 7-Literhaus	0,0056	0,163	0,0020	20,3
Moser Massivholz Passivhaus	0,0113	0,325	0,0041	40,7
Woodcube, Hamburg	0,0103	0,386	0,0048	48,2
MFH Holzhausen (CH)	0,0052	0,231	0,0029	28,8

Quelle: Eigene Berechnung

11.2.1.1.6.3 Flächenbedarf Bauholz und Dämmstoff

Aus dem Flächenbedarf für Bauholzproduktion und Dämmstoffherstellung ergibt sich die Waldflächeninanspruchnahme der Beispielgebäude insgesamt. Für das e3 in Berlin und die drei „Punkthäuser“ in Hamburg-Winterhude waren jedoch keine Angaben zu den verbauten Dämmstoffmengen erhältlich. Deshalb wurde für die folgende Schätzung jeweils der Dämmstandard eines vergleichbaren Gebäudes übertragen: Der Dämmstoffbedarf des MFH Holzhausen wurde für das e3 übernommen, während der Dämmstoffbedarf des Moser-Massivholz-Passivhauses auf die in Massivbauweise errichteten Punkthäuser in Winterhude übertragen wurde. Für den Woodcube wurde der Dämmstandard des Vorarlberger Reihenhauses angenommen. Die folgende Schätzung zeigt zudem, wie sich der Flächenbedarf der Gebäude erhöht, wenn statt Fichtenholz Buchenholz als Bauholz verwendet wird. Dabei wurde davon ausgegangen, dass auch die Buchenholzbauten mit Holzweichfaserdämmstoffen aus Fichtenholz gedämmt werden. Im Durchschnitt der Beispielgebäude steigt der Flächenbedarf durch den Ersatz von Fichtenholz durch Buchenholz um 28 Prozent. Nicht berücksichtigt werden konnte bei dieser Schätzung, dass Buchenfurnierschichtholz schlankere Bauteile ermöglicht und somit für das gleiche Gebäude geringere Volumina an Bauholz benötigt werden. Die für das Erreichen des Passivhausstandards nötige Zusatzdämmung des Massivholzbaus erhöht den Flächenbedarf bei Verwendung eines Kiefernholzweichfaserdämmstoffs im Vergleich zum 7-Liter-Haus um rund sechs bzw. acht Prozent (vgl. Tabelle 295).

Tabelle 295: Waldflächenbedarf der Beispielgebäude pro Person und Jahr

Gebäude	Flächenbedarf pro Person und Jahr bei 80 Jahren Nutzung (m²)		Differenz Buchenholz zu Fichtenholz*
	Fichtenholz	Buchenholz	
Vorarlberger Reihenhaus	276,8	344,1	+24%
Kanadisches Blockhaus	458,7	605,8	+32%
Moser Massivholz 7-Literhaus	507,5	671,8	+32%
Moser Massivholz Passivhaus	548,2	712,4	+30%
Woodcube, Hamburg	534,2	688,2	+29%
MFH Holzhausen (CH)	328,8	424,3	+29%
e3, Berlin	483,5	599,3	+24%
Drei Punkthäuser, HH-Winterhude	325,2	413,2	+27%
Mittelwert	**405,2**	**518,5**	**+28%**

*Die Unterschiede in den Differenzen ergeben sich aus den unterschiedlichen Dämmstoffanteilen am gesamten Holzverbrauch. Der Dämmstoff wird auch bei einem Buchenholzbau aus Nadelholz hergestellt.
Quelle: Eigene Berechnung

Für die Berechnung möglicher Autonomiegrade bietet sich die Schätzung des Bauholzbedarfs anhand der benötigten Neubauwohnfläche an, die in der Regel durch die Statistischen Ämter der Länder erhoben und prognostiziert wird. Im Jahr 2014 umfasste die pro Person genutzte Wohnfläche in Deutschland 46,5 Quadratmeter und damit sieben Quadratmeter mehr als im Jahr 2000. Dies entspricht einem Zuwachs von 17,7 Prozent in 14 Jahren (Umweltbundesamt, 2016). Die Entwicklung der pro Person genutzten Wohnfläche ist damit ein entscheidender Faktor für die möglichen Autonomiegrade in den Bereichen Energie und Baustoffe. Im Mittel wird pro Quadratmeter Wohnfläche für eine Fichtenholzkonstruktion der Jahresertrag von 539 bis 1.405 m² und für eine Buchenholzkonstruktion von 711 bis 1.860 m² Waldfläche benötigt (vgl. Tabelle 296). Auf 80 Jahre Nutzungsdauer umgerechnet, liegt die pro Quadratmeter Wohnfläche nötige Waldflächeninanspruchnahme bei Fichtenholz je nach Konstruktionsweise zwischen 6,7 und 17,6 m²/m²*a und bei Buchenholz zwischen 8,9 und 23,3 m²/m²*a. In Tabelle 296 ist die Waldflächeninanspruchnahme der Beispielgebäude in Quadratmetern Waldfläche pro Quadratmeter Wohnfläche dargestellt.

Tabelle 296: Waldflächenbedarf für Holz & Fichtenholzweichfaserdämmung pro Quadratmeter Wohnfläche

Gebäude	Fichten-Bauholz (m²/m²)	Buchen-Bauholz (m²/m²)
Klassisches Vorarlberger Reihenhaus	561	723
Kanadisches Blockhaus	986	1.317
Moser Massivholz 7-Literhaus	1.349	1.804
Moser Massivholz Passivhaus	1.405	1.860
Woodcube, Hamburg	1.037	1.365
MFH Holzhausen, Steinhausen (CH)	539	711
e3, Berlin	593	762
Drei Punkthäuser, Hamburg-Winterhude	863	1.127

Quelle: Eigene Berechnung

11.2.1.1.6.4 Flächenbedarf Bauholz nach Wohnflächeninanspruchnahme

Wählt man die Konstruktionsweise des Vorarlberger Reihenhauses und belegt das Gebäude mit einer Person pro 20 m², benötigt man – ohne Dämmung – nur den Holzertrag von 155 Quadratmetern Waldfläche pro Person und Jahr. Bewohnen zwei Personen ein Einfamilienhaus in Holzmassivbauweise mit 160 Quadratmetern Wohnfläche (80 m² pro Person), benötigen sie 1.748 Quadratmeter Waldfläche pro Person und Jahr. Die Wohnweise mit dem geringsten Waldflächenbedarf und die waldflächenintensivste Wohnweise in dem hier durchgeführten Vergleich unterscheiden sich somit um den Faktor 11,3 (vgl. Tabelle 297).

Tabelle 297: Waldflächenbedarf Standardwohnbau nach der pro Person genutzten Wohnfläche (Buchenholz)

	Wohnfläche pro Person (m²)						
	20	30	40	50	60	70	80
Gebäude	Waldflächenbedarf pro Person und Jahr (m²)						
Klassisches Vorarlberger Reihenhaus	155	232	310	387	465	542	620
e3, Berlin	162	243	325	406	487	568	649
MFH Holzhausen, Steinhausen (CH)	165	247	329	412	494	576	659
Drei Punkthäuser, Hamburg-Winterhude	254	380	507	634	761	888	1.014
Woodcube, Hamburg	316	473	631	789	947	1.104	1.262
Kanadisches Blockhaus	318	477	636	795	954	1.113	1.272
Moser Massivholzhaus Passivhaus	437	655	874	1.092	1.311	1.529	1.748

Quelle: Eigene Berechnung

11.2.1.1.7 Flächenbedarf des Holzmodulbaus

Mittlerweile werden nicht nur einzelne Bauteile, sondern auch ganze Wohnmodule immer häufiger vorgefertigt und auf der Baustelle zusammengefügt. Aufgrund der hohen Präzision der Verarbeitung, der Unabhängigkeit von Witterungsbedingungen und der Kostenersparnis der seriellen Fertigung gewinnt diese Bauweise zunehmend an Attraktivität. In Hamburg wurde mit dem „Woodie“ bereits ein großes Studentenwohnheim für 371 Personen auf diese Weise errichtet. Weitere Beispiele für größere Wohnprojekte in Holzmodulbauweise finden sich vor allem in Österreich.

11.2.1.1.7.1 Wohnheime in Modulbauweise

Das Studentenwohnheim Woodie in Hamburg bietet 371 Zimmer, die vollständig aus Holz gefertigt wurden und jeweils eine Wohnfläche von 20 m² aufweisen (BauNetz Media GmbH, 2017). Bei der Herstellung des Wohnheims wurden über 3.800 m³ Nadelholz (Fichte, Tanne und Lärche) verarbeitet (UPARTMENTS RE, 2018).

Beim Bau des Sozialzentrums Antoniushaus in Feldkirch wurden 60 Module verbaut, die jeweils ein Außenmaß von 8,0 x 3,8 m aufweisen (Kaufmann Bausysteme, 2016). Die Nutzfläche einer Moduleinheit beträgt rund 26 m². Pro Modul wurden jeweils knapp 20 Kubikmeter Holz verarbeitet (VOL.AT, 2011). Davon entfielen rund 15 Kubikmeter auf die Konstruktion der Boxen und fünf Kubikmeter auf die Konstruktion der übrigen Räume und der Fassade (Kaufmann Zimmerei und Tischlerei GmbH, 2018). So ergibt sich ein Bedarf von 900 m³ Holz für die Module und ein Gesamtbedarf von 1.200 m³ Holz für das Gesamtgebäude (vgl. Tabelle 298). Mit 20 und 26 m² pro Person ist die Wohnfläche beider Gebäude etwa halb so groß wie die durchschnittlich genutzte Wohnfläche in Deutschland.

Tabelle 298: Gebäudebeispiele Modulwohnbau, Kennzahlen

Gebäude	Wohneinheiten	Bewohner	Wohnfläche in Modulen (m²)	Wohnfläche pro Person (m²)	Holzbedarf Gesamt (m³)	Holzbedarf pro m² (m³)
Studentenwohnheim Woodie, Hamburg	371	371	7.420	20	3.800	0,51
Sozialzentrum Antoniushaus Feldkirch	60	60	1.560	26	1.200	0,77

* nur Wohnmodule ohne sonstige Räume
Quellen: UPARTMENTS RE, 2018; Kaufmann Bausysteme, 2016; VOL.AT, 2011

Betrachtet man nur die Wohnmodule ohne die sonstigen Räume, liegen diese mit 0,51 und 0,58 Kubikmetern Holz pro Quadratmeter Wohnfläche im Mittelfeld der übrigen Beispielgebäude - zwischen Holzrahmenbau und Massivholzbauweise. Nimmt man die übrigen Räume der Gebäude hinzu, so sind diese im Falle des Studentenwohnheims Woodie im Erdgeschoss

untergebracht, welches, wie auch die Erschließungskerne, in Stahlbetonbauweise konstruiert wurde. Dadurch entstand kein weiterer Holzbedarf. Im Gegensatz dazu wurden beim Sozialzentrum Antoniushaus auch die übrigen Räume aus Holz konstruiert, sodass der Holzbedarf des Gesamtgebäudes bei 0,77 m³ pro Quadratmeter liegt. Die Waldflächeninanspruchnahme der Holzkonstruktion aus Fichtenholz (ohne Dämmung) beträgt daher im Falle des Studentenwohnheims nur 615 m² pro Quadratmeter Wohnfläche, während die des Sozialzentrums 693 m²/m² beträgt. Bei einer Nutzungsdauer von 80 Jahren ergibt sich daraus jeweils ein Waldflächenbedarf von 7,7 und 8,7 Quadratmetern pro Quadratmeter Wohnfläche und Jahr. Pro Person liegt der Waldflächenbedarf bei 154 und 225 m² pro Jahr. (Vgl. Tabelle 299)

Tabelle 299: Waldflächenbedarf Modulwohnbau aus Fichtenholz

Gebäude	Flächenbedarf pro m² Wohnfläche (m²/m²)	Flächenbedarf pro m² Wohnfläche und Jahr über 80 Jahre (m²/m²*a)	Flächenbedarf pro Person und 80 Jahre (ha/Person)	Flächenbedarf pro Person und Jahr über 80 Jahre (m²/Ea)
Studentenwohnheim Woodie, Hamburg	615	7,69	1,23	154
Sozialzentrum Antoniushaus Feldkirch	693	8,7	1,80	225

Quelle: Eigene Berechnung

11.2.1.1.7.2 Wohnungsbau in Modulbauweise

Aus vorgefertigten Holzwohnmodulen ließen sich nicht nur Wohnheime, sondern auch klassische Mehrfamilienhäuser errichten. Beispielhaft wurden aus den bereits dargestellten Wohnmodulen verschiedene Wohnungstypen zusammengesetzt. Die Nutzflächen der verschiedenen Wohnungen sind in Tabelle 300 dargestellt. Beispielhaft wurde neben den ausschließlich zu Wohnzwecken genutzten Wohnungen auch ein Wohnhaus für fünf Sechspersonen-Wohngemeinschaften in die Schätzung einbezogen, in dem jedem Bewohner zusätzlich neun Quadratmeter Bürofläche in Coworking-Büros zur Verfügung gestellt wurden. Dies ermöglicht die Verbindung von Arbeit und Wohnen an einem Ort.

Tabelle 300: Wohnflächen verschiedener Wohnungstypen

Wohnung	Schlaf-zimmer	Kinder-zimmer	Wohn-zimmer	(Wohn-) Küche	Ess-zimmer	Arbeits-raum	Summe
Single-Wohnung	20	-	-	20	-	-	40
Zweipersonen-Wohnung	26	-	26	20	-	-	72
Dreipersonen-Wohnung	26	20	26	20	-	-	92
Vierpersonen-Wohnung	26	40	26	20	-	-	112
Fünfpersonen-WG-Wohnung	100	-	26	20	20	-	166
Sechspersonen-WG-Wohnung	120	-	26	20	26	-	192
Wohnhaus mit Büros	600	-	130	100	130	260	1.220

Quelle: Eigene Annahmen

In Tabelle 301 sind die daraus resultierenden Wohnflächen eines Wohnhauses mit Büroräumen dargestellt. Durch die gemeinsame Nutzung der Wohnzimmer, Esszimmer und Küchen konnte die Wohnfläche der Wohngemeinschaften auf 32 Quadratmeter begrenzt werden. So bleibt das Gebäude auch inklusive der Büro-/Arbeitsräume mit einer Nutzfläche von 41 Quadratmetern noch um 12 Prozent unter der in Deutschland pro Person genutzten Wohnfläche von 46,5 m². Ergänzen ließen sich z. B. noch eine Waschküche und eine Werkstatt mit jeweils 50 m² Nutzfläche im Untergeschoss sowie Räume für Sport und das Abstellen von Fahrrädern im Erdgeschoss. Diese haben, üblicherweise aus Stahlbeton konstruiert, keinen Einfluss auf den Waldflächenbedarf. Der jährliche Waldflächenbedarf aller Module und der Büroflächen läge damit bei 334 m² pro Person, wenn das Gebäude aus Fichtenholz konstruiert würde. Schlägt man, entsprechend dem Beispiel des Sozialzentrums Antoniushaus in Feldkirch, für die Räume im Erdgeschoss, Fassade und Dachkonstruktion noch einmal ein Drittel auf, so beträgt der Waldflächenbedarf 445 m³/Ea.

Tabelle 301: Waldflächenbedarf Fichtenholz-Wohngebäude für fünf Sechspersonen-Wohngemeinschaften mit Büros

Modul	Nutzfläche (m²)	Holz (m³)	Waldflächen-bedarf (ha)	Jährlicher Waldflächen-bedarf (m²/a)	Jährlicher Waldflächen-bedarf Gesamtge-bäude (m²/a)
30 Schlafzimmer	600	315	38	4.727	6.301
5 Wohnzimmer	130	75	9	1.125	1.500
5 Esszimmer	130	75	9	1.125	1.500
5 Küchen	100	53	6	788	1.050
10 Arbeitsräume	260	150	18	2.251	3.000
Summe	**1.220**	**668**	**80**	**10.017**	**13.352**
Gesamtfläche/Person	41	22,3	2,7	334	445
Wohnfläche/Person	32	17	2	259	345
Bürofläche/Person	9	5	1	75	100

Quelle: Eigene Berechnung

Bei einer Konstruktion aus Buchenholz beträgt der berechnete Flächenbedarf bei gleichen Holzvolumina 451 m² bzw. 602 m² pro Person und Jahr. Tatsächlich wären bei einer Buchenholzkonstruktion schlankere Bauteile möglich, sodass der Flächenbedarf in der Realität geringer ausfallen dürfte.

Tabelle 302: Waldflächenbedarf Buchenholz-Wohngebäude für fünf Sechspersonen-Wohngemeinschaften mit Büros

Modul	Nutzfläche (m²)	Holz für Wohnmo-dule (m³)	Waldflächen-bedarf (ha)	Jährlicher Waldflächen-bedarf (m²/a)	Jährlicher Wald-flächen-bedarf Gesamtgebäude (m²/a)
30 Schlafzimmer	600	315	51	6.390	8.518
5 Wohnzimmer	130	75	12	1.521	2.028
5 Esszimmer	130	75	12	1.521	2.028
5 Küchen	100	53	9	1.065	1.420
10 Arbeitsräume	260	150	24	3.043	4.056
Summe	**1.220**	**668**	**108**	**13.541**	**18.050**
Gesamtfläche/Person	41	22,3	3,6	451	602
Wohnfläche/Person	32	17	3	350	466
Bürofläche/Person	9	5	1	101	135

Quelle: Eigene Berechnung

In Tabelle 303 ist der gesamte Flächenbedarf der unterschiedlichen Wohnformen nach Wohnungsart im Vergleich dargestellt. Für Dach und Fassade sowie sonstige Räume (Freizeit- und

Sporträume, Abstellräume, Fahrradabstellraum, Werkstatt, Waschraum, Haustechnik etc.) wurde als Schätzwert vereinfachend ein Drittel zusätzlicher Holzaufwand angenommen - entsprechend dem Beispiel des Sozialzentrums Antoniushaus in Feldkirch. Die vollständigen Daten zu den jeweiligen Wohnungstypen sind im Anhang II in Tabelle 478 dargestellt.

Tabelle 303: Holz- und Flächenbedarf im Modulwohnbau pro Person nach Haushaltstyp bei Buchenholzverwendung

Haushaltstyp/ Gebäudetyp	Nutzfläche (m²/Person)	Holz für Wohn-module (m³/Person)	Waldflächen-bedarf über Nutzungsdauer (ha/Person)	Jährlicher Wald-flächenbedarf für Module pro Person (m²/Ea)	Jährlicher Waldflächen-bedarf insgesamt pro Person (m²/Ea)
Single-Haushalt	40,0	21,0	3,4	426	568
2-Personen-HH	36,0	20,3	3,3	411	548
3-Personen-HH	30,7	17,0	2,8	345	460
4-Personen-HH	28,0	15,4	2,5	312	416
5-Personen-WG	33,2	17,7	2,9	359	479
6-Personen-WG	32,0	17,3	2,8	350	466
WH mit Büros	40,7	22,3	3,6	451	602

HH=Haushalt, WG=Wohngemeinschaft, WH=Wohnhaus
Quelle: Eigene Berechnung

Der Vergleich macht ersichtlich, dass der Wohnflächenbedarf und der daraus resultierende Waldflächenbedarf trotz angepasster Raumprogramme sowohl bei Wohnungen für Familien als auch bei Wohnungen für Wohngemeinschaften mit der Zahl der im Haushalt lebenden Personen abnehmen. In diesem Beispiel liegt die Waldflächeninanspruchnahme des Haushaltes mit der größten pro Person genutzten Wohnfläche (Single-Haushalt) um 37 Prozent über der des Haushaltes mit der kleinsten pro Person genutzten Wohnfläche (Vier-Personen-Haushalt).

11.2.1.1.8 Flächenbedarf Holzhochhaus HoHo Wien

In der Seestadt Aspern in Wien wird bis zum Jahr 2019 „das weltweit höchste Holz-Hochhaus (HoHo)“ (Stadt Wien, 2018) mit einer Höhe von 84 Metern errichtet. Wie beim e3 in Berlin handelt es sich dabei jedoch nicht um einen reinen Holzbau, sondern um einen Hybridbau, bei dem neben den tragenden Gebäudekernen aus Stahlbeton auch bei der Fertigung anderer Bauteile ein Holz-Beton-Verbund hergestellt wird. „An die tragenden Gebäudekerne werden die Grundflächen aus Holzverbunddecken angelagert, die ihren Abschluss an den Fassaden finden. Diese seriellen Elemente der Holzverbunddecken sind auf Holzstützen in der abschließenden Fassadenschicht aufgelagert. Die Stützen wiederum bilden mit den ebenfalls vorgefertigten Außenwandmodulen aus Massivholz ein gemeinsames Montageelement.“ (Baufeld

Delta, 2018) Das Gebäude beinhaltet neben 32 Wohneinheiten auch verschiedene gewerbliche Einrichtungen, wie ein Hotel, ein Restaurant und Büroflächen. (Woschitz Group, 2018)

Tabelle 304: Hoho Wien, Gebäudekennzahlen

Gebäudetyp	Geschosse	Bauweise	Bruttogeschoss-fläche (m²)	Mietfläche (m²)	Wohnein-heiten
Holzhochhaus	24	Holzhybridbau	25.000	19.500	32

Quelle: Entwicklung Baufeld Delta GmbH, 2017a

Durch den Verbund von Holz und Beton ist der Holzbedarf pro Quadratmeter Nutzfläche deutlich geringer als bei den übrigen Beispielgebäuden. So werden pro Quadratmeter nur 0,185 m³ Fichtenholz benötigt. Dies ist im Vergleich zum e3 in Berlin (0,4 m³/m²) weniger als die Hälfte und im Vergleich zum Woodcube in Hamburg (0,778 m³/m²) weniger als Viertel.

Tabelle 305: Holz- und Waldflächenbedarf des HoHo Wien

Holzart	Bauholzbedarf Gesamt (m³)	Bauholzbedarf pro m² Mietfläche (m³)	Waldflächenbedarf Bauholz pro m² Mietfläche (ha)	Flächenbedarf Bauholz pro m² Mietfläche (m²)
Fichte	3.600	0,185	0,0222	222

Quelle: Entwicklung Baufeld Delta GmbH, 2017a; Eigene Berechnung

Die Holzhybridbauweise spart nach Angaben der Entwicklung Baufeld Delta GmbH gegenüber einer Ausführung des Hochhauses in Stahlbeton rund 2.800 Tonnen CO_2-Äquivalente ein (Baufeld Delta, 2017b).

11.2.1.1.9 CO_2-Absorption des Holzbaus

Für die Wahl von Material und Bauweise ist der Flächenbedarf zwar ein wichtiges Kriterium, weil die nutzbare Waldfläche begrenzt ist. Da dies allerdings aufgrund des Klimawandels auch auf die CO_2-Aufnahmekapazität der Atmosphäre zutrifft, muss hier eine Abwägung getroffen werden. Dabei sind die reinen Hektarerträge in Kubikmetern kein ausreichendes Auswahlkriterium. So sind die Zuwächse eines Fichtenwaldes zwar mit 15,3 Vfm/a um rund 49 Prozent höher als die eines Buchenwaldes. Diese Differenz wird jedoch durch die höhere Dichte des Buchenholzes kompensiert. Tabelle 306 stellt das CO_2-Absorptionspotenzial von Fichten und Buchen im Vergleich dar. Anhand der im Holz gebundenen Kohlenstoffmenge lässt sich über den Umrechnungsfaktor 3,67 die CO_2-Absorption des Holzzuwachses berechnen (Stiftung Unternehmen Wald, 2018). Somit werden bei einem Kohlenstoffgehalt von 0,306 t pro Kubikmeter Buchenholz mit 1,12 t rund 53 Prozent mehr Kohlenstoffdioxid absorbiert als pro Kubikmeter Fichtenholz, welcher bei einem Kohlenstoffgehalt von 0,2 t/m³ nur rund 0,73 t CO_2 bindet.

Tabelle 306: CO_2-Absorption von Fichten und Buchen

Baumart	Zuwachs (Vfm/ha*a) 1)	Dichte (t TM/m³) 2)	C (t/t TM) 3) 4)	C-Gehalt (t/m³)	CO_2-Absorption (t/m³)	CO_2-Absorption (t/ha)
Fichte	15,3	0,40	0,5	0,200	0,73	11,2
Buche	10,3	0,61	0,5	0,306	1,12	11,5

Quellen: (1) BMEL, 2016 (2) Lignum, 2018; (3) Stiftung Unternehmen Wald, 2018; (3) TU München, 2010

Bei gleichem Bauholzvolumen bietet ein Gebäude aus Buchenholz somit ein erheblich größeres CO_2-Absorptionspotenzial als ein Gebäude aus Fichtenholz. Wenn eine möglichst große CO_2-Absorption das Ziel des Holzbaus ist und ausreichende Waldflächen verfügbar sind, um die regionalen Bedarfe zu decken, spricht die hohe CO_2-Absorption dafür, sich trotz der höheren Waldflächeninanspruchnahme für eine Massivholzbauweise aus Buchenholz anstelle einer Holzrahmenbauweise aus Fichtenholz zu entscheiden.

So bindet ein Massivholzhaus aus Buche bei gleicher Wohnfläche bis zu viereinhalbmal so viel CO_2 wie ein Holzrahmenbau aus Fichtenholz.

Tabelle 307: Holzbedarf für Bauholz (ohne Dämmung) pro Quadratmeter Wohnfläche

Gebäude	Fichte	Buche
	kg atro pro m²	kg atro pro m²
Klassisches Vorarlberger Reihenhaus	139	204
Kanadisches Blockhaus	297	437
Moser Massivholzhaus 7-Literhaus	408	601
Moser Massivholzhaus Passivhaus	408	601
Woodcube, Hamburg	295	434
MFH Holzhausen (Schweiz)	154	227
e3, Berlin	188	280
Drei Punkthäuser, Hamburg-Winterhude	237	349
Studentenwohnheim Woodie, Hamburg	194	286
Sozialzentrum Antoniushaus Feldkirch	219	322

atro = absolut trocken
Quelle: Eigene Berechnung

Wird die gleiche Holzart verwendet, bindet ein Massivholzhaus die dreifache Menge Kohlendioxid und ein Kanadisches Blockhaus, das mit dem Woodcube in Hamburg vergleichbar ist, immerhin doppelt so viel CO_2 wie ein klassischer Vorarlberger Holzrahmenbau. (Vgl. Tabelle 308).

Tabelle 308: CO_2-Absorption von Bauholz und Dämmstoff pro Quadratmeter Wohnfläche (t/m²)

Gebäude	Fichte	Buche
Klassisches Vorarlberger Reihenhaus	0,27	0,41
Kanadisches Blockhaus	0,58	0,88
Moser Massivholzhaus 7-Literhaus	0,79	1,21
Moser Massivholzhaus Passivhaus	0,79	1,21
Woodcube, Hamburg	0,57	0,87
MFH Holzhausen (Schweiz)	0,30	0,46
e3, Berlin	0,36	0,56
Drei Punkthäuser, Hamburg-Winterhude	0,46	0,70
Studentenwohnheim Woodie, Hamburg	0,38	0,58
Sozialzentrum Antoniushaus Feldkirch	0,42	0,65

Quelle: Eigene Berechnung

Mit Blick auf den Klimawandel bieten jedoch alle Holzbauweisen deutliche Vorteile gegenüber herkömmlichen Stahlbeton- oder Ziegelbauweisen. Allein die Zementindustrie verursacht „ca. 5 Prozent der weltweiten anthropogenen CO2-Emissionen. Bei der Herstellung von einer Tonne Zementklinker entsteht durchschnittlich rund 800 kg CO2“ (HeidelbergCement AG, 2013). Die Herstellung von einem Kubikmeter Beton ist mit einem Primärenergieverbrauch von 509 kWh/m³ und Treibhausgasemissionen von 0,3 Tonnen CO_2 verbunden. Der Primärenergieverbrauch der Stahlbetonherstellung liegt bei 813 kWh/m³ und die Treibhausgasemissionen betragen rund 0,4 t CO_2/m³. Pro Kubikmeter Fichtenschnittholz werden dagegen nur 400 kWh aufgewendet (Wind, et al., 2008).

Bei Hybridbauten wie dem e3 in Berlin oder dem HoHo Wien ist deshalb zu bedenken, dass der Einsatz von Beton sich immer negativ auf die Grauen Emissionen auswirkt. Denn die Emissionen der herkömmlichen Zementherstellung lassen sich durch den Einsatz regenerativer Brennstoffe nur begrenzt reduzieren, da bei der herkömmlichen Zementproduktion nur 40 Prozent der CO_2-Emissionen aus dem Einsatz fossiler Energien stammen, während 60 Prozent der Emissionen rohstoffbedingt bei der Entsäuerung des Kalksteins freigesetzt werden (HeidelbergCement AG, 2013).

Entscheidend für die Klimabilanz ist aber die Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus von der Herstellung der Gebäude über den Betrieb bis hin zu ihrem Rückbau und der Entsorgung oder Wiederverwendung der Baustoffe. Dauerhaft gebunden wird der Kohlenstoff nur, wenn das Bauholz nach dem Rückbau der Gebäude nicht thermisch verwertet, sondern weiterhin stofflich genutzt wird - im Idealfall wieder als Baustoff oder als Rohstoff für stoffliche Konsumgüter, beispielsweise für die Möbelproduktion.

11.2.1.1.10 Fazit – Flächeninanspruchnahme Holzbau

Eine Umstellung auf die Holzrahmenbauweise ist mit einer geringen Flächeninanspruchnahme pro Person und Jahr verbunden. Eine pauschale Empfehlung für eine bestimmte Holzbauweise kann dennoch nicht gegeben werden. Die unterschiedlichen Konstruktionsweisen bieten vielmehr die Möglichkeit, sich in gewissen Grenzen an die Verfügbarkeit des Rohstoffs Holz anzupassen und dabei sein CO_2-Absorptionspotenzial zu Zwecken des Klimaschutzes gezielt zu nutzen. Das größte CO_2-Absorbtionspotenzial bietet der Holzmassivbau. Insbesondere bei einer Verarbeitung mithilfe erneuerbarer Energien kann der Rohstoff Holz im Hochbau als wirkungsvolle CO_2-Senke genutzt werden, da im besten Fall bis zu einer Tonne CO_2 pro Quadratmeter Wohnfläche absorbiert werden kann. Die jeweiligen Anteile des Dämmstoffs am Gesamtflächenbedarf und CO_2-Absorptionspotenzial der Gebäude sind im Vergleich zur Bauholzproduktion zwar deutlich geringer, die im Dämmstoff verarbeiteten Holzmengen sind dennoch keine vernachlässigbare Größe (vgl. Abbildung 126). Wenn regional ausreichende Waldflächen und Holznutzungspotenziale für den Hochbau vorhanden sind, erscheint es mit Blick auf den Klimaschutz sinnvoll, sich eher für holzintensive Bauweisen zu entscheiden und die größeren Klimaschutzpotenziale zu nutzen. Die Nutzung von Buchenholz, das bisher vor allem energetisch genutzt wird, erscheint dabei besonders vorteilhaft, weil Buchen bei gleichem Holzvolumen deutlich mehr CO_2 binden, als die bisher im Hochbau dominierenden Nadelhölzer Fichte und Tanne.

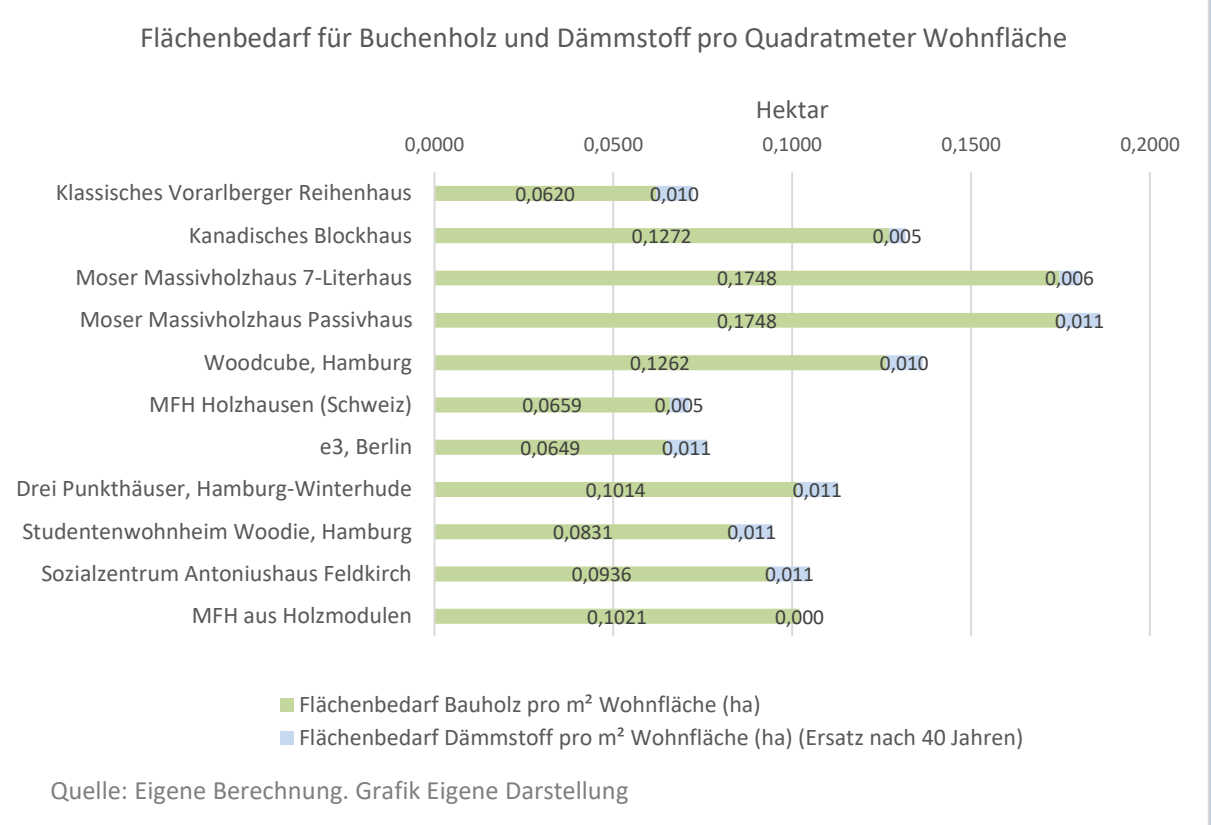


Abbildung 126: Flächenbedarf für Buchenholz und Dämmstoff pro Quadratmeter Wohnfläche

Der Waldflächenbedarf des Hochbaus und mögliche Autonomiepotenziale lassen sich über den jährlichen Wohnflächenzubau abschätzen. Wenn in Baden-Württemberg auch aufgrund eines zunehmenden Zuzugs weiterhin rund 0,32 m² Wohnfläche pro Einwohner neu gebaut werden, entspricht dies bei einer Bevölkerung von rund 11 Millionen Personen 3,52 Mio. m²/a und bei 12 Millionen Einwohnern bereits 3,84 Mio. m²/a. Dafür müssten bei Verwendung eines Vorarlberger Holzrahmenbaus 1,29 bzw. 1,41 Millionen Kubikmetern Bauholz bereitgestellt werden. Um diesen Bedarf zu decken, müssten die Erträge von 209.143 bzw. 228.156 Hektar Buchenwald in Anspruch genommen werden. Bei einer Waldfläche von 1.352.564 Mio. Hektar (Stand 2016) entspricht dies 15,5 bzw. 16,9 Prozent der Waldfläche. Der Anteil der Buche lag im Jahr 2012 bei 21,8 Prozent mit steigender Tendenz (MLR Baden-Württemberg, o. J.). Im Jahr 2013 entsprachen 21,8 Prozent der Waldfläche Baden-Württembergs einer Fläche von 294.897 Hektar (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2017a). Folglich ließe sich der gesamte Wohnungsneubau rein rechnerisch allein mit Buchenholz aus Baden-Württemberg realisieren.

Würde man anstelle des Holzrahmenbaus die Konstruktion des Woodcube wählen, würden bei 11 Millionen Einwohnern 2,74 Millionen Kubikmeter Holz bzw. 444.571 Hektar Buchenwald benötigt. Folglich müssten bei dieser Bauweise auch andere Hölzer verwendet werden, sofern nur einheimisches Holz verwendet werden soll. Eine vollständige Deckung des gesamten Neubaubedarfs für Wohnzwecke allein mit einheimischem Holz wäre dennoch möglich.

Mit Blick auf den Klimawandel erscheint die Verwendung von Holz als Bauholz in jedem Fall sinnvoll.

11.2.1.2 Alternative Baustoffe

Neben Holz eignen sich weitere pflanzliche Rohstoffe für die Produktion von Baustoffen. Aus Wiesengras, Hanf, Miscanthus, Getreidestroh und Bambus lassen sich nicht nur Dämmstoffe, sondern auch Wandelemente, Mauersteine, Fassaden, Dämmputze und Bodenbeläge herstellen. Da zu vielen dieser Baustoffe bisher nur wenige Datenquellen und kaum gesicherte Erfahrungswerte vorliegen, werden hier mit Hanfstein, Miscanthusbeton, Miscanthusputz, Wiesengrasdielen und Bambusböden nur einige Beispiele vorgestellt, die aufgrund hoher Flächenerträge und guter Wiederverwertbarkeit besonders vielversprechend erscheinen. Mit Ausnahme von Bambus wurde die Betrachtung auf Pflanzen beschränkt, die für den Anbau in Deutschland gut geeignet sind. Bambus wurde aufgrund besonders hoher Zuwachsraten, die eine hohe Flächeneffizienz versprechen, in die Betrachtung mit einbezogen.

11.2.1.2.1 Hanf

Hanf ist ein vielseitig verwendbarer Baustoff, der bisher vor allem als Rohstoff für die Dämmstoffproduktion bekannt ist, inzwischen aber auch als Zuschlagstoff für Leichtbeton oder für

die Herstellung von Hanf-Kalkmauerstein verwendet wird. Hanfstein der Firma Schönthaler hat eine Dichte von 300 kg/m³ (Schönthaler, 2017 S. 1) und enthält ausschließlich Kalk und 125 kg Hanf (Schönthaler, 2018). Anwendungsbereiche sind Trennwände, Außenwände, Neuerrichtung von Isolationsmauern, Vollwärmeschutz von existierenden Bauwerken, Innendämmung von existierenden Bauwerken, Unterfußbodendämmung, innere Akustik-Wände, Vollwärmeschutz von Neubauten sowie Sanierungen von Altbauten (Schönthaler, 2017 S. 1). Bei einem Hanfstrohertrag von 10 t TM pro Hektar erhält man bis zu sieben Tonnen Schäben pro Hektar. Dies ist ausreichend für die Produktion von 56 m³ Hanfstein. Zusätzlich erhält man rund zwei Tonnen Langfasern für die Textilproduktion und eine Tonne Kurzfasern, aus denen sich bis zu 26 m³ Hanfdämmstoff herstellen lassen. Zwei Tonnen Textilfasern ergeben eine Flächengutschrift von 0,646 ha. Hinzu kommt für 26 m³ Dämmstoff eine Flächengutschrift von 0,101 ha. Daraus ergibt sich unter Berücksichtigung der Koppelprodukte eine Netto-Flächeninanspruchnahme von 369 m² pro Tonne Hanfschäben und eine Flächeninanspruchnahme von rund 46 m² pro Kubikmeter Hanfstein.

11.2.1.2.1.1 Hanfsteinhäuser im Vergleich

Beim Bau eines Hanfsteinhauses werden die Außenwände eines Holz- oder Beton-Skelett-Baus mit einer 39 cm starken Hanfstein-Ausfachung konstruiert. Eine zusätzliche Dämmung ist aufgrund der hohen Dämmwirkung der Hanfsteine nicht erforderlich. Hanf-Kalk-Ziegelsteine haben zudem eine feuchteregulierende Wirkung und beugen Schimmel vor (Schönthaler, 2017 S. 3). Sie müssen allerdings mit atmungsaktiven Putzen verputzt werden. Neben den Außenwänden können auch die Innenwände (12 cm Hanfstein) und Unterböden/Estriche aus Hanfstein hergestellt werden.

Für den Vergleich von reinen Holzbauweisen und Holz-Hanfsteinhäusern wurden die je nach Bauweise benötigten Baustoffmengen für den Bau eines Einfamilienhauses mit Satteldach und einer Wohnfläche von 100 m² sowie Außenmaßen von 10x6 Metern berechnet. Für die vorgehängte Fassade wurde vereinfachend jeweils das gleiche Holz verwendet, das auch für die Konstruktion und alle übrigen Holzbauteile verwendet wurde, obwohl hierfür in der Praxis witterungsbeständige Hölzer wie Lärche bevorzugt werden. Für die Dämmung (Holzfaser oder Hanf) wurden folgende Dichten angenommen:

- Außenwanddämmung: 50 kg/m³ (Mindestbedarf)
- Aufsparrendämmung (10 cm): 180 kg/m³
- Zwischensparrendämmung (20 cm): 50 kg/m³ (Mindestbedarf)

In Tabelle 309 sind die Wand- und Fensterflächen des Beispielgebäudes dargestellt, die für die Mengenberechnung angenommen wurden.

Tabelle 309: Wand- und Fensterflächen eines Beispielreihenhauses

Flächen	Außenwände				Innenwände
	Süd	Nord	Ost	West	
Wandfläche (m²)	21,3	27,3	66,5	66,5	50,0
Fensterfläche (m²)	16,0	10,0	12,0	16,0	0,0

Quelle: Eigene Annahmen

Der Vergleich zeigt, dass Hanf als Baustoff den Flächenbedarf des Baustoffbedarfs eines kleinen Einfamilienhauses bereits dann reduziert, wenn lediglich die Wände eines Gebäudes in Holzrahmenbauweise mit Hanfstein konstruiert werden. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass keine zusätzliche Dämmung der Wände nötig ist. Wird als Dachdämmung zudem Dämmstoff aus Hanfstroh verwendet, reduziert sich der Flächenbedarf noch einmal deutlich.

Wurde der Hanf mit dem vorrangigen Ziel der Strohproduktion erzeugt (ca. 10 t/ha Stroh, kein Korn), reduziert der aus Hanfschäben und Kalk hergestellte Hanfstein den Flächenbedarf eines Holzrahmenbaus in Deutschland um rund 7 Prozent, wenn die Koppelprodukte ungenutzt bleiben. Nutzt man auch die Koppelprodukte der Bauholz- und Hanfschäbenproduktion, liegt der Flächenbedarf eines Holzrahmen-Hanfstein-Gebäudes um 11 Prozent unter dem eines klassischen Holzrahmenbaus. Nutzt man zudem eine Dachdämmung aus Hanf (hergestellt ohne Kornproduktion) anstelle einer Holzfaserdämmung, so reduziert sich der Flächenbedarf im Vergleich zu einem klassischen Holzrahmenbau sogar um 16 Prozent. Wird das Hanfstroh allerdings durch eine Kombinationsnutzung von Hanf mit Kornproduktion erzeugt, bringt Hanfstein in Deutschland im Vergleich zum klassischen Holzrahmenbau keine Steigerung der Flächeneffizienz. Eine Hanfdämmung führt dagegen zu einer erheblichen Steigerung der Flächeneffizienz.

Für das als Beispiel gewählte Einfamilienhaus in Holzrahmenbauweise werden rund 41 fm Bauholz (Fichte) benötigt. Für die erforderlichen 72 m³ Holzfaserdämmung kommt ein Bedarf von rund 17 fm Fichtenholz hinzu. In Massivholzbauweise werden bei einer Außenwandstärke von 30 cm und einer Außenwanddämmung von 14 cm rund 77 fm Bauholz sowie 11 fm Holz für die Dämmstoffproduktion benötigt. Wird das Gebäude nicht in Massivholzbauweise, sondern als Holzskelettbau mit Hanfsteinausfachung konstruiert, so werden rund 55 m³ Hanfstein und bis zu 35 fm Bauholz sowie rund 7,6 fm Holz für die Holzfaserdämmstoffproduktion erforderlich. In Tabelle 310 sind die Wald- und Ackerflächen dargestellt, die unter Berücksichtigung von Koppelprodukten für die Produktion der aufgewendeten, nachwachsenden Baustoffe benötigt werden.

Mit mehr als 10,1 Hektar ist der Flächenbedarf des Massivholzhauses deutlich größer als der Bedarf der übrigen Bauweisen. Im Vergleich zum Massivholzbau nimmt der Bau des Hauses in Holzrahmenbauweise 40 Prozent weniger Fläche in Anspruch. Durch die Kombination von Holz und Hanfstein kann der Flächenbedarf darüber hinaus um 0,7 bis 1,0 Hektar reduziert werden. Damit benötigt der Holz-Hanfsteinbau bis zu 16 Prozent weniger Produktionsfläche für Baustoffe als ein Holzrahmenbau und bis zu 50 Prozent weniger Produktionsfläche als ein Massivholzbau.

Tabelle 310: Flächenbedarf von Hanfsteinhäusern bei Strohnutzung im Vergleich (Flächenangabe in Hektar)

Kennwert	Massivholz-bau	Holzrahmen-bau	Holz-Hanf-steinbau I	Holz-Hanf-steinbau II
Flächenbedarf Holz	9,25	4,96	4,19	4,19
Flächenbedarf Hanfstein	0,00	0,00	0,73	0,73
Flächenbedarf Dämmung	0,88	1,14	0,53	0,22
Flächenbedarf Gesamt	**10,13**	**6,11**	**5,45**	**5,14**
Flächenbedarf rel. zu Massivholzbau	100%	60%	54%	51%
Flächenbedarf rel. zu Holzrahmenbau	166%	100%	89%	84%

Quelle: Eigene Berechnung

Wird der Hanf für eine Kombinationsnutzung angebaut und neben dem Stroh auch Korn erzeugt, entspricht die Flächeneffizienz von Hanfsteinhäusern ungefähr der von klassischen Holzrahmenhäusern.

Tabelle 311: Flächenbedarf von Hanfsteinhäusern bei Kombinationsnutzung im Vergleich (Flächenangabe in Hektar)

Kennwert	Massivholz-bau	Holzrahmen-bau	Holz-Hanf-steinbau I	Holz-Hanf-steinbau II
Flächenbedarf Holz	9,25	4,96	4,19	4,19
Flächenbedarf Hanfstein	0,00	0,00	1,46	1,46
Flächenbedarf Dämmung	0,88	1,14	0,53	0,37
Flächenbedarf Gesamt	**10,13**	**6,11**	**6,18**	**6,02**
Flächenbedarf rel. zu Massivholzbau	100%	60%	61%	59%
Flächenbedarf rel. zu Holzrahmenbau	166%	100%	101%	99%

Quelle: Eigene Berechnung

Der Flächenbedarf des Massivholzbaus beträgt im ersten Vergleich 100 Prozent. Die Berechnung zeigt, dass ein Holzrahmenbau im Vergleich zu einem Massivholzbau nur 60 Prozent der Fläche in Anspruch nimmt, während der Flächenbedarf eines Holz-Hanfsteinhauses (Variante I) nur 54 Prozent der Fläche benötigt. Noch weiter reduziert werden kann der Flächenbedarf der Dämmstoffproduktion, wenn die Dachdämmung ebenfalls aus Hanf hergestellt wird. In diesem Fall (Variante II) wird der Flächenbedarf im Vergleich zu einem Massivholzbau um 49 Prozent reduziert. Im Vergleich zu einem reinen Holzrahmenbau benötigt man für ein Holz-Hanfsteinhaus mit Hanfdämmung 16 Prozent weniger Produktionsfläche. Zusätzlich zu den nachwachsenden Rohstoffen werden für das Hanfsteinhaus jedoch rund 10 t Kalk benötigt.

11.2.1.2.2 Miscanthus

Miscanthus-Stroh wird, ähnlich wie Hanfschäben, für die Produktion leichter und wärmedämmender Baustoffe verwendet. So wird Miscanthus zur Herstellung von Dämmplatten, Schüttdämmungen, Spanplatten und Dachdeckungen eingesetzt (Pude, 2011). Aufgrund seiner guten Dämmwirkung wird Miscanthus auch als Zuschlagstoff im Lehmbau sowie für die Produktion von Dämmputzen verwendet. Unter anderem soll die besondere Porenstruktur von Miscanthus genutzt werden, um einen dünnschichtigen Hochleistungswärmedämmputz zu produzieren. Dabei wird die Entwicklung einer Rezeptur angestrebt, die mithilfe organischer Bindemittel die Herstellung eines Putzes ermöglicht, der nahezu zu 100 Prozent aus nachwachsenden Rohstoffen besteht (Projektträger Jülich, o. J.). Eine weitere Verwendungsmöglichkeit von Miscanthus ist die Herstellung von Leichtbetonsteinen und Wandelementen mit hoher Dämmwirkung. Nach Angaben eines Herstellers benötigt man für den Bau eines mittleren Einfamilienhauses aus Miscanthus (Außen- und Innenwände, Schüttdämmung und Estrich, Außen- und Innenputz) lediglich das „Erntegut von ca.1 ha“ (Schulte, o. J.). Angaben zu den Nutz- und Wohnflächen des Gebäudes sowie zu den Miscanthusanteilen der verschiedenen Baustoffe macht der Hersteller jedoch nicht, sodass ein direkter Vergleich von Holz- und Hanfbaustoffen mit Miscanthusbaustoffen hier nicht möglich ist. Grundsätzlich dürfte die Konstruktionsweise des Miscanthushauses aber der des beschriebenen Hanfsteinhauses ähnlich sein. Der Gesamtflächenbedarf der Baustoffproduktion dürfte somit knapp unter 5 Hektar liegen, da Miscanthus pro Hektar etwa 50 Prozent mehr Stroh (Trockenmasse) produziert.

11.2.1.2.3 Wiesengras

Aus Grasfasern können Dämmstoffe sowie holzfreie Terrassendielen und Fassadenelemente hergestellt werden. Nach Auskunft des Herstellers bestehen solche holzfreien Terrassendielen zu 75 Prozent aus Grasfasern und zu 25 Prozent aus Recycling-Kunststoffen. Vorzugsweise werden die Grasfasern mit Kunststoffen aus Industrieabfällen kombiniert, weil diese sauberer, geruchsärmer und sortenrein zu erhalten sind. Möglich ist aber auch eine Kombination mit Post-Consumer-Abfällen, wie z. B. Lebensmittelverpackungen. Grundsätzlich ließe sich der

Recycling-Kunststoff auch durch Milch- oder Maisbasierte Stoffe ersetzen, sodass das Endprodukt vollständig aus NawaRo und ohne Einsatz mineralölbasierter Bestandteile hergestellt wäre. Aus einem Wiesengrasertrag von ca. 4,1 t/ha aus extensiver Bewirtschaftung können rund 1,4 Tonnen Rohstoff für Terrassendielen gewonnen werden. Bei einem Laufmetergewicht von 2,7 kg und einer Profilbreite von 21 cm (Biowert Industrie GmbH, 2015) können damit allein auf Wiesengrasbasis ca. 556 lfm Terrassendielen erzeugt werden, die für eine Fläche von ca. 164 m² Terrassenboden ausreichen. Eine Terrasse mit einer Fläche von 100 m² nimmt somit eine Fläche von ca. 0,81 Hektar in Anspruch. Berücksichtigt man den dritten Schnitt, der jedoch in der Regel für andere Zwecke verwendet wird (z. B. Verfütterung), reduziert sich die Flächeninanspruchnahme auf ca. 0,44 Hektar. Bei intensiver ökologischer Bewirtschaftung und vier Schnitten, sinkt sie rechnerisch schließlich auf ca. 0,36 Hektar. Durch Zugabe des Recycling-Kunststoffanteils vergrößert sich die Terrassendielenproduktion um ein Drittel, wodurch der Flächenbedarf auf 0,27 bis 0,61 Hektar pro 100 m² Terrassenboden sinkt.

Tabelle 312: Hektarertrag Terrassendielen aus Wiesengras

Einheit	Gründlandnutzung		
	Biotoppflege, extensiv	Dreischürig, ökologisch	Vierschürig, ökologisch
Tonnen (t TM) [1) 2)]	3,1	5,7	7,0
Laufende Meter (lfm) [2)]	573	1.060	1.290
Terrassenbodenfläche (m²) [2)]	123	228	277
Terrassenbodenfläche inkl. RKS (m²) [2)]	164	304	370

RKS=Recycling-Kunststoffe
Quelle: Eigene Berechnung nach (1) KTBL, 2015/2018 und (2) Biowert Industrie GmbH, 2015

Eine energetische Nutzung der Produktionsreststoffe kann den Flächenbedarf darüber hinaus noch weiter senken, wenn auch nur in relativ geringem Umfang.

Tabelle 313: Flächenbedarf der Produktion von Terrassendielen (m²/m²)

Bewirtschaftung	Flächenbedarf ohne Recycling-Kunststoff-anteil (m²/m²)	Flächenbedarf inkl. Recycling-Kunststoff-anteil (m²/m²)
Biotoppflege, extensiv	~ 81	~ 61
Dreischürig, ökologisch	~ 44	~ 33
Vierschürig, ökologisch	~ 36	~ 27

Quelle: Eigene Berechnung nach KTBL (2015/2018) und Biowert Industrie GmbH (2015)

11.2.1.2.4 Bambus

Obwohl Bambus überwiegend aus Lateinamerika und Asien importiert werden muss, ist Bambus aufgrund seiner hohen Hektarerträge und besonderen Eigenschaften ein immer stärker

nachgefragtes Baumaterial. Es vereint eine hohe Druckfestigkeit mit einer hohen Zugfestigkeit und einem geringen Gewicht. Bambus wird daher in den Tropen schon lange für den Bau von Tragkonstruktionen verwendet. Außerhalb der Tropen ist es bisher noch kaum verbreitet, könnte sich aber aufgrund seiner besonderen Eigenschaften auch dort für den Einsatz im Holzrahmenbau bei kleineren Gebäuden anbieten (Mortice, 2019).

Auf dem Markt erhältlich sind bereits viele verschiedene Arten von Bambus-Bodenbelägen, sowohl für den Innenraum als auch für Terrassen. Bambus ist härter als die meisten Holzbeläge und verträgt viel Feuchtigkeit. Die klimatischen Bedingungen in Deutschland erfordern bei der Verwendung im Außenbereich jedoch eine hohe Qualität der Verarbeitung. Im Innenraum ist unter anderem zu beachten, dass nicht alle Bambusböden mit Fußbodenheizungen kombiniert werden können.

Der Flächenbedarf pro Tonne Baustoff ist im Vergleich zu Holz wesentlich geringer. Im globalen Durchschnitt liegt der Bambusertrag gut geführter Plantagen bei rund 25 t TM pro Hektar und Jahr liegt, besonders ertragreiche Bambusarten können jährlich sogar mehr als 30 t TM pro Hektar liefern (NL Agency, 2013, S. 5).

Der Materialbedarf pro Quadratmeter liegt im Innenraum z. B. bei ca. 11,5 kg Bambusmassivparkett bei einer Lieferfeuchte von 8 bis 9 Prozent (Durafloor Werner GmbH, o. J.), im Außenbereich z. B. bei ca. 23 kg Terrassendielen (MOSO International B.V., o. J.)

Tabelle 314: Flächenkennwerte der Bambusparkett- und Bambusterrassendielenbodenproduktion

Kennwert (Einheit)	Innenraumparkett [1)]	Terrassendielenboden [2)]
Terrassenbodenertrag (m²/ha Anbaufläche)	~ 2.390	1.200
Anbauflächenbedarf (m²/m² Bodenfläche)	~ 4,2	~ 8,5

Quellen: (1) Eigene Berechnung nach NL Agency, 2013, und Durafloor Werner GmbH, o. J. (2) Eigene Berechnung nach NL Agency, 2013, und MOSO International B.V., o. J.

Die Produktion von Bambusterrassendielenböden weist mit einer Anbaufläche von ca. 8,5 m²/m² nur 11 bis 32 Prozent des Flächenbedarfs von Wiesengrasterrassendielen auf. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass der Flächenbedarf von Produkten aus Wiesengras im Vergleich zu vergleichbaren Produkten aus anderen nachwachsenden Rohstoffen kein entscheidendes Auswahlkriterium sein muss. Wo eine extensive Beweidung z. B. aus wirtschaftlichen Gründen nicht möglich ist, muss eine ökologische Pflege artenreicher Wiesen auf andere Weise erfolgen. Eine wirtschaftliche Nutzung des Schnittgutes als Baustoff kann zur Finanzierung solcher Landschaftspflegemaßnahmen beitragen. Die Flächenkonkurrenz ist in solchen Fällen, in denen es darum geht, geeignete Pflegemaßnahmen überhaupt finanzieren zu können, kaum von Bedeutung. Daher müssen bei der Auswahl von Baumaterialien nach ökologischen Kriterien auch solche Aspekte berücksichtigt werden.

11.2.2 Dämmstoffe

11.2.2.1 Verbrauch

Infolge der Energiewende hat der Bedarf an Dämmstoffen für Gebäude erheblich zugenommen. Im Jahr 2011 wurden bereits 28,4 Millionen Kubikmeter verkauft, was rund 0,35 m³ pro Einwohner entspricht (FNR, 2018b S. 19). Der Marktanteil der Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen lag mit rund 2,0 Millionen Kubikmetern im Jahr 2011 bei sieben Prozent (FNR, 2014). Im Jahr 2014 erreichte die Nachfrage 35,6 Mio. m³ und übertraf den Wert des Jahres 2011 damit um 25 Prozent (Branchenradar, 2016). Im Jahr 2016 betrug sie 36,2 Millionen Kubikmeter und für das Jahr 2017 rechnet man mit einem Volumen von 36,8 Millionen Kubikmetern. Der Nachfragezuwachs war 2016 und 2017 vor allem durch den Neubau angeschoben (Branchenradar, 2018). Für das Jahr 2017 ergab sich somit ein Verbrauch von 0,45 m³ pro Einwohner. Die Sanierungsquote liegt in Deutschland relativ konstant bei rund einem Prozent des Gebäudebestandes. Das von der Politik angestrebte Ziel liegt bei 2,5 Prozent (Riering, 2014). Würde dieses Ziel erreicht, könnte der Dämmstoffbedarf deutlich ansteigen.

Im Segment der Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen haben Holzfaserdämmstoffe die größte Bedeutung. Im Jahr 2011 lag ihr Anteil bei über 50 Prozent, gefolgt von Cellulosedämmstoffen mit 42 Prozent. Hanfdämmstoffe hatten im Jahr 2011 einen Anteil von rund 5,0 Prozent (FNR, 2018b S. 19). Alle sonstigen nachwachsenden Rohstoffe kamen zusammen auf 2,8 Prozent (vgl. Abbildung 127).

Insgesamt wurden 1,04 Mio. m³ Holzfaserdämmstoff, 0,85 Mio. m³ Cellulosedämmstoff und 0,14 Mio. m³ sonstige Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen verkauft (FNR, 2014 S. 706). Weitere Rohstoffe für die Herstellung von Dämmstoffen sind Flachs, Jute, Wiesengras, Stroh, Schilf, Kork und Schafswolle.

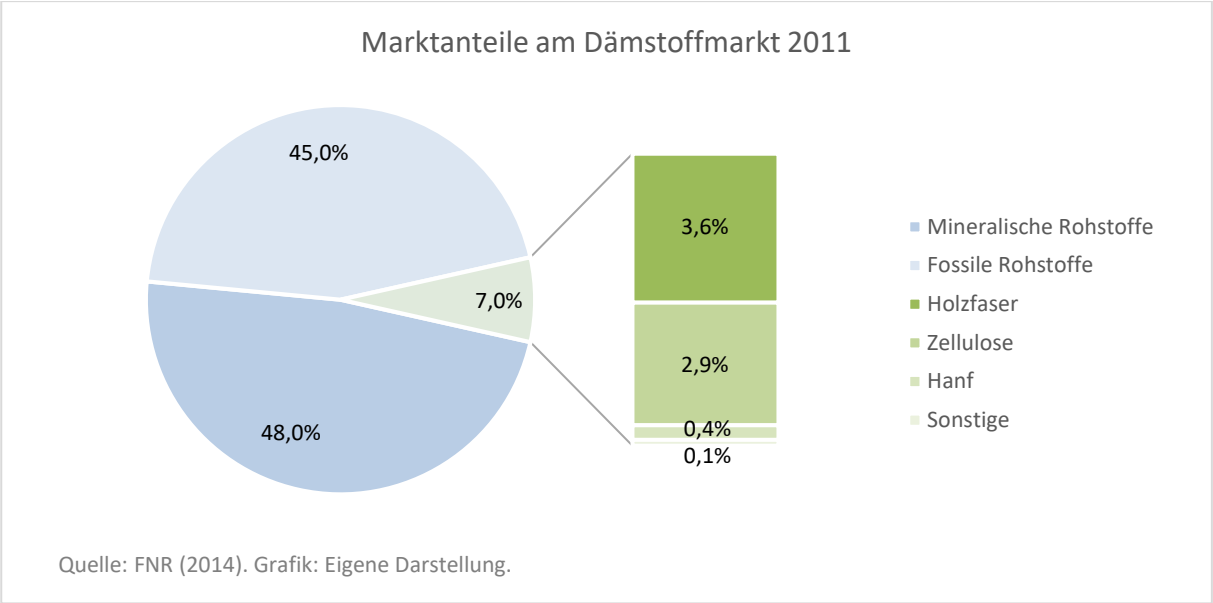


Abbildung 127: Anteile verschiedener Rohstoffe am Gesamtmarkt für Dämmstoffe 2011

11.2.2.2 Bedarf

Im Jahr 2016 wurden in neuen Wohngebäuden 235.658 Wohnungen mit 105,6 Quadratmetern Wohnfläche pro Wohnung fertiggestellt. Geht man von einem Dämmstoffbedarf von ca. 0,20 bis 0,45 m³ pro Quadratmeter Wohnfläche aus (vgl. Tabelle 292) und schätzt den Bedarf über die Baufertigstellungen, so ergibt sich daraus ein Dämmstoffbedarf von 21,1 bis 47,5 m³ pro Wohnung. Insgesamt ergäbe dies einen Bedarf von rund 5,0 bis 11,2 Mio. m³ pro Jahr. Würde die Zahl der fertiggestellten Neubauwohnungen bei unveränderter Wohnfläche pro Wohnung, wie politisch angestrebt, auf 350.000 Wohnungen pro Jahr erhöht, stiege der jährliche Dämmstoffbedarf auf 7,2 bis 16,6 Mio. m³ an. Dies dürfte einen Anstieg von rund 36 Mio. m³ auf rund 39 Mio. m³ erwarten lassen. Geht man zudem von einer Verdopplung der Sanierungsquote auf mehr als zwei Prozent aus, dürfte der Bedarf infolgedessen um 20 bis 30 Mio. m³ ansteigen. Der künftige Bedarf dürfte somit wahrscheinlich zwischen den heutigen 36 Millionen Kubikmetern und möglichen 70 Millionen Kubikmetern pro Jahr liegen, was rund 0,4 bis 0,9 Kubikmetern pro Person und Jahr entspricht.

11.2.2.3 Rohstoffe

Bei den nachwachsenden Rohstoffen, die für die Herstellung von Dämmstoffen genutzt werden, handelt es sich vor allem um Holz, Altpapier, Hanf, Flachs, Jute, Wiesengras, Stroh, Schilf, Kork und Schafswolle. Möglich ist aber auch die Herstellung aus anderen Reststoffen wie z. B. Baumrinde (Kain, 2013). Viele der „als nachwachsend bezeichneten Dämmstoffe weisen 5 bis 15 Prozent Anteile an nicht nachwachsenden Zusatzstoffen auf. Diese Zusätze werden unter anderem als Brandschutzmittel (z.B. Aluminiumsulfat), als Feuchteschutzmittel (z.B. Paraffin) oder als Stützfasern (z.B. Polyesterfasern) benötigt.“ (Becker, et al., 2014 S. 9) Den hier dargestellten Hanf- und Flachsdämmstoffen werden Stützfasern aus Maisstärke oder

Kartoffelstärke zugefügt. Diese haben einen Anteil zwischen neun und zwölf Prozent und sind biologisch abbaubar. Hinzu kommen Flammschutzmittel mit einem Anteil von drei bis vier Prozent (z. B. Soda). Aufgrund des erwarteten Rückgangs der Anteile von Nadelbäumen am Baumbestand dürften alternative Rohstoffpflanzen wie Hanf und Flachs für die Dämmstoffproduktion weiter an Bedeutung gewinnen.

11.2.2.4 Herstellung

11.2.2.4.1 Holzfaserdämmstoffe

Zur Herstellung von Holzfaserdämmstoffen wird aufgrund der Fasereigenschaften bevorzugt Nadelholz (v. a. Fichte, Tanne, Kiefer) eingesetzt (FNR, 2014 S. 692), in der Regel Schwachholz aus Durchforstungen oder Produktionsreste (Sägenebenprodukte (SNP)). Diese Rohmaterialien werden zu Fasern zerkleinert und zu Dämmplatten verarbeitet, die zu 95 Prozent aus Holzfasern bestehen. Dabei werden zwei unterschiedliche Verfahren angewendet. Beim Trockenverfahren zur Herstellung von formstabilen und druckbelastbaren Holzfaserdämmplatten „werden die Fasern direkt nach dem Aufschlussprozess auf die für den Beleimungsprozess notwendige Restfeuchte getrocknet und anschließend in einem Beleimkanal oder -turm mit dem Bindemittel – in der Regel ca. 4 % PUR-Harz – geleimt. [...] Bei der Herstellung von flexiblen Holzfaserdämmplatten im Trockenverfahren werden, nach der Trocknung der Fasern mittels Stromrohrtrockner auf die gewünschte Feuchte, die Holzfasern mit textilen Bindefasern gemischt.“ (VHD, 2018) Beim Nassverfahren werden vor allem die Bindekräfte des im Holz enthaltenen Lignins genutzt. Dabei wird „das Holz durch thermo-mechanische Verfahren zu Fasern aufgeschlossen, und anschließend der Faserkuchen unter Hitze zum Abbinden gebracht“. (VHD, 2018)

11.2.2.4.2 Cellulosedämmstoffe

Die in Papier enthaltene Cellulose ist in Deutschland einer der am meisten wiederverwendeten Rohstoffe und bietet sich daher für die Herstellung von Dämmstoffen an. Cellulosedämmstoffe werden deshalb hauptsächlich aus Altpapier hergestellt. Dabei wird das Altpapier „zerfasert und ggf. mit Zusatzstoffen für besseren Brandschutz oder gegen Schimmel- oder Schädlingsbefall ergänzt. Dieser Dämmstoff kann einerseits als Einblaszellulose in Dämmschalungen eingeblasen werden oder durch Zugabe von Wasser als Bindemittel, feucht aufgeschüttet (Decke, Wand, etc.).“ (FNR, 2014 S. 692)

11.2.2.4.3 Hanfdämmstoffe

Bei der Herstellung von Hanfdämmstoffen werden, je nach Dämmstoff, nur die Fasern oder das gesamte Stroh einschließlich der Schäben zu Dämmstoffmatten oder Schütt- und Stopf-

dämmstoffen verarbeitet. Die meisten Hersteller verwenden nur die Faseranteile des Hanfstrohs. „Der Gesamtfasergehalt des Hanfes variiert zwischen 28 und 35 %. Die Faserausbeute nach dem Faseraufschluss schwankt dahingegen zwischen 18 und 25 %." (Graf, et al., 2005 S. 10) Neuere technische Entwicklungen erlauben aber auch die Verarbeitung des gesamten Strohs. Dies ermöglicht deutlich höhere Dämmstofferträge pro Hektar. Zur Stabilisation enthalten Flachsdämmstoffe acht bis 10 Prozent Maisstärkefasern. Als Brandschutz wird meist Soda genutzt, das vier Prozent des Gesamtgewichts ausmacht.

11.2.2.4.4 Flachsdämmstoffe

Für die Herstellung von Flachsdämmstoffplatten werden aus den Kurzfasern in einer Vliesstoffkrempel dünne Faserbahnen gebildet, wobei die Fasern mechanisch verfilzt werden. Die einzelnen Bahnen werden anschließend zu verschieden dicken Dämmplatten geschichtet, durch Bindemittel oder Stützfasern verbunden und in geeignete Formate zugeschnitten. (FNR, 2017 S. 26) Stabilisiert werden die Platten meist mit bis zu neun Prozent Maisstärkefasern. Bei einigen Produkten werden an ihrer Stelle Polyesterfasern verwendet. Diese sind im Gegensatz zu Maisstärkefasern nicht kompostierbar. Eine vollständige Verarbeitung des gesamten Strohs wie im Falle des Hanfs ist bisher nicht bekannt.

11.2.2.4.5 Wiesengrasdämmstoffe

Für die Herstellung von Wiesengrasdämmstoffen wird regionaler Grasschnitt genutzt. Vorzugsweise werden der erste und der zweite Schnitt verwendet, wobei der zweite Schnitt meist mehr geeignetes Fasermaterial liefert. Die Faser wird nach der Silierung von den übrigen Bestandteilen (v. a. Proteine) getrennt. Die übrigen Bestandteile werden in der Biogasanlage vergoren. Pro Tonne Trockenmasse erhält man ca. 500 kg Fasern aus denen rund 500 kg Cellulosedämmstoff hergestellt werden. Der Feuchtegehalt der Cellulose liegt bei 10 Prozent. Die Grasfaserdämmstoffe bestehen ausschließlich aus Grasfaser-Cellulose. Je 100 kg Cellulose werden lediglich vier Kilogramm Flammschutz hinzugegeben, weshalb der Dämmstoff nach Herstellerangaben prinzipiell kompostierfähig wäre. Der Cellulose-Dämmstoff ist viermal ohne Qualitätsverlust recycelbar. (Schwinn, 2015)

11.2.2.4.6 Strohdämmstoffe

Strohdämmstoff ist ein selten genutzter aber einfach herstellbarer Dämmstoff. „Baustroh besteht aus landwirtschaftlich hergestellten Ballen aus naturbelassenem Getreidestroh. Es bedarf keinerlei Zusätze, um sicher als Wärmedämmung eingesetzt zu werden" (BauStroh GmbH, 2016). „Für das Pressen von HD-Ballen eignen sich ausschließlich Kolbenpressen; mit den kolbenlosen Pressen werden Rundballen hergestellt" (BauStroh GmbH, 2017). Die Strohballen werden anschließend so eingesetzt, dass die Schnürung auf den Längsseiten der Bal-

len auf der Strohoberfläche sichtbar ist und die Halme größtenteils senkrecht zum Wärmestrom ausgerichtet sind. „Baustroh kann in Wänden, Decken und Dächern verbaut werden. Zahlreiche Bekleidungen sind möglich, sowohl aus Plattenwerkstoffen oder Holz, aber auch direkte Verputzungen innen wie außen. Auch die Außendämmung bestehender Gebäude ist möglich.“ (BauStroh GmbH, 2018) Die Rohdichte von Baustroh-Dämmstoffen liegt im Bereich von 85-115 kg/m³ (BauStroh GmbH, 2017).

11.2.2.4.7 Rindendämmstoffe

Mit Anteilen zwischen 10 und mehr als 20 Prozent eines Baumstammes stellen die Rinden von Nadelhölzern und Eichen ein beachtliches Rohstoffpotenzial dar. Aus dem Rindenmaterial können Dämmplatten hergestellt werden, indem das Material zerkleinert und verklebt wird. Die größte Partikelabmessung des gehackten Materials wird auf 30 mm begrenzt (Kain, et al., 2012). Die Rindenpartikel werden anschließend mit einem flüssigen Harnstoff-Formaldehyd-Klebstoff vermischt. (Kain, et al., 2012)

11.2.2.5 Koppelprodukte

Die Flächeneffizienz der Dämmstoffproduktion aus nachwachsenden Rohstoffen hängt in hohem Maße davon ab, ob die genutzte Rohstoffpflanze komplett genutzt werden kann - entweder vollständig für die Dämmstoffproduktion oder zur Herstellung von Dämmstoffen und wertvollen Koppelprodukten. Im Falle der Holzfaserdämmstoffe handelt es sich in der Regel um ein Koppelprodukt der Schnittholzproduktion. Bei der Holzproduktion fällt zudem Rinde an, die ebenfalls als Rohstoff für die Dämmstoffproduktion genutzt werden kann. Dämmstoffe aus einheimischer Baumrinde werden im Handel jedoch noch nicht angeboten. Flachsdämmstoffe können ein Koppelprodukt der Flachsfaserproduktion oder der Leinölgewinnung sein. In der Regel werden nur die Kurzfasern für die Dämmstoffproduktion verwendet, die als Nebenprodukt der Textilfaserproduktion anfallen. Grundsätzlich kann aber auch der gesamte Faseranteil des Faserleins für die Dämmstoffproduktion genutzt werden. Da die Stroherträge des Öllein deutlich niedriger als die des Faserleins sind, bietet es sich hier an, die gesamten Faseranteile zu verarbeiten. Bei der Fasergewinnung fallen Schäben an, die z. B. zur Produktion von Spanplatten, Brennstoffen (Briketts) oder als Zuschlagstoff für die Lehmputzproduktion genutzt werden können. Hanf bietet ebenfalls eine Vielzahl von Nutzungsmöglichkeiten. Baut man Hanf vorrangig zur Dämmstoffproduktion an, so liefert er für die Dämmstoffproduktion mit bis zu 12 Tonnen Stroh pro Hektar die höchsten Rohstofferträge aller hier dargestellten Rohstoffpflanzen. Wird Hanf zugleich zur Kornproduktion genutzt, sind zwar die Stroherträge mit vier bis fünf Tonnen pro Hektar nur etwa halb so hoch, doch erhält man neben dem Stroh wertvolle Hanfsamen, aus denen sich Speiseöl, Presskuchen oder Mehl gewinnen lässt. Der Pressku-

chen kann als Lebensmittel oder als Futtermittel verwendet werden. Nutzt man nur den Faseranteil des Strohs für die Dämmstoffproduktion, erhält man Schäben, die beispielsweise gut zu Spanplatten verarbeitet oder als Brennstoff genutzt werden können

Bei Wiesengrasdämmstoffen fallen als mögliche Koppelprodukte sowohl Reststoffe (v. a. Proteine) der Cellulosegewinnung als auch Futtermittel aus möglichen weiteren Schnitten (3. und 4. Schnitt) an. Die Reststoffe können als Biogassubstrat genutzt werden. Extensiv bewirtschaftete Wiesen (ein- bis dreischürig) dienen zudem als wertvolle Insektenweide. Die Nutzungsmöglichkeiten vorhandener Wiesen, Nutzungskonkurrenzen bei ackerbaulichen und forstwirtschaftlichen Produkten, mögliche Koppelprodukte und ihre verarbeitenden Unternehmen sind einige der Kriterien, nach denen die Auswahl geeigneter Rohstoffpflanzen getroffen werden kann. Sind regional keine Abnehmer für die Koppelprodukte vorhanden, können weite Transportwege die Umweltbilanz erheblich beeinträchtigen. Ein weiteres Kriterium ist die ökologische Vielfalt. So bietet es sich zur Vermeidung von Monokulturen an, bei der Dämmstoffherstellung Hanf- und Flachsfasern zu kombinieren, wie es bei vielen Flachsdämmstoffen bereits heute getan wird.

Getreidestroh ist als Koppelprodukt der Getreidekornproduktion ein gefragter und vielseitig verwendbarer Rohstoff, aus dem neben Dämmstoffen auch Festbrennstoffe, Flüssigbrennstoffe, Reinigungsmittel, Zellstoff und andere Produkte hergestellt werden können.

Tabelle 315: Mögliche Koppelprodukte der Dämmstoffproduktion

Rohstoffpflanze	Hauptprodukt	Koppelprodukte	Mögliche Verwendung der Koppelprodukte (Beispiele)
Nadelbäume	Schnittholz	Schwach- und Restholz, Rinde	Dämmstoff, Holzstoff, Zellstoff, Festbrennstoffe, Kleb- und Verbundstoffe, Rindenmulch, etc.
	Dämmfasern	Rinde	Dämmstoff, Kleb- und Verbundstoffe, Rindenmulch, etc.
Hanf, Fasernutzung	Dämmstroh	-	-
	Dämmfasern	Schäben	Spanplatten, Schüttdämmstoffe, Festbrennstoffe
	Textilfasern	Kurzfasern, Schäben	Dämmstoff, Spanplatten, Festbrennstoffe
Hanf, Kombinations-nutzung	Dämmstroh	Korn	Hanfkorn, Hanföl und Hanfmehl, Futtermittel
	Dämmfasern	Korn, Schäben	Hanfkorn, Hanföl und Hanfmehl, Futtermittel, Spanplatten, Schüttdämmstoffe, Festbrennstoffe
Hanf als Zwischenfrucht	Dämmfasern	Schäben	Spanplatten, Festbrennstoff
	Textilfasern	Kurzfasern, Schäben	Dämmstoff, Spanplatten,
Faserlein	Dämmfasern	Schäben	Spanplatten, Festbrennstoff Lehmputzzuschlagstoff

	Textilfasern	Werg, Kurzfasern, Schäben	Textilien, Dämmstoffe, Spanplatten, Festbrennstoffe Lehmputzzuschlagstoff
Öllein	Speiseöl	Expeller, Fasern, Schäben	Viehfutter, Textilien, Dämmstoffe, Spanplatten, Festbrennstoffe Lehmputzzuschlagstoff
	Leinöl für stoffliche Nutzung	Expeller, Fasern, Schäben	Viehfutter, Textilien, Dämmstoffe, Spanplatten, Festbrennstoffe Lehmputzzuschlagstoff
Wiesengras	Cellulose	Proteine etc.	Biogassubstrat
Getreide	Korn	Stroh	Dämmstoff
	Stärke	Stroh, Weizenkleber	Dämmstoff, Festbrennstoffe, Ethanol, Zellstoff, Einstreu, Viehfutter
	Ethanol	Stroh, Weizenschlempe	Dämmstoff, Festbrennstoffe, Ethanol, Zellstoff, Einstreu, Viehfutter

Quelle: Eigene Zusammenstellung

11.2.2.6 Nutzungskonkurrenzen

Nach Einschätzung der DUH (2016) bestehen „Nutzungskonkurrenzen zwischen der Verwendung als Dämmstoff und anderen Verwendungsarten [..] entgegen verschiedener Bedenken bei vielen Naturdämmstoffen nicht. Holzfaserdämmplatten werden zum Beispiel aus Schwach- und Resthölzern von Fichten oder Kiefern hergestellt. Schafwolle ist weltweit mangels anderer Nutzungen überreichlich vorhanden, es sollte jedoch auf eine regionale Herkunft der Rohstoffe geachtet werden.“ (DUH, 2016 S. 6) Zieht man jedoch in Betracht, dass der Rohstoff für die Produktion von Holzfaserdämmstoffen auch für die Herstellung von Zellstoff, Holzstoff, Viskose, OSB, Faser- und Spanplatten geeignet ist, können sich mit einer fortschreitenden Rohstoffwende auch hier erhebliche Nutzungskonkurrenzen entwickeln. Dies gilt ebenso für das Stroh bzw. die Fasern von Hanf und Lein sowie für Wiesengras und Baumrinden.

11.2.2.7 Erträge von Rohstoffpflanzen der Dämmstoffproduktion

Die wichtigsten für die Dämmstoffproduktion geeigneten Rohstoffpflanzen liefern pro Hektar zwischen 0,8 und 12,0 Tonnen Rohstoff für die Dämmstoffproduktion. Je nach Pflanzenart und Verwendung können zugleich Rohstoffe für diverse Koppelprodukte gewonnen werden. Hanf- und Flachsdämmstoffe werden häufig mit Dichten von 30 bis 50 kg pro Kubikmeter angeboten, Holzfaserdämmstoffe dagegen überwiegend mit Dichten zwischen 50 und 200 kg pro Kubikmeter. Nachfolgend wurden deshalb die Flächenkennwerte ermittelt, die sich bei den üblichen Dichten ergeben. Für herkömmliche Wärmedämmverbundsysteme sind Dämmstoffe mit Dichten unter 100 kg/m³ in der Regel ungeeignet. Mit Blick auf eine das Recycling begünstigende sortenreine Trennung der Rohstoffe nach dem Nutzungsende, wie sie beispielsweise nach dem Cradle-to-Cradle-Prinzip angestrebt wird, sind jedoch Konstruktionen vorteilhaft, die das Verkleben von unterschiedlichen Materialien unnötig machen, wie z. B. das Fassadensystem

„lambdaplus“. Solche Konstruktionen ermöglichen es zudem, weiche mattenförmige Dämmstoffe oder Einblasdämmstoffe auch als Außenwanddämmung zu verwenden. Grundsätzlich ist mit solchen Systemen jeder Dämmstoff für die Fassadendämmung geeignet, der auch als Zwischensparrendämmung verwendet werden kann (lambdaplus GmbH, 2018). Dies ermöglicht bei der Fassadendämmung die Wahl flächeneffizienter Dämmstoffe mit geringen Dichten.

11.2.2.7.1 Fichte

Fichte liefert rund fünf Tonnen Rohholz pro Hektar und Jahr, davon rund drei Tonnen entrindetes Stammholz und rund zwei Tonnen Astholz bzw. Schwachholz und Rinde. Das Stammholz lässt sich bei einem Fasergehalt von 92 bis 95 Prozent zu rund 3,2 Tonnen Dämmstoff mit einer Restfeuchte von 14 Prozent verarbeiten. Bei einer Dichte von 50 kg/m³ ergibt dies rund 68 m³ Dämmstoff. Bei einer Dichte von 190 kg/m³ liegt der Ertrag bei rund 19 m³/ha. In der Regel ist es jedoch sinnvoller, das wertvolle Stammholz zu Schnittholz bzw. Bauholz zu verarbeiten und lediglich Verschnitt, Schwach- und Restholz als Rohstoff für die Dämmstoffproduktion zu nutzen. So erhält man pro Hektar rund 5,7 m³ Bauholz und 14 m² Dämmstoff.

11.2.2.7.2 Kiefer

Dämmstoffe aus Kiefernholz werden ebenfalls hauptsächlich aus Verschnitt bzw. Restholz hergestellt. Bei einer Dichte von 50 kg/m³ erhält man bei einer Nutzung des Vollertrags rund 44 m³/ha. Nutzt man nur Verschnitt sowie Schwach- und Restholz, erhält man neben dem Schnittholzertrag von 3,3 m³/ha rund 8,8 m³ Dämmstoff pro Hektar.

11.2.2.7.3 Hanf

Je nach Zielsetzung liefert der Hanfanbau unterschiedliche Erträge. Liegt der Fokus auf der Strohproduktion, werden in Deutschland nach Angaben der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) Erträge zwischen sieben und neun Tonnen Hanfstroh pro Hektar erzielt (Graf, et al., 2005 S. 10). Nach Angaben der FNR erreicht Hanf „eine Masse von 10-12 t pro ha“ (FNR, 2018e). In Thüringen lieferten geprüfte Hanfsorten im Mittel der Jahre und Standorte Röststroherträge von ca. 10 t/ha. „Bei Kombinationsnutzung sind 0,5 bis 1 t/ha Körner und 4 bis 5 t TM/ha Stroh realisierbar“ (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2016b). Ein Durchschnittsertrag von rund fünf Tonnen pro Hektar wird nach Herstellerangaben auch im bayerischen Nördlingen erzielt. Legt man den Schwerpunkt auf die Dämmstoffproduktion, erhält man somit bei einer vollständigen Nutzung des Strohs Erträge von 7 bis 12 t/ha, was bei einer durchschnittlichen Dämmstoffdichte von 38 kg/m³ rund 197 bis 322 m³ Dämmstoff pro Hektar entspricht. Im Mittel wurde von einem Ertrag von rund 10 t/ha ausgegangen. Der Anteil der Hanffasern am fertigen Dämmstoff liegt bei rund 85 bis 90 Prozent. Berücksichtigt man die Zuschlagsstoffe Maisstärkefasern und Soda, haben diese aufgrund der geringen Flächeninanspruchnahme der Maisstärkeproduktion nur geringen Einfluss auf den Flächenbedarf (vgl.

Abbildung 150). Bei einem Hanfstrohertrag von 10,0 t/ha ergibt sich daher in der Summe ein Ertrag von rund 274 m³ Dämmstoff pro Hektar.

Bei einer Kombinationsnutzung zur Produktion von Dämmstoff und Korn erhält man neben dem Kornertrag von 0,75 t/ha rund 116 bis 144 m³ Dämmstoff pro Hektar. Ist das Ziel der Kombinationsnutzung die Produktion von Textilfasern als Hauptprodukt und die von Dämmstoff und Korn als Nebenprodukte, so erhält man jeweils eine Tonne Langfasern. 0,7 t Korn, rund 14 m³ Dämmstoff sowie 3,4 Tonnen Schäben, die sich für die Produktion von Spanplatten, als Brennstoff oder als Zuschlagstoff für Baustoffe aus Beton nutzen lassen.

Baut man Hanf nicht als Hauptfrucht, sondern als Zwischenfrucht an, kann man mit einem Strohertrag von 2,5 t/ha rechnen (Borchert, 2015), was rund 72 m³ Dämmstoff pro Hektar entspricht. Im Zwischenfruchtanbau ist die Flächeninanspruchnahme minimal.

Bei einer Dichte der Dämmstoffplatten von 100 kg/m³ reduziert sich der Dämmstoffertrag auf folgende Werte:

- Priorität Dämmstoffproduktion: 104 m³/ha
- Kombinationsnutzung Dämmstoff und Korn: 55 m³/ha
- Kombinationsnutzung Textilfaser, Korn, Dämmstoff und Schäben: 5 m³/ha
- Zwischenfruchtanbau: 28 m³/ha

11.2.2.7.4 Flachs

Wie im Falle des Hanfanbaus kann man auch beim Flachsanbau unterschiedliche Ziele vorgeben. Die Röststroherträge von Faserlein liegen zwischen 5,5 und 7,5 t pro Hektar und Jahr (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2009a). Das Stroh weist einen Langfaseranteil von 14 bis 21 Prozent und einen Werganteil von 7 bis 15 Prozent auf (Gesamtverband Leinen, o. J.). Der Schäbenanteil liegt bei ca. 72 Prozent (von Gleich, 1990 S. 2). Nutzt man den gesamten Faseranteil (Langfasern und Werg), so erzielt man Dämmstofferträge von 1,8 (1,5 – 2,1) t/ha. Bei einer Dichte von 30 kg/m³ lassen sich daraus ohne Zuschlagstoffe 61 (50 – 70) m³ Dämmung herstellen. Der Flachsanteil an Flachsdämmstoffen beträgt in der Regel 88 Prozent. Einschließlich der Zuschlagstoffe (Stärkefasern und Flammschutz) lassen sich somit insgesamt bis zu 72 (59 – 83) m³ Dämmstoff pro Hektar produzieren. Nutzt man die Langfasern für die Produktion von Textilien und nur die übrigen Fasern (Werg/Kurzfasern) für die Dämmstoffproduktion, so erhält man pro Hektar im Mittel 1,0 t Langfasern, 28 m³ Dämmstoff und 4,7 t Schäben für Spanplatten. Der Kornertrag von modernen Faserleinsorten liegt mit ca. einer halben Tonne pro Hektar deutlich unter dem Kornertrag von Öllein. Höhere Kornerträge liefert z. B. die seltenere Sorte Ötztaler Faserlein. Im Kornertrag erreicht sie ungefähr die Hälfte der Ölleinsorten, ihr Faserertrag fällt jedoch deutlich niedriger aus als bei modernen Faserleinsorten (AGES, 2015).

Baut man hingegen Ölleinsorten zur Leinölproduktion an, liegt das Verhältnis von Korn zu Stroh etwa bei 1:1,5 (Graf, et al., 2005 S. 6). Im konventionellen Anbau kann man mit einem Kornertrag von 1,5 bis 2,0 t/ha rechnen (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2016a). Der Strohertrag beträgt somit rund 2,6 (2,2 – 3,0) t/ha. Der Gesamtertrag liegt dann im Mittel bei 0,6 t Leinöl, 1,1 Presskuchen, 0,7 t Fasern und 1,9 t Schäben. Aus den Fasern lassen sich rund 29 m³ Dämmstoff mit einer Dichte von 30 kg/m³ herstellen.

Im ökologischen Anbau werden Erträge von rund 1,0 t bis 1,5 Tonnen Korn erzielt (Gruber, et al., 2007 S. 39). Der Strohertrag wird demzufolge auf 1,5 bis 2,3 t/ha geschätzt. So erhält man im Mittel etwa 0,4 t Leinöl, 0,9 t Presskuchen, 0,5 t Fasern und knapp 1,4 t Schäben pro Hektar. Aus den Fasern lassen sich rund 21 m³ Dämmstoff mit einer Dichte von 30 kg/m³ herstellen.

11.2.2.7.5 Wiesengras

Auf Standorten mittlerer Qualität sind bei den ersten beiden Schnitten Erträge von bis zu 6,5 t TM/ha zu erwarten, auf guten Standorten bis zu 8,0 t TM/ha (KTBL, 2012 S. 140). Pro Tonne TM erhält man rund eine halbe Tonne Dämmstoff. Bei einer Dichte liegender Dämmstoffe von 33 bis 50 kg pro Kubikmeter ergibt sich ein mittlerer Dämmstoffertrag von rund 80 m³/ha*a. Raumfüllend ergibt sich bei einer Dichte von 40 bis 65 kg/m³ ein Dämmstoffertrag von rund 65 m³/ha*a.

11.2.2.7.6 Getreide

Die Erträge des Getreideanbaus liegen im konventionellen Anbau, wie bereits dargestellt, je nach Getreideart zwischen 3,0 und 12,0 t Korn und 2,7 bis 8,3 t Stroh pro Hektar (vgl. KTBL, 2012, S. 44 und Thrän, Arendt, Adwiraah, & Kaltschmitt, 2016, S.294). Im ökologischen Landbau werden in Deutschland bisher durchschnittlich zwischen 43 und 53 Prozent des konventionellen Ertragsniveaus erreicht (Noleppa, 2016 S. 5). Möglich sind aber, wie bereits dargestellt, auch höhere Erträge. So wurden in Feldversuchen in der Schweiz durchschnittlich 60 bis 70 Prozent der konventionellen Ertragsniveaus erreicht. Im globalen Vergleich wurden mehreren Studien zufolge 65 bis 89 Prozent erreicht. (Resl, et al., 2016)

„Das nachhaltig energetisch nutzbare Strohpotenzial Deutschlands beträgt – je nach eingesetzter Methode zur Humusbilanzierung – 8 bis 13 Mio. t/a (Frischmasse). Dies entspricht 27 bis 43 % des theoretischen Strohpotenzials“ (Thrän, et al., 2016 S. 294). Das nutzbare Aufkommen liegt somit zwischen 0,8 und 3,9 t/ha. Dies entspricht bei einer Dämmstoffdichte von 100 kg/m³ einem Dämmstoffertrag von acht bis 39 m³/ha. Wenn lokal keine Nutzungskonkurrenzen bestehen, können aber auch höhere Anteile genutzt werden. Geht man von einem Ertrag von ca. 6,0 t Stroh pro Hektar aus, ergibt sich ein Ertrag von 60 m³ Dämmstoff. Allerdings eignet sich Stroh auch für die Herstellung von Ethanol, das z. B. für die Produktion von Reinigungsmitteln oder als Flüssigbrennstoff gut geeignet ist.

11.2.2.8 Ertragspotenziale im Vergleich

Vergleicht man die Ertragspotenziale der einzelnen für die Dämmstoffproduktion geeigneten Pflanzen, so liefern die meisten dieser Pflanzen Rohstofferträge für die Dämmstoffproduktion von rund zwei bis drei Tonnen pro Hektar. In bedeutsamem Umfang übertroffen wird dieses Ertragspotenzial nur von verschiedenen Getreidearten und Hanf. Deutlich darunter bleibt allein der vorrangig zur Ölproduktion genutzte Öllein. In Abbildung 128 sind die möglichen Rohstofferträge pro Hektar nach Pflanzenart und Nutzung im Einzelnen dargestellt. Betrachtet man die für die Dämmstoffproduktion geeigneten Rohstofferträge isoliert von möglichen Koppelprodukten, so liefern Hanf, Getreide und Wiesengras die höchsten Erträge, gefolgt von Faserlein und Öllein. Würde auch Stammholz für die Dämmstoffproduktion genutzt, könnten auch Nadelbäume relativ hohe Hektarerträge von 2 bis 3 Tonnen pro Hektar ermöglichen.

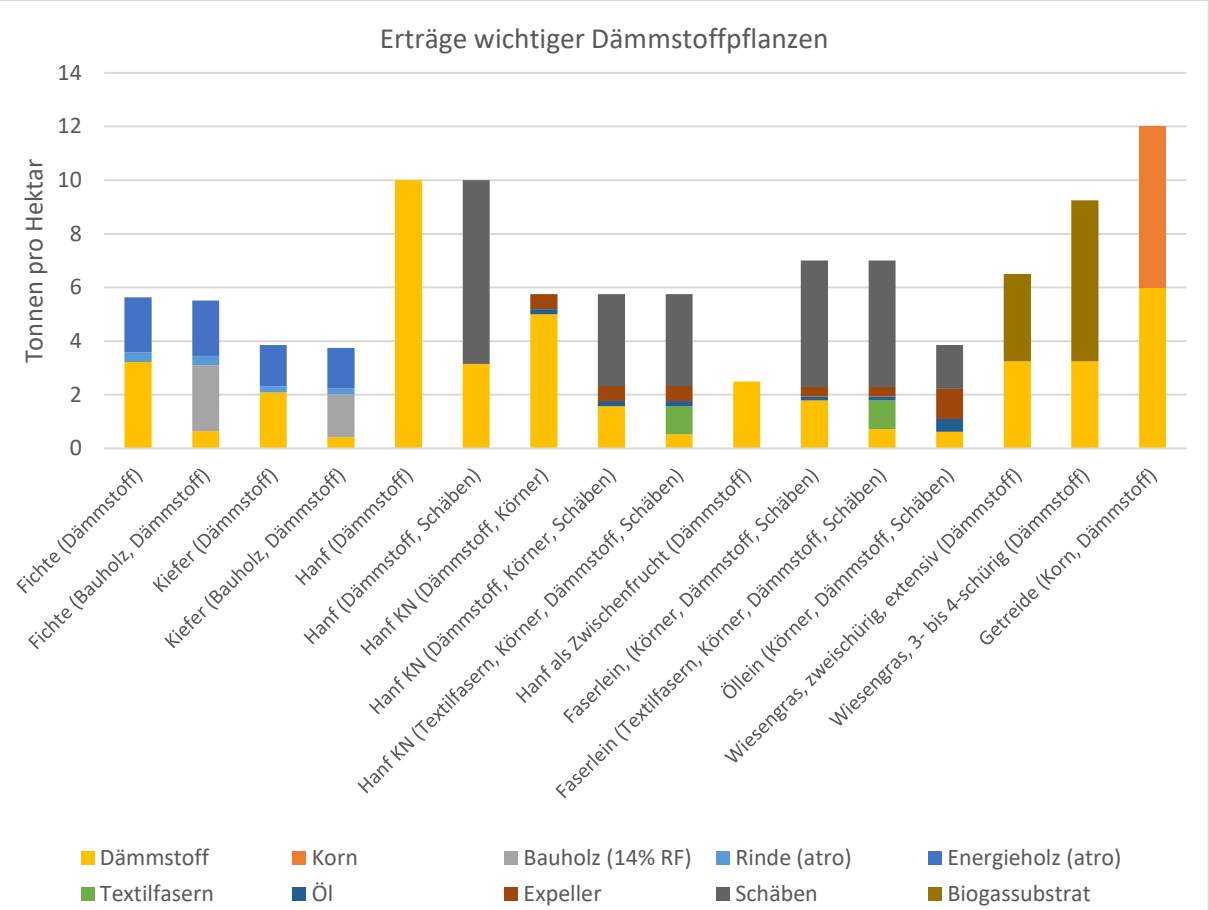


Abbildung 128: Gesamterträge wichtiger Dämmstoffpflanzen mit Koppelprodukten nach Nutzpflanze und Nutzungspfad bei konventionellem Anbau (t/ha)

Berücksichtigt man mögliche Flächenkonkurrenzen, so gewinnen neben Abfällen der Holzverarbeitung vor allem Hanfstroh aus dem Zwischenfruchtanbau und Getreidestroh als Koppelprodukt der Nahrungsproduktion an Bedeutung. Für beide Rohstoffe gibt es jedoch zahlreiche weitere Verwendungsmöglichkeiten, die als Alternative, ebenso wie die lokalen Rahmenbedingungen, bei der Wahl des am besten geeigneten Rohstoffs berücksichtigt werden müssen.

11.2.2.9 Flächenbedarf pro Kubikmeter Dämmstoff

11.2.2.9.1 Flächenbedarf ohne Koppelproduktnutzung

Verzichtet man auf eine Nutzung von Koppelprodukten und verwendet den gesamten nutzbaren Zuwachs der jeweiligen Pflanzenart für die Dämmstoffproduktion, so erweist sich Hanf als die ertragreichste Rohstoffpflanze mit dem geringsten Flächenbedarf pro Kubikmeter Dämmstoff. Der anhand der handelsüblichen Rohdichten berechnete Flächenbedarf beträgt für einen Dämmstoff mit einer Dichte von 38 kg/m³ lediglich 37 m²/m³ und für Dämmplatten mit einer Rohdichte von 100 kg/m³ nur 96 m²/m³. Den höchsten Flächenbedarf handelsüblicher Dämmstoffe weisen in diesem Vergleich Kiefernfaserdämmplatten auf. (Vgl. Abbildung 129)

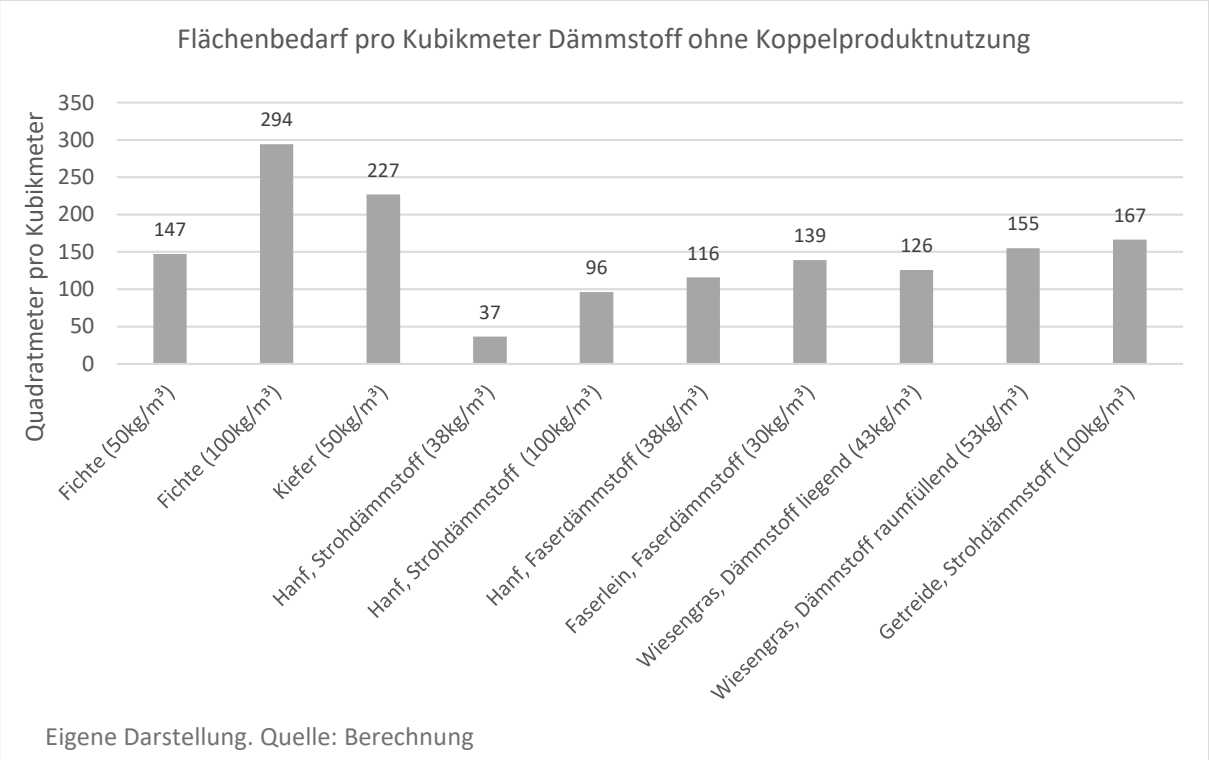


Abbildung 129: Flächenbedarf pro Kubikmeter Dämmstoff ohne Koppelproduktnutzung

11.2.2.9.2 Flächeninanspruchnahme bei Berücksichtigung der Koppelprodukte

Ein vollkommen anderes Bild zeigt sich, wenn die Koppelprodukte der Dämmstoffproduktion berücksichtigt werden und Dämmstoffe aus Nebenprodukten oder Zwischenfruchterträgen hergestellt werden. Nach der beschriebenen Berechnungsmethodik ergeben sich für die in Abbildung 128 dargestellten Koppelprodukte der verschiedenen Dämmstoffpflanzen erhebliche Flächengutschriften. Für Pflanzen im Hauptfruchtanbau betragen sie zwischen 1.164 und 8.342 m². Die größte Gutschrift erhält Hanf im an Wintergerste anschließenden Zwischenfruchtanbau, wenn das gesamte Hanfstroh zu Dämmstoff verarbeitet wird. Dabei wurde angenommen, dass neben dem Hanfstroh auch das Gerstenstroh als Dämmstoff genutzt wird,

wodurch 16 bis 60 Kubikmeter zusätzliches Dämmmaterial verfügbar werden. Insgesamt erhält man somit neben den sechs bis sieben Tonnen Getreidekornertrag bis zu 128 m² Dämmstoff aus Stroh. Dabei entfallen 68 m³ auf den Hanf als Zwischenfrucht. Geht man von einem nutzbaren Getreidestrohanteil von 47 Prozent aus (vgl. Thrän, Arendt, Adwiraah, & Kaltschmitt, 2016, S. 294), so erzielt man einen Gesamtertrag von 96 Kubikmetern (68 m³ Hanfdämmstoff und 28 m² Strohdämmstoff) pro Hektar und Jahr. Die aus dem Strohertrag resultierende Flächengutschrift beträgt 1.029 m². Für den Kornertrag werden 7.313 m² gutgeschrieben. Bei einer verbleibenden Flächeninanspruchnahme von 1.658 m² für den Hanfanbau und einem Gesamtertrag von 68 Kubikmetern Hanfdämmstoff ergibt sich ein Flächenbedarf von nur 24 Quadratmetern pro Kubikmeter Hanfdämmstoff. Die Nutzung von Hanf im Zwischenfruchtanbau ist damit die flächeneffizienteste Methode, natürliche Dämmstoffe zu produzieren. Für die Kombination aus Hanfstroh- und Gerstenstrohdämmstoff werden etwa 27 Prozent der Fläche in Anspruch genommen, die übrigen 73 Prozent sind der Gerstenkornproduktion anzurechnen. So ergibt sich für die Kombination aus Hanfstroh- und Gerstenstrohdämmstoff folglich eine Flächeninanspruchnahme von rund 28 m² pro Kubikmeter.

Unter den als Hauptfrucht angebauten Pflanzen erhält Hanf mit 8.185 m² die höchste Flächengutschrift, wenn als Hauptprodukt Textilfasern erzeugt werden. Es folgt mit einer Gutschrift von 8.144 m² Faserlein, der mit dem vorrangigen Ziel der Faserproduktion angebaut wird (vgl. Abbildung 130 sowie Tabelle 479 und Tabelle 480). Faserhanf erreicht mit 37 m² pro Kubikmeter Dämmstoff den niedrigsten Wert aller als Hauptfrucht angebauten Dämmstoffpflanzen in diesem Vergleich. Die Kombination aus Gerste als Hauptfrucht und Hanf als Zwischenfrucht bleibt jedoch noch um 23 Prozent unter dem Wert, den Hanf als Hauptfrucht erzielt.

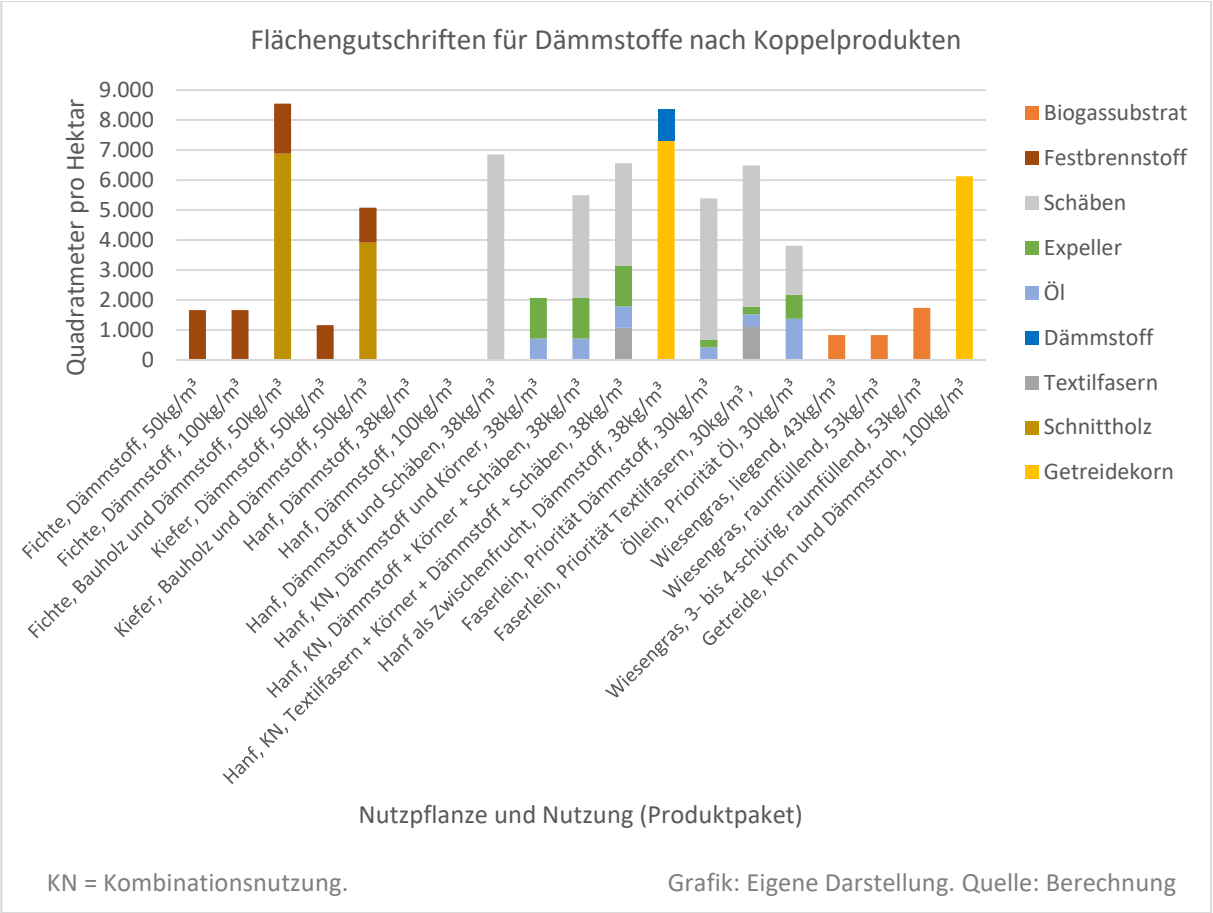
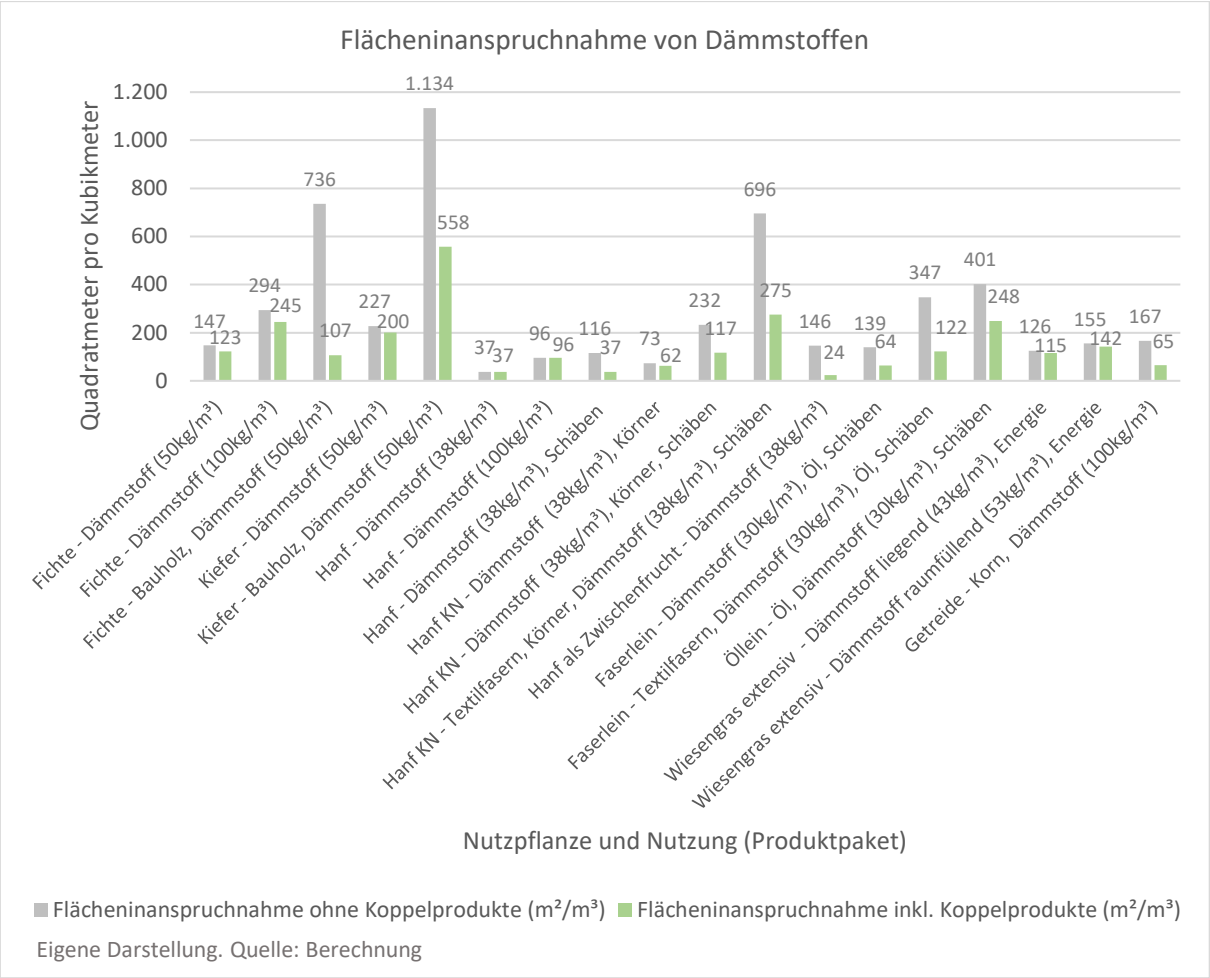


Abbildung 130: Flächengutschriften für Dämmstoffe nach Koppelprodukten

Insgesamt erweist sich Hanf somit auch im Hauptfruchtanbau als die Dämmstoffpflanze mit der höchsten Flächeneffizienz, wenn Hanf ausschließlich zum Zweck der Dämmstoffproduktion angebaut wird und das Stroh vollständig, also einschließlich der Schäben, zu Dämmstoff verarbeitet wird. Die gleiche Flächeneffizienz (37 m²/m³) wird erzielt, wenn nur die Fasern zu Dämmstoff verarbeitet und die Schäben für die Spanplattenherstellung genutzt werden.

Baut man Hanf für eine Kombinationsnutzung zur Produktion von Dämmstoff und Hanföl an, werden rund 58 m²/m³ beansprucht, was einem um 57 Prozent höheren Flächenaufwand pro Kubikmeter entspricht. Als Nebenprodukt der Textilfasergewinnung aus Hanf in Kombinationsnutzung (Korn und Stroh) beansprucht die Dämmstoffproduktion 239 m²/m³ und weist damit eine deutlich geringere Flächeneffizienz auf (vgl. Abbildung 131).



Eigene Darstellung. Quelle: Berechnung

Abbildung 131: Flächeninanspruchnahme von Dämmstoffen nach Koppelproduktnutzung

Die ebenfalls häufig verwendeten Flachsdämmstoffe aus Faserlein nehmen pro Kubikmeter rund 64 m²/m³ in Anspruch, wenn man die Fasern einschließlich der Langfasern vollständig zu Dämmstoff verarbeitet und die Schäben als Baustoff nutzt. Nutzt man die Langfasern dagegen als Textilfasern und die Schäben als Baustoff, so ergibt sich eine beinahe doppelt so hohe Flächeninanspruchnahme von 122 m²/m³.

Die Nutzung von Öllein wird durch eine vollständige Nutzung aller Koppelprodukte deutlich flächeneffizienter. Sie gehört dennoch mit rund 248 m² pro Kubikmetern Dämmstoff zu den flächenintensiveren Arten der Rohstoffgewinnung und ist daher vor allem mit der besonderen Qualität von Leinöl zu begründen, sofern diese benötigt wird.

Wiesengras nimmt zwischen 79 und 142 m² pro Kubikmeter Dämmstoff in Anspruch und liegt damit im mittleren Bereich der verglichenen Dämmstoffe. Seine Nutzung stellt insbesondere dann eine interessante Alternative dar, wenn keine ausreichenden Viehbestände vorhanden sind und der Grasaufwuchs infolgedessen ungenutzt bliebe.

Holz von Fichten als Rohstoff der Dämmstoffproduktion ist in der vorliegenden Bilanz nicht ganz so flächeneffizient wie Dämmstoff aus Wiesengras. Produziert man Fichtenfaserdämmstoff mit einer Dichte von 50 kg/m³ aus dem gesamten Stammholzertrag, so nimmt ein Kubikmeter 123 m³ Fläche in Anspruch. Als Koppelprodukt der Bauholzproduktion wird mit einem Flächenbedarf von 107 m²/m³ eine etwas höhere Flächeneffizienz erreicht. Bei Dämmstoffen aus Kiefernholz verhält es sich dagegen gänzlich anders. Nutzt man das gesamte Stammholz, nimmt die Dämmstoffproduktion 200 m²/m³ in Anspruch. Als Koppelprodukt der Bauholzproduktion sinkt die Flächeneffizienz deutlich, weil es mit Fichten und Buchen wesentlich ertragreichere Alternativen für die Bauholzproduktion gibt. Die Flächengutschriften für die Kiefernbauholzproduktion sind deshalb vergleichsweise gering, sodass pro Kubikmeter Fichtenfaserdämmstoff 558 m² in Anspruch genommen werden.

11.2.2.9.3 Flächeninanspruchnahme unter Berücksichtigung des Energieaufwandes

Eine Berücksichtigung des für Anbau, Ernte und Verarbeitung nötigen Energieaufwandes ist, wie bereits erwähnt, auch im Falle der Dämmstoffe aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit nicht für alle hier dargestellten Alternativen möglich. Da jedoch zumindest ein Teil der Daten verfügbar ist, wurde an ihrem Beispiel versucht, die Größenordnung ihres Einflusses auf den Flächenbedarf einzuschätzen. So werden für die Herstellung von Hanf- und Flachsdämmstoffen rund 50 bis 80 kWh pro Kubikmeter benötigt, für die Herstellung von Holzweichfaserdämmstoffen 600 bis 1.500 kWh/m³ (vgl. FNR, 2015 zit. n. DUH, 2016). Geht man von einem Netto-Energieertrag von 450.000 kWh/ha für PV-Freiflächenanlagen aus, entspricht dies im Mittel einem Flächenbedarf von 1,4 m² pro Kubikmeter Flachs- oder Hanfdämmstoff und 23 m² pro Kubikmeter Holzweichfaserdämmung.

Infolgedessen sinkt die Flächeneffizienz von Hanf um ca. 2 Prozent im Hauptfruchtanbau und um bis zu 6 Prozent im Zwischenfruchtanbau. Die Flächeneffizienz von Flachsdämmstoffen sinkt um ca. 3 Prozent. Größere Auswirkungen hat der Energieaufwand bei Holzweichfaserdämmstoffen, bei denen die Effizienz um 9 bis 16 Prozent abnimmt. In Abbildung 132 sind die Flächeninanspruchnahmen im Vergleich dargestellt, die sich je nach Berücksichtigung des Energieaufwandes ergeben. Zum Energieaufwand der übrigen Dämmstoffe aus Getreidestroh und Wiesengras liegen nur Daten für den landwirtschaftlichen Anbau vor. Speziell im Falle der Strohdämmstoffe ist der Energieaufwand der Verarbeitung jedoch sehr gering und dürfte vernachlässigbar sein. Anhand der vorliegenden Daten sind für Stroh- und Grasdämmstoffe keine hohen Effizienzeinbußen zu erwarten. Insgesamt verändert der Energieaufwand aber nichts Wesentliches am Verhältnis der verschiedenen Dämmstoffe zueinander. Hanf, Flachs und Stroh weisen nach wie vor die höchste Flächeneffizienz auf.

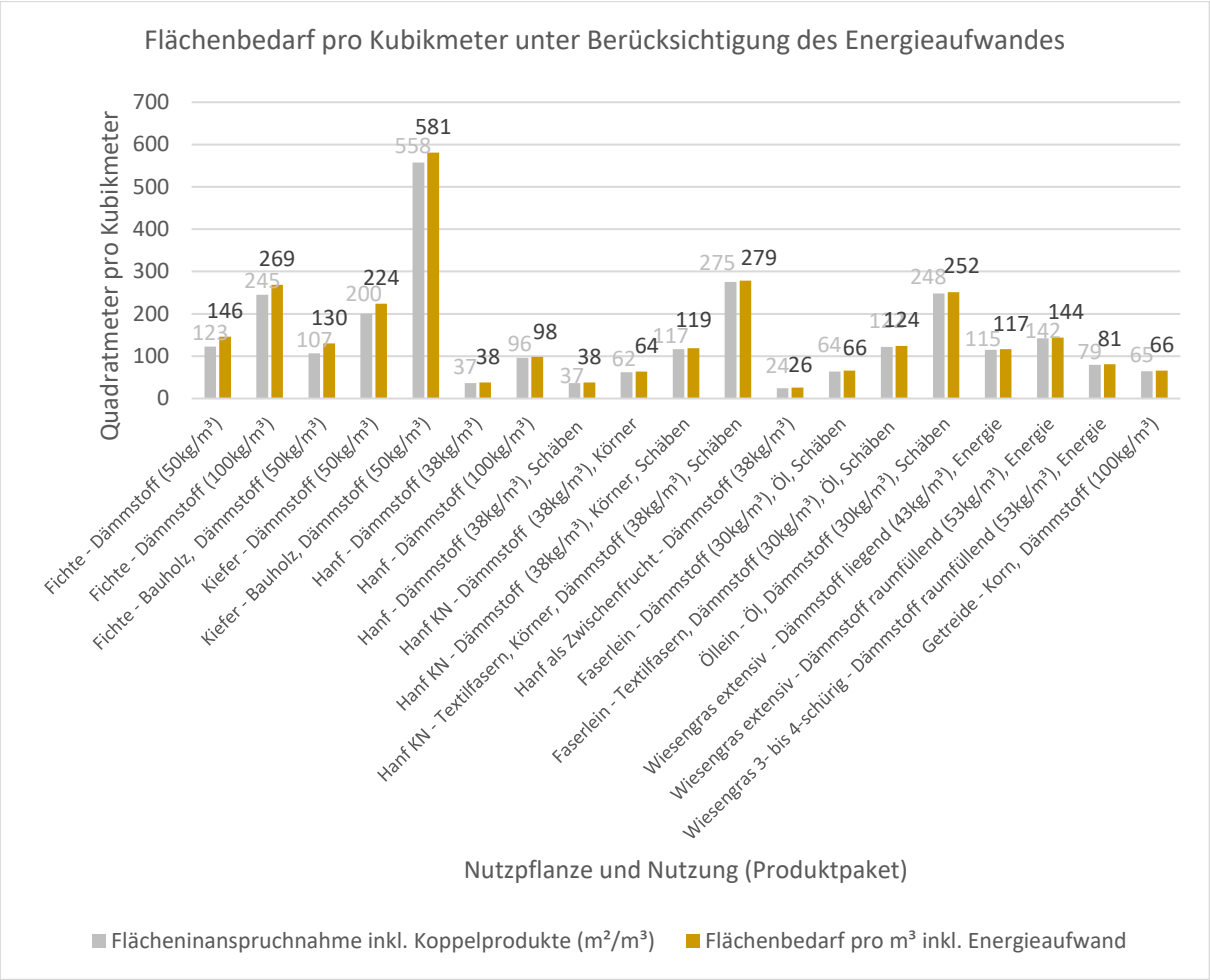


Abbildung 132: Geschätzter Flächenbedarf pro Kubikmeter Dämmstoff unter Berücksichtigung von Koppelprodukten und Energieaufwand

11.2.2.10 Flächeninanspruchnahme nach Bedarf

Geht man von einem zukünftigen Dämmstoffbedarf zwischen den heutigen 36 Millionen Kubikmetern und möglichen 70 Millionen Kubikmetern pro Jahr aus, müssten bei Erträgen zwischen rund 30 und 270 m³/ha auf rund 130.000 bis 2.330.0000 Hektar Pflanzen für die Dämmstoffproduktion angebaut werden. Würde man den Bedarf zu jeweils einem Viertel mit Dämmstoffen auf Fichtenholz, Hanf, Flachs und Wiesengras decken, läge der Durchschnittsertrag ohne Koppelprodukte bei etwa 120 m³ pro Hektar und Jahr. Folglich müssten auf 300.000 bis 580.000 Hektar Dämmstoffpflanzen kultiviert werden. Ohne Berücksichtigung des Energieaufwandes könnte die Netto-Flächeninanspruchnahme der Dämmstoffproduktion durch die Nutzung von Koppelprodukten auf 240.000 bis 470.000 gesenkt werden. Berücksichtigt man den Energieaufwand der Dämmstoffproduktion, steigt die erwartete Flächeninanspruchnahme jedoch wieder auf 260.000 bis 500.000 Hektar an.

11.2.2.11 Ökologische Kennwerte von Dämmstoffen

Bei der ökologischen Bewertung stehen bisher vor allem Aspekte wie der Energiebedarf bei der Herstellung, das Treibhauspotenzial (GWP), die Kompostierbarkeit, die Schadstoffbelastung oder die Schädlingsresistenz im Fokus. Umfassende Lebenszyklusbewertungen berücksichtigen z. B. im Falle eines Holzfaserdämmstoffs „die Lebenswegabschnitte cradle to gate, d. h. die forstliche Produktion, die Holzlagerung, den Transport zum Produktionsort und die eigentliche Produktion inkl. Werksbetrieb und der notwendigen Rohstoffe und Hilfsstoffe“ (BMI, 2018). Da ein hoher Flächenbedarf zu direkten oder indirekten Landnutzungsänderungen führen kann, die meist mit nennenswerten Auswirkungen auf die Treibhausgasbilanz, die Ökosysteme und die Biodiversität verbunden sind, erscheint es sinnvoll, ihn künftig in die Ökobilanz mit aufzunehmen. Dies gilt insbesondere für ackerbaulich erzeugte Dämmstoffe. Von den bisher erfassten Kennwerten weisen vor allem der Energieaufwand und das damit verbundene Treibhauspotenzial, der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln sowie der Einfluss auf die Biodiversität einen direkten Flächenbezug auf. Aufgrund mangelnder Datengrundlagen kann hier jedoch nur beispielhaft auf diese Zusammenhänge eingegangen werden.

11.2.2.11.1 Primärenergieaufwand

Der Energieaufwand der Herstellung fällt, wie in Tabelle 316 dargestellt, bei Dämmstoffen aus Hanf, Flachs und Schafwolle besonders niedrig aus, ebenso bei Cellulose und Schafwolle. Bei Holzweichfaserdämmstoffen liegt er dagegen fast so hoch, wie bei Polyurethan (FNR, 2015 zit. n. DUH, 2016, S. 7). Dieser Energieaufwand hat direkten Einfluss auf die Flächeneffizienz, wenn Energie künftig vorrangig aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen wird. Da der hohe Energieaufwand der Dämmstoffproduktion immer wieder als Argument gegen die verstärkte Dämmung von Gebäuden angeführt wird, wurde zunächst betrachtet, wie sich Energieaufwand und Energieeinsparung zueinander verhalten.

Wenn die Erhöhung des Energiestandards bzw. die Absenkung des Heizenergiebedarfs eines Massivholzhauses mit 130 m² Wohnfläche von 70 kWh/m² auf 15 kWh/m² den Bedarf an Holzweichfaserplatten um 30 Kubikmeter erhöht, so ist dies mit einem zusätzlichen Waldflächenaufwand von mindestens 0,32 ha und einem zusätzlichen Primärenergieaufwand von ca. 31,5 MWh (1.050 kWh pro Kubikmeter Dämmung) verbunden. Pro Quadratmeter Wohnfläche nimmt die zusätzliche Dämmung folglich im Produktionsjahr knapp 25 m² Fichtenwald und 242 kWh Primärenergie in Anspruch. Um 242 kWh mit einer Freiflächenphotovoltaikanlage zu produzieren, werden 5,4 m² Anlagenfläche benötigt. Da Leitungs- und Speicherverluste bei Energie aus Photovoltaik in der Regel unterhalb der Umwandlungsverluste von Gas- und Kohlekraftwerken liegen, dürfte der Primärenergieaufwand bei einer fortschreitenden Energiewende in Zukunft geringer ausfallen. Aber auch ein zusätzlicher Primärenergieverbrauch von 242

kWh ist bei einer Energieeinsparung von 55 kWh/m²*a durch die zusätzliche Gebäudedämmung bereits nach 4,4 Jahren kompensiert. Bei einer Nutzungsdauer der Dämmung von 40 Jahren entspricht dies 11 Prozent der Nutzungsdauer. Das Verhältnis von Energieaufwand zu Energieeinsparung ist also auch im Falle von relativ energieintensiven Holzweichfaserdämmstoffen mit 1 zu 9,1 noch sehr positiv.

Tabelle 316: Primärenergiebedarf bei der Herstellung eines Kubikmeters Dämmstoff

Dämmstoff	Primärenergiebedarf der Herstellung in kWh/m³
Flachs	50 - 80
Hanf	50 - 80
Holzfaser (flexibel)	50 - 100
Holzweichfaserplatten	600 - 1.500
Schafwolle	40 - 80
Zellulose	70 - 100
Polystyrol EPS	200 - 760
Polystyrol EPS XPS	450 - 1.000
Steinwolle	150 - 400
Glaswolle	250 - 500
Polyurethan (PUR)	800 - 1.500

Quelle: FNR, 2015, Marktübersicht: Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen zit. n. DUH, 2016, S. 7

11.2.2.11.2 Treibhauspotenzial

Die mit der Herstellung der Dämmstoffe verbundenen Treibhausgasemissionen, die bis zum Fabriktor (cradle to gate) entstehen, resultieren aus der land- oder forstwirtschaftlichen Produktion der Rohstoffe, dem Transport und der industriellen Verarbeitung zu fertigen Dämmstoffen. Abgesehen von aus Landnutzungsänderungen stammenden Emissionen hängt dieses sogenannte Treibhauspotenzial vor allem von dem mit Anbau, Ernte, Transport und Herstellung verbundenen Energieverbrauch und dem verwendeten Energiemix ab. Je mehr dabei fossile Energieträger durch erneuerbare Energieträger ersetzt werden, desto niedriger fallen die klimawirksamen Emissionen aus.

Da sich der Energiemix im Laufe der Energiewende fortwährend ändert, handelt es sich bei den Angaben zum Treibhauspotenzial um Momentaufnahmen zum jeweiligen Zeitpunkt der Erhebung. Mit dem Fortschreiten der Energiewende werden die GWP-Werte folglich weiter sinken. So ist bei *Danner* (2010) zum Stand des Jahres 2010 für Hanfdämmstoffe nach *ÖKOBAUDAT* ein Treibhauspotenzial von rund 23,45 kg CO_2-Äquivalent pro Kubikmeter angegeben (Danner, 2010 S. 32). Im Jahr 2018 ist dieser Wert nach ÖKOBAUDAT bereits auf 22,72 kg CO_2-Äq./m³ gefallen. Wenn Hersteller sich bewusst für einen überdurchschnittlichen Anteil erneuerbarer Energien entscheiden, sind noch deutlich bessere Treibhausgasbilanzen mög-

lich. Das Treibhauspotenzial des Dämmstoffs Thermo Hanf Plus lag nach Angaben des Herstellers Hock GmbH deshalb schon im Jahr 2010 bei -14,4 kg CO_2-Äq./m³ (Hock GmbH, o. J. S. 11): Insgesamt werden pro Kubikmeter Hanfdämmstoff rund 71,9 kg CO_2 absorbiert. Durch den Energieaufwand der Herstellung wurden im Jahr 2010 rund 57,5 kg CO2-Äq./m³ freigesetzt (Hock GmbH, o. J. S. 11). Die Dämmung eines Einfamilienhauses mit 130 m² Wohnfläche und 60 m³ Hanfdämmung absorbierte im Jahr 2010 somit 0,864 t CO_2-Äquivalent. Bei einem vollständig regenerativen und klimaneutralen Energiemix läge die Absorption nach diesen Angaben bei bis zu 4,314 t CO_2-Äquivalent.

Aufgrund der hohen Varianz der Treibhausgasbilanzen infolge unterschiedlicher Energiemixe wird hier nicht weiter auf die Treibhauspotenziale eingegangen. Wenn sich der künftige Energiemix nahezu vollständig aus erneuerbaren Quellen zusammensetzt, sind letztlich das CO_2-Absorptionspotenzial während des Pflanzenwachstums und der Energiebedarf der Produktion die ausschlaggebenden Entscheidungskriterien. Im Vergleich zu erdölbasierten Dämmstoffen sprechen beide Kennwerte für Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen.

11.2.2.11.3 Biodiversität

Die Nutzung von Faserpflanzen wie Hanf und Lein erhöht die Vielfalt auf den Ackerflächen. Insbesondere Hanf trägt außerdem dazu bei, den Bedarf an Pflanzenschutzmitteln zu reduzieren, was sich positiv auf die Zahl und die Vielfalt der Organismen auf landwirtschaftlichen Flächen auswirkt. Im Vergleich zu den Energiepflanzen Raps, Durchwachsene Silphie, Sida und Sonnenblume bieten die dargestellten Dämmstoffpflanzen jedoch nur wenig Nahrung für Insekten. Nektar für die Honigproduktion wird lediglich vom gemeinen Lein und blühenden, extensiv genutzten Wiesen produziert.

Der Nektarertrag des Leins ist vergleichsweise gering, doch bietet Lein den Vorteil einer relativ späten Blüte, womit er das Nahrungsangebot für Bienen im Spätsommer verbessern kann (vgl. Tabelle 317). Auch der sogenannte Honigtau der Nadelbäume dient Bienen und anderen Insekten als Nahrung. Dabei handelt es sich um die stark zuckerhaltigen Ausscheidungen von Pflanzenläusen. Wie für alle Pflanzen gilt auch für Nadelbäume, Hanf und Lein, dass sie in Monokulturanbau nicht förderlich für die Artenvielfalt sind. Dämmstoffmischungen aus Hanf und ökologisch angebautem Flachs erscheinen deshalb mit Blick auf die Artenvielfalt durchaus sinnvoll. Den größten Nutzen für die Artenvielfalt insgesamt haben aber sicherlich Grasdämmstoffe von extensiv genutzten Wiesen.

Tabelle 317: Blütezeiten von Dämmstoffpflanzen

	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov
Fichte										
Kiefer										
Hanf										
Hanf, Zwischenfrucht										
Faserlein										
Öllein										
Wiesengras										

Gelb: Pollen und Nektar; Blau: nur Pollen
Tabelle: Eigene Darstellung
Quelle: Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, Deutscher Imkerbund & Apis, 2018

11.2.3 Möbel

11.2.3.1 Verbrauch

Deutschland war im Jahr 2015 der umsatzstärkste Möbelmarkt in Europa, knapp gefolgt von Italien und mit deutlichem Abstand vor Großbritannien, Polen, Türkei, Spanien und den Niederlanden. Die Ausgaben pro Person waren unter diesen Ländern im Jahr 2015 nur in Italien höher als in Deutschland (PwC, 2017 S. 7). Zwischen den Jahren 2002 und 2016 sind die Konsumausgaben der Bundesbürger für Möbel um zehn Prozent von 369 auf 406 Euro pro Person und Jahr gestiegen (vgl. Abbildung 133). Im Mittel der Jahre 2002 bis 2010 gaben die Bundesbürger auf relativ stabilem Niveau 363 Euro/Ea aus. In den Jahren 2011 bis 2016 lag der Durchschnittsbetrag bei 392 Euro/Ea mit steigender Tendenz. (VDM, 2017 S. 1)

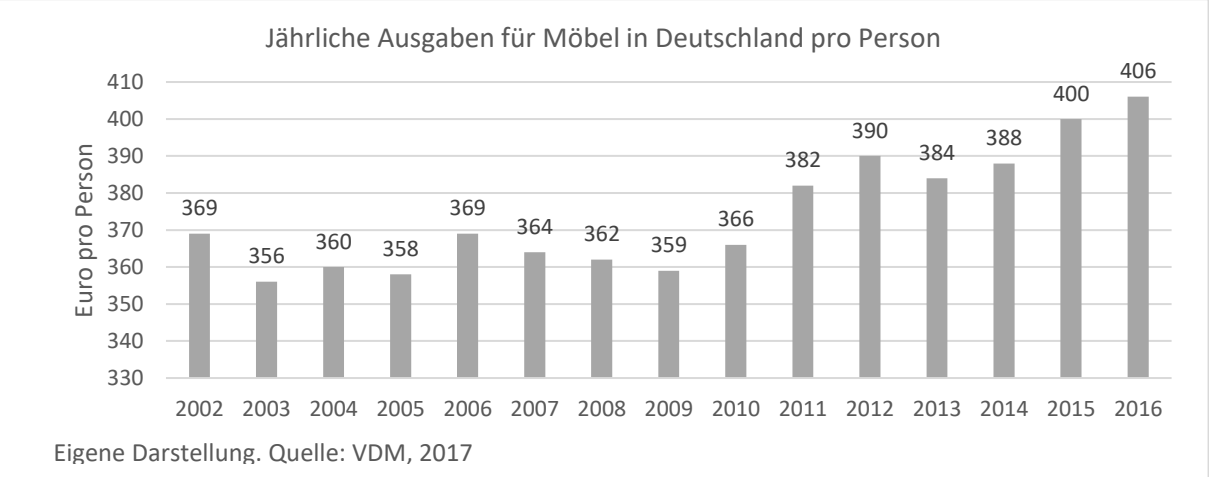


Abbildung 133: Jährliche Ausgaben für Möbel in Deutschland pro Person

Der wichtigste Rohstoff der Möbelindustrie ist Holz (FNR, 2014 S. 690). Für die Möbelproduktion in Deutschland wurden im Jahr 2006 rund 9,6 Mio. m^3 an Holzfertigwaren eingesetzt, was rund 0,12 Kubikmetern pro Einwohner und 14,2 Prozent der Rohholzverwendung entsprach. Bezogen auf die Gewichtsmenge blieben 66,4 Prozent in Möbelprodukten aus Holz gespeichert, die restlichen 33,6 Prozent fielen als Reststoffe an. (Dehoust, et al., 2006 S. 20)

Im Jahr 2010 lag die Holzverwendung im Möbelsektor bei rund 9,4 Mio. Kubikmetern. Im Jahr 2013 stieg sie auf rund zehn Mio. Kubikmeter an und lag im Jahr 2014 wieder bei rund 9,6 Mio. Kubikmetern (Mantau, et al., 2015). Angesichts der anschließend deutlich steigenden Umsatzzahlen in den Jahren 2015 und 2016 ist anzunehmen, dass auch die Holzverwendung eine steigende Tendenz zeigt.

Im Jahr 2016 hatten Holzmöbel einen Anteil von 67 Prozent am Möbelmarkt in Deutschland (FNR, 2018b S. 19). Nur 35 Prozent der in Deutschland verkauften Möbel stammen aus deutscher Produktion (VDM, 2018). Der Saldo der Außenhandelsbilanz in der Warengruppe „Holzwaren inkl. Möbel“ ergab für die Jahre 2013 bis 2015 Importüberschüsse von 7.202 m³, 7.280 m³ und 7.015 m³. Der Export lag über diese Jahre im Mittel bei rund zehn Millionen Kubikmetern und der Import bei rund 17,1 Mio. Kubikmetern (Weimar, 2016 S. 15). Der Verbrauch der deutschen Konsumenten dürfte pro Person dementsprechend höher liegen als der Holzverbrauch der Möbelindustrie pro Person und könnte bis zu 0,21 Kubikmeter jährlich betragen. Zieht man 33,6 Prozent Verschnitt und sonstige Holzreste vom inländischen Rohholzverbrauch ab, liegt der geschätzte Verbrauch schließlich bei bis zu 0,17 Kubikmetern pro Person und Jahr.

11.2.3.2 Stoffstrom und Materialeffizienz der Möbelindustrie

Im Laufe des Produktionsprozesses kommt es bei mehreren Herstellungsschritten zu Verlusten, z. B. in Form des bei der Verarbeitung anfallenden Verschnitts. Durch Beschädigung bei Montage oder Transport kommt es zu weiteren Verlusten. Wenn man rund zwei Prozent Wiederverwendung berücksichtigt, beträgt der Materialverlust der Möbelindustrie nach Reuber (2011) rund 37 Prozent (Reuber, 2011 S. 6). Die anfallende Holzrestmenge liegt nach Reuber (2011) somit um vier Prozent höher als nach Dehoust et al. (2006). Die einzelnen Verluste sind in Tabelle 318 anteilig dargestellt.

Tabelle 318: Materialeffizienz in der Möbelindustrie

Eingangslager	**100,0%**
Altbestände	-5,0%
Widerverwendung	2,0%
Ausschuss durch Handling und Lagerung	-3,0%
Reste	-5,0%
Verschnitt	-10,0%
Übermengen Kantenmaterial	-10,0%
Beschädigung durch Zwischenlagerung	-3,0%
Beschädigung bei Bearbeitung, Vormontage, Montage, Transport	-3,0%
Verluste Insgesamt	**-37,0%**

Quelle: Reuber, 2011

Nach Reuber gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Verluste zu reduzieren. Allen voran das „Entwickeln von alternativen Konstruktionen (z.B. Leichtbau) oder Plattformstrategien“ (Reuber, 2011 S. 7). Bereits bei der Produktentwicklung Schadstoffe zu vermeiden und die Produkte mit Blick auf die anschließende Wiederverwendbarkeit zu optimieren, ist der Grundsatz des Cradle-to-Cradle-Prinzips. Die Entwicklung von Produkten nach den Prinzipien von Cradle to Cradle ermöglicht eine komplette Rückgewinnung der Rohstoffe durch eine einfach durchführbare, sortenreine Trennung der Materialien und eine möglichst lange Nutzung der einzelnen Bauteile. Defekte Bauteile können einfach ausgetauscht werden. Abfälle werden ohne aufwendige Behandlung direkt wieder zum Rohstoff für neue Produkte. Ein anderer Ansatz, die Verluste deutlich zu reduzieren, besteht darin, den unvermeidbaren Verschnitt zu nutzen und gezielt „eingeschlossene Äste, Wurmfraß und andere Imperfektionen“ (Verschnitt, 2018) so in Szene zu setzen, dass gerade aufgrund dieser sogenannten Schönheitsfehler einzigartige und unverwechselbare Möbel und Einrichtungsgegenstände hergestellt werden können (Verschnitt, 2018). Die Kaskadennutzung von Rohstoffen ist eine weitere, wichtige Möglichkeit, die Rohstoffeffizienz der Möbelproduktion deutlich zu steigern. Massivholz, das beispielsweise aus alten Häusern stammt, wird demontiert, aufbereitet, getrocknet, geschliffen und anschließend zu Möbeln weiterverarbeitet. Verschiedene Studien schätzen das Altholzaufkommen insgesamt auf 65 bis 100 kg pro Einwohner (Hammerl, et al., 2012). Dies entspricht ungefähr dem durchschnittlichen Ertrag von 130 bis 200 m² Waldfläche. Für die Produktion von Möbeln sollte jedoch nur Altholz bester Qualität verwendet werden: naturbelassenes oder lediglich mechanisch bearbeitetes Altholz, das bei seiner Verwendung nicht mehr als unerheblich mit holzfremden Stoffen verunreinigt wurde. Zu den Anteilen dieser Qualität am Gesamtaufkommen liegen keine Zahlen vor. Sie dürften jedoch relativ gering sein. In Zukunft könnte das Potenzial durch nachhaltige Produktionsweisen vergrößert werden.

11.2.3.3 Koppelprodukte

Bei der Möbelproduktion fallen im Laufe der Verarbeitungskette relativ große Mengen an Holzreststoffen an, die stofflich oder energetisch genutzt werden können. Mögliche Koppelprodukte sind unter anderem OSB-Platten, Spanplatten, chemische Textilfasern (hier Viskose), Zellstoff für die Papierproduktion, Holzfaserdämmstoffe, Rindendämmstoffe, Klebstoffe oder Brennstoffe (Holz, Braunlauge, Schwarzlauge).

11.2.3.4 Nutzungskonkurrenzen

Mit ihrem Bedarf an hochqualitativem Schnittholz steht die Möbelindustrie in Konkurrenz zur Baustoffindustrie. Diese kann dadurch entschärft werden, dass auf Holz aus dem traditionellen Obstbau (z. B. aus Streuobstbeständen) oder auf Altholz aus zurückgebauten Gebäuden zurückgegriffen wird. Eine solche Kaskadennutzung reduziert die Flächenkonkurrenz deutlich. Zu einer wichtigen Rohstoffquelle könnte künftig auch die Wertholzproduktion in modernen

Agroforstsystemen werden. Weitere Nutzungskonkurrenzen um geeignete Rohstoffe bestehen zu diversen stofflichen und energetischen Nutzungen. Entschärft werden können diese durch die Nutzung der diversen Reststoffe, die in der forstwirtschaftlichen Schnittholzproduktion sowie in der verarbeitenden Möbelindustrie anfallen und etwas mehr als die Hälfte des jährlichen Zuwachses ausmachen.

11.2.3.5 Ertragspotenziale

Die Gesamterträge der wichtigsten in Deutschland etablierten Baumartengruppen liegen im Mittel zwischen vier und knapp acht Tonnen Trockenmasse pro Hektar und Jahr (vgl. Tabelle 319). Ohne Koppelprodukte lassen sich aus dem jährlichen Zuwachs je nach Baumart 0,6 und 2,9 Tonnen Möbel pro Hektar mit einer Restfeuchte von acht Prozent herstellen. Höhere Erträge dürften mit dem Anbau des Chinesischen Blauglockenbaums möglich sein, wenn dieser tatsächlich Erträge von bis zu 11 Tonnen TM pro Hektar erreichen sollte. Entscheidend ist die Materialeffizienz der Möbelproduktion. Wenn die dort bei der Verarbeitung entstehenden Verluste und Reststoffe als Rohstoffe für die Möbelproduktion z. B. in Form von Spanplatten wiederverwertet werden können, sind deutlich höhere Erträge möglich als wenn ausschließlich Schnittholz verarbeitet wird.

Tabelle 319: Mittlere Aufkommen an Holz und Rinde bei der Möbelproduktion nach Baumart, Rohstoffart und Ort des Aufkommens (t atro)

Holz-/Rindenaufkommen	Eiche	Buche	Fichte	Tanne	Douglasie	Kiefer	Lärche
Schnittholz (Sägewerk)	0,57	0,83	1,36	1,44	1,87	0,88	1,24
Verschnitt (Sägewerk)	0,28	0,35	0,62	0,65	0,85	0,40	0,56
Mehl (Sägewerk)	0,14	0,18	0,31	0,33	0,42	0,20	0,28
Verschnitt (Möbelwerk)	0,09	0,13	0,22	0,23	0,30	0,14	0,20
Reste (Möbelindustrie)	0,05	0,07	0,11	0,11	0,15	0,07	0,10
Verluste (Möbelindustrie)	0,20	0,29	0,47	0,50	0,65	0,31	0,43
Erntereste (Forstwirtschaft)	0,45	0,36	0,47	0,37	0,70	0,53	0,38
DF-Holz (Forstwirtschaft)	0,41	0,50	0,53	0,55	0,74	0,36	0,48
Rinde Stammholz (Sägewerk)	0,22	0,12	0,35	0,44	0,57	0,22	0,63
Rinde Astholz (Sägewerk)	0,42	0,21	0,12	0,15	0,20	0,08	0,23
Astholz stofflich (Sägewerk)	0,57	0,85	0,18	0,19	0,24	0,12	0,14
Astholz energetisch (Sägewerk)	0,85	1,28	0,73	0,75	0,98	0,47	0,57
SUMME	**4,26**	**5,17**	**5,45**	**5,71**	**7,66**	**3,77**	**5,26**

Quelle: Eigene Berechnung BMEL (2016), Schmitz (2018), Baumgartner (2018) und Reuber (2011)

Der Anteil des jährlichen Zuwachses, der letztendlich in den Möbeln gebunden wird, ist je nach Baumart mit 13 bis 43 Prozent relativ gering. Hohe Anteile von bis zu 43 Prozent können nur

erzielt werden, wenn eine Nutzung des Verschnitts und geeigneter Astholzanteile für die Möbelproduktion erfolgt. Die möglichen Möbelerträge und ihre Koppelprodukte sind in Tabelle 320 am Beispiel der Fichte sowie in Tabelle 321 am Beispiel der Buche dargestellt.

Tabelle 320: Mögliche Möbel- und Koppelprodukterträge der Fichtenholznutzung (t/ha)

Produkt	Nutzungspfad bzw. Produktkombination							
	MiTD	MTD	MiBD	MiiD	MBD	MED	MD	MPD
Möbel (8% RF)	2,13	1,47	2,13	2,56	1,47	1,47	1,47	1,47
Spanplatten (8% RF)	0,20	0,20	0,43		1,09			
Zellstoff								0,39
Textilfasern (Viskose)	0,08	0,32						
Dämmstoff	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	1,31	0,38
Essigsäure, Furfural, Xylose	0,02	0,09						
Brennstoff	2,85	3,16	2,74	2,74	2,74	3,75	2,92	3,36
Heizwert des Brennstoffs	14.475	15.774	14.248	14.248	14.248	14.248	14.248	15.889
Dämmstoff in m³	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	13,1	3,8

B=Bauplatten (OSB/Span), D=Dämmstoff, E=Energie, M=Möbel, Mi=Möbel inklusive Verschnitt, Mii=Möbel inkl. Verschnitt und Astholz, T=Textilfasern, P=Papierzellstoff
Quelle: Eigene Berechnung

Tabelle 321: Mögliche Möbel- und Koppelprodukterträge der Buchenholznutzung (t/ha)

Produkt	Nutzungspfad bzw. Produktkombination					
	MiT	MT	MiB	Mii	MB	ME
Möbel (8% RF)	1,28	0,90	1,28	2,34	0,90	0,90
Spanplatten (8% RF)	0,92	0,92	1,06		1,44	
Zellstoff						
Textilfasern (Viskose)	0,05	0,19				
Dämmstoff						
Essigsäure, Furfural, Xylose	0,01	0,05				
Brennstoff	3,07	3,24	3,00	3,00	3,00	4,34
Heizwert des Brennstoffs	14.550	15.300	15.600	15.600	15.600	22.560
Dämmstoff (m³)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

B=Bauplatten (OSB/Span), D=Dämmstoff, E=Energie, M=Möbel, Mi=Möbel inklusive Verschnitt, Mii=Möbel inkl. Verschnitt und Astholz, T=Textilfasern, P=Papierzellstoff
Quelle: Eigene Berechnung

Die Erzeugung von Koppelprodukten durch die Nutzung der diversen Reststoffe ermöglicht deutliche Steigerungen der Flächeneffizienz. Die möglichen Erträge unterschiedlicher Koppelprodukte wichtiger Baumarten (Eiche, Buche und Fichte) sind in Abbildung 134 neben den Möbelerträgen dargestellt.

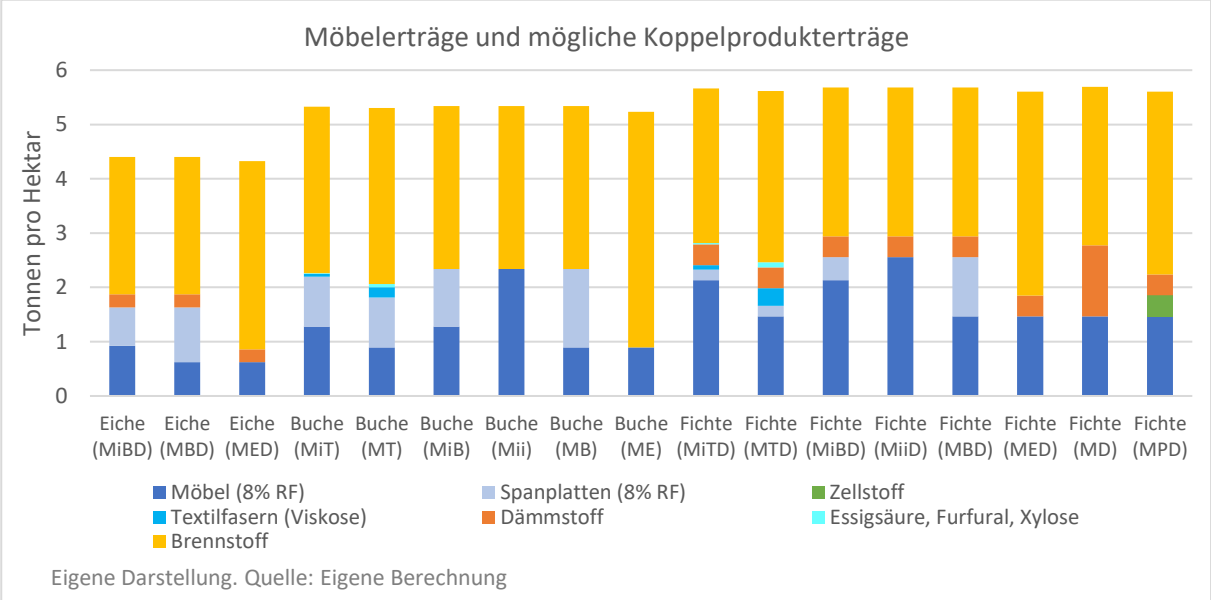


Abbildung 134: Möbelerträge und mögliche Koppelprodukterträge aus Eiche, Buche und Fichte nach Nutzungspfaden (t/ha)

Die geringen Abweichungen bei den Gesamterträgen einer Baumart ergeben sich aus den unterschiedlichen Feuchtegehalten der Endprodukte und den jeweiligen Konversionsfaktoren. Für Möbel und Bauplatten (OSB und Spanplatten) wurde vereinfachend eine mittlere Restfeuchte von bis zu 10 Prozent angenommen, Brennstoffe (Holz, Braunlauge und Schwarzlauge) sind jeweils absolut trocken angegeben.

In Tabelle 322 sind die anhand der jeweiligen Koppelprodukterträge berechneten Flächengutschriften für Fichtenholzmöbel dargestellt, in Tabelle 323 die Flächengutschriften für Buchenholzmöbel. Die größten Flächengutschriften ergeben sich, wenn der Verschnitt aus Sägewerken und Möbelfabriken jeweils als Rohstoff für die Produktion von Viskosefasern oder Spanplatten genutzt wird.

Die Flächengutschriften für Möbel aus Holz der übrigen Baumartengruppen sind in Tabelle 482 bis Tabelle 484 (s. Anhang II) dargestellt.

Tabelle 322: Flächengutschriften der Fichtenholzmöbelproduktion nach Koppelprodukten (m²/ha)

Produkt	MiTD	MTD	MiBD	MiiBD	MBD	MED	MD	MPD
Spanplatten	196	196	429	0	1.093	0	0	0
Zellstoff	0	0	0	0	0	0	0	427
Textilfasern (Viskose)	86	331	0	0	0	0	0	0
Dämmstoff	140	140	140	140	140	140	477	140
Heizwert des Brennstoffs	1.856	2.022	1.827	1.827	1.827	1.827	1.827	2.037
SUMME	**2.278**	**2.689**	**2.395**	**1.967**	**3.060**	**1.967**	**2.304**	**2.604**

B=Bauplatten (OSB/Span), D=Dämmstoff, E=Energie, M=Möbel, Mi=Möbel inklusive Verschnitt, Mii=Möbel inkl. Verschnitt und Astholz, T=Textilfasern, P=Papierzellstoff
Quelle: Eigene Berechnung

Die Flächengutschriften der übrigen wichtigen Baumartengruppen sind in Tabelle 474 bis Tabelle 477 (Anhang II) dargestellt.

Tabelle 323: Flächengutschriften der Buchenholzmöbelproduktion nach Koppelprodukten (m²/ha)

Produkt	MiT	MT	MiB	MiiB	MB	ME
Spanplatten	920	920	1.062	0	1.444	0
Zellstoff	0	0	0	0	0	0
Textilfasern (Viskose)	52	193	0	0	0	0
Dämmstoff	0	0	0	0	0	0
Heizwert des Brennstoffs	1.866	1.961	2.000	2.000	2.000	2.892
SUMME	**2.838**	**3.075**	**3.063**	**2.000**	**3.445**	**2.892**

B=Bauplatten (OSB/Span), D=Dämmstoff, E=Energie, M=Möbel, Mi=Möbel inklusive Verschnitt, Mii=Möbel inkl. Verschnitt und Astholz, T=Textilfasern, P=Papierzellstoff
Quelle: Eigene Berechnung

Ohne Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte benötigt man für Möbel aus Fichtenholz zwischen 3,9 und 6,8 m²/kg. Für Möbel aus Buchenholz liegt der Flächenbedarf zwischen 4,3 und 11,2 m²/kg. Eichenholzmöbel nehmen 10,9 bis 16,1 m²/kg in Anspruch.

Die Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte lässt den Flächenbedarf der Holzmöbelproduktion deutlich sinken. Der Flächenbedarf von Fichtenholzmöbeln beträgt in diesem Fall zwischen 3,1 und 5,5 m²/kg. Noch deutlicher sinkt der Flächenbedarf von Möbeln aus Laubhölzern. Bei Buchenholzmöbeln liegt er zwischen 3,4 und 7,9 m²/kg, bei Eichenholzmöbeln zwischen 8,2 und 12,2 m²/kg. Den geringsten Flächenbedarf weisen Douglasienholzmöbel auf. Die Flächeninanspruchnahme der wichtigsten Möbelholzarten sind jeweils nach Koppelproduktnutzung in Abbildung 135 und Abbildung 136 im Vergleich dargestellt.

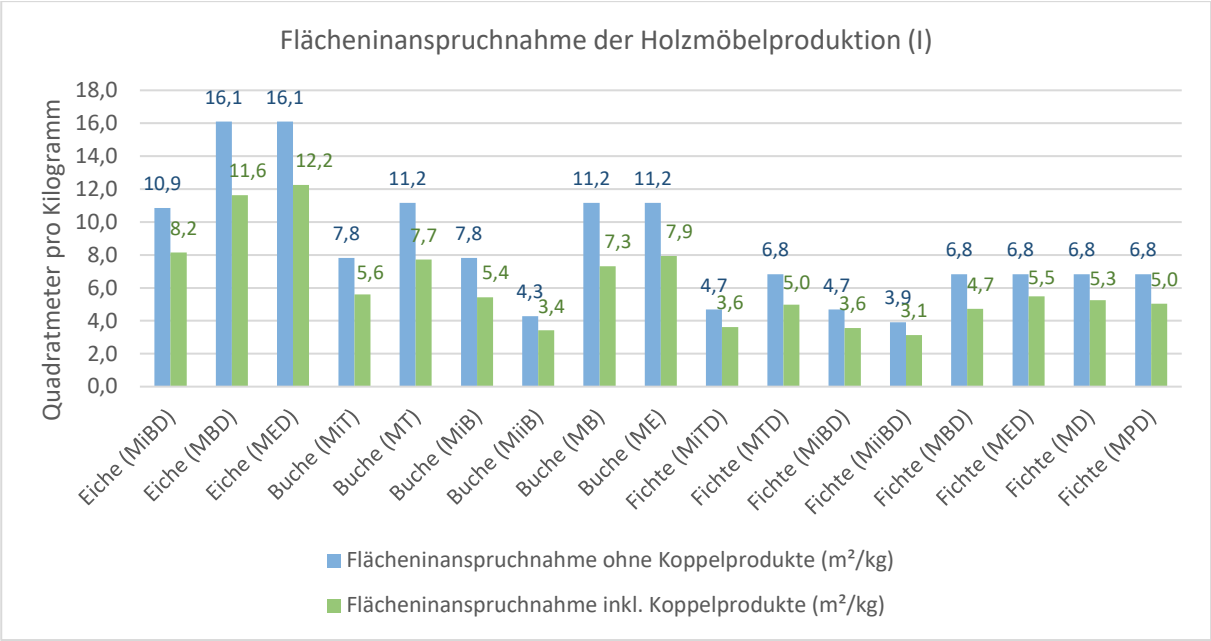


Abbildung 135: Flächeninanspruchnahme der Holzmöbelproduktion – Eiche, Buche, Fichte

Bei einer Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte zeigt sich, dass ein Umstieg vom sogenannten „Brotbaum“ der Forstwirtschaft, der Fichte auf die Buche, nicht mit einem großen Verlust an Flächeneffizienz verbunden sein muss, wenn eine effektive Nutzung des Astholzes etabliert werden kann, beispielsweise als Rohstoff der Möbelproduktion.

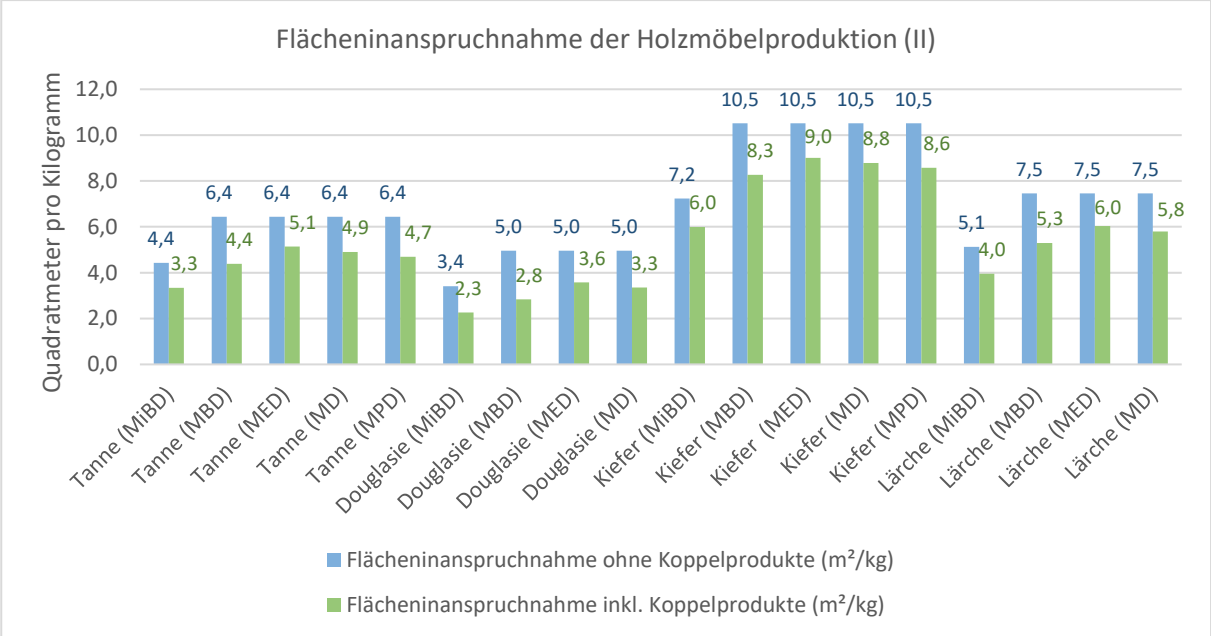


Abbildung 136: Flächeninanspruchnahme der Holzmöbelproduktion – Tanne, Douglasie, Kiefer, Lärche

Der Vergleich zeigt allerdings auch, dass andere Laubbäume den Ausfall ertragreicher Nadelbäume infolge des Klimawandels nicht so gut kompensieren können wie die Buche oder die Douglasie: Die effizienteste Nutzung der Douglasie übersteigt die effizienteste Nutzung der Eiche um den Faktor 3,7.

11.2.3.6 Auswirkungen der Koppelproduktnutzung und der gewählten Verwendung auf die Flächeneffizienz

In der folgenden Übersicht (Tabelle 324) sind die Flächenbedarfe aller untersuchten Nutzungsvarianten mit und ohne Nutzung möglicher Koppelprodukte dargestellt sowie die Reduktion des Flächenbedarfs je nach Koppelproduktnutzung. Zudem ist jeweils die Steigerung der Flächeneffizienz im Vergleich zur Variante mit dem niedrigsten Ertragswert der jeweiligen Baumart ohne Koppelprodukte angegeben. Im Falle der Eiche liegt dieser Tiefstwert ohne Anrechnung von Koppelprodukten bei 0,62 t/ha, was einem hohen Flächenbedarf von 16,11 m²/kg entspricht. Der Vergleich zeigt, dass die Flächeneffizienz fast verdoppelt werden kann, wenn der Verschnitt ebenfalls für die Möbelproduktion verwendet wird und auch die übrigen Koppelprodukte genutzt werden. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch bei den übrigen Baumarten. Die geringsten Steigerungen der Flächeneffizienz von rund 27 Prozent werden mit Dämmstoffen erzielt. Nur wenig größer sind die Steigerungen im Falle von Energieholz mit 29 Prozent und Papierzellstoff mit 32 Prozent. Die höchsten Effizienzsteigerungen werden erzielt, wenn möglichst große Anteile des Holzes für die Möbelproduktion genutzt werden können. Mittlere Effizienzsteigerungen von rund 50 Prozent werden erzielt, wenn aus dem Verschnitt Spanplatten oder Viskosefasern hergestellt werden. Die Effizienzsteigerungen, die mit Dämmstoffen, Energieträgern oder Zellstoff für die Papierindustrie erzielt werden, liegen deutlich unter den Steigerungen, die mit Baustoffen und Textilfasern möglich sind, weil für die Herstellung von Dämmstoffen, Energieträgern und Papier beispielsweise mit Hanf (Dämmstoff/Papierzellstoff) und Miscanthus (Brennstoff/Papierzellstoff) deutlich ertragreichere Rohstoffalternativen vorhanden sind. Im Durchschnitt aller Varianten bewirkt die Koppelproduktnutzung eine Reduktion des Flächenbedarfs um 26 Prozent.

Tabelle 324: Übersicht des Flächenbedarfs der Möbelproduktion nach Baumart und Nutzungsvariante (m²/kg)

Baumart	Nutzungs-pfad (Produkt-paket)	Flächenbedarf ohne Koppelpro-dukte (m²/kg)	Flächenbedarf inkl. Koppelprodukte (m²/kg)	Reduktion des Flächenbe-darfs	Steigerung der Flä-cheneffizienz durch Koppelprodukte ggü. Minimalertrag
Eiche	**MiBD**	10,85	8,16	25%	97%
	MBD	16,11	11,62	28%	39%
	MED	16,11	12,25	24%	32%
Buche	**MiT**	7,82	5,52	29%	102%
	MT	11,16	7,29	35%	53%
	MiB	7,82	5,43	31%	106%
	MiiB	4,27	3,42	20%	227%
	MB	11,16	7,32	34%	53%
	ME	11,16	7,93	29%	41%
Fichte	**MiTD**	4,69	3,54	25%	93%
	MTD	6,82	4,53	34%	51%
	MiBD	4,69	3,57	24%	91%
	MiiBD	3,91	3,14	20%	117%
	MBD	6,82	4,74	31%	44%
	MED	6,82	5,48	20%	24%
	MD	6,82	5,25	23%	30%
	MPD	6,82	5,05	26%	35%
Tanne	**MiBD**	4,43	3,33	25%	93%
	MBD	6,44	4,39	32%	47%
	MED	6,44	5,14	20%	25%
	MD	6,44	4,91	24%	31%
	MPD	6,44	4,70	27%	37%
Douglasie	**MiBD**	3,41	2,26	34%	119%
	MBD	4,96	2,84	43%	75%
	MED	4,96	3,58	28%	39%
	MD	4,96	3,35	33%	48%
Kiefer	**MiBD**	7,24	6,00	17%	75%
	MBD	10,52	8,27	21%	27%
	MED	10,52	9,01	14%	17%
	MD	10,52	8,78	17%	20%
	MPD	10,52	8,58	18%	23%
Lärche	**MiBD**	5,13	3,96	23%	88%
	MBD	7,45	5,30	29%	41%
	MED	7,45	6,03	19%	24%
	MD	7,45	5,80	22%	29%

B=Bauplatten (OSB/Span), D=Dämmstoff, E=Energie, M=Möbel, Mi=Möbel inklusive Verschnitt, Mii=Möbel inkl. Verschnitt und Astholz, T=Textilfasern, P=Papierzellstoff
Quelle: Eigene Berechnung

Die durchschnittlichen Effizienzsteigerungen, die mit den einzelnen Koppelproduktarten erzielt werden, sind in Abbildung 137 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass in diesem Vergleich, anders als im Falle der Bauholzproduktion, die besonders ertragreichen Weiden und Pappeln als Bezugsgrößen für die Berechnung der Flächengutschriften für Bauplatten gewählt wurden. Umso deutlicher zeigt sich, dass eine Steigerung der Materialeffizienz in der stofflichen Verwertung mit Blick auf die Flächeneffizienz besonders wirkungsvoll ist. Allerdings muss hier erneut darauf hingewiesen werden, dass mit Miscanthus eine der ertragreichsten Pflanzen überhaupt als Referenzpflanze für die Brennstoffproduktion dient. Miscanthus steht allerdings als ackerbaulich kultivierte Rohstoffpflanze in einer erheblich größeren Flächenkonkurrenz und dabei auch in direkter Konkurrenz zur Nahrungsproduktion. In Anbetracht dieser Zusammenhänge erscheint die energetische Nutzung von Holzresten hier im Vergleich zu stofflichen Nutzungen etwas unterbewertet.

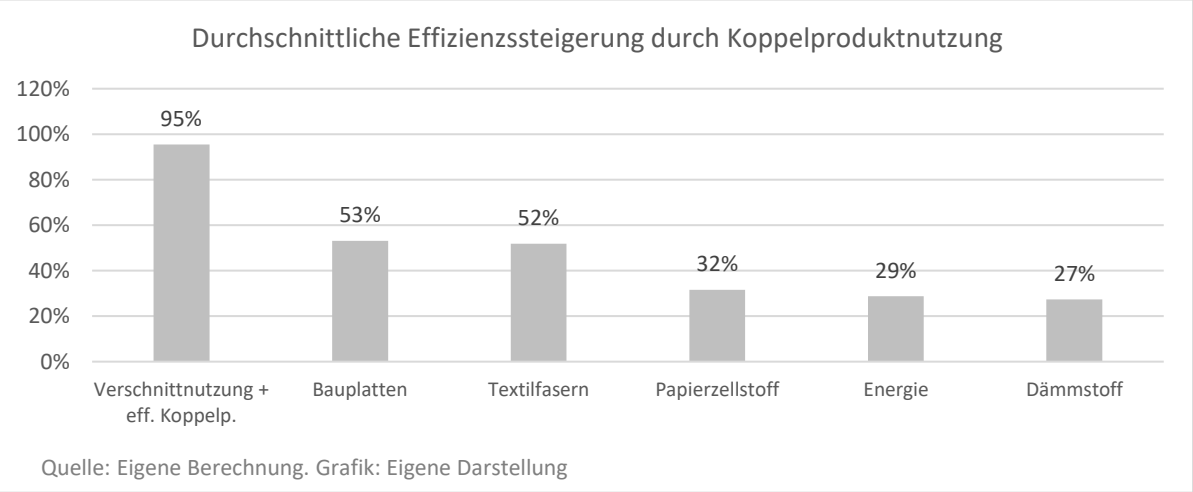


Abbildung 137: Durchschnittliche Effizienzsteigerung durch Koppelproduktnutzung nach Art der Koppelprodukte

11.2.3.7 Bedarf und Flächeninanspruchnahme

11.2.3.7.1 Möbelbedarf

Geht man nach Abzug von Produktionsverlusten und unter Berücksichtigung des Importüberschusses bei Holzwaren von einem durchschnittlichen Holzverbrauch von knapp 0,17 m³/Ea aus, ergibt sich pro Einwohner ein Verbrauch von ca. 70 kg Fichtenholz oder ca. 102 kg Buchenholz. Bei einer Mindest-Flächeninanspruchnahme von 3,14 m²/kg (Fichte) bzw. 3,42 m²/kg (Buche) resultiert daraus ein Flächenbedarf von mindestens 220 m²/Ea (Fichte) bis 349 m²/Ea (Buche). Nimmt man Anteile beider Holzarten von 50 Prozent an, liegt der Flächenbedarf folglich bei mindestens 284 m²/Ea. Um den Holzbedarf pro Quadratmeter Wohnfläche zu erhalten, der entsteht, wenn eine Wohnung vollständig mit Holzmöbeln neu eingerichtet werden muss, wurde der Holzbedarf eines durchschnittlichen Zwei-Person-Haushaltes mit drei bis

vier Zimmern und 93 Quadratmetern Wohnfläche (46,5 m² pro Person) abgeschätzt. Die in den Möbeln verbauten Holzmengen dieses Durchschnittshaushaltes sind in Tabelle 325 dargestellt. Insgesamt ergibt sich ein Holzbedarf von 1.143 kg. Dies entspricht 571,5 kg pro Person und 12,3 kg pro Quadratmeter Wohnfläche.

Tabelle 325: Flächenbedarf für Holzmöbel eines Zwei-Personen-Haushaltes (50 Prozent Buche, 50 Prozent Fichte)

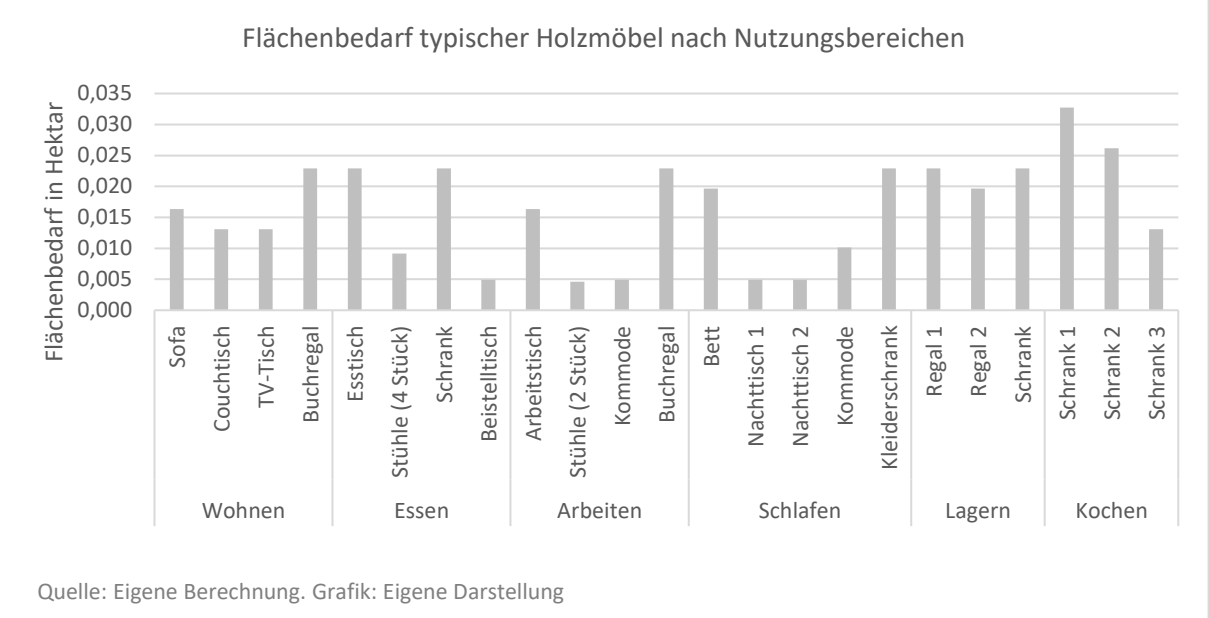
Raum (Nutzung)	Möbel	Holzgewicht (kg) [1)]	Flächenbedarf (ha) [2)]	Summe Gewicht (kg) [2)]	Summe Flächenbedarf (ha) [2)]
Wohnen	Sofa	50	0,016	200	0,0655
	Couchtisch	40	0,013		
	TV-Tisch	40	0,013		
	Buchregal	70	0,023		
Essen	Esstisch	70	0,023	183	0,0599
	Stühle (4 Stück)	28	0,009		
	Schrank	70	0,023		
	Beistelltisch	15	0,005		
Arbeiten	Arbeitstisch	50	0,016	149	0,0488
	Stühle (2 Stück)	14	0,005		
	Kommode	15	0,005		
	Buchregal	70	0,023		
Schlafen	Bett	60	0,020	191	0,0625
	Nachtisch 1	15	0,005		
	Nachtisch 2	15	0,005		
	Kommode	31	0,010		
	Kleiderschrank	70	0,023		
Lagern	Regal 1	70	0,023	200	0,0655
	Regal 2	60	0,020		
	Schrank	70	0,023		
Kochen	Schrank 1	100	0,033	220	0,0720
	Schrank 2	80	0,026		
	Schrank 3	40	0,013		
Gesamt		**1.143**	**0,374**	**1.143**	**0,3741**

Quellen: (1) Verschiedene Unternehmen. Genauere Angaben zu den einzelnen Möbeln siehe Anhang II, Tabelle 481 (2) Eigene Berechnung

Vergleichbare Zahlen zu den Gewichten von Möbeln, die zum Teil um wenige Kilogramm höher liegen, werden von Kolb (2004) angegeben. Nach Kolb wiegt ein Holzstuhl 10 kg, ein Wandschrank 100 kg, ein Kinderbett 40 kg, ein Schreibtisch 45 kg und eine Einbauküche 250 kg. Die Möbel einer Drei-Zimmer-Wohnung haben nach Kolb ein Gewicht von 1.400 kg (Kolb, 2004 S. 214). Eine Differenzierung nach Holzart wurde nicht vorgenommen. Da die beiden am häufigsten genutzten Holzarten Buche und Fichte eine unterschiedliche Dichte aufweisen,

wurde vereinfachend angenommen, dass beide Holzarten jeweils einen Anteil von 50 Prozent an der Möblierung haben.

Nimmt man auf dieser Grundlage ohne Berücksichtigung von Koppelprodukten einen jährlichen Möbel-Ertrag von maximal 2,5 Tonnen pro Hektar mit einer Holzfeuchte von acht Prozent als Mittelwert für Buche und Fichte an, ergibt sich aus diesen beiden Schätzungen ein Waldflächenbedarf von 0,46 bis 0,56 Hektar pro Haushalt (ca. 2,0 Personen) und Neueinrichtung. Unter Berücksichtigung von Koppelprodukten reduziert sich der Flächenbedarf von Buchen- und Fichtenholz, sodass der Flächenbedarf einer Neueinrichtung ca. 0,37 bzw. 0,46 Hektar beträgt.



Quelle: Eigene Berechnung. Grafik: Eigene Darstellung

Abbildung 138: Flächenbedarf typischer Holzmöbel nach Nutzungsbereichen

11.2.3.7.2 Nutzungsdauer von Möbeln

Bei einem jährlichen Materialbedarf von 0,12 bis 0,17 m³ pro Person ergibt sich anhand der Schätzung in Tabelle 325, dass der beschriebene Durchschnittshaushalt, der pro Person über mehr als 1,1 m³ in Möbeln gebundenes Holz verfügt, seine Möbel im Schnitt alle sieben bis 10 Jahre austauscht. Dieses Ergebnis kommt den Daten, die der Verband der Deutschen Möbelindustrie in den Jahren 2003 und 2008 veröffentlicht hat und in Tabelle 326 dargestellt sind, nahe (VDM, 2008). Diese wurden auf Nachfrage beim Handelsverband Möbel und Küchen, der die Zahlen erhoben hat, als immer noch aktuell bestätigt. Lediglich bei Polstermöbeln sei eine geringe Verkürzung der Nutzungsdauer zu beobachten (Kunz, 2018). Die Wohnungseinrichtungen der Bundesbürger sind nach Angaben des VDM durchschnittlich neun Jahre alt. (VDM, 2003).

Tabelle 326: Nutzungsdauer von Möbeln in Deutschland

Möbel	Nutzungsdauer
Küchenmöbel	15 Jahre
Betten	12 Jahre
Wohnzimmermöbel	10 Jahre
Polstermöbel	8 Jahre
Matratzen	8 Jahre
Kindermöbel	6 Jahre

Quelle: VDM, 2008

Eine Schätzung der durchschnittlichen Nutzungsdauer einer vollständigen Einrichtung aus Holz wurde anhand des Bedarfs des Bespielhaushaltes und den Angaben des VDM zur Nutzungsdauer durchgeführt, deren Ergebnis in Tabelle 327 dargestellt ist. Nach dieser Schätzung erscheint eine Nutzungsdauer von rund 12 Jahren wahrscheinlich. Aufgrund des geschätzten Holzverbrauchs in Deutschland und einer geschätzten Nutzungsdauer von 12 Jahren dürfte das pro Person in Holzmöbeln gebundene Holz bei ca. zwei Kubikmetern bzw. rund einer Tonne liegen. Dieser Wert liegt um 14 Prozent über der Schätzung des Möbelbestandes (einschließlich hölzerne Haushaltsgegenstände) von Kolb (2004), die mit rund 70 Mio. Tonnen im Jahr 2004 bei rund 880 kg pro Person lag. Da die Konsumausgaben für Möbel zwischen den Jahren 2004 und 2016 um rund 13 Prozent gestiegen sind und die pro Person genutzte Wohnfläche um 14,3 Prozent gewachsen ist[98], erscheint es durchaus wahrscheinlich, dass der Holzbedarf zwischen den Jahren 2004 und 2016 von 880 kg auf ca. 1.000 kg pro Person gestiegen ist. Es ergibt sich also eine plausible Spanne von ca. 570 bis 1.000 kg pro Person.

Tabelle 327: Geschätzte Nutzungsdauer und Holzbedarf einer durchschnittlichen Wohnungseinrichtung

Möbel	Jahre [1)]	Holzverbrauch (kg) [2)]	Bedarf pro Jahr (kg) [2)]
Küchenmöbel	15	220	14,7
Lagermöbel	15	200	13,3
Arbeitsmöbel	12	149	12,4
Betten	12	60	5,0
Wohnzimmermöbel	10	464	46,4
Gepolsterte Möbel	8	50	6,3
Durchschnitt	**12,1**	**1.143**	**98,1**

Quellen: (1) VDM, 2008 (2) Eigene Berechnung

[98] Im Jahr 2004 betrug die Wohnfläche bundesweit 40,7 m² pro Person (Berliner Mieterverein, 2005), im Jahr 2016 betrug sie 46,5 m² (Umweltbundesamt, 2018).

11.2.3.7.3 Flächeninanspruchnahme nach Nutzungsdauer

Bei einer Nutzungsdauer von 12 Jahren beträgt der Holzverbrauch, wie dargestellt, rund 48 bis 83 kg pro Person und Jahr, wobei es sich bei dem unteren Wert um eine ausreichende Möblierung und bei dem oberen Wert eher um den wahrscheinlichen heutigen Verbrauch handelt. Die jährliche Mindest-Waldflächeninanspruchnahme, die sich daraus ergibt, liegt somit zwischen rund 157 m² und 272 m² pro Person. Der obere Wert von 272 entspricht dem anhand des industriellen Rohstoffverbrauchs geschätzten Flächenbedarf, der, wie bereits dargestellt, im Mittel bei 284 m² pro Person liegt (vgl. 11.2.3.7.1), zu 96 Prozent.

Plausibilität der Bedarfsschätzung

Die berechnete Übereinstimmung des theoretischen Bedarfs mit dem aktuellen Verbrauch von 96 Prozent lässt sich nicht ohne Weiteres einordnen, da der Möbelbedarf im Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistung bei der Bedarfsschätzung noch unberücksichtigt ist, aber auch ein großer Teil der Möbel in Haushalten, Büros und Gewerbeimmobilien aus Metallen und Kunststoffen hergestellt ist. In Deutschland gibt es knapp 18 Millionen Büroarbeitsplätze (Cebra, 2016). Geht man von einem Büroflächenbedarf von ca. 9 m² pro Arbeitsplatz aus, ergibt sich in Deutschland eine Bürofläche von ca. 2,0 m² pro Einwohner [99]. Hinzu kommt eine Verkaufsfläche des Einzelhandels von rund 1,5 m² pro Einwohner (Statista, 2019b). Allein diese Flächen entsprechen somit rund 8 Prozent der Wohnfläche. Hinzu kommen Lagerräume des Einzelhandels und sonstige gewerbliche Räumlichkeiten, zu deren Flächen jedoch keine vergleichbaren Daten vorliegen. Geht man davon aus, dass jeder Arbeitsplatz mit einem Tisch (50 kg), einem Stuhl (8 kg), einem Standcontainer (20 kg) und einem Regal (ca. 70 kg) ausgestattet ist, summiert sich der geschätzte Holzbedarf auf ca. 150 kg pro Arbeitsplatz. Die durchschnittliche Nutzungsdauer von Büromöbeln liegt bei 13 Jahren (Bundesministerium der Finanzen, 2000), sodass sich ein Verbrauch von 11,5 kg pro Arbeitsplatz und Jahr ergibt. Umgerechnet auf die Gesamtbevölkerung ergibt sich somit lediglich ein Holzbedarf von ca. 2,5 kg/Ea, wenn das gesamte Mobiliar künftig aus Holz hergestellt würde. Dies entspricht lediglich 3 Prozent des potenziellen Bedarfs der Haushalte. Da auch künftig ein erheblicher Teil der Möbel aus Metall oder wiederverwerteten Kunststoffen hergestellt werden dürfte, erscheint es wahrscheinlich, dass der maximale Holzbedarf der Möbelproduktion die geschätzte Menge von 83 kg/Ea nicht wesentlich übersteigen dürfte. Aufgrund der mangelnden Datenverfügbarkeit wurde bei der Berechnung der Autonomiepotenziale daher vereinfachend der höhere Verbrauch von 83 kg pro Person und Jahr als Bedarf angenommen.

[99] Für Büro- und Bildschirmarbeitsplätze ergibt sich laut Arbeitsstättenverordnung „bei Einrichtung von Zellenbüros als Richtwert ein Flächenbedarf von 8 bis 10 m^2 je Arbeitsplatz einschließlich Möblierung und anteiliger Verkehrsflächen im Raum. Für Großraumbüros ist angesichts des höheren Verkehrsflächenbedarfs und ggf. größerer Störwirkungen (z. B. akustisch, visuell) von 12 bis 15 m^2 je Arbeitsplatz auszugehen.“ (BAuA, 2013/2018 S. 5, 6)

11.2.3.7.4 Potenziale zur Flächenbedarfsreduktion

Die dargestellten Daten machen das hohe Einsparpotenzial ersichtlich. Dabei ist neben der pro Person genutzten Möblierung insbesondere die Nutzungsdauer der Möblierung einer der entscheidenden Faktoren für den Flächen- und Ressourcenaufwand und somit auch für die Berechnung möglicher Szenarien. Gerade in den ersten 12 Jahren reduziert sich der Flächenbedarf pro Jahr besonders deutlich. In Abbildung 139 ist dies am Beispiel der jeweils flächeneffizientesten Nutzungen von Buchenholz (3.418 m²/t) und Fichtenholz (3.140 m²/t) dargestellt, die in diesem Beispiel jeweils einen Anteil von 50 Prozent am Verbrauch haben.

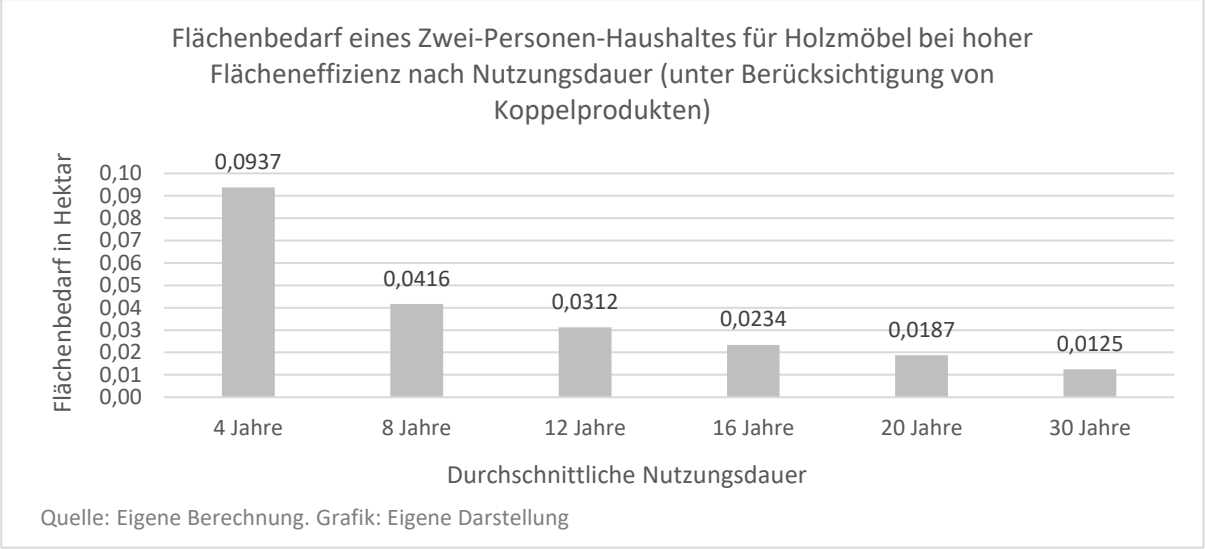


Abbildung 139: Flächenbedarf eines Zwei-Personen-Haushaltes für Holzmöbel bei hoher Flächeneffizienz nach Nutzungsdauer

Im Umkehrschluss bedeutet das, dass eine kürzere Nutzungsdauer von weniger als 12 Jahren den Flächenbedarf mit jedem Jahr Verkürzung überproportional ansteigen lässt. Ein Holzmöbel nur für neun statt zwölf Jahre zu nutzen, erhöht den Flächenbedarf um 33 Prozent. Nutzt man Holzmöbel nur sieben statt zwölf Jahre, so steigt der Flächenbedarf bereits um 71 Prozent (vgl. Tabelle 328).

Tabelle 328: Flächenbedarf von Holzmöbeln nach Nutzungsdauer im Vergleich

	Jahre									
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Flächenbedarf im Vergleich	240%	200%	171%	150%	133%	120%	109%	100%	92%	86%

Quelle: Eigene Berechnung

11.2.4 Fahrzeuge

Im Fahrzeugbau gewinnt der Leichtbau immer mehr an Bedeutung. Dabei rücken vor allem Naturfasern in den Fokus, weil sie leichter sind als Glasfasern oder Carbon und zudem deutlich ökologischer (Fraunhofer WKI, 2015 S. 9). Die Einsatzmöglichkeiten nachwachsender Rohstoffe im Fahrzeugbau sind derart vielfältig und zahlreich, dass sie hier nur angedeutet werden können. Die Bandbreite reicht vom einfachen Holzbauteil über Farben und Lacke bis hin zu komplexesten Verbundwerkstoffen. Zum Einsatz kommen unter anderem Schurwolle, Baumwolle, Flachs, Hanf, Kenaf, Leinen, Jute, Sisal, Abaka, Kokosfaser, Ananasfaser, Banane, Soja, Olivenkerne, Kautschuk, Zellulose, Zellulosefasern, Papier und Holz. Verarbeitet werden sie beispielsweise in Tür- und Seitenverkleidungen, Ladeböden oder Bodenbelägen. Häufig werden aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellte Produkte wie Textilien, Faserverbundwerkstoffe, biobasierter Korrosionsschutz und biobasierte Kunststoffe verarbeitet. Im Jahr 2010 entfielen in Deutschland mit rund 12.000 Tonnen (FNR, 2014 S. 281) rund 24 Prozent des Verbrauchs biobasierter Kunststoffe auf den Automobilsektor (FNR, 2014 S. 285). Dies entsprach rund 0,15 kg pro Einwohner. Naturfasern, die im Automobilbau zum Einsatz kommen, werden häufig in Kunststoffe eingebettet, wie z. B. in Polyurethan. Die großen Vorteile der nachwachsenden Rohstoffe liegen neben der umweltfreundlichen Herstellung in einem geringen Gewicht bei einer hohen Festigkeit und guten akustischen Eigenschaften. Am Ende des Lebenszyklus lassen sie sich als Brennstoff rückstandsfrei zur Energiegewinnung nutzen - das Recycling von Verbundwerkstoffen stellt jedoch noch eine größere Herausforderung dar (Fraunhofer WKI, 2015 S. 9-10).

11.2.4.1 Pkw

Die meisten Hersteller setzen bereits heute nachwachsende Rohstoffe im Automobilbau ein. Im Durchschnitt sind in einem Mittelklassefahrzeug bis zu 20 kg Naturfasern verbaut (FNR, 2018a). Fahrzeuge des Herstellers Renault enthielten im Jahr 2010 im Schnitt zwischen 13 und 16 Kilogramm an Naturfasern (Geiger, 2010). In der Mercedes E-Klasse des Baujahres 2004 kamen bereits „mehr als 50 Bauteile aus Naturmaterialien mit einem Gesamtgewicht von mehr als 30 Kilogramm zum Einsatz“ (dpa/gms, 2004). BMW setzt beim Bau des i3 Kenaf, Schurwolle und Holz ein. Die Kenaf Faser ist nach Angaben von BMW um 30 Prozent leichter als die herkömmlich an ihrer Stelle verwendeten Materialien (BMW, 2018). Die meisten Hersteller streben danach, die Anteile ökologischer Werkstoffe weiter zu erhöhen.

Naturfasern werden bisher vor allem im Innenbereich der Fahrzeuge eingesetzt. Der Hersteller Renew Sports Cars verwendet Hanffasern auch für die Herstellung seiner Sportwagenkarosserien und führt als Gründe dafür an, dass Hanf leichter ist als Stahl oder Glasfaser, nicht verbeult, nicht so spröde wie Kohlenstofffaser ist, biologisch abgebaut werden kann und Kohlenstoff bindet (Renew Sports Cars, 2018a). Das Unternehmen strebt an, bis zum Jahr 2025 kohlenstoffnegative Fahrzeuge (Carbon Negative Cars) zu entwickeln, die bei der Herstellung

mehr Kohlenstoff binden als bei der Produktion freigesetzt werden (Renew Sports Cars, 2018b). In der Karosserie des aktuellen Sportwagens sind nach Angaben von Bruce Michael Dietzen, CEO und Chef-Designer von Renew Sports Cars, 45 kg (100 Pfund) gewebten Hanfs verbaut (Dietzen zit. n. Steinbuch, 2016). Die Karosserie aus Hanf ist nach Angaben des Herstellers bei Zusammenstößen zehnmal so widerstandsfähig gegen Verbeulen wie eine Stahlkarosserie (Steinbuch, 2016).

Für die Schätzung der Flächeninanspruchnahme wurden die Angaben der Hersteller kombiniert. Der Faseranteil von Hanfstroh liegt nur bei 29 Prozent. Da jedoch auch die übrigen Bestandteile des Strohs vollständig für andere Zwecke genutzt werden können (z. B. für Spanplatten), ergibt sich bei einem Hanfstrohertrag von 7,5 bis 10,0 t/ha und einem Hanffaserverbrauch von 65 kg pro Automobil eine Flächeninanspruchnahme von weniger als 87 m². Der Flächenbedarf der übrigen nachwachsenden Rohstoffe wurde vereinfachend mit einem mittleren Ertrag von ebenfalls 7,5 t/ha gerechnet. Die gesamte Flächeninanspruchnahme liegt somit bei weniger als 100 m² pro Pkw. Bei einer Nutzungsdauer von 13 Jahren, ergibt sich daraus ein Flächenbedarf von 7,7 m² pro Pkw und Jahr (vgl. Tabelle 329). Wenn je 1.000 Einwohner 554 Pkw genutzt werden (Stand 2017), ergibt sich ohne Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte folglich ein Flächenbedarf von 4,3 m² pro Einwohner und Jahr.

Tabelle 329: Flächeninanspruchnahme der Rohstoffbereitstellung pro Pkw 2018

Verwendung	Karosserie	Innenausstattung, Textilien	Innenausstattung, Sonstiges
Rohstoff	Hanf	Hanf	Flachs, Hanf, Holz, etc.
Gewicht	[1] 45 kg	[2] 20 kg	[3] 10 kg
Ertrag	7,5 – 10,0 t/ha	7,5 – 10,0 t/ha	2,0 – 10,0 t/ha
Flächenbedarf [4]	< 60 m²	< 27 m²	< 13 m²

Quellen: (1) Dietzen zit. n. Steinbuch, 2016 ;(2) FNR, 2018a; (3) Schätzung (4) Eigene Berechnung

11.2.4.2 Fahrräder

Im Fahrradbau kommen vor allem die nachwachsenden Rohstoffe Holz, Bambus und Hanf zur Anwendung. Eingesetzt werden unter anderem Eiche, Esche, Nussbaum, Roteiche, Kirschbaum und andere Edelhölzer (Woodbike 46, 2018). Rahmen aus Holz und Bambus haben den niedrigsten Primärenergiebedarf aller Rahmenmaterialien (Renovo Hardwood Bicycles, 2018). Ein Bambusrahmen bindet nach Herstellerangaben „ca. 0,5 kg mehr CO_2 als bei Produktion und Transport entstehen. Im Vergleich zu Stahl- oder Kohlefaserrahmen, welche bei Produktion und Transport mehr als 5 kg CO_2 freisetzen ist dies bemerkenswert“ (Bambooride OG, 2014).

11.2.4.2.1 Räder aus Holz

Fahrradrahmen aus Holz zeichnen sich nach Herstellerangaben dadurch aus, dass sie eine höhere Ermüdungsbruchfestigkeit als Stahlrahmen aufweisen und eine bessere Federung als Karbonrahmen bieten (Cyclowood, 2013). Schäden sind in der Regel leicht auszubessern. Das Gewicht der umweltfreundlichen und schadstofffreien Holzrahmen ist trotz guter Werte bei Härte und Biegung gering (Cyclowood, 2013). Ein Cyclowood-Rennradrahmen wiegt zwischen 1.600 g und 2.300 g (Cyclowood, 2013). Der Mountainbike-Rahmen „Zebra“ des Herstellers Ango-Bikes wiegt 2.800 g. Das Gesamtgewicht des Mountainbikes liegt bei 12,0 Kilogramm (Arnhofer, 2018). Die übrigen Bauteile eines Fahrrades können ebenfalls zu großen Teilen aus Holz hergestellt werden. Zu noch größeren Teilen ist das Holzfahrrad „Athina“ aus Holz gefertigt: Rahmen, Sattel, Lenker, Pedale (teilweise) und Schutzbleche sind jeweils aus massivem Holz hergestellt. Das Gesamtgewicht des Fahrrades liegt bei 18 Kilogramm (SermaX GmbH, 2018). Der Flächenbedarf der Fahrräder liegt, je nach Bauweise, zwischen 4,6 und 14,3 m³ pro Fahrrad (vgl. Tabelle 330).

11.2.4.2.2 Räder aus Bambus

Fahrradrahmen aus Bambus weisen ähnliche Eigenschaften und Vorteile auf, wie Rahmen aus Holz. Dabei sind die guten Dämpfungseigenschaften von Bambusrahmen hervorzuheben. Die Verbindungen der einzelnen Bambusrohre werden aus Hanfseil und Epoxidharz hergestellt. Verbaut werden pro Rahmen 2.100 g Bambus und Hanf oder Bark Cloth, 180 g Metall sowie 200 g Epoxidharz. Die fertigen Rahmen wiegen zwischen 2,3 kg und 2,8 kg und liegen somit im Bereich üblicher Rahmen. (Bambooride OG, 2014) Eine für den Rahmenbau geeignete Art ist Tam Vong Bambus, der „wegen seiner Eigenschaften auch unter dem Namen „Iron Bamboo“ bekannt ist“ (STARK Sustainable Products UG, 2018). Hohe Bambusarten können Bambusrohre mit einer Höhe von 15 bis 20 m produzieren, aus denen sich mehrere Rahmen herstellen lassen. Der Flächenbedarf pro Rahmen ist minimal, da der Bambusertrag gut geführter Plantagen im globalen Durchschnitt bei rund 25 t TM pro Hektar und Jahr liegt. Besonders ertragreiche Bambusarten können sogar mehr als 30 t TM pro Hektar und Jahr liefern. (NL Agency, 2013 S. 5). Im Mittel ergibt dies einen Flächenbedarf von 0,8 m² pro Rahmen.

Tabelle 330: Fahrradbau - Flächenbedarf von Holz- und Bambusbauteilen

Rad-Typ	Rennrad	Mountainbike	Holz-Stadtrad	Mountainbike
Bauteil	Rahmen	Rahmen	Rahmen, Lenker, etc.	Rahmen
Rohstoff	Holz	Holz	Holz.	Bambus
Gewicht	1,6 – 2,3 kg [1)]	2,0 – 3,0 kg [1)]	3,0 – 9,0 kg [1)]	2,0 kg [1)]
Ertrag	3,4 – 5,0 t/ha	3,4 – 5,0 t/ha	3,4 – 5,0 t/ha	25 t/ha
Flächenbedarf	4,6 m²	6,0 m²	7,1 – 21,4 m²	0,8 m²

Quellen: (1) Cyclowood, 2013; (2) SermaX GmbH, 2018; (3) Bambooride OG, 2014

11.2.5 Textilien

Mit dem Umstieg von fossilen auf nachwachsende Rohstoffe gewinnt die Flächen- und Ressourceneffizienz der Naturfaserproduktion an Bedeutung. Pflanzliche Textilfasern sind ein vielseitiger Rohstoff, der nicht nur in Kleidung und Heimtextilien sondern auch bei der Herstellung von Möbeln, Fahrzeugen und vielen weiteren Produkten zum Einsatz kommt. Naturfasern eignen sich aufgrund ihrer Festigkeit und ihres vergleichsweise geringen Gewichtes besonders gut für technische Anwendungen (Formteile, Baustoffe, Spezialpapiere, technische Vliese).

11.2.5.1 Verbrauch

Der Faserverbrauch ist weltweit stark ansteigend. „Im Jahr 2016 wurden erstmals mehr als 100 Millionen Tonnen Textilfasern hergestellt“ (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2017 S. 2). Im Jahr 1900 lag der weltweite Verbrauch pro Person bei 2,4 Kilogramm und ist bis zum Jahr 2010 auf 11,0 kg/Ea gestiegen (HUMANA, 2011). Ein Produktionszuwachs um mehr als zwei Kilogramm (2,2 kg/Ea) dauerte zwischen 1950 und 1970 zwanzig Jahre, zwischen 2000 und 2010 (um 2,4 kg/Ea) noch zehn Jahre und zwischen 2010 und 2015 (um 2,6 kg/Ea) nur noch fünf Jahre. Aufgrund des gleichzeitigen Bevölkerungswachstums ist die Produktion dadurch von vier Millionen Tonnen im Jahr 1900 auf 99 Mio. Tonnen im Jahr 2015 gestiegen (vgl. Tabelle 331).

Tabelle 331: Entwicklung der jährlichen Produktion von Textilfasern weltweit zwischen 1900 und 2015

Jahr	Mio. Tonnen [1)]	Bevölkerung [4)]	kg/Person
1900	4,0	1.650.000	2,4
1950	9,4	2.532.229	3,7
1970	21,9	3.696.186	5,9
1990	40,8	5.306.425	7,7
2000	52,6	6.122.770	8,6
2010	76,0	6.895.889	11,0
2015	[2) 3)] 98,8	7.284.296	13,6

Quellen: (1) HUMANA, 2011; (2) Statista, 2018a; (3) Gesamtverband textil+mode, 2017; (4) UN Population Database zit. n. PDWB

Während sich die Bevölkerung in diesem Zeitraum (1900 - 2015) um den Faktor 4,4 vermehrt hat, hat der Verbrauch pro Person um den Faktor 5,6 zugenommen. Die Gesamtproduktion ist in der Folge auf das Fünfundzwanzigfache der Produktion des Jahres 1900 gewachsen. (Vgl. Abbildung 140)

Die Produktionszuwächse haben sich, wie bereits geschildert, dementsprechend stark beschleunigt. So ist die Gesamtproduktion in den fünf Jahren zwischen 2010 und 2015 mit einer

Zunahme um 22,8 Mio. Tonnen stärker gewachsen, als im viermal so langen Zeitraum zwischen 1970 und 1990. Die Zunahme zwischen 2010 und 2015 entspricht somit knapp einem Viertel der aktuellen Gesamtproduktion.

Sollte sich die weltweite Faserproduktion pro Person weiterhin in diesem Maße beschleunigen, dürfte die Gesamtproduktion im Jahr 2035 bereits deutlich über 200 Millionen Tonnen pro Jahr liegen, was mehr als einer Verdopplung der heutigen Produktion entspräche. Der Faserverbrauch pro Person hätte dann weltweit das Niveau erreicht, auf dem sich der Verbrauch in Deutschland heute befindet.

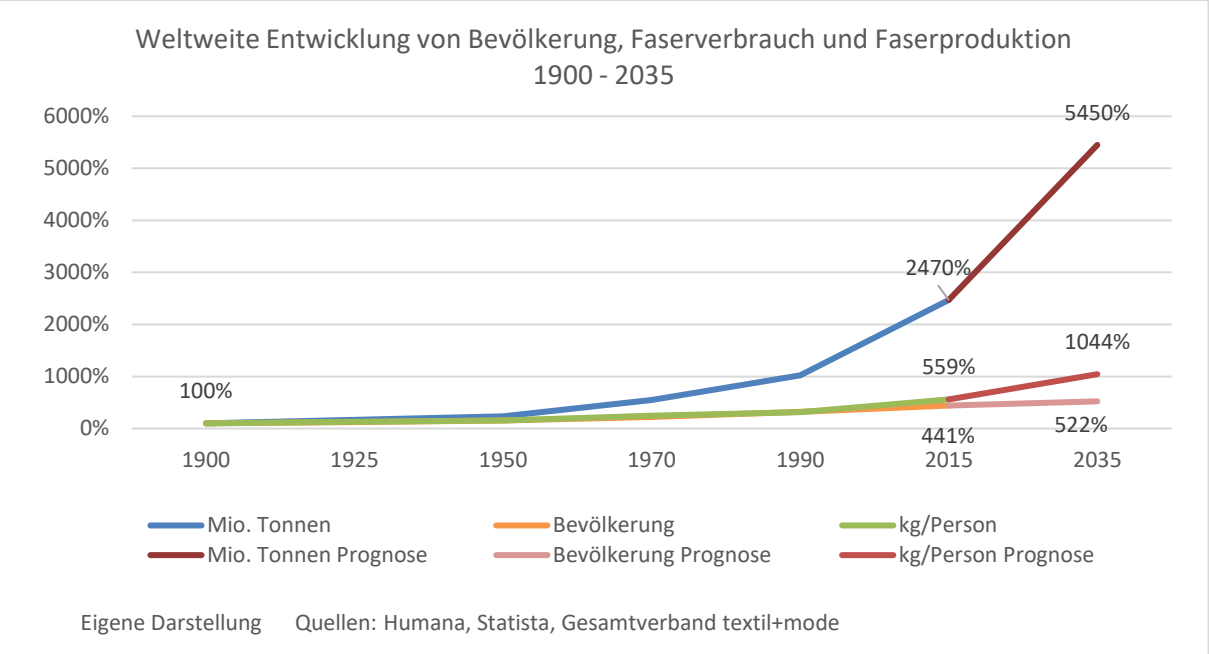


Abbildung 140: Weltweite Entwicklung von Bevölkerung, Faserverbrauch und Faserproduktion

Deutsche Verbraucher kaufen nach Angaben von Greenpeace jährlich 10 Kilogramm neue Kleidung, während in den USA 16 Kilogramm und in Afrika/Nahost etwa zwei Kilogramm Kleidung pro Person und Jahr konsumiert werden (Greenpeace, 2017 S. 3). Einen etwas höheren Verbrauch geben das Deutsche Rote Kreuz (DRK) und die Jugendorganisation des BUND (BUNDjugend) für Deutschland an. Pro Person werden in Deutschland demnach zwischen 12 und 15 kg Kleidung gekauft (DRK, 2018 und BUNDjugend, 2018). Der Gesamtverbrauch an Textilien liegt bei 26 Kilogramm (BUNDjugend, 2018). Die Nutzungsdauer, die ein wichtiger Faktor für die Ressourceneffizienz der Bekleidung von Menschen ist, hat in jüngerer Vergangenheit deutlich abgenommen: „Jeder Deutsche kauft etwa 60 neue Kleidungsstücke pro Jahr und trägt diese halb so lange wie vor 15 Jahren.“ (McKinsey & Company, 2016 zit. n. Greenpeace, 2017, S. 3). Frauen besitzen im Durchschnitt 118 Kleidungsstücke, Männer 73 Teile. 19 Prozent der Kleidungsstücke werden „so gut wie nie“ getragen (Greenpeace, 2015 S. 2).

Rund 250.000 Tonnen gebrauchter Kleidung werden jährlich im Hausmüll entsorgt (DRK, 2018). Dies entspricht rund drei Kilogramm pro Einwohner und damit zwischen 20 und 33 Prozent des jährlichen Kleiderverbrauchs. Diese Art der Entsorgung stellt „eine Belastung für die Umwelt dar. Kleider und Textilien mit synthetischen Stoffen (wie Polyester oder Polyamid) sind laut deutschem Abfallgesetz 'Sondermüll' “ (DRK, 2018).

Anhand der dargestellten Zahlen ist ersichtlich, dass der Verbrauch durchaus gesenkt werden könnte. Würde nur auf jene 19 Prozent der Kleidungsstücke verzichtet, die beinahe nie getragen werden, könnte der Verbrauch je nach Ausgangswert auf 8,1 bis 12,2 kg/Ea gesenkt werden. Der Gesamtverbrauch an Textilien läge dann bei ca. 24 kg/Ea. Aktuelle Trends wie das sogenannte „Upcycling“ von Textilien oder der Tausch und das Verleihen von Kleidung im Rahmen einer umweltbewussten „Sharing Economy“ deuten ebenfalls darauf hin, dass auch eine Trendumkehr bei der Verbrauchsentwicklung möglich ist. Großes Einsparpotenzial bietet aber vor allem eine Verlängerung der Nutzungsdauer. Diese könnte beispielsweise wieder verdoppelt werden, auf das Niveau des Jahres 2001.

Verkürzt sich die Nutzungsdauer der Kleidung dagegen weiter wie bisher, könnte der Verbrauch von Kleidung bis zum Jahr 2030 auf 16 bis 24 Kilogramm pro Person und Jahr ansteigen. Vorausgesetzt, dass der Konsum sonstiger Textilien gleichbleibt, läge der gesamte Textilverbrauch dann bei 28 bis 37 kg/Ea und somit um bis zu 43 Prozent über dem heutigen Verbrauch.

11.2.5.2 Rohstoffe

Mit 63,7 Prozent haben synthetische Fasern weltweit mit Abstand den größten Anteil an der Gesamtfaserproduktion (Gesamtverband textil+mode, 2017 S. 46). Naturfasern haben einen Anteil von 30,2 Prozent, wovon der größte Teil auf Baumwolle (23,2 Prozent) entfällt, während alle anderen Naturfasern bisher nur einen geringen Beitrag (7,1 Prozent) zur Gesamtproduktion leisten (Statista, 2018a). Synthetische Fasern aus dem nachwachsenden Rohstoff Cellulose (z. B. Viskose) haben einen Anteil von 6,1 Prozent (Gesamtverband textil+mode, 2017 S. 46). Nur noch 1,2 Prozent der Textilien werden aus Wolle hergestellt.

Für die Textilproduktion geeignete Naturfasern sind vor allem Baumwolle, Jute, Kenaf, Wolle, Seide, Flachs, Hanf und Fasernessel. Viskosefasern werden bisher vor allem aus Buche, Fichte, Eukalyptus, Pinie, Bambus, einjährigen Faserpflanzen oder Baumwolllinters gewonnen.

Die wichtigsten Faserpflanzen, die in Deutschland unter den bisherigen klimatischen Bedingungen angebaut und für die Naturfaserproduktion genutzt werden können, sind Lein, Hanf und Fasernessel. Auf dem Weltmarkt haben sie bisher jedoch nur eine geringe Bedeutung. Die Anteile der einzelnen Faserarten sind in Abbildung 141 dargestellt.

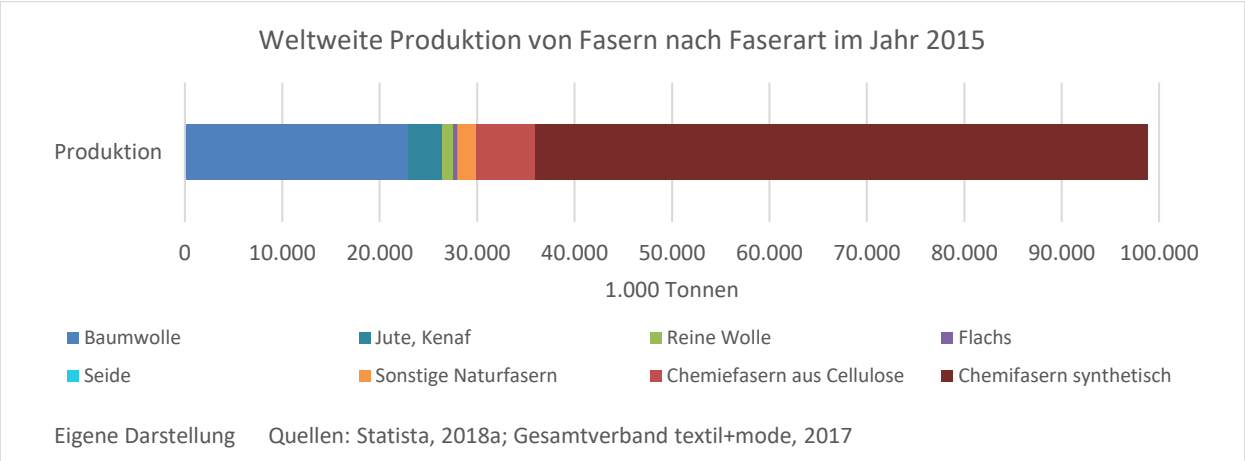


Abbildung 141: Weltweite Produktion von Fasern nach Faserart im Jahr 2015

11.2.5.3 Herstellung

11.2.5.3.1 Hanffaser

Nach der Ernte wird das Hanfstroh für gewöhnlich mehrere Wochen lang zum Rösten auf dem Boden ausgebreitet. In diesem Prozess kommen unter Einwirkung von Licht und Luft die langen Bastfasern zum Vorschein. Die Röste kann auch in Wasserbehältern durchgeführt werden und mithilfe von Chemikalien und Enzymen beschleunigt werden. Bei der folgenden Entrindung der Hanffasern werden diese von dem in der Mitte befindlichen Holzkern des Stängels getrennt. Moderne Entrindungsgeräte machen lange Röstungsphasen und separate Entrindungsprozesse oft überflüssig und produzieren innerhalb von wenigen Minuten nach dem Schneiden der Pflanze bündelfertige Fasern. Anschließend können die Fasern direkt gesponnen oder vorher durch weitere chemische oder mechanische Bearbeitung weicher und elastischer gemacht werden. Durch Entfernen des Lignins erhält man wesentlich glattere und weichere Fasern. Hanf ermöglicht die Herstellung sehr weicher und feiner Fasern. (SSB Holland, 2013)

11.2.5.3.2 Leinfaser

Bei der Ernte, dem sogenannten Raufen, wird der Flachs mit besonderen Maschinen aus der Erde gezogen und zum Rösten auf dem Feld ausgelegt, damit sich die Klebstoffe zwischen Fasern und Holz auflösen. Im Laufe der Röste werden die meisten der im Stängel aufgenommenen Nährstoffe gelöst und wieder in den Boden gespült. Anschließend wird das Röststroh für den Transport zu Ballen gepresst. Im nächsten Schritt werden die Samen abgekämmt und die Holzteile in einer Schwinge von den Fasern getrennt. Die Holzteile werden dabei zu kleinen Stücken (Schäben) gebrochen. Die Fasern werden beim sogenannten Hecheln durch immer feinere Kämme gezogen (gehechelt), wodurch Langfasern und Werg voneinander getrennt

werden. Die Langfasern können anschließend gesponnen werden. Werg/Kurzfasern und Schäben sind wertvolle Nebenprodukte.

11.2.5.3.3 Nesselfaser

Wie im Falle der Hanffasergewinnung erfolgt zunächst eine Tau- oder Wasserröste, bevor Fasern und Holz voneinander getrennt werden können. Dazu bedient man sich mechanischer Verfahren, bei denen der innere Holzteil der zunächst auf 20 bis 40 cm eingekürzten Stängel in kleine Stücke gebrochen wird, die sogenannten Schäben. Über mechanische Siebe, Schüttler und Windsichten werden Holz und Fasern anschließend voneinander getrennt. Am Ende des Aufschlussprozesses stehen gereinigte Faserflocken von mindestens 10 mm Länge. Diese werden in Ballen gepresst und der Spinnerei zugeführt, wo die sogenannte Spinnereivorbereitung und der Feinspinnprozess erfolgen. Industriell gesponnene Fasernesselgarne erreichen noch nicht die Feinheit und Gleichmäßigkeit, die bei anderen Naturfasern erreicht werden. Deshalb werden sie bisher in sogenannten Mischgarnen verarbeitet, in denen sich Mischungspartner wie Baumwolle oder Viskose anbieten. Die daraus hergestellten Textilien können gut isolieren und schneller Feuchte aufnehmen als Stoffe aus vergleichbaren Hanf- oder Leingarnen. Künftig sollen daraus verschleißarme Heimtextilien oder Bezugsstoffe für Sitze und Innenverkleidungen von Automobilen hergestellt werden. Als Nebenprodukte der Fasergewinnung erhält man neben den holzigen Schäben wertvolle Nesselblätter, die als Nahrungsmittel oder als Rohstoff für die Pharmazie genutzt werden können. (Mattes & Ammann, o. J.)

11.2.5.3.4 Viskosefaser

Viskosefasern bestehen vollständig aus pflanzlicher Cellulose und werden überwiegend aus Holz (z. B. Buche, Fichte, Bambus oder Eukalyptus) gewonnen.[100] Als Nebenprodukte erhält man im Laufe des Produktionsprozesses hauptsächlich Essigsäure, Furfural und Xylose (Holzzucker). Als Reststoff fällt sogenannte Braunlauge an, die vor allem Lignin und Hemicellulose enthält. Diese Braunlauge wird in der Regel als Brennstoff genutzt. Das darin enthaltene Lignin könnte aber künftig auch als Rohstoff für die Kunststoffproduktion oder für die Bereitstellung organischer Elektrolyte für Redox-Flow-Batterien genutzt werden (3N Kompetenzzentrum, 2017). „Zellstoff für die Papierherstellung besitzt im Allgemeinen eine Reinheit von 88 Prozent, Viskosezellstoff eine Reinheit von bis zu 96 Prozent, je nach Sorte. Die Gesamtausbeute eines

[100] Durch Weichkochen entrindeter Holzchips mit Magnesiumhydrogensulfit wird Zellstoff gewonnen. Nachdem dieser gewaschen und gebleicht wurde, wird der Zellstoff „mit ca. 20-prozentiger Natronlauge vermischt und abgepresst. Es entsteht Alkalizellulose. Diese wird zerfasert und muss dann bei 40 bis 50 Grad Celsius fünf bis acht Stunden lang reifen. [..] Schwefelkohlenstoff wird hinzugefügt. Die Alkalizellulose […] wird in Natronlauge gelöst, von Luft befreit und muss nachreifen. Es entsteht die Viskosespinnlösung. [..] Die Viskosespinnlösung wird durch Spinndüsen gepresst. Dies erfolgt bei mehr als 1.000 Löchern pro Spinndüse in einer Lösung aus Schwefelsäure und Sulfaten wie Natriumsulfat und Zinksulfat. Dabei findet eine chemische Reaktion statt und es entstehen Natriumsulfat, Schwefelkohlenstoff und Schwefelwasserstoff.“ (Isopp, 2012)

Textil-Zellstoffs bezogen auf die eingesetzte Holzmenge beträgt etwa 40 Prozent.“ (AustroCel Hallein, 2018a) Bei Buchenholz liegt die Zellstoffausbeute bei 39 bis 42 Prozent. Zusätzlich liefert jede Tonne (absolut trockenes) Holz bei der Zellstoffproduktion einen Nettoüberschuss Wärme (in Form von Dampf) von durchschnittlich 3.65 Gigajoule (GJ), was rund 1.014 kWh entspricht. Der Dampf wird mithilfe von Dampfturbinen zur Stromerzeugung genutzt. Abzüglich der Strommenge, die für die Zellstoffproduktion und die damit verbundenen Prozesse verbraucht wird, erreicht die Firma Lenzing einen Überschuss von 182 kWh Strom pro Tonne Buchenholz (Lenzing, 2012 S. 43). Die Firma AustroCel verarbeitet rund 850.000 Festmeter Fichtenholz pro Jahr. Die anfallende Braunlauge und das Produktionsabwasser werden ebenfalls zur Stromerzeugung genutzt. Bei einer Stromlieferung von 96 GWh/a entspricht dies bezogen auf den Rohstoffeinsatz rund 113 kWh pro Festmeter und rund 240 kWh pro Tonne absolut trockenen Holzes. Der Großteil des von AustroCel verarbeiteten Holzes kommt als Sägerestholz aus Sägebetrieben. (AustroCel Hallein, 2018b).

11.2.5.4 Koppelprodukte

Die für die Textilfaserproduktion geeigneten Fasern haben nur einen relativ geringen Anteil an der gesamten Biomasse der Faserpflanzen. Dementsprechend wichtig ist eine vollständige Nutzung der übrigen Bestandteile, um eine hohe Flächeneffizienz zu erzielen. Da die Koppelprodukte der Textilfaserproduktion ebenso zahlreich wie wertvoll sind, ist eine wichtige Voraussetzung für ihre nachhaltige Nutzung die Existenz gewerblicher oder industrieller Abnahmestrukturen innerhalb oder in der Nähe der Anbauregion.

11.2.5.4.1 Hanffaser

Als Koppelprodukte der Hanffaserproduktion können aus den übrigen Pflanzenteilen Nahrungsmittel (Hanfsamen, Hanföl, Hanfnudeln, Hanfmehl) und Futtermittel (Hanfsamen, Presskuchen) aus den Samen hergestellt werden, Dämmstoffe aus den Kurzfasern und weitere Baustoffe (z. B. Spanplatten, Zuschlagstoffe) sowie Brennstoffe aus den Schäben.

11.2.5.4.2 Leinfaser

Die möglichen Koppelprodukte der Leinfaserproduktion sind, wie im Falle des Hanfs aus den Samen hergestellte Nahrungsmittel (Leinsamen, Leinöl) und Futtermittel (Leinsamen, Presskuchen), Dämmstoffe aus den Kurzfasern und Baustoffe (Spanplatten, Zuschlagstoffe) sowie Brennstoffe, die aus den Schäben hergestellt werden. Aus dem Werg können Dämmstoffe und Garne hergestellt werden. Werg kommt auch als Dichtung von Gewinden in der Sanitärtechnik zum Einsatz. Leinöl ist zudem als Rohstoff für stoffliche Nutzungen aufgrund seiner besonderen Eigenschaften besonders gut geeignet. Es ist ein wichtiges Bindemittel für Ölfarben und Rohstoff für Leinölfirnis. Lein liefert außerdem geringe Honigerträge.

11.2.5.4.3 Nesselfaser

Die bei der Fasergewinnung anfallenden Schäben können als Brennstoff genutzt werden. Die Blätter der Nessel werden als Nahrungsmittel, Futtermittel oder als Pharmazierohstoff verwendet. Aus den Samen der Nessel lässt sich ein wertvolles Öl gewinnen. Allerdings erfolgt die Samenreife meist erst nach dem für die Stängel- und Blatternte geeigneten Zeitpunkt, sodass sich eine Kombinationsnutzung von Stängeln, Laub und Samen nicht anbietet.

11.2.5.4.4 Viskose

Da für die Viskoseproduktion ausschließlich das weichere und rindenfreie Stammholz genutzt wird, eignet sich hierfür vor allem der Verschnitt der Schnittholzproduktion. Neben dem Schnittholz können weitere Koppelprodukte folglich aus der Rinde hergestellte Dämm- oder Klebstoffe sein, sowie Bauholz und diverse weitere aus dem Astholz hergestellte Produkte. Hinzu kommen größere Mengen an Energieholz (Rest- und Durchforstungsholz). Bei der eigentlichen Viskoseproduktion erhält man wiederum pro Tonne absolut trockenen Holzes (atro) durchschnittlich rund 0,39 Tonnen Viskose und 0,11 Tonnen Koppelprodukte der Zellstoffgewinnung. Als Reststoff fallen rund 0,5 t Braunlauge an. Die Koppelprodukte können wie im Folgenden dargestellt genutzt werden (Lenzing, o. J. S. 23):

- Essigsäure: Lebens- und Konservierungsmittel
- Furfural: Chemisches Zwischenmittel und Lösungsmittel
- Magnesiumligninsulfonat: Bindemittel für Baustoffe oder Futtermittelindustrie
- Natriumsulfat: Waschmittel
- Braunlauge: Energie- oder Ligningewinnung

11.2.5.5 Nutzungskonkurrenzen

Die Viskoseproduktion konkurriert u. a. mit der Papierindustrie und der Spanplattenindustrie sowie mit der Bioenergiebranche um die gleichen Rohstoffe. Bei ackerbaulich produzierten Naturfasern handelt es sich dagegen nicht um Rohstoffe, die ohnehin anfallen und von verschiedenen Branchen nachgefragt werden. Da sie gezielt für die Faserproduktion angebaut werden, besteht allenfalls eine Konkurrenz um die nötigen Ackerflächen.

11.2.5.6 Hektarerträge

Baumwolle, die weltweit mit einem Anteil von 77 Prozent den Naturfasermarkt dominiert, lieferte im Zeitraum 2016 – 2019 weltweit durchschnittlich Hektarerträge von knapp 0,8 Tonnen pro Hektar (Statista, 2019g). Die höchsten Erträge erzielten die Länder Australien, Türkei, China, Brasilien und Mexiko mit 1,6 – 1,8 t/ha (Statista, 2019g). Nachfolgend werden die Ertragspotenziale der in Deutschland kultivierbaren Faserpflanzen Hanf, Lein (Faserlein / Öllein) und Nessel dargestellt. Ergänzt werden diese Potenziale durch Ertragspotenziale der Forstwirtschaft (Viskose).

11.2.5.6.1 Hanf

Je nach Standort und Anbau bewegen sich die Röststroherträge des Hanfanbaus zwischen 3 und 12 Tonnen pro Hektar. In Kombinationsnutzung liefert Hanf zwischen 3 und 5 Tonnen Stroh und zwischen 0,3 und 1,0 t Samen pro Hektar. Im bayerischen Nördlingen werden Stroherträge von fünf Tonnen ebenso erreicht wie in Thüringen (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2016b). Wird Hanf nur zur Strohproduktion angebaut, kann man 7 bis 12 Tonnen pro Hektar rechnen. Erträge von bis zu 12 t/ha sind nur auf besonders geeigneten Böden möglich (HANFFASER Uckermark eG, o. J.). Unter Thüringer Standortbedingungen werden im Mittel der Jahre und Standorte Röststroherträge von ca. 10 t/ha erzielt (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2016b). Im Zwischenfruchtanbau werden in Mecklenburg-Vorpommern (bei 30 Bodenpunkten auf Plaggenesch) durchschnittliche Erträge von 2,5 t/ha erzielt (Borchert, 2015). Im Mittel enthält geröstetes und getrocknetes Hanfstroh nach Schönthaler einen Faseranteil von 31 Prozent (Schönthaler, 2018a). Der Langfasergehalt beträgt bis zu 20 Prozent (Graf, et al., 2005 S. 10). Dieser Anteil kann als Kalkulationswert angenommen werden (Graf, et al., 2010). Der Kurzfaseranteil von rund 11 Prozent kann als Koppelprodukt z. B. für die Herstellung von Dämmstoffen verwendet werden.

11.2.5.6.2 Faserlein

Der Röstflachsertrag von Faserlein liegt nach Angaben der TLL (2009) bei 5,5 bis 7,5 Tonnen pro Hektar. Der Langfasergehalt liegt laut TLL bei 14,5 Prozent, der Kurzfasergehalt bei 10 Prozent (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2009a). Der Gesamtverband Leinen gibt eine etwas größere Ertragsspanne an: „Flachsstroh weist typische Ausbeuten an Langflachs von 14 bis 21% auf. Bei einer Strohmenge zwischen 5 und 8 t /ha entspricht dies einem Langfaserertrag von 700 kg bis 1680 kg/ha. Hinzu kommt der Ertrag an Werg, so dass effektive Fasererträge von mehr als 2000 kg/ha Flachsfaser keine Seltenheit sind“ (Gesamtverband Leinen, 2018). Zur Langfaserausbeute kommen nach Angaben des Gesamtverbands Leinen typische Wergausbeuten von 7 bis 15 Prozent. „Bei einer Strohmenge zwischen 5 und 8 t /ha entspricht dies einem Wergertrag von 400 kg bis 1000 kg/ha" (Gesamtverband Leinen, 2018). Nach von Gleich (1990) haben die Schäben einen Anteil von 45 Prozent am Gesamtertrag, der nach von Gleich inklusive Trocknungsverlusten, Erde, Staub, Spreu und Wurzeln erfasst wird. Dies ergibt einen Anteil am Stroh von knapp 73 Prozent. Der Faseranteil liegt nach von Gleich bei rund 26 Prozent. Hinzu kommt ein Prozent Flachswachs (von Gleich, 1990 S. 2).

Nachfolgend wurde auf Basis dieser Angaben ein mittlerer Roststrohertrag von 6,5 t/ha bei einem mittleren Langfasergehalt von 16 Prozent angenommen. Dies ergibt einen mittleren Langfaserertrag von einer Tonne pro Hektar. Zudem wurde hier von einem Werggehalt von 10 Prozent ausgegangen, was rund 0,7 t/ha entspricht. Dies ergibt einem Faseranteil (Langfasern

und Werg) von rund 26 Prozent im Durchschnitt. Der Schäbenanteil liegt demnach bei 72 bis 73 Prozent.

„In der Fruchtfolge steht Lein am besten nach Getreide. Allerdings sind wegen der 'Leinmüdigkeit' (Boden, Schädlinge) Anbaupausen von 5 bis 7 Jahren notwendig“ (BASF, 2017).

11.2.5.6.3 Öllein

Der Strohertrag von Öllein liegt nach Steger (2014) bei 1,0 bis 2,0 t/ha (Steger, 2014 S. 20). Graf, Degner, Zorn und Pittdorf (2005) geben für Öllein einen mittleren Kornertrag 2,0 t/ha bei einer Spanne von 1,2 bis 2,5 t/ha an (Graf, et al., 2005 S. 5) und gehen von einem Verhältnis von Korn zu Stroh = 1:1,5 aus (Graf, et al., 2005 S. 6). Nach Angaben der TLL liegt der Kornertrag zwischen 1,5 und 2,0 t/ha (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2016a). Der Fasergehalt (Langfasern und Werg) von Öllein liegt nach Steger bei rund 20 bis 25 Prozent (Steger, 2014 S. 20). Nachfolgend wurden auf Basis der genannten Daten ein Kornertrag von 1,5 t/ha und ein Röststrohertrag von 2,2 t/ha angenommen, was einem Verhältnis von 1:1,5 entspricht. Daraus ergeben sich potenzielle Fasererträge von 0,4 bis 0,5 t/ha. Die Möglichkeit der Verarbeitung von Ölleinstroh und Ölleinfasern ist nachgewiesen (Brückner, 2014).

11.2.5.6.4 Nessel

Die Fasernessel liefert im konventionellen Anbau 7 bis 8 t lufttrockene Stängel pro Hektar. In einem zweiten Schnitt können 1,0 bis 1,5 t lufttrockene Blätter geerntet werden (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2009b), was einem Gesamtertrag von bis zu 6,9 t Trockenmasse pro Hektar entspricht. Im ökologischen Anbau werden nach Lehne et al. (2001) Stängelerträge von 1,7 bis 4,4 t TM pro Hektar erzielt. Dabei hat die Düngung erheblichen Einfluss auf die Höhe der Erträge. Die höchsten Erträge wurden in Versuchen mit einer Kombination von Jauche und Stallmist erzielt. (Lehne, et al., 2001)

Der Faseranteil der Fasernessel liegt zwischen 11 und 16 Prozent (Lehne, et al., 2001; Ganz, 2017). Werden Stängelerträge von 5 bis 7 t/ha erreicht, sind somit Fasererträge von 0,5 bis 1,1 t/ha möglich. Neuere Züchtungen erreichten im Jahr 2013 um 25 Prozent höhere Fasergehalte als die besten bis dahin bekannten Fasernessel-Sorten (FNR, 2013). In der Praxis erzielt die Firma Mattes & Ammann in Meßstetten-Tieringen (Baden-Württemberg) bisher Langfasererträge von rund 0,7 t pro Hektar und Jahr. Hinzu kommen rund 3,2 Tonnen Schäben. Dabei wird in Meßstetten-Tieringen vollständig auf chemische Pflanzenschutzmittel und Düngemittel verzichtet (Ganz, 2017a). Im ökologischen Anbau können neben den Schäben weitere Koppelprodukte aus Blättern und Pollen erzeugt werden, die als Futter- oder Nahrungsmittel genutzt werden können. Mattes & Ammann strebt deshalb die Entwicklung einer Erntetechnik an, mit der Stängel, Blätter und Pollen separiert geerntet werden können (Ganz,

2017b). Bei einer Doppelnutzung von Blatt und Faser bei nur einem Schnitt werden die Pflanzen früher als sonst üblich geschnitten, weil die Blätter ansonsten zu großen Teilen schon vor der Ernte abfallen können. Das Erntegut wird anschließend „nur wenige Tage auf dem Feld angewelkt und dann künstlich nachgetrocknet bis die Blätter konserviert („rascheltrocken“) sind“ (Mattes & Ammann, 2015a).

11.2.5.7 Ertragspotenziale und Flächenbedarf im Vergleich

Ohne Berücksichtigung von Koppelprodukten liegen die reinen Textilfasererträge der in Deutschland für die Faserproduktion nutzbaren Rohstoffpflanzen, wie zuvor dargestellt, zwischen einer halben Tonne und zwei Tonnen pro Hektar. Faserlein, Fichte und Hanf in Kombinationsnutzung liefern jeweils rund eine Tonne pro Hektar. Mit zwei Tonnen pro Hektar liefert Faserhanf mit Abstand die höchsten Erträge (vgl. Abbildung 142).

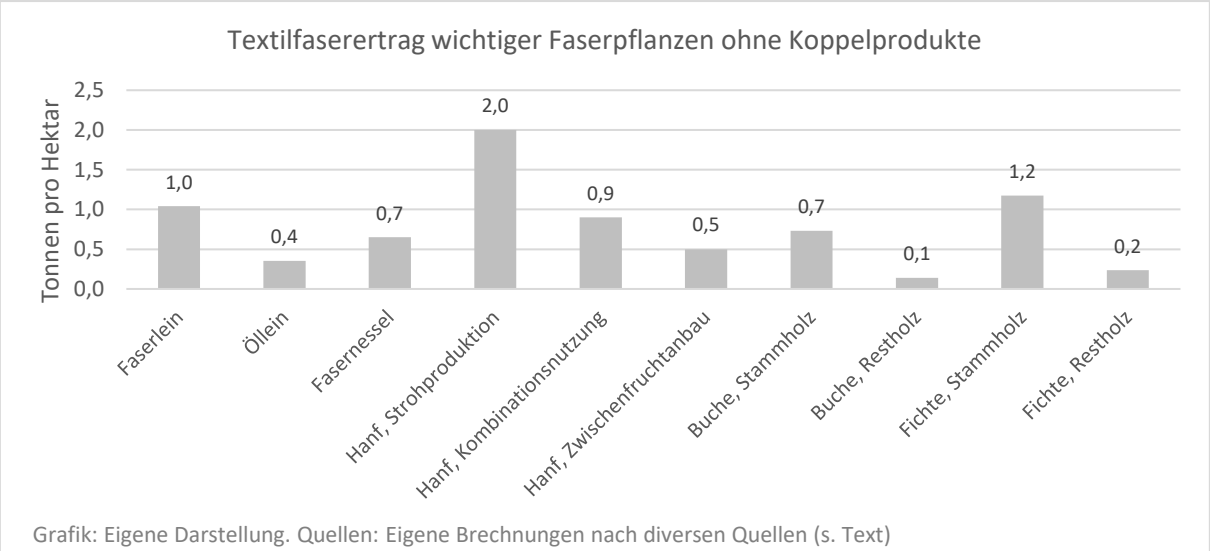


Abbildung 142: Textilfaserertrag wichtiger Rohstoffpflanzen ohne Koppelprodukte (t/ha)

Da der für die Textilfaserproduktion geeignete Anteil der Rohstoffpflanzen sehr gering ist, hat die Nutzung der Koppelprodukte eine umso größere Bedeutung für Flächeneffizienz und Nachhaltigkeit der Faserproduktion. Nimmt man mögliche Koppelprodukte hinzu, so liegen die Gesamterträge zwischen vier und zehn Tonnen pro Hektar. Hanf liegt auch hier mit großem Abstand vor den übrigen Rohstoffpflanzen. Die möglichen Gesamterträge der oberirdischen Pflanzenteile sind in Abbildung 143 dargestellt.

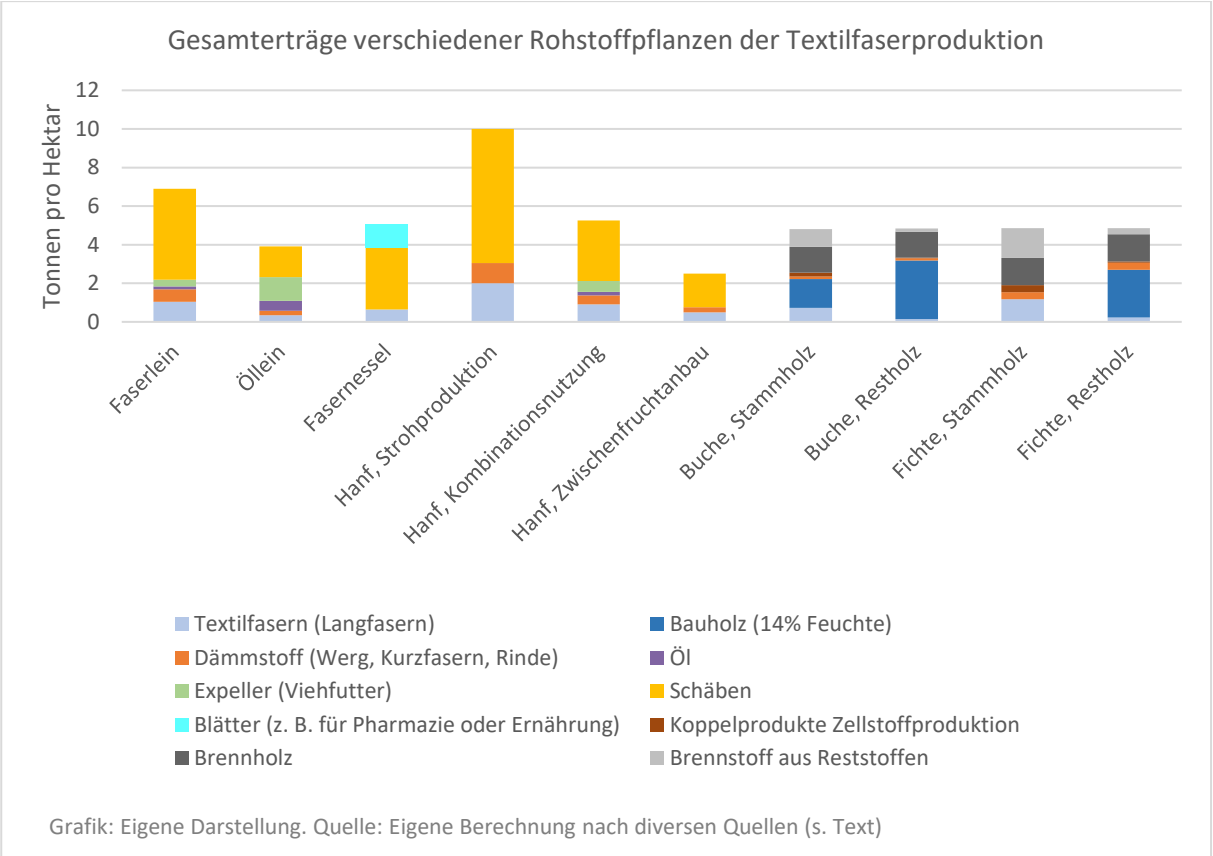


Abbildung 143: Gesamterträge verschiedener Rohstoffpflanzen der Textilfaserproduktion (t/ha)

11.2.5.7.1 Flächeneffizienz bei energetischer Nutzung der Schäben

Anhand der dargestellten Gesamterträge können mögliche Flächengutschriften berechnet werden. Da zur Eignung von Nesselschäben als Rohstoff für Baustoffproduktion (z. B. für die Produktion von Spanplatten oder Leichtbeton) keine Informationen vorliegen, wurde in diesem Vergleich angenommen, dass die anfallenden Schäben jeweils als Brennstoff verwendet werden, um die Anwendung gleicher Maßstäbe zu gewährleisten. Allerdings ergeben sich so geringere Flächengutschriften als bei einer Verwendung der Schäben als Baustoff. Dies betrifft insbesondere Faserhanf und Faserlein.

Verwendet man die Schäben als Brennstoff, muss als Vergleichspflanze nicht die Pappel, sondern Chinaschilf/Miscanthus herangezogen werden, bei dem es sich in Deutschland um die ackerbaulich kultivierbare Pflanze mit der höchsten Biomasseproduktion handelt. Dementsprechend gering fallen die Flächengutschriften für Brennstoffe aus. Insgesamt wurden Gutschriften zwischen 1.881 m²/ha und 9.508 m²/ha berechnet. Die geringste Gutschrift ergab sich für die Fasernessel, die höchste für Hanf im Zwischenfruchtanbau. Die insgesamt berechneten Gutschriften sind in Tabelle 332 dargestellt.

Tabelle 332: Flächengutschriften für Koppelprodukte der Faserproduktion bei energetischer Nutzung der Schäben

Koppelprodukt	Faserlein	Öllein	Fasernessel	Hanf FN	Hanf KN	Hanf ZF	Buche SH	Buche RH	Fichte SH	Fichte RH
Getreidekorn						7.313				
Nesselblätter			199							
Bauholz							3.141	6.379	0	5.188
Dämmstoff	791	268		1.008	454	1.281	44	44	129	129
Öl	405	1419			507					
Expeller	607	2.126			976					
Festbrennstoff	2.477	838	1.682	3.653	1.644	913	1.103	904	1.342	1.024
Biogassubstrat										
SUMME	**4.281**	**4.651**	**1.881**	**4.662**	**3.581**	**9.508**	**4.288**	**7.327**	**1.472**	**6.341**

FN=Fasernutzung; KN = Kombinationsnutzung, ZF = Zwischenfrucht, SH = Stammholz, RH = Restholz
Quelle: Eigene Berechnung

Aufgrund der dargestellten Gutschriften steigt die Flächeneffizienz von Faserlein um rund 75 Prozent, die Effizienz von Öllein um 87 Prozent. Der Flächenbedarf von Faserleinfasern sinkt somit von 9,6 auf 5,5 m²/kg, der von Ölleinfasern von 28,4 auf 15,2 m²/kg. Relativ gering ist dagegen die Flächeneffizienzsteigerung im Falle der Fasernessel mit rund 23 Prozent, weil Energieträger als Koppelprodukte nur zu niedrigen Gutschriften führen. Pro Kilogramm Nesselfaser fällt der Flächenbedarf daher nur von 15,4 auf 12,5 m².

Hohe Steigerungen der Flächeneffizienz ergeben sich für Fasern aus Buchenstammholz und Hanffasern, die in einer Kombinationsnutzung erzeugt werden. Mit 7,1 und 7,8 m²/kg bewegen sich Kombinationshanffasern und Buchenviskose nach Berücksichtigung der Koppelprodukte auf dem Niveau von Fichtenviskose. Die Nutzung von Restholz als Rohstoff der Faserproduktion erweist sich nach dieser Berechnungsmethode nicht als flächeneffizient. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass es zur Faserproduktion deutlich flächeneffizientere Alternativen gibt als zur Produktion von holzbasierten Baustoffen wie OSB- oder Spanplatten. So nimmt Viskosefaser aus Buchenrestholz ca. 19,1 m²/kg in Anspruch, Viskose aus Fichtenrestholz ca. 15,6 m²/kg.

Die höchste Flächeneffizienz im Hauptfruchtanbau weist Faserhanf mit einem Flächenbedarf von 2,7 m²/kg auf. In Kombinationsnutzung (mit Körnerproduktion) werden dagegen 7,1 m² pro Kilogramm Hanffaser in Anspruch genommen. Die mit Abstand höchste Flächeneffizienz weist jedoch Faserhanf im Zwischenfruchtanbau auf, der nur 1,0 m² pro Kilogramm Fasern in Anspruch nimmt. Der Grund dafür ist, dass der hohe Ertrag der Hauptfrucht Wintergerste sehr stark ins Gewicht fällt.

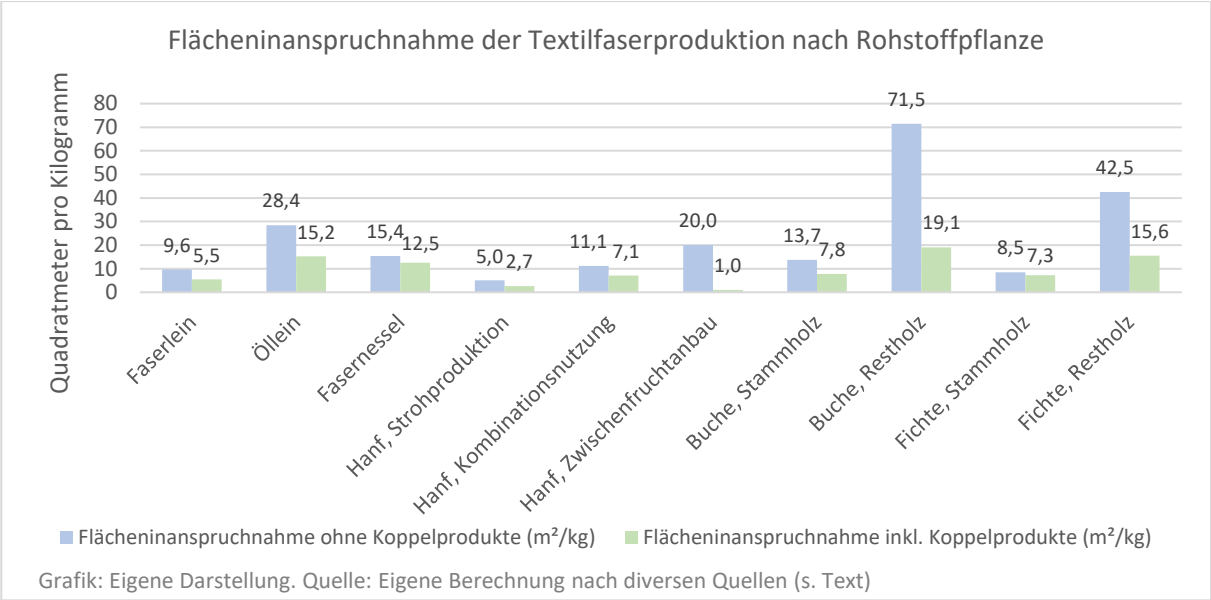


Abbildung 144: Textilfasererträge nach Berücksichtigung von Koppelprodukten bei energetischer Nutzung der Schäben (m²/kg)

11.2.5.7.2 Flächeneffizienz bei stofflicher Nutzung der Schäben

Bei einer Verwendung der Schäben als Rohstoff für die Spanplattenproduktion erhalten vor allem Faserlein und Hanf größere Flächengutschriften. Im Zwischenfruchtanbau erhält Hanf sogar eine Gutschrift von mehr als 10.000 m². Somit nimmt die Faserproduktion mit Hanf in diesem Fall praktisch keine Fläche mehr in Anspruch und ist damit die flächeneffizienteste Form aller hier untersuchten Möglichkeiten der Textilfaserproduktion. Ob die Schäben der Fasernessel für die Produktion von Baustoffen geeignet sind, konnte nicht geklärt werden, weshalb die berechnete Flächengutschrift in Tabelle 333 unter Vorbehalt angegeben ist.

Tabelle 333: Flächengutschriften für Koppelprodukte der Faserproduktion bei stofflicher Nutzung der Schäben

Koppelprodukt	Faser-lein	Öllein	Faser-nessel	Hanf FN	Hanf KN	Hanf ZF	Buche SH	Buche RH	Fichte SH	Fichte RH
Getreidekorn						7.313				
Blätter			199							
Bauholz							3.141	6.379		5.188
OSB/Spanplatte	4.713	1.595	(3.200)	6.950	3.128	1.738				
Dämmstoff	791	268		1.008	454	1.281	44	44	129	129
Öl	405	1.419			507					
Expeller	607	2.126			976					
Festbrennstoff						0	1.103	904	1.342	1.024
SUMME	**6.516**	**5.408**	**3.399**	**7.958**	**5.064**	**10.332**	**4.288**	**7.327**	**1.472**	**6.341**

KN=Kombinationsnutzung, ZF=Zwischenfruchtanbau, SH=Stammholz als Rohstoff, RH=Restholz als Rohstoff.
In Klammern: Unter Vorbehalt.
Quelle: Eigene Berechnung

Unter den im Hauptfruchtanbau kultivierten Faserpflanzen ist Hanf ebenfalls die Pflanze mit der höchsten Flächeneffizienz, die nur rund 1,0 m² je Kilogramm Fasern in Anspruch nimmt. Faserlein folgt mit rund 3,3 m²/kg vor Hanf in Kombinationsnutzung, der einen Flächenbedarf von 5,5 m²/kg aufweist. Viskose aus dem Stammholz von Fichten und Buchen liegt auch in diesem Vergleich mit 7,3 m²/kg bzw. 7,8 m²/kg im Mittelfeld vor Fasernessel und Öllein, die pro Kilogramm Fasern 10,2 bzw. 13,0 m² in Anspruch nehmen. Im Durchschnitt ist die Flächeninanspruchnahme durch landwirtschaftliche Faserpflanzen bei einer stofflichen Nutzung der Schäben etwa um die Hälfte geringer als bei einer energetischen Nutzung.

Daher weist Hanf im Zwischenfruchtanbau bei einer stofflichen Nutzung der Schäben eine derart hohe Flächeneffizienz auf, dass Gerste und Hanf im Vergleich zum Durchschnitt der übrigen Pflanzen rechnerisch sogar 0,7 m² pro Kilogramm „freisetzen“, die in der Folge für andere Zwecke genutzt werden können.

Tabelle 334: Flächeninanspruchnahme der Textilfaserproduktion nach Berücksichtigung von Koppelprodukten bei stofflicher Nutzung der Schäben (m²/kg)

Nutzung	Faserlein	Öllein	Fasernessel	Hanf, FN	Hanf, KN	Hanf, ZF	Buche SH	Buche RH	Fichte SH	Fichte RH
Ohne Koppelprodukte	9,6	28,4	15,4	5,0	11,1	20,0	13,7	71,5	8,5	42,5
Inklusive Koppelprodukte	3,3	13,0	(10,2)	1,0	5,5	-0,7	7,8	19,1	7,3	15,6

KN=Kombinationsnutzung, ZF=Zwischenfruchtanbau, SH=Stammholz als Rohstoff, RH=Restholz als Rohstoff.
In Klammern: Unter Vorbehalt.
Quelle: Eigene Berechnung

11.2.5.8 Bedarf und Flächeninanspruchnahme

Der Bedarf an Textilfasern liegt in Deutschland aktuell bei rund 26 kg pro Einwohner und Jahr. Im Szenario I „Heutiger Verbrauch“ wurde berechnet, wie viel Anbaufläche benötigt würde, um den heutigen Verbrauch an Textilfasern vollständig aus Fasern zu decken, die aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden. Geht man davon aus, dass jeweils 40 Prozent der für die Faserproduktion genutzten Anbaufläche für den Anbau von Hanf und Flachs und die verbleibenden 20 Prozent für die Viskosefaserproduktion aus Holz verwendet werden, wird in der gewählten Nutzungskombination ein Ertrag von rund 1,2 t/ha erzielt. Dies entspricht einem Flächenbedarf von rund 8,2 m²/kg, wenn keine Koppelprodukte aus dem Hanf- und Flachsanbau genutzt bzw. berücksichtigt werden. Die erforderliche Flächeninanspruchnahme zur Deckung des Gesamtbedarfs umfasst demnach rund 1,76 Millionen Hektar. Im Falle der Viskoseproduktion wurde allerdings in beiden Varianten angenommen, dass kein potenzielles Schnittholz, sondern nur Verschnitt aus Sägewerken genutzt wird. Im Falle der Hanffaserproduktion im Zwischenfruchtanbau wurde in beiden Varianten die Kornnutzung der Hauptfrucht Gerste berücksichtigt. Die daraus resultierenden Erträge, die der Berechnung der Szenarien zugrunde liegen, sind in Tabelle 485 (Anhang II) dargestellt.

Bei einer vollständigen Nutzung aller Pflanzenteile für die Herstellung von Koppelprodukten steigt die Flächeneffizienz etwa um den Faktor 3,0. Pro Kilogramm Faser sinkt die Flächeninanspruchnahme somit auf einen Wert von 2,8 m²/kg. Unter Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte beträgt die erforderliche Flächeninanspruchnahme zur Deckung des Gesamtbedarfs somit noch rund 0,59 Millionen Hektar.

Um die Auswirkungen eines veränderten Textilfaserverbrauchs auf den Flächenbedarf zu untersuchen, wurden fünf weitere Szenarien berechnet. Der für diese Szenarien angenommene Faserverbrauch ist in Tabelle 335 dargestellt. Im Szenario I wurde unterstellt, dass der Verbrauch auf dem heutigen Niveau stagniert. Setzt sich der aktuelle Entwicklungstrend des Kleiderkonsums fort, dürfte der Verbrauch im Jahr 2030 über 30 kg/Ea liegen. Wird dieser Bedarf mit den gleichen Pflanzen des Szenarios I gedeckt, steigt der Flächenbedarf, je nach Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte, auf 2,2 bzw. 0,8 Mio. Hektar pro Jahr. Diese Entwicklung wurde in Szenario II berechnet. In Szenario III wurde der Bedarf des Jahres 2030 ausschließlich mithilfe der flächeneffizientesten Möglichkeiten des Faserpflanzenanbaus gedeckt.

Tabelle 335: Faserverbrauch pro Einwohner im Jahr 2030 nach Szenario

Faserverbrauch pro Einwohner	Heutiger Verbrauch (I) [1]	Trend (II) [2]	Trend + Effizienz (III) [2]	Suffizienz (IV) [2]	Suffizienz + Biodiversität (V) [2]	Effizienz + Suffizienz + Biodiversität (VI) [2]
kg/Ea	26,0	32,5	32,5	13,6	13,6	13,6

Quellen: (1) DRK (2018); (2) Eigene Annahmen / Szenarien

In dieser Variante sind ohne Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte Erträge von rund 2 t Fasern pro Hektar zu erwarten. Dies entspricht einem Flächenbedarf 5,0 m²/kg. Werden Koppelprodukte genutzt, wurde eine mittlere Flächeninanspruchnahme von rund 1,0 m²/kg berechnet. Trotz des gestiegenen Verbrauchs würde die Flächeninanspruchnahme somit deutlich sinken und betrüge unter Berücksichtigung von Koppelprodukten weniger als 0,27 Mio. Hektar pro Jahr (vgl. Tabelle 337).

Tabelle 336: Angenommene Flächenanteile der Faserpflanzen im Jahr 2030 nach Szenario

Faserpflanzen, Nutzung	Heutiger Verbrauch (I)	Trend (II)	Trend + Effizienz (III)	Suffizienz (IV)	Suffizienz + Biodiversität (V)	Effizienz + Suffizienz + Biodiversität (VI)
Faserhanf, T+E	10,0%	10,0%		10,0%		
Faserhanf, T+B	10,0%	10,0%	50,0%	10,0%		10,0%
Hanf, KN	10,0%	10,0%		10,0%	10,0%	
Hanf, ZF	10,0%	10,0%	50,0%	10,0%	15,0%	40,0%
Nessel					45,0%	40,0%
Faserlein, T+E	20,0%	20,0%		20,0%	15,0%	
Faserlein, T+B	20,0%	20,0%		20,0%	15,0%	10,0%
Öllein						
Fichte SH						
Fichte RH	10,0%	10,0%		10,0%		
Buche SH						
Buche RH	10,0%	10,0%		10,0%		
SUMME	**100,0%**	**100,0%**	**100,0%**	**100,0%**	**100,0%**	**100,0%**

B=Baustoffliche Nutzung, E=Energetische Nutzung, T=Nutzung für Textilproduktion, KN=Kombinationsnutzung, ZF=Zwischenfruchtanbau, SH=Stammholz als Rohstoff, RH=Restholz als Rohstoff
Quelle: Annahme / Eigene Szenarien

Würde dagegen nicht die Flächeneffizienz optimiert, sondern der Verbrauch wie in Szenario IV auf das Niveau des heutigen globalen Durchschnitts von 13,6 kg/Ea gesenkt, würde dies zu einer Flächeninanspruchnahme von mehr als 0,31 Mio. Hektar führen. Würde dabei, wie in Szenario V, zudem darauf geachtet, dass der Faserpflanzenanbau die Biodiversität fördert, dürfte beispielsweise eine verstärkte Nutzung von Fasernesseln den Flächenbedarf auf mehr als 0,40 Millionen Hektar pro Jahr steigen lassen.

In Szenario VI wurde eine Kombination von Effizienz, Suffizienz und Biodiversität gewählt. In diesem Fall zeigt sich, dass die Flächeninanspruchnahme trotz einer verstärkten Berücksichtigung ökologischer Aspekte auf weniger als 0,19 Mio. Hektar gesenkt werden könnte.

Tabelle 337: Flächenbedarf der Faserproduktion im Jahr 2030 pro Kilogramm nach Szenario und Koppelproduktnutzung (m²/kg)

Koppelproduktnutzung	Heutiger Verbrauch (I)	Trend (II)	Trend + Effizienz (III)	Suffizienz (IV)	Suffizienz + Biodiversität (V)	Effizienz + Suffizienz + Biodiversität (VI)
Keine Koppelproduktnutzung	8,2	8,2	5,1	8,2	10,2	7,6
Vollständige Koppelproduktnutzung	2,8	2,8	1,0	2,8	3,6	1,8

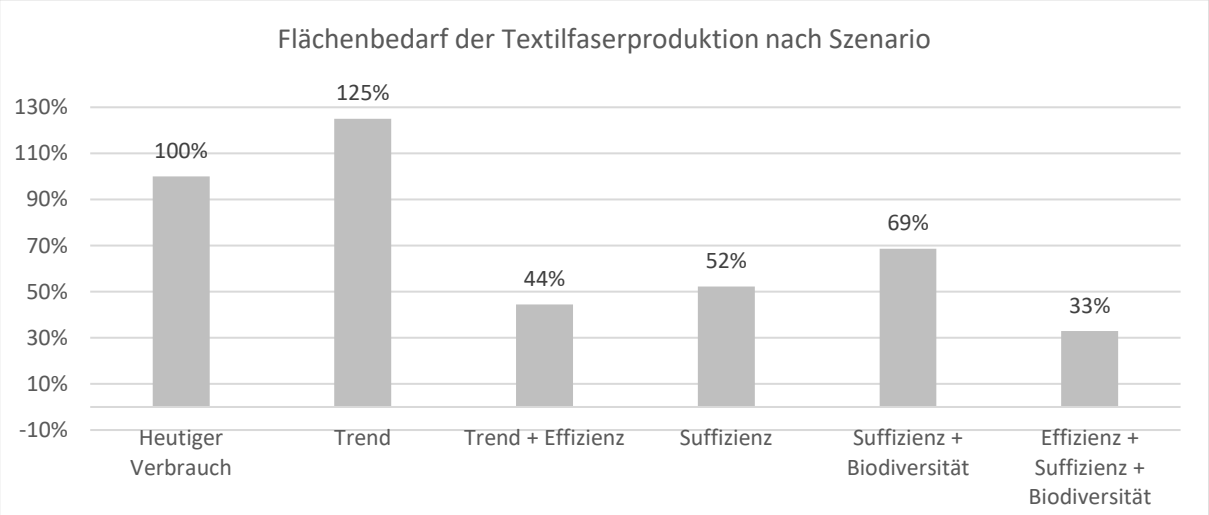
Quelle: Eigene Berechnung

Tabelle 338: Flächenbedarf der Faserproduktion in Deutschland insgesamt nach Szenario und Koppelproduktnutzung (Hektar)

Koppelproduktnutzung	Heutiger Verbrauch (I)	Trend (II)	Trend + Effizienz (III)	Suffizienz (IV)	Suffizienz + Biodiversität (V)	Effizienz + Suffizienz + Biodiversität (VI)
Keine Koppelproduktnutzung	1.758.193	2.197.741	1.366.667	919.670	1.138.540	842.296
Vollständige Koppelproduktnutzung	594.279	742.848	267.119	310.854	406.328	196.987

Quelle: Eigene Berechnung

Eine Kombination von Effizienz und Suffizienz würde damit die Flächeninanspruchnahme einer vollständig regenerativen Faserproduktion um zwei Drittel gegenüber dem Szenario I und um 73 Prozent gegenüber dem Szenario II senken. In Abbildung 145 ist der Flächenbedarf nach den unterschiedlichen Szenarien im Vergleich zu Szenario I dargestellt.



Grafik: Eigene Darstellung. Quelle: Eigene Berechnung nach diversen Quellen (s. Text)

Abbildung 145: Flächenbedarf der Textilfaserproduktion unter Berücksichtigung von Koppelprodukten im Vergleich

11.2.6 Papier

11.2.6.1 Verbrauch

Deutschland ist weltweit einer der größten Verbraucher von Papier. Der deutsche Papierkonsum hat am weltweiten Papierverbrauch einen Anteil von mehr als fünf Prozent (Rohstoff- und CO2-Einsparpotenziale. Welchen Beitag zur Ressourcenschonung und Einsparung von CO2 erzielt man durch eine drastische Reduzierung des Papierverbrauchs um 50 % in Deutschland. Vortragsfolien, 2012). Deutschlands Anteil an der Weltbevölkerung (rund 6,68 Mrd.) lag im Jahr 2007 mit einer offiziellen Einwohnerzahl von 82,3 Millionen bei 1,2 Prozent (The World Bank, 2018). Ohne Deutschland hätte der globale Papierverbrauch im Jahr 2007 nur bei 56,6 kg statt 59,0 kg pro Person gelegen. Der Papierverbrauch der deutschen Bevölkerung betrug pro Person somit das Viereinhalbfache des Papierverbrauchs der übrigen Weltbevölkerung. Seither hat sich der Verbrauch in Deutschland kaum verändert. Im Jahr 2014 betrug er 20,382 Millionen Tonnen (VDP, 2016), was bei einer Bevölkerung von 81,2 Millionen Menschen 251 kg pro Einwohner entspricht. Der Verbrauch ist somit in sieben Jahren um weniger als ein Prozent gesunken. Dabei ist allerdings zu bedenken, dass die Einwohnerzahl mit dem Zensus 2011 nach unten korrigiert wurde.

Tabelle 339: Deutschlands Anteil am globalen Papierverbrauch

Region	Bevölkerung im Jahr 2007 [1)]	Anteil an Weltbevölkerung	Papierverbrauch im Jahr 2007 (Mio. t)	Papierverbrauch pro Person (kg/Ea) [2)]	Anteil am globalen Papierverbrauch
Weltweit	6.683.000.000	100,0%	394,3	59,0	100,0%
Deutschland	82.266.000	1,2%	20,8	254,0	5,3%

Quellen: (1) The World Bank, 2018; (2) Detzel & Kämper, 2012.

11.2.6.2 Rohstoffe

Papier kann sowohl auf pflanzlicher Basis als auch auf mineralischer Basis hergestellt werden. Der wichtigste Rohstoff der Papierproduktion auf pflanzlicher Basis sind pflanzliche Fasern. Diese werden heute überwiegend aus Holz gewonnen. Möglich ist aber auch die Gewinnung aus dem Stroh ein- und mehrjähriger Gräser sowie aus Hanfstroh. Gräser und andere Nichtholzmaterialien werden seit mindestens 1.900 Jahren als Rohstoffe der Papierproduktion genutzt. Im Vergleich dazu ist Holz ein relativ neuer Rohstoff der Papierherstellung, der erst seit dem Ende des 19. Jahrhunderts genutzt wird (Pahkala, et al., 1997). Trotzdem haben Gräser und Hanf heute nur noch einen geringen Anteil an der Gesamtproduktion.

Bei Papier auf pflanzlicher Basis handelt es sich heute um Mischungen aus pflanzlichen Fasern, Hilfs- und Füllstoffen, Farbstoffen oder Leim. Die Recyclingquote ist in Deutschland zwischen den Jahren 1990 und 2009 von 44 auf 82 Prozent gestiegen. Seit dem Jahr 2010 ist sie

jedoch wieder leicht rückläufig und lag im Jahr 2014 noch bei 74 Prozent (VDP, 2016). Mit einem Anteil von drei Vierteln ist Altpapier der wichtigste Rohstoff der Papierproduktion. Die wichtigsten Füllstoffe sind die natürlichen Mineralien Kaolin und Kreide, die dem Papier mehr Glätte und Festigkeit verleihen und es besser bedruckbar machen (VDP, 2015b). Der Frischfaseranteil (Zellstoff und Holzstoff), der nach den Angaben des VDP zwischen einem Fünftel und einem Viertel der Gesamtproduktion liegt (Stand 2015/2016), ließe sich weiter reduzieren. Heute können nicht nur Hygienepapiere, Kopierpapiere und Recyclingkarton zu 100 Prozent aus Altpapier hergestellt werden, sondern auch grafische Papiere hoher Qualität (Steinbeis Papier GmbH, 2017).

Eine Alternative zu Papier aus pflanzlichen Rohstoffen ist sogenanntes Steinpapier, bei dem es sich um ein papierähnliches Material auf nichtpflanzlicher Basis handelt. „Es setzt sich je nach Grammatur aus bis zu 80% Steinmehl und einer geringen Menge ungiftigem Polyethylen zusammen“ (Rockpaper PMG, 2018).

11.2.6.3 Herstellung

Das heute genutzte Papier wird überwiegend auf pflanzlicher Basis hergestellt und ist per Definition „ein Erzeugnis aus mechanisch oder chemisch freigelegten Pflanzenfasern, die in wässriger Suspension miteinander verfilzt und – unter Zusatz von Hilfs- und Füllstoffen, Farbstoffen oder Leim – zu einer Blattform verarbeitet werden“ (VDP, 2015a S. 9). Der erste Schritt in der Papierherstellung aus Holz „ist die Stoffaufbereitung, bei der das Holz zerfasert wird. Das Aufbereitungsverfahren richtet sich nach dem Holz und dem späteren Verwendungszweck des Papiers. Es gibt zwei Hauptmethoden der Stoffaufbereitung: den mechanischen Aufschluss und den chemischen Aufschluss“ (So entsteht Qualitätspapier, 2005 S. 11). Der mechanische Aufschluss wird bei der Holzstoffproduktion angewendet. Dabei kommen zwei verschiedene Verfahren zum Einsatz. Beim mechanischen Verfahren werden die entrindeten Holzstücke zu Fasern verschliffen, „indem sie gegen einen rotierenden Schleifstein gepresst werden (Holzschliff)“ (So entsteht Qualitätspapier, 2005 S. 12). Im thermomechanischen Verfahren werden Hackschnitzel „im Refiner zwischen zwei rotierenden Scheiben zerfasert, wobei zur Beschleunigung des Prozesses Druck und Wärme eingesetzt werden (thermomechanischer Holzstoff, TMP)“ (So entsteht Qualitätspapier, 2005 S. 12). Beide Verfahren ermöglichen eine sehr hohe Rohstoffausbeute. „Aus 100 Kilogramm Holz erhält man zwischen 95 und 98 Kilogramm Holzstoff“ (VDP, 2015b). Beim chemischen Aufschluss liegt die Zellstoffausbeute dagegen unter 50 Prozent. Bei der Zellstoffgewinnung kommen ebenfalls hauptsächlich zwei Verfahren zur Anwendung. Das überwiegend angewendete Verfahren ist das Sulfatverfahren, da das Sulfitzellverfahren eine geringere Zellstoffqualität liefert. „Papier, das zu 100 Prozent aus Zellstoff besteht, wird als holzfrei bezeichnet. Beim Kochprozess wird nämlich das Lignin entfernt, das im Holz als das natürliche Bindemittel zwischen den Holzfasern fungiert. Dadurch gewinnt das Papier an Lebensdauer und Archivbeständigkeit“ (So entsteht Qualitätspapier,

2005 S. 13). Holzstoff wird vor allem zur Produktion von Zeitungspapier und Karton verwendet. Papier aus Holzstoff ist kostengünstiger in der Herstellung. Zudem ist Holzstoff für die Kartonherstellung besser geeignet, weil das darin enthaltene Lignin mehr Steifigkeit ermöglicht. Die Ligninanteile lassen das Papier allerdings vergilben.

11.2.6.4 Produktion und Rohstoffverbrauch

Frischfasern haben in Deutschland mit 25 bis 26 Prozent einen relativ geringen Anteil an der Papierproduktion (vgl. Tabelle 340). Der wichtigste Rohstoff ist Altpapier mit einem Anteil von rund 74 Prozent. Bei einem Papierverbrauch von 0,25 t pro Einwohner ergab dies einen Frischfaserverbrauch von 0,06 t pro Person und Jahr. Die Rücklaufquote des Altpapiers liegt bei rund 76 Prozent. Die im Altpapier enthaltenen und neu hinzugefügten Füllstoffe, Pigmente und chemischen Additive bilden rund 15 Prozent des in Deutschland produzierten Papiers (Nachhaltige Ressourcennutzung in der Zellstoff- und Papierindustrie. Effizienter Rohstoffeinsatz in Deutschland. Vortragsfolien, 2014 S. 6). Der jährliche Holzverbrauch liegt bei rund zehn Millionen Festmetern ohne Rinde.

Tabelle 340: Kennzahlen der deutschen Papierindustrie

Kennzahl	2013 [1)]	2014 [1)]	2016 [2)]
Beschäftigte	40.250	40.000	39.750
Papierproduktion (Mio. t)	22,4	22,5	22,6
Altpapierverbrauch (Mio. t)	16,5	16,6	16,9
Frischfaser-Verbrauch Insgesamt (Mio. t)	5,8	5,6	5,6
Zellstoff-Verbrauch (Mio. t)	4,6	4,5	
Holzstoff-Verbrauch (Mio. t)	1,2	1,1	
Holzverbrauch (Mio. fm o. R.)	10,3	10,0	
Energieverbrauch (kWh/t)	2.899	2.884	

Quellen: (1) VDP, 2016; (2) VDP, 2017

11.2.6.4.1 Energiebedarf der Papierindustrie

Die Herstellung von Papier gehört zu den energieintensiven Industrien. Für die Herstellung einer Tonne Papier wurden im Jahr 2009 noch 3.113 kWh Energie benötigt (VDP, 2016). Bis zum Jahr 2014 ist der Energieverbrauch auf 2.884 kWh/t gesunken (VDP, 2016). Bei einem Verbrauch von 0,252 t pro Einwohner ergab dies einen Energieverbrauch von 728 kWh pro Einwohner und Jahr. Dies entspricht etwa dem Stromertrag von 16 Quadratmetern Freiflächenphotovoltaik. Der Energiebedarf der Herstellung von Steinpapier liegt nach Angaben der Rockpaper PMG bei rund 900 kWh/t und somit um zwei Drittel niedriger als bei herkömmlichen Papier (Rockpaper PMG, 2018). Bei einem Verbrauch von 0,252 t/Ea ergäbe dies einen Energiebedarf von 227 kWh pro Einwohner und Jahr.

Der Strombedarf der Papierindustrie betrug im Jahr 2014 rund 750 kWh pro Tonne Papier. Dies entsprach 26 Prozent ihres gesamten Energiebedarfs von 2.884 kWh/t. 43 Prozent des Bedarfs wurden mit Gas, Kohle und Heizöl gedeckt, 31 Prozent der genutzten Energie stammten aus alternativen Brennstoffen und Fremdwärme.

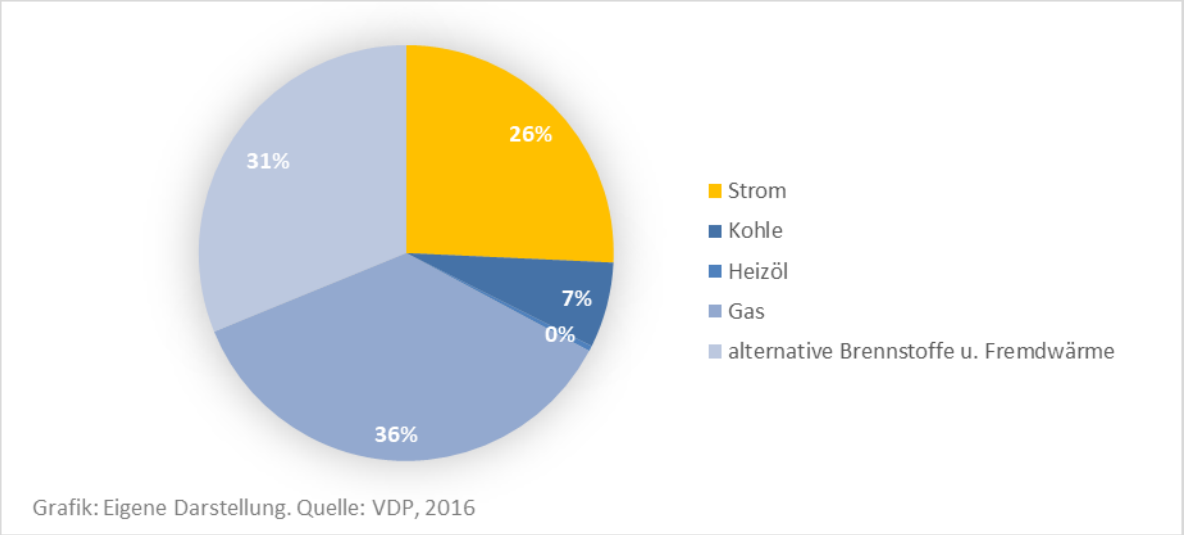


Abbildung 146: Anteile der Energieträger am Energieverbrauch der Papierindustrie

11.2.6.5 Hektarerträge

11.2.6.5.1 Zellstoff

Die Zellstoffausbeuten der meisten für die Papierproduktion geeigneten Pflanzen liegen nach Paavilainen und Torgilsson (1994, zit. n. Pahkala, Paavilainen & Mela, 1997) und Pahkala, Paavilainen & Mela (1997) zwischen 40 und 50 Prozent bezogen auf den Trockenmasseertrag (Pahkala, et al., 1997 S. 58). In Tabelle 341 sind die Hektarerträge und die Zellstoffausbeuten verschiedener Rohstoffpflanzen ohne Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte dargestellt. Für Miscanthus und Hanf wurden die Trockenmasseerträge an die für Deutschland angegebenen Ertragspotenziale angepasst. Für die Berechnung der Ertragspotenziale der wichtigen Nadelhölzer Fichte, Tanne und Kiefer wurde jeweils der auf Basis der Waldinventur 2012 (BMEL, 2016a) errechnete Stammholzzuwachs zugrunde gelegt.

Miscanthus produziert nach Angaben der FNR durchschnittlich 15 t TM pro Hektar (FNR, 2016), nach Angaben des KTBL rund 18 t TM pro Hektar (KTBL, 2012). Bei einer Zellstoffausbeute von 48 Prozent liegt der potenzielle Zellstoffertrag demnach im Mittel bei ca. 7,9 t/ha. Damit liefert Miscanthus rund 140 Prozent des Zellstoffertrags, den Hanf mit rund 5,6 t/ha erreicht. Beide Pflanzen gehören damit zu den ertragreichsten Zellstofflieferanten, die in Deutschland bereits etabliert sind. Ob eine Etablierung der ebenfalls sehr ertragreichen Rohstoffpflanze Kenaf in größerem Umfang möglich und sinnvoll ist, ist bisher unsicher. Kenaf

stammt aus Ostafrika, wo es seit mehreren tausend Jahren zur Produktion von Nahrung und Fasern angebaut worden ist (LeMahieu, et al., 1991).

Tabelle 341: Zellstofferträge und Zellstoffausbeuten

Pflanze	TM-Ertrag t/ha*a	Zellstoffertrag t/ha*a	Zellstoffausbeute
Weizenstroh [1)]	2,5	1,1	44 %
Haferstroh [1)]	1,6	0,7	44 %
Roggenstroh [1)]	2,2	1,1	50 %
Reisstroh [2)]	3,0	1,2	40 %
Bagasse (Reststoff vom Zuckerrohr) [2)]	9,0	4,2	47 %
Bambus [2)]	4,0	1,6	40 %
Miscanthus sinensis*	[4)] 16,5	[6)] 7,9	[2)] 48 %
Rohr-Glanzgras [1)]	6,0	3,0	50 %
Rohr-Schwingel [1)]	8,0	3,0	38 %
Rohrschilf [1)]	9,0	4,3	48 %
Kenaf [2)]	15,0	6,5	43 %
Hanf	[5)] 10,0	[6)] 5,6	[2)] 56 %
Schnellwachsendes Hartholz (Eukalyptus) [2)]	15,0	7,4	49 %
Skandinavisches Weichholz (Koniferen) [2)]	1,5	0,7	47 %
Schnellwachsendes Weichholz [2)]	8,6	4,0	47 %
Fichte	[3)] 3,1	[6)] 1,5	[2)] 47 %
Tanne	[3)] 3,3	[6)] 1,5	[2)] 47 %
Kiefer	[3)] 2,0	[6)] 1,0	[2)] 47 %

* Ertrag nach FNR, 2016. Nach KTBL, 2012, sind 18,0 t TM/ha*a im Mittel realistisch. (KTBL, 2012, S. 190)
Quellen: (1) Pahkala, Paavilainen & Mela, 1997; (2) Paavilainen und Torgilsson, 1994 zitiert nach Pahkala, Paavilainen & Mela, 1997; (3) BMEL, 2016a; (4) KTBL, 2012, und FNR, 2016 (5) Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2016b (6) Eigene Berechnung
Die am häufigsten verwendeten Nadelhölzer ermöglichen bei einer Nutzung des Stammholzes Zellstofferträge von 1,5 bis zwei Tonnen pro Hektar und Jahr. Damit bleiben sie deutlich hinter den Erträgen von Hanf sowie diversen Gräsern zurück.

Wegen seines hohen Wärmebedarfs ist Kenaf an die Bedingungen in Deutschland nicht gut angepasst. Zudem ist für den Anbau von Kenaf eine intensive Unkrautbekämpfung erforderlich. (Meister, et al., 1999 S. 4) Bei Versuchen in Baden-Württemberg und in der Schweiz in den Jahren 1996 und 1997 schwankten die Erträge von Jahr zu Jahr erheblich[101]. Die Spanne reichte von zwei bis sieben Tonnen TM pro Hektar. (Meister, et al., 1999 S. 30) Nach Angaben der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe sind in Deutschland an wärmeren Standorten Erträge zwischen zwei und zwölf Tonnen möglich (Pude, et al., 2012 S. 13). Geht man von einem

[101] Kenaf-Anbauversuche erfolgten in Biengen (Baden-Württemberg), Steinenstadt (Baden-Württemberg), Zürich-Reckenholz (Schweiz) und Giebenach (Schweiz)

mittleren Ertrag von sieben Tonnen pro Hektar aus, liegt der Zellstoffertrag von Kenaf bei rund drei Tonnen pro Hektar.

Weizen liefert im konventionellen Anbau Stroherträge von sieben Tonnen TM pro Hektar (KTBL, 2012 S. 44). Geht man nach Thrän et al. (2016) von einem nutzbaren Anteil zwischen 27 und 43 Prozent aus, sind Zellstofferträge zwischen 0,8 und 1,3 Tonnen pro Hektar zu erwarten. Ist der gesamte Strohertrag nutzbar, so können 3,1 t Zellstoff pro Hektar gewonnen werden.

Wiesengras ist ein Rohstoff für die Papierproduktion, der in Deutschland auf vermehrtes Interesse stößt. Nach Angaben der CREAPAPER GmbH werden Erträge von bis zu fünf Tonnen Grundstoff pro Hektar erzielt. Dies deckt sich ungefähr mit den Angaben des KTBL, demzufolge mit zwei- bis dreischürigen Wiesen bis zu 8,5 t TM pro Hektar und Jahr erzeugt werden können. Geht man von einer für Gräser typischen Zellstoffausbeute von 47 bis 48 Prozent aus, erreicht man somit einen Zellstoffertrag von mehr als vier Tonnen pro Hektar. Noch können Papiere und Kartonagen nicht vollständig aus Gras hergestellt werden, doch neue Rezepturen ermöglichen bereits einen Grasfaseranteil von bis zu 50 Prozent (CREAPAPER GmbH, 2018).

11.2.6.5.2 Holzstoff

Die Ausbeute der Holzstoffproduktion liegt zwischen 95 und 98 Prozent (VDP, 2015b). Bei Stammholzerträgen von 2,0 bis 3,1 t/ha*a ergibt dies einen theoretischen Holzstoffertrag von 1,9 bis 3,0 t/ha*a. In der Regel werden die benötigten Frischfasern für die Herstellung von Zeitungspapier und Pappen ausschließlich aus Rest- und Durchforstungsholz gewonnen. Bei Norske-Skog Golbey stammen sie zu 70 Prozent aus Holzschnitzeln von Sägewerken und zu 30 Prozent aus Durchforstungsholz (Norske-Skog Golbey, 2015). Bei der Herstellung von Zeitungspapier werden heute nur noch geringe Frischfaseranteile verarbeitet, die häufig deutlich unter 10 Prozent liegen. So betrug der Frischfaseranteil von Papier der Papierfabrik Utzenstorf AG im Jahr 2013 lediglich 6,7 Prozent (Utzenstorf Papier, 2013 S. 5). Die Firma Palm stellt Zeitungspapier zu 100 Prozent aus Recyclingpapier her (Palm, 2018).

11.2.6.6 Koppelprodukte

Die für die Herstellung von Koppelprodukten geeigneten Reststoffmengen der Holzstoffproduktion sind bei einer Holzstoffausbeute von 95 bis 98 Prozent sehr gering. Im Gegensatz dazu fallen bei der Produktion von Zellstoff größere Mengen unterschiedlicher Nebenprodukte und Reststoffe an, aus denen Koppelprodukte hergestellt werden können. Während bei der Gewinnung von Zellstoff aus Faserhanfstroh und Gräsern vor allem Brennstoffe wie Schwarzlauge anfallen, ist Zellstoff ansonsten selbst ein mögliches Koppelprodukt der Produktion von Schnittholz, Getreidekorn oder Hanfkorn. In Abbildung 147 sind die mittleren Gesamterträge

von Hanf, Miscanthus, Wiesengras, Switchgrass und Weizen dargestellt, sowie die theoretischen mittleren Erträge wichtiger Nadelhölzer, die bei einer Stammholznutzung erzielt werden können. Als besonders ertragreich erweist sich der Anbau von Gerste als Hauptfrucht in einem Zweikulturensystem mit Hanf als Zwischenfrucht, durch den ein mittlerer Gesamtertrag erreicht wird, der dem von Miscanthus nahekommt.

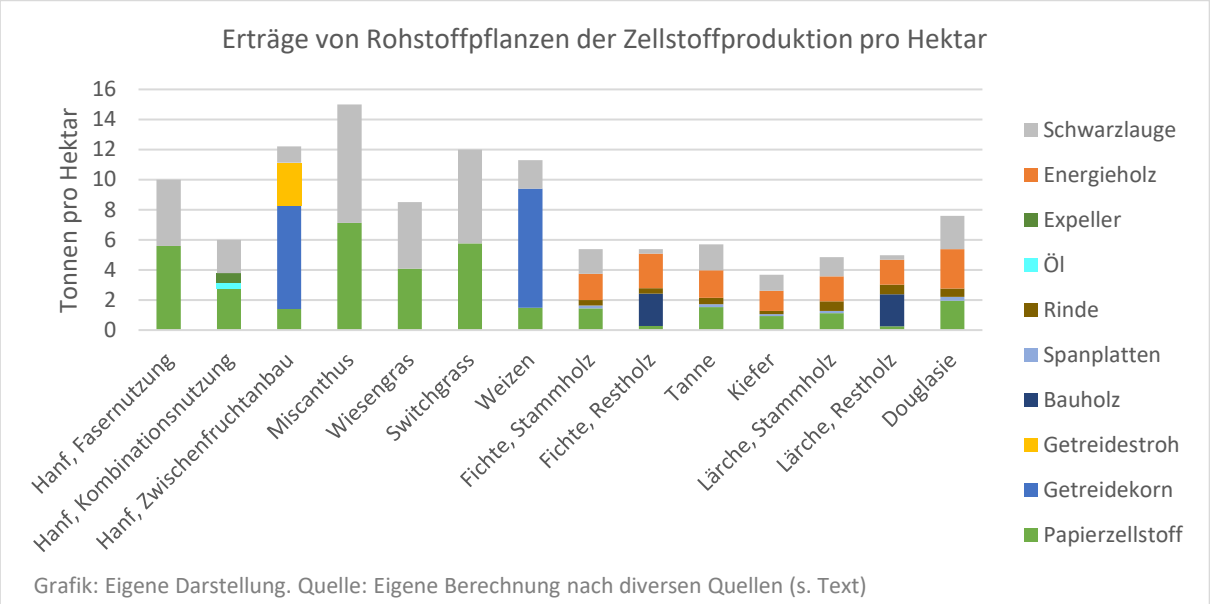


Abbildung 147: Erträge von Rohstoffpflanzen der Zellstoffproduktion (t/ha)

Eine wichtige Koppelproduktgruppe der Zellstoffproduktion ist die der Brennstoffe, bei denen es sich vor allem um Energieholz und die sogenannte Schwarzlauge handelt. Schwarzlauge ist ein Abfallprodukt der Zellstoffgewinnung, das vor allem Lignin enthält. Die Schwarzlauge wird in den Papierfabriken als Brennstoff genutzt, um den eigenen Energiebedarf zu decken. Siemens gibt für anfallende Rejekte (inkl. Klärschlämme, Holzabfälle) der Papierproduktion insgesamt einen durchschnittlichen Heizwert von 9.743 kj/kg an was 2,71 MWh/t entspricht (Siemens, 2010 S. 5). Nach Kaltschmitt und Streicher (2009) hat die anfallende „Schwarz- bzw. Ablauge aus der Papier- und Zellstoffindustrie“ ein technisches Brennstoffpotenzial von rund 2,25 MWh/t TM (Kaltschmitt, et al., 2009 S. 517). Zum Heizwert von Reststoffen der Zellstoffgewinnung aus Hanfstroh und Gräsern lagen keine Daten vor. Da aber der Heizwert dieser Rohstoffpflanzen insgesamt dem von Holz sehr nahekommt und die Zellstoffausbeuten ebenfalls bei knapp 50 Prozent liegen, wurde bei der Schätzung der potenziellen Energieerträge vereinfachend der niedrigere Heizwert nach Kaltschmitt und Streicher (2009) für alle Rohstoffpflanzen der Papierproduktion übernommen. Die geschätzten Energiepotenziale der Koppelprodukte der Zellstoffproduktion sind in Abbildung 148 im Vergleich dargestellt. Da im Falle der Gräser und des Hanfstrohs nahezu das gesamte Biomasseaufkommen für die Zellstoffproduktion genutzt werden kann, ist der Energieertrag pro Tonne Zellstoff im Vergleich zu Zellstoff aus Holz deutlich geringer. Einbußen bei den Energieerträgen lassen sich jedoch mit

einem geringeren Flächenaufwand kompensieren als Einbußen bei Nahrungsmittel-, Schnittholz- oder Zellstofferträgen.

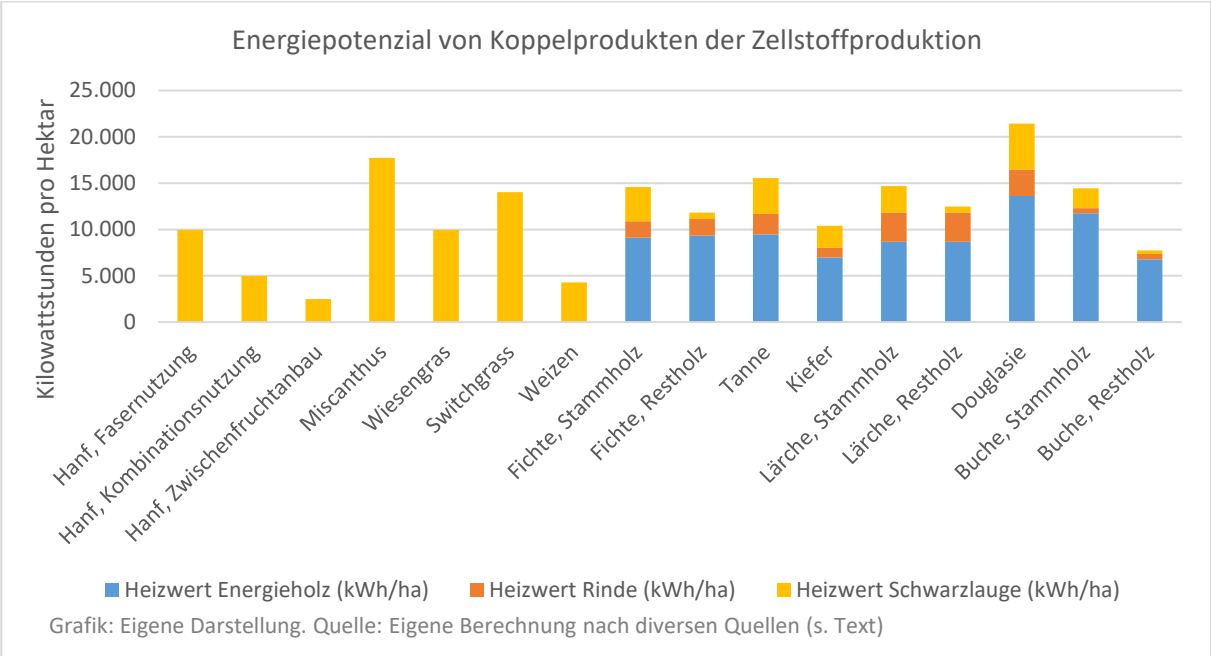


Abbildung 148: Energiepotenzial von Koppelprodukten der Zellstoffproduktion (kWh/ha)

11.2.6.7 Ertragspotenziale und Flächeninanspruchnahme im Vergleich

Bleiben mögliche Koppelprodukte ungenutzt, liegt der Zellstoffertrag je nach Pflanzenart im Mittel zwischen einer und sieben Tonnen pro Hektar, was einem Flächenbedarf zwischen 1,4 und 10,0 m²/kg entspricht. Dabei liefern Miscanthus (7,1 t/ha), Switchgrass (5,8 t/ha) und Hanf (5,6 t/ha) mit Abstand die höchsten Hektarerträge. Berücksichtigt man die möglichen Koppelprodukte der Papierproduktion und die mit ihnen verbundenen Flächengutschriften, ist Weizenstroh der Rohstoff mit der geringsten Flächeninanspruchnahme pro Tonne Zellstoff. Sofern der nutzbare Anteil des Weizenstrohertrags nach Angaben von Thrän et al. (2016) maximal 43 Prozent beträgt (Thrän, et al., 2016 S. 294), liegt die Flächeninanspruchnahme durch Zellstoff aus Weizenstroh nach Berücksichtigung der Koppelprodukte bei ca. 0,7 m² pro Kilogramm Zellstoff. Die den Berechnungen zugrundeliegenden Flächengutschriften sind in Tabelle 342 und Tabelle 343 dargestellt.

Mit einem Flächenbedarf von 1,0 m²/kg weist die Zellstoffgewinnung aus Hanfstroh, das im Zwischenfruchtanbau produziert wurde, ebenfalls eine sehr hohe Flächeneffizienz auf. Miscanthus erreicht mit rund 1,1 m/kg einen ähnlich geringen Wert. Hanf und Switchgrass bleiben im Hauptfruchtanbau mit jeweils rund 1,4 m²/kg ein wenig dahinter zurück. Wiesengras weist mit 2,1 m²/kg ebenfalls eine gute Flächeneffizienz auf, sofern ein Trockenmasseertrag von ca. 8,5 t/ha geerntet werden kann. Damit ist Wiesengras ähnlich flächeneffizient wie Hanf in Kombinationsnutzung. Im Gegensatz zu Hanf, Miscanthus und Switchgrass muss bei einer Wie-

sengrasnutzung jedoch kein Ackerland in Anspruch genommen werden. Diese Art der Rohstoffgewinnung bietet sich daher insbesondere in Regionen an, in denen eine Weidehaltung von Nutztieren nicht mehr möglich oder vorübergehend nicht wirtschaftlich ist.

Tabelle 342: Flächengutschriften für Koppelprodukte von Zellstoffen aus landwirtschaftlichen Rohstoffpflanzen

Produkt	Hanf FN	Hanf KN	Hanf ZF	Miscanthus	Wiesen-gras	Switch-grass	Weizen
Getreidekorn	0	0	7.313	0	0	0	8.373
Bauholz	0	1.277	0	0	0	0	0
Spanplatten	0	0	0	0	0	0	0
Dämmstoff			1.029				
Öl	0	929	0	0	0	0	0
Expeller	1.078	1.078	0	0	0	0	0
Festbrennstoff	1.274	637	319	2.272	1.275	1.800	549
Biogassubstrat	0	0	0	0	0	0	
SUMME	**2.352**	**3.920**	**8.661**	**2.272**	**1.275**	**1.800**	**8.922**

FN=Fasernutzung, KN=Kombinationsnutzung, ZF=Zwischenfruchtanbau
Quelle: Eigene Berechnung

Im Vergleich zur Nutzung von Gräsern und Hanf weist die Zellstoffgewinnung aus Holz einen deutlich höheren Flächenbedarf auf. Lediglich Zellstoffe aus Tannen- und Fichtenrestholz sowie aus Douglasienholz erreichen mit 1,4 bis 4,8 m²/kg ebenfalls eine hohe Flächeneffizienz.

Tabelle 343: Flächengutschriften für Koppelprodukte von Zellstoffen aus forstwirtschaftlichen Rohstoffpflanzen

Produkt	Fichte SH	Fichte RH	Tanne	Kiefer	Lärche SH	Lärche RH	Douglasie
Getreidekorn	0	0	0	0	0	0	0
Bauholz	0	6.817	0	0	0	6.753	0
Industrieholz	186	0	188	117	144	0	244
Dämmstoff	0	0	0	0	0	0	0
Öl	0	0	0	0	0	0	0
Expeller	0	0	0	0	0	0	0
Festbrennstoff	1.870	1.845	1.994	1.334	1.884	1.600	2.746
Biogassubstrat	0	0	0	0	0	0	0
SUMME	2.056	8.662	2.183	1.450	2.028	8.353	2.990

SH=Stammholznutzung, RH=Restholznutzung
Quelle: Eigene Berechnung

Die Nutzung von Holz, wie auch die von Wiesengras, steht nicht in direkter Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion. Es erscheint jedoch sinnvoll, die Produktion nachhaltiger Baustoffe mit der Produktion von Zellstoff und der Weidehaltung von Nutztieren abzustimmen, um, je nach Region, diejenige Kombination zu finden, die zu möglichst geringen Flächennutzungskonkurrenzen führt. Dabei sollten zudem weitere Aspekte, wie die Potenziale zur Kohlenstoffbindung (Treibhauspotenzial) und nötige Transportwege, berücksichtigt werden. In Abbildung 149 ist der Zellstoffertrag verschiedener Rohstoffpflanzen in Abhängigkeit von der Koppelproduktnutzung dargestellt. Bei einer effizienten Nutzung möglicher Koppelprodukte liegt die Spanne insgesamt zwischen 0,7 und 9,1 m²/kg.

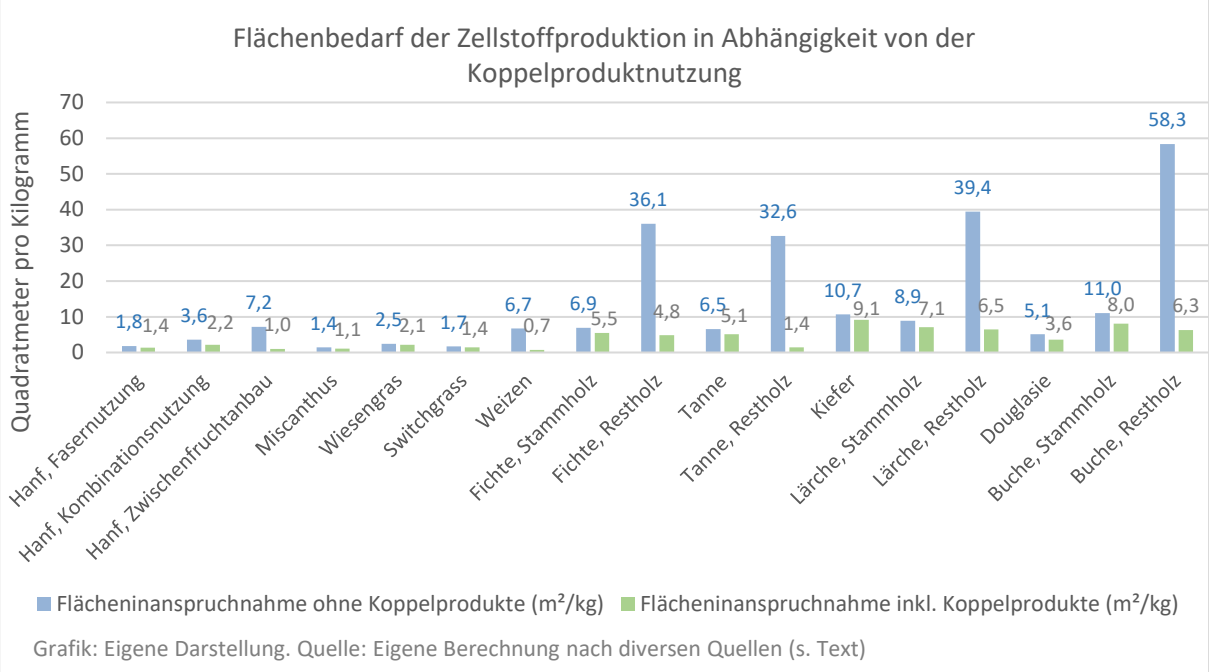


Abbildung 149: Flächenbedarf der Zellstoffproduktion in Abhängigkeit von der Koppelproduktnutzung

11.2.6.8 Flächeninanspruchnahme nach Bedarf

Bei einem Papierverbrauch von 0,25 t/Ea und einem Frischfaseranteil von 20 bis 25 Prozent ergibt sich in Deutschland ein Frischfaserverbrauch von 0,04 bis 0,06 t/Ea, weshalb nachfolgend mit einem mittleren Bedarf von 0,05 t/Ea gerechnet wurde. Unter Berücksichtigung von Koppelprodukten liegt der Flächenbedarf der Zellstoffproduktion in Deutschland, wie zuvor dargestellt, zwischen 0,7 und 9,1 m²/kg.

Bei einer Nutzung des gesamten Stammholzertrags der Fichten von 3,1 t TM/ha, würden für die Deckung dieses Frischfaserbedarfs 2,81 Millionen Hektar Fichtenwald benötigt, was 102 Prozent des Fichtenbestands und 23,6 Prozent des Baumbestandes in Deutschland entspricht. Die Nutzung von Verschnitt aus der Schnittholzproduktion steigert zwar die Flächeneffizienz der Fichtenholznutzung um ca. 17 Prozent, reduziert die Flächeninanspruchnahme damit aber nicht wesentlich. Um den Bedarf allein mit dem Verschnitt der Fichtenschnittholzpro-

duktion zu decken, müsste der Frischfaserbedarf außerdem um mindestens vier Fünftel reduziert werden. Dies entspricht bei heutigen Frischfaseranteilen einem Papierverbrauch von weniger als 50 kg pro Person und Jahr. Berücksichtigt man die erwarteten Folgen des Klimawandels und die Ertragspotenziale anderer Baumarten, reicht auch der Verschnitt, der bei einer Schnittholzproduktion auf 100 Prozent der deutschen Waldfläche anfallen würde, nicht aus, um den aktuellen inländischen Frischfaserbedarf zu decken, da der relativ kleine Douglasienbestand trotz seines höheren Ertragspotenzials kaum ins Gewicht fällt.

Bei einer Gewinnung von Zellstoff aus Miscanthus könnte der Flächenbedarf auf 0,58 Millionen Hektar reduziert werden, bei einer Nutzung von Faserhanf als Zellstoffquelle auf 0,73 Millionen Hektar. Würden diese beiden Pflanzen als Zellstoffquellen genutzt, müssten somit 4,9 bis 6,1 Prozent der in Deutschland vorhandenen Ackerflächen für die Papierproduktion in Anspruch genommen werden. Unter Berücksichtigung von Koppelprodukten fällt der Flächenbedarf mit 0,45 und 0,56 Millionen Hektar und Anteilen von 3,7 bis 4,7 Prozent an der Gesamtackerfläche noch geringer aus. Wird Hanf im Zwischenfruchtanbau genutzt, sinkt die Flächeninanspruchnahme auf 0,39 Millionen Hektar, was 3,3 Prozent der in Deutschland vorhandenen Ackerflächen entspricht.

Geht man von einem Flächenbedarf von einem Hektar pro 14 Tonnen Frischfaser aus Weizenstroh aus, würde der Frischfaseraufwand des Papierverbrauchs in Deutschland mindestens 293.000 Hektar in Anspruch nehmen, was rund 2,5 Prozent der inländischen Ackerfläche entspricht.

Die deutlich höheren Hektarerträge von ackerbaulich produzierten Zellstoffarten sollten nicht darüber hinwegsehen lassen, dass durch ihre Nutzung anstelle von Waldflächen noch knappere Ackerflächen in Anspruch genommen werden und es sich bei Lebensmitteln im Zweifel um vorrangige Produkte handelt. Es erscheint daher in jedem der betrachteten Fälle sinnvoll, den Frischfaserbedarf deutlich zu senken. Den heutigen Frischfaserbedarf dauerhaft aus nachwachsenden Rohstoffen zu decken, kann ansonsten - unabhängig von der genutzten Rohstoffpflanze - zu erheblichen Flächennutzungskonflikten zu führen.

11.2.7 Kunststoffe

11.2.7.1 Verbrauch

Die Kunststoffgesamtproduktion in Deutschland betrug im Jahr 2015 rund 18,5 Millionen Tonnen. Exportiert wurden 12,8 Millionen Tonnen, importiert wurden 9,3 Millionen Tonnen. Somit betrug die Absatzmenge der Kunststoffproduzenten zur Verarbeitung rund 15 Millionen Tonnen (Consultic, 2016 S. 5). Dies entspricht einer Gesamtmenge von rund 183 kg pro Einwohner. „Nach Export- und Importbereinigung um Produkte, die Kunststoffe enthalten (Verpackung, Autos, Spielwaren), verbleiben im Markt 10,14 Mio. t“ (Consultic, 2016 S. 5). Der Verbrauch pro Einwohner lag somit bei rund 124 kg, womit Deutschland im Jahr 2015 leicht unterhalb des für Westeuropa ermittelten Durchschnitts von 136 kg/Ea liegt (Statista, 2018b). Die Menge der durch relevante Branchen verarbeiteten Kunststoffe lag mit 147 kg/Ea dagegen etwas höher als der europäische Durchschnittsverbrauch (Consultic, 2016 S. 7).

Die größten Anteile an der Produktion hatten die Kunststoffarten Polyethylen (PE) mit 27 Prozent und Polypropylen (PP) mit 20 Prozent. PVC hatte einen Anteil von 15 Prozent, 6 Prozent des Verbrauchs entfielen auf Polyamide (PA). Um Polystyrol (PS) handelte es sich bei 5 Prozent des Verbrauchs, davon waren drei Viertel expandiertes Polystyrol (Polystyrol-Schaumstoff). Der Verbrauch der wichtigsten Kunststoffgruppen ist in Tabelle 344 dargestellt.

Tabelle 344: Produktionsmengen nach Kunststoffarten in 2015

Kunststoffarten	Kilotonnen (Kt)	Anteile
PE-LD/LLD	1.560	15%
PE-HD/MD	1.240	12%
PP	2.000	20%
PS	135	1%
PS-E	400	4%
PVC	1.550	15%
PA	615	6%
Sonst. Thermoplaste	1.520	15%
Sonstige Kunststoffe	1.130	11%
Gesamt	**10.150**	**100%**

PE-LD = Polyethylen mit geringer Dichte (Low Density), PE-HD = Polyethylen mit hoher Dichte (High Density)
Quelle: Consultic, 2016, S. 6

Den größten Anteil am Kunststoffverbrauch in Deutschland hatte im Jahr 2015 die Verpackungsbranche mit 35 Prozent. Das Bauwesen folgte mit 23 Prozent auf Platz 2, die Automobilbranche mit mehr als 10 Prozent auf Platz 3. Damit gehen mehr als zwei Drittel des Verbrauchs und insgesamt 101 kg pro Einwohner und Jahr allein auf diese drei Branchen zurück. Die Elektro- und Elektronikindustrie hatte einen Anteil von 6 Prozent, was rund 9 kg/Ea entspricht. Relativ gering fällt dagegen der Verbrauch in der Möbelindustrie aus, die mit einem

Anteil von 4 Prozent rund 6 kg/Ea verbraucht. In der Landwirtschaft werden weniger als 5 kg/Ea verbraucht, in der Medizin dreieinhalb Kilogramm. Der Verbrauch aller übrigen Branchen summierte sich auf 13 Prozent, was rund 19 kg/Ea entspricht. (Consultic, 2016 S. 7)

Tabelle 345: Menge der verarbeiteten Kunststoffwerkstoffe in Deutschland nach relevanten Branchen 2015

Branche	Kilogramm pro Person und Jahr	Anteil
Verpackung	52	35%
Bau	33	23%
Fahrzeuge	15	10%
Elektro/Elektronik	9	6%
Haushaltswaren, Sport/Spiel/Freizeit	4	3%
Möbel	6	4%
Landwirtschaft	5	3%
Medizin	3	2%
Sonstiges	19	13%
Gesamt	**147**	**100%**

Quelle: Consultic, 2016, S. 7

11.2.7.2 Rohstoffe

Die wichtigsten Rohstoffe für die Herstellung biobasierter Kunststoffe sind Stärke, Zucker, Pflanzenöle und Cellulose. Ein weiteres Potenzial besteht in der Nutzung von Lignin aus Schwarzlaugen, die in großen Mengen bei der Zellstoffproduktion anfallen.

Stärke und Zucker sind u. a. Rohstoffe der Produktion von PLA, PE, PET, PA 6, PBS und PHA. Aus Stärke werden zudem Thermoplastische Stärke (TPS) und Stärkeblends hergestellt (TPS + PP). Pflanzenöl wird vor allem zur Produktion von PA 6 und PUR genutzt (FNR, 2014 S. 224). Im Jahr 2014 konnte durch Global Bioenergies erstmals auch eine direkte biobasierte Produktion von Propylen aus Glukose nachgewiesen werden, die mithilfe eines proprietären Bakterienstamms möglich wurde. Bis dahin wurde Propylen, das für die Herstellung von Polypropylen benötigt wird und beispielsweise im Fahrzeugbau eine große Bedeutung hat, ausschließlich auf Basis fossiler Rohstoffe hergestellt. Mehr als die Hälfte der in einem typischen Neuwagen verbauten Kunststoffe bestehen aus Polypropylen. (nova-Institut, 2014)

Cellulose und Lignin haben gegenüber Stärke, Zucker und Pflanzenölen den Vorteil, dass sie nicht direkt in Konkurrenz zur Nahrungsproduktion stehen. Das Ligninaufkommen ist jedoch abhängig vom Papier- bzw. vom Zellstoffverbrauch. Der für die stoffliche Verwertung nutzbare Anteil der Schwarzlaugen wird heute auf bis zu 20 Prozent geschätzt (Pott, 2017). Je nach Pflanzenart weist Lignin unterschiedliche Struktureigenschaften auf, weshalb sich die verschiedenen Lignine für unterschiedliche Verwendungen anbieten. Kunststoffe auf Ligninbasis

bieten sich unter anderem für die Produktion naturfaserverstärkter Kunststoffe an. So vertreibt die Firma Tecnaro bereits einen ligninbasierten und mit Hanf- und Flachsfasern verstärkten Biowerkstoff, den sie als „Flüssigholz“ bezeichnet (Tecnaro, 2018a), weil er Holz ähnelt und flexibel in verschiedenste Formen gepresst oder auch im Spritzverfahren verarbeitet werden kann (Tecnaro, 2018b). Mit Ligninkunststoffen „konnten bereits erfolgreich Standard-Kunststoffe wie ABS, PE, PP, PS sowie technische Kunststoffe wie Polyamide (PA 6, PA6.6, PA12) substituiert werden“ (Tecnaro, 2018b). Je nach Einsatzzweck können die Werkstoffe „biologisch abbaubar oder gegen Mikroorganismen und Hydrolyse beständig“ produziert werden (Tecnaro, 2018b).

Cellulose dient zur Produktion von Cellulosegeneraten, Celluloseacetten und Funktionspolymeren. (FNR, 2014 S. 224). Die Firma Biowert produziert Cellulose-Kunststoffe aus Wiesengras, die für diverse Produkte geeignet sind, wie z. B. Becher, Bürobedarf, Terrassendielen, Fassadenverkleidungen oder Dachschindeln (Biowert Industrie GmbH, 2018). Die Biowert-Kunststoffe bestehen z. B. im Falle der Terrassendielen zu 75 Prozent aus Grasfasern und zu 25 Prozent aus Recycling-Kunststoffen. Vorzugsweise werden die Fasern mit Kunststoffen aus Industrieabfällen kombiniert, weil diese sauber, geruchsarm und sortenrein zu erhalten sind. Möglich ist aber auch eine Kombination mit Kunststoffen aus Haushaltsabfällen, wie z. B. Lebensmittelverpackungen. Um einen vollständig aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnenen Kunststoff zu erhalten, könnten die Recycling-Kunststoffe durch Milch- oder Maisbasierte Stoffe ersetzt werden, was allerdings mit höheren Kosten verbunden wäre (Schwinn, 2015).

11.2.7.3 Produktion und Rohstoffverbrauch

Im Jahr 2011 hatte Stärke einen Anteil von 61 Prozent an der Produktion biobasierter Kunststoffe in Deutschland (24 Prozent Maisstärke, 19 Prozent Weizenstärke, 18 Prozent Kartoffelstärke). 29 Prozent entfielen auf Rizinusöl, 10 Prozent auf Holz und weniger als ein Prozent auf Zuckerrübe. Insgesamt betrug der Verbrauch dieser Rohstoffe im Jahr 2011 rund 62.300 Tonnen (FNR, 2014 S. 225). Die Gesamtproduktionsmenge biobasierter Kunststoffe betrug im Jahr 2011 rund 79.000 Tonnen (FNR, 2014 S. 220). Dies entsprach knapp einem Kilogramm pro Person und weniger als einem Prozent des Kunststoffverbrauchs in Deutschland. Aktuellere Zahlen zur Produktion von Biokunststoffen in Deutschland lagen im Jahr 2018 nicht vor (Peterek, 2018).

11.2.7.4 Hektarerträge

Nach Angaben des Branchenverbands European Bioplastics (EuBP) wurden im Jahr 2017 weltweit rund 0,82 Millionen Hektar für die Produktion von 2,05 Millionen Tonnen Biokunststoff aufgewendet (European Bioplastics, 2018 S. 11). Dies entspricht einem Durchschnittsertrag

von 2,5 Tonnen pro Hektar. Die Erträge variieren jedoch je nach Kunststoffart und Rohstoffpflanze erheblich. Die Hektarerträge diverser Biopolymere wurden durch das IfBB Hannover anhand der weltweiten Durchschnittserträge der wichtigsten Rohstoffpflanzen berechnet (IfBB Hannover, 2017). Stärke und Zucker sind zwei der wichtigsten nachwachsenden Rohstoffe für die Herstellung von Biokunststoffen. Des Weiteren können Biokunststoffe auch aus Pflanzenöl, Cellulose oder Lignin hergestellt werden. Stärke wird vor allem aus Maiskorn, Getreidekorn und Kartoffeln gewonnen, Zucker aus Zuckerrüben und Zuckerrohr. Außer Zuckerrohr werden alle genannten Rohstoffpflanzen auch in Deutschland angebaut. Die den Berechnungen des IfBB Hannover zugrunde liegenden weltweiten Durchschnittserträge unterschieden sich jedoch teils deutlich von den Ertragspotenzialen in Deutschland, wie in Tabelle 346 dargestellt.

Tabelle 346: Erträge wichtiger Rohstoffpflanzen der Biokunststoffproduktion weltweit und in Deutschland

Pflanze	Ertrag weltweit	Ertrag in Deutschland
Zuckerrübe (t/ha)	[1] 57,8	[2] 60,0
Mais (t/ha)	[1] 6,7	[2] 11,4
Kartoffel (t/ha)	[1] 22,2	[2] 55,0
Weizen (t/ha)	[1] 3,74	[2] 7,9
Holz (t atro/ha)	[1] 1,64	[3] 2,0
Ricinus communis (t Samen/ha)	[1] 1,28	-
Raps (t Samen/ha)	[1] k. A.	[2] 3,5

Quellen: (1) IfBB Hannover, 2017; (2) KTBL, 2017; (3) Eigene Berechnung (Stammholzertrag aller Baumarten o. R.)

Zudem handelt es sich bei den bisherigen Ertragsberechnungen von EuBP und IfBB um konservative Berechnungen, bei denen mögliche Koppelprodukte nicht berücksichtigt sind. Daher wurden im Rahmen der vorliegenden Erhebung, wie im Folgenden dargestellt, für die wichtigsten Rohstoffe Stärke und Zucker neben den in Deutschland möglichen Erträgen auch die Erträge ihrer potenziellen Koppelprodukte und die daraus folgenden Flächengutschriften berechnet.

11.2.7.4.1 Stärke

Der größte Stärkeverbraucher in der Europäischen Union ist die Papier-, Pappe- und Wellpappen- Industrie mit einem Anteil von knapp 30 Prozent. Andere wichtige Verbraucher sind die Industriezweige Textil, Kosmetik, Pharmazie, Bau und Farben. (Otten, 2008) Wie bereits zuvor dargestellt, besteht beim Papierverbrauch in Deutschland erhebliches Einsparpotenzial, durch dessen Umsetzung mögliche Nutzungskonkurrenzen entschärft werden können. Die Stärke-

produktion in Deutschland schwankte in den Jahren 2011 bis 2015 zwischen 1,3 und 1,7 Millionen Tonnen pro Jahr (VDGS, 2017). 39 Prozent der Produktion wurden in diesem Zeitraum aus Weizen gewonnen, 36 Prozent aus Kartoffeln und 25 Prozent aus Körnermais. Dafür wurden im Mittel 2,4 Millionen Tonnen Kartoffeln, 1,2 Millionen Tonnen Weizen und 0,6 Millionen Tonnen Mais verarbeitet.

Tabelle 347: Rohstoffverarbeitung und Produktion der Stärkeindustrie 2011 - 2015

Kennwert	2011	2012	2013	2014	2015	Mittel
Rohstoffverarbeitung in Mio. Tonnen						
Gesamt	**4,70**	**4,20**	**3,70**	**4,73**	**4,01**	**4,27**
Kartoffeln	2,96	2,44	1,85	2,74	2,09	2,42
Mais	0,61	0,59	0,63	0,61	0,56	0,60
Weizen	1,13	1,18	1,22	1,28	1,36	1,23
Stärke-Produktion in Mio. Tonnen						
Gesamt	**1,58**	**1,48**	**1,35**	**1,66**	**1,44**	**1,50**
aus Kartoffeln	0,66	0,58	0,39	0,63	0,43	0,54
aus Mais	0,38	0,37	0,38	0,37	0,36	0,37
aus Weizen	0,54	0,53	0,58	0,61	0,65	0,58

Quelle: VDGS, 2017

Aus den Angaben des VDGS (2017) lassen sich Stärkeausbeuten von 22 Prozent bei Kartoffeln, 47 Prozent bei Weizen und 62 Prozent bei Mais ableiten (vgl. Tabelle 348). Nach Kolbe (1995) liegt der Stärkeanteil bei Kartoffeln bei 70 Prozent der Trockenmasse (Kolbe, 1995). Der Wassergehalt von Kartoffeln liegt in der Regel bei 75 Prozent (Kolbe, et al., 2012 S. 5). Daraus ergibt sich bezogen auf die Frischmasse ein Stärkegehalt von rund 17,5 Prozent.

Tabelle 348: Stärkeausbeuten nach Rohstoffpflanze 2011-2015

Rohstoffpflanze	2011	2012	2013	2014	2015	Mittel
Kartoffel	22%	24%	21%	23%	21%	22%
Mais	62%	63%	60%	59%	64%	62%
Weizen	48%	45%	48%	48%	48%	47%

Quelle: Eigene Berechnung nach VDGS, 2017

Den höchsten Stärkeertrag pro Hektar erzielt man folglich mit dem Anbau von Stärkekartoffeln. Bei einem Knollenertrag von 55 t/ha und einer Stärkeausbeute von 17,5 Prozent sind durchschnittliche Stärkeerträge von 9,6 t/ha möglich, bei einer Ausbeute von 22 Prozent rund 12,1 t/ha. Körnermais liefert bei Kornerträgen von 11,4 t/ha rund 7,0 t Stärke pro Hektar, während Weizen mit Kornerträgen von 7,9 t/ha rund 3,7 t Stärke pro Hektar liefert.

Je nach Rohstoffpflanze fallen bei der Stärkeproduktion verschiedene Koppelprodukte an, die überwiegend als Futtermittel oder Biogassubstrat verwendet werden. Die wichtigsten dieser Koppelprodukte sind Maiskleberfutter, Weizenkleberfutter und Kartoffelpülpe. Maiskleberfutter ist ein Gemisch aus Maisschalen, entölten Keimen, Kleber und Quellwasserbestandteilen (Süd-Treber GmbH, 2018). Weizenkleberfutter besteht aus den abgetrennten Weizenschalen, Weizenkleber und Weizenquellwasser. Kartoffelpülpe setzt sich aus den Faseranteilen der Kartoffel, der technisch nicht gewinnbaren Stärke und Quellwasser zusammen (TVG, 2018). Neben den Reststoffen der Stärkeproduktion können auch das Stroh von Mais und Weizen sowie das Kraut der Kartoffel genutzt werden. Während Weizenstroh auch stofflich vielseitig verwendbar ist, bieten sich Körnermaisstroh und Kartoffelkraut vor allem für die energetische Nutzung an. Bisher verbleiben beide Rohstoffe meist ungenutzt auf dem Feld. Die mittleren Ertragspotenziale sind in Tabelle 349 dargestellt. Beim Kartoffelanbau in Deutschland fallen pro Hektar rund 14,7 t Kraut an (Pacan, et al., 2010 S. 6). Bei einem Trockensubstanzanteil von 16,7 Prozent (LfL Bayern, 2017a) entspricht dies 2,45 t TM pro Hektar. Der Körnermaisstrohertrag liegt im Mittel bei rund 10,5 t TM/ha, der Weizenstrohertrag bei rund 7,2 t TM/ha (8,4 t FM/ha).

Tabelle 349: Hektarerträge von Rohstoffpflanzen der Stärkeproduktion

Produkt	Körnermais	Weizen	Kartoffel	Quellen
Korn/Knolle (t/ha)	11,40	7,90	55,00	(1)
Stärke (t/ha)	7,04	3,73	9,63	(2)
Kleberfutter (t/ha)	4,36	4,17		(2)
Kartoffelpülpe FM (t /ha)			12,93	(3)
Kartoffelpülpe TM (t /ha)			0,97	(3)
Maisstroh (t TM/ha)	10,50			(4)
Weizenstroh, 86% TM (t FM/ha)		8,40		(5)
Kartoffelkraut (t TM/ha)			2,45	(6)

(1) KTBL, 2017 (2) Eigene Berechnung nach: KTBL, 2017; VDGS, 2017; Kolbe, 1995; (3) Müller, 2005, S. 4; (4) Fleschhut, 2016; (5) KTBL, 2012, S. 50; (6) Pacan & Dröge, 2010

Tabelle 350 zeigt die Energiegehalte der aus den Reststoffen der Stärkeproduktion herstellbaren Futtermittel. Pro Hektar liefern die Reststoffe von Mais und Weizen als Futtermittel mit rund 46 GJ/ha deutlich mehr umsetzbare Energie als die der Kartoffel mit rund 11 GJ/ha.

Tabelle 350: Energiegehalt von Futtermitteln aus Reststoffen der Stärkeproduktion

Kennwert	Maiskleber-futter	Weizenkle-berfutter	Kartoffel-pülpe	Quellen
Netto-Energie-Laktion (NEL) [MJ/kg FM]	3,20			Südtreber, 2018
Netto-Energie-Laktion (NEL) [MJ/kg TM]	7,70	7,90	6,86	Südtreber, 2018; LWK NRW, 2010; beweka 2018a; be-weka, 2018b
Netto-Energie-Laktion (NEL) pro Hektar [MJ/ha]	13.965	28.329	6.650	Eigene Berechnung
Umsetzbare Energie Rind (ME) [MJ/kg FM]	5,10		11,19	Südtreber, 2018; LWK NRW, 2010; beweka 2018a; beweka, 2018b
Umsetzbare Energie Rind (ME) [MJ/kg TM]	12,30	12,66		Südtreber, 2018; LWK NRW, 2010;
Energieertrag Futtermittel Kle-berfutter ME pro Hektar [MJ/ha]	46.162	45.398		Eigene Berechnung
Energieertrag Futtermittel Pülpe (ME) pro Hektar [MJ/ha]			10.847	Eigene Berechnung

In Tabelle 351 sind die Energieerträge dargestellt, die für die Energieversorgung aus den Restpflanzen der für die Stärkeproduktion genutzten Rohstoffpflanzen gewonnen werden können. Mit rund 34 MWh/ha liefert das Stroh von Körnermais und Weizen im Vergleich zu Kartoffelkraut jeweils den fünffachen Energieertrag. Wird die Kartoffelpülpe ebenfalls als Biogassubstrat genutzt, lassen sich aus Kraut (6,4 mWh/ha) und Pülpe (9,1 mWh) insgesamt rund 15,6 MWh Endenergie pro Hektar in Form von Biogas gewinnen.

Tabelle 351: Energieausbeuten und Energieerträge aus Restpflanzen und Reststoffen der Stärkeproduktion

Kennwert	Körner-mais	Weizen	Kartoffel	Quelle
Energieausbeute				
Heizwert Getreidestroh (kWh/kg)		4,0		(KTBL, 2012 S. 50)
Methanausbeute Maisstroh (l/kg TM)	324			(Fleschhut, 2016)
Biogasausbeute Kartoffelkraut (l/kg/TM)			421	(LfL Bayern, 2017a)
Biogasausbeute Kartoffelpülpe (m³/t FM)			71	(LfL Bayern, 2018a)
Energieertrag pro Hektar				
Energieertrag Stroh (kWh/ha)	34.020	33.684		Eigene Berechnung
Energieertrag Kraut (kWh/ha)			6.445	Eigene Berechnung
Energieertrag Pülpe (kWh/ha)			9.135	Eigene Berechnung

Auf Basis der berechneten Futtermittel- und Energieerträge wurden jeweils mögliche Flächengutschriften berechnet, die in Tabelle 351 dargestellt sind. Dabei wird deutlich, dass die Stärkegewinnung aus Mais- oder Weizenkorn weniger als 20 Prozent der Anbaufläche in Anspruch nimmt, wenn die möglichen Koppelprodukte vollständig genutzt werden. Die Flächeneffizienz der Stärkeproduktion aus diesen Rohstoffen hängt somit in entscheidendem Maße von der Nutzung der möglichen Koppelprodukte ab.

Bei der Stärkegewinnung aus Kartoffeln reduziert sich die Flächeninanspruchnahme durch eine Nutzung möglicher Koppelprodukte lediglich um 20 Prozent. Ob die anfallende Kartoffelpülpe als Futtermittel oder als Energiequelle genutzt wird, ist für die Flächeneffizienz dabei nicht entscheidend. In beiden Fällen werden bei einer Stärkeausbeute von 17,5 Prozent rund 830 m² pro Tonne Stärke in Anspruch genommen. Bei einer Ausbeute von 22 Prozent werden ca. 670 m² pro Tonne Stärke aufgewendet. Wenn eine vollständige Nutzung der Koppelprodukte erfolgt, weist die Stärkegewinnung aus Maiskorn mit Abstand die höchste Flächeneffizienz auf. Wie in Abbildung 150 dargestellt, ist sie doppelt so hoch wie bei einer Gewinnung aus Weizenkorn und übertrifft die Gewinnung aus Kartoffeln um den Faktor 3,7. Können die Pflanzenreste und die Reststoffe der Stärkeproduktion nicht genutzt werden, liefert Körnermais mit sieben Tonnen pro Hektar rund 3,3 Tonnen mehr Stärkeertrag als Weizen, aber 2,6 Tonnen weniger als die Kartoffel (vgl. Abbildung 150).

Nach Angaben der Firma BIOTEC wird Kartoffelstärke für die Produktion von Biokunststoffen jedoch hauptsächlich und zunehmend aus den Reststoffen der Lebensmittelindustrie gewonnen, um eine Konkurrenz zur Nahrungsversorgung zu vermeiden (BIOTEC, 2018). Die Flächeninanspruchnahme ist damit sehr gering. Die Gewinnung der Stärke aus Kartoffelschalen und Schnittwasser ist allerdings mit einem höheren Aufwand bei der Verarbeitung (v. a. für die Reinigung) verbunden, um die erforderliche Qualität zu erzielen. Da aber die nutzbaren Aufkommen[102] zunehmen, handelt es sich derzeit um ein wachsendes Potenzial (BIOTEC, 2018). Beim Schälprozess fallen in der Lebensmittelindustrie pro Tonne verarbeiteter Kartoffeln etwa 0,09 (Arapoglou, et al., 2010) bis 0,16 Tonnen Kartoffelabfälle an (Pathak, et al., 2017). Bei einem Drittel der Schälabfälle handelt es sich um Stärke, bei 56 Prozent um Kartoffelhaut und bei 11 Prozent um sonstiges Material (Arapoglou, et al., 2010). Bei einem Speisekartoffelertrag von 45 t/ha (KTBL, 2017) fallen somit 4,0 bis 7,2 t Schälabfälle an, die 1,3 bis 2,4 t Stärke enthalten. Für die vorliegende Schätzung wurde mit einer Stärkeausbeute der Schälabfallverarbeitung von 27,5 Prozent gerechnet. Dabei handelt es sich um den Mittelwert der Angaben von Arapoglou et al. (2010) und des VDGS (2017). So erhält man pro Hektar 39,4 t geschälte

[102] Während der Verbrauch von Kartoffeln abgenommen hat, ist der Konsum verarbeiteter Kartoffeln (z. B. in Form von Pommes frites, Chips und Püree) kontinuierlich gestiegen (Genius GmbH, 2012). In Deutschland ist „die Verlagerung des Verbrauchs von Frischware zu Veredelungsprodukten […] weit fortgeschritten“. (Sutor, et al., 2013).

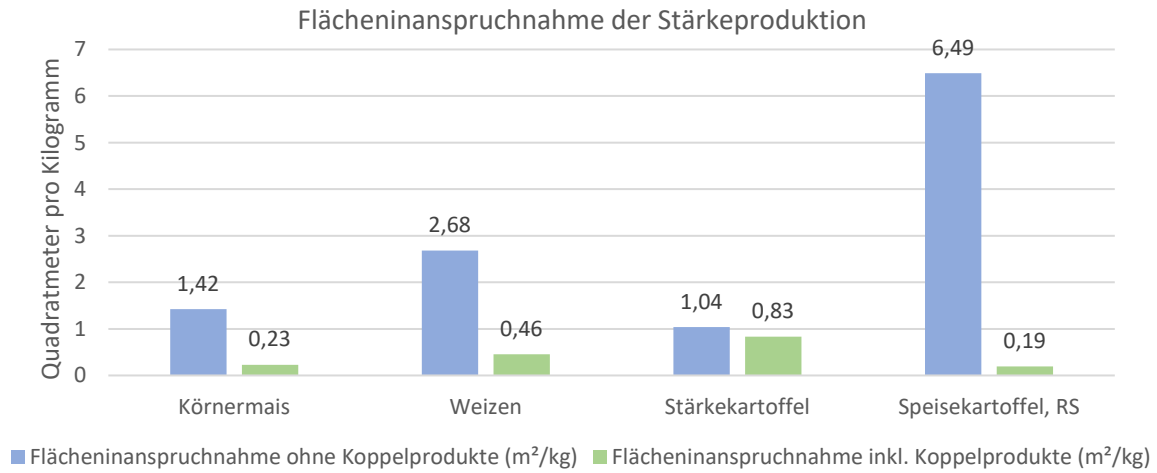
Speisekartoffeln, 1,54 t Stärke und mehr als 7 MWh Bioenergie (Biogas). Bei einem Kaloriengehalt der Speisekartoffeln von 70 kcal pro 100 g führt dies zu einer Flächengutschrift von 8.756 m² für den Lebensmittelertrag und 945 m³ für das Endenergiepotenzial. Berücksichtigt man das Energiepotenzial des Kartoffelkrauts und der anfallenden Reststoffe nimmt die Produktion von 1,54 t Stärke nur 0,03 ha ein.

Tabelle 352: Flächengutschriften für Koppelprodukte der Stärkeproduktion nach Rohstoffpflanzen (m²/ha)

Produktgruppe	Körnermais	Weizen	Stärkekartoffel	Speisekartoffel
Lebensmittel				8.756
Futtermittel	4.049	3.982		
Festbrennstoffe		4.318		
Biogassubstrat	4.348		1.997	945
SUMME	**8.398**	**8.301**	**1.997**	**9.701**

Quelle: Eigene Berechnung

So wird bei einem Netto-Flächenbedarf von 0,19 m² pro Kilogramm Stärke eine höhere Flächeneffizienz erreicht, als beim Anbau von Rohstoffpflanzen mit dem vorrangigen Ziel der Stärkeproduktion (vgl. Abbildung 150). Körnermais weist mit 0,23 m²/kg aber ebenfalls eine hohe Flächeneffizienz auf.



RS = Reststoffe der Kartoffelschälung
Grafik: Eigene Darstellung. Quellen: Berechnung nach diversen Quellen (s. Text).

Abbildung 150: Flächeninanspruchnahme der Stärkeproduktion nach Rohstoffpflanze und Koppelproduktnutzung (m²/kg)

11.2.7.4.2 Zucker

Zucker wird in Deutschland aus Zuckerrüben gewonnen. Sie sind weltweit neben Zuckerrohr die wichtigste Rohstoffpflanze der Zuckerproduktion. Pro Hektar werden Erträge von 60 Tonnen Rüben und 35 Tonnen Rübenblatt (18 Prozent TM-Gehalt) erzielt. Die Zuckerausbeute liegt bei knapp 18 Prozent des Rübenertrags, was zwischen 10 und 11 Tonnen Zucker pro Hektar entspricht. Zusätzlich fallen als Reststoffe 3,3 Tonnen Rübenschnitzel und zwei bis drei Tonnen Melasse an (vgl. Tabelle 353). Beide können als Futtermittel oder als Biogassubstrat verwendet werden. Die Gesamterträge und Ausbeuten sind in Tabelle 353 dargestellt.

Tabelle 353: Hektarerträge und Ausbeuten der Zuckerrübenproduktion in Deutschland

Kennzahl	Wert	Quellen
Rübenertrag (t FM/ha)	60	(KTBL, 2012 S. 117)
Zuckerausbeute	18%	(Südzucker AG, 2017a)
Zuckerertrag nach Südzucker AG (t/ha)	10,0	(Südzucker AG, 2017b)
Zuckerertrag nach Statista (t/ha)	11,6	(Statista, 2017a)
Zuckerertrag berechnet (t/ha)	10,8	(KTBL, 2012), (Südzucker AG, 2017a)
Kaloriengehalt Zucker (kcal/100g)	409	(Yazio GmbH, 2017-2019)
Kaloriengehalt Zuckerertrag (kcal/ha)	44.172.000	Eigene Berechnung
Rübenblattertrag (t FM/ha)	35	(KTBL, 2012 S. 117)
TM-Gehalt Rübenblatt	18%	(KTBL, 2012 S. 116)
Rübenblattertrag (t TM/ha)	6,30	Eigene Berechnung
Biogasausbeute Rübenblatt (m³/t FM)	95	(KTBL, 2012 S. 116)
Biogasertrag Rübenblatt (m³/ha)	3.325	(KTBL, 2012 S. 116)
Energieertrag aus Rübenblatt (kWh/ha)	14.703	(KTBL, 2012 S. 117)
Rübenschnitzelausbeute	5,5%	(Michel, 2005)
Rübenschnitzelertrag (t/ha)	3,3	Eigene Berechnung
Rübenschnitzel, ME (MJ/kg FM)	11,9	(Menke, et al., 2004)
Rübenschnitzel, ME/ha (MJ/ha)	39.270	Eigene Berechnung
Melasse*, Ertrag (t FM/ha)	3,0	(Hansa Melasse, 2017)
Melasse*, Ertrag (t FM/ha)	2,1	(Michel, 2005)
Vinasse (bei Ethanolproduktion)* (t FM/ha)	3,0	(Debruck, o. J.; KTBL, 2018)
Biogasertrag Vinasse: m³/t FM	150,0	(DMH, o. J)
Biogasertrag Vinasse: m³/ha	450	Eigene Berechnung
Energieertrag Vinasse: kWh/ha	2.813	Eigene Berechnung
Biogasausbeute Melasse (m³/t FM)	489,8	(LfL Bayern, 2017a)
Heizwert Biogas (kWh/m³)	6,25	(FNR, 2017)
Energieertrag Melasse (kWh/ha)	6.429	Eigene Berechnung
Energieertrag Rübenblatt + Melasse (kWh/ha)	21.132	Eigene Berechnung

* Melasse fällt bei der Herstellung von Rübenzucker an, Vinasse bei der Herstellung von Ethanol. Im Ökologischen Landbau fallen nach Debruck (o. J.) ca. 2,5 t Vinasse pro Hektar an. Im konventionellen Anbau ist der Rübenertrag mit 60 t/ha um etwa 20 Prozent höher als im ökologischen Landbau. (KTBL, 2018)

Verwendet man die Rübenschnitzel als Futtermittel und Rübenblätter und Melasse zur Energiegewinnung, erhält man Biogas mit einem Heizwert von 21,1 MWh/ha.

Mit einem Gesamtaufkommen von insgesamt rund 12 Tonnen fallen bei der Zuckerproduktion große Mengen energiereicher Futtermittel und Biogassubstrate an. Daraus resultieren Flächengutschriften von insgesamt 6.154 m² pro Hektar (vgl. Tabelle 354).

Tabelle 354: Flächengutschriften für Koppelprodukte der Zuckerproduktion aus Zuckerrübe

Produktgruppe	**Flächengutschriften** (m²/ha)
Futtermittel	3.445
Biogassubstrat	2.709
Summe	**6.154**

Quelle: Eigene Berechnung

Infolgedessen reduziert sich der Flächenbedarf der Zuckerproduktion beinahe um zwei Drittel von 0,93 m²/kg auf 0,36 m²/kg.

Tabelle 355: Flächeninanspruchnahme durch Zuckerproduktion aus Zuckerrüben nach Koppelproduktnutzung

Nutzung	**m²/kg Zucker**
Keine Nutzung der Koppelprodukte	0,93
Nutzung der Koppelprodukte	0,36

Quelle: Eigene Berechnung

11.2.7.5 Koppelprodukte von Biokunststoffen

Die bei der Produktion von Biopolymeren pro Hektar anfallenden Reststoffe und Restpflanzen sind in Abbildung 152 sowie in Tabelle 349 und Tabelle 353 dargestellt. Es handelt sich dabei vor allem um die Futtermittel Maiskleberfutter, Weizenkleberfutter und Kartoffelpülpe und sowie um die Energieträger Maisstroh, Weizenstroh und Kartoffelkraut. Mögliche Alternativen bestehen z. B. in einer energetischen Nutzung der Kartoffelpülpe sowie einer stofflichen Nutzung des Weizenstrohs (beispielsweise als Baustoff oder als Rohstoff der Zellstoffproduktion).

11.2.7.6 Ertragspotenziale im Vergleich

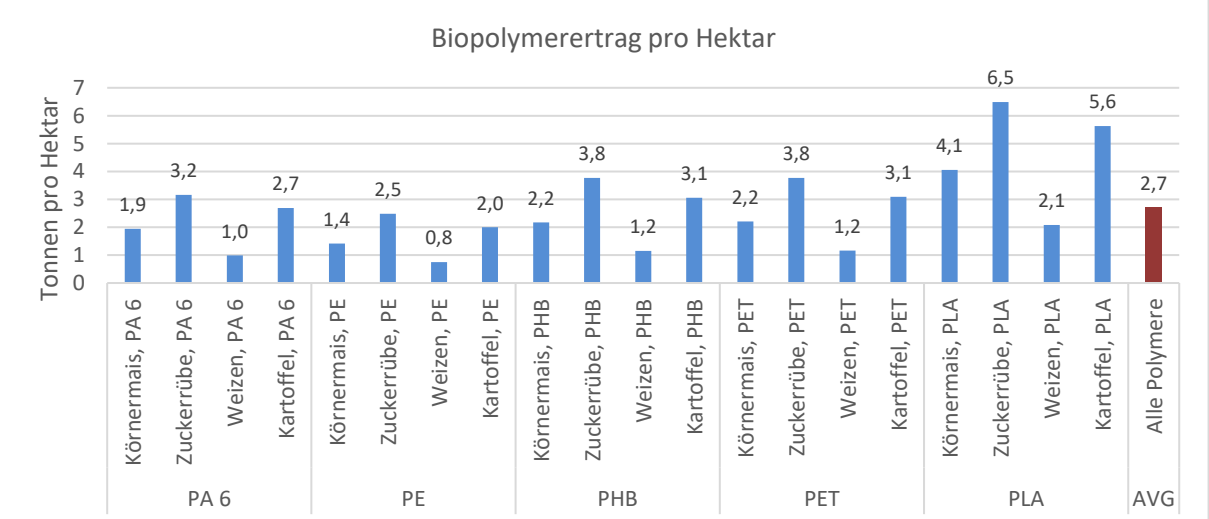
Global liegen die Polymererträge nach Angaben des IfBB Hannover zwischen 0,3 und 5,6 t/ha. Um die in Deutschland möglichen Polymererträge zu schätzen, wurden die durch das IfBB Hannover (2017) ermittelten globalen Durchschnittspolymererträge anhand der in Deutschland erzielten Durchschnittserträge der genutzten Rohstoffpflanzen und der in Deutschland erzielten Ausbeuten angepasst. Die unterschiedlichen Angaben zu den Stärke- und Zuckerausbeuten sind in Tabelle 356 dargestellt.

Tabelle 356: Angaben zu Ausbeuten der wichtigsten Rohstoffe der Kunststoffproduktion im Vergleich

Rohstoff	IfBB	VDGS	Kolbe	Südzucker AG
Rübenzucker	16%			18%
Maisstärke	70%	62%		
Kartoffelstärke	18%	22%	18%	
Weizenstärke	46%	47%		

Quellen: IfBB Hannover, 2017; VDGS, 2017; Kolbe, 1995; Südzucker AG, 2017a

Aus den in Deutschland erzielten Erträgen und Ausbeuten ergeben sich für Deutschland deutlich höhere Polymererträge als im globalen Durchschnitt. Dies gilt insbesondere für Kunststoffe auf Basis von Weizen- und Kartoffelstärke, deren Erträge mehr als das Zweifache des weltweiten Mittels betragen. In Abbildung 151 sind die berechneten durchschnittlichen Erträge wichtiger Bio-Polymere in Deutschland dargestellt, die aus Mais, Weizen, Kartoffel und Zuckerrübe hergestellt werden können. Insgesamt liegen diese zwischen 0,8 und 6,5 t/ha (IfBB Hannover, 2017). Bei gleichen Flächenanteilen aller dargestellten Varianten ergibt sich ein Durchschnitt von 2,7 t/ha. Dies entspricht einer Flächeninanspruchnahme von 1,5 bis 12,5 m² pro Kilogramm Biopolymer.



Grafik: Eigene Darstellung. Quelle: IfBB Hannover, 2017

Abbildung 151: Hektarerträge wichtiger Biopolymere in Deutschland nach Rohstoffpflanze

Um die tatsächliche Flächeninanspruchnahme zu schätzen, wurden Flächengutschriften für mögliche Koppelprodukte angerechnet.

Bei der Ermittlung der Netto-Flächeninanspruchnahme der Polymererzeugung durch die Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte wurden Reststoffe der vorangehenden Stärke- und Zuckerproduktion sowie Pflanzenreste aus der landwirtschaftlichen Produktion der Ausgangsrohstoffe Maiskorn, Zuckerrübe und Kartoffel berücksichtigt. In Abbildung 152 sind neben den Polymererträgen die genannten Koppelprodukte dargestellt.

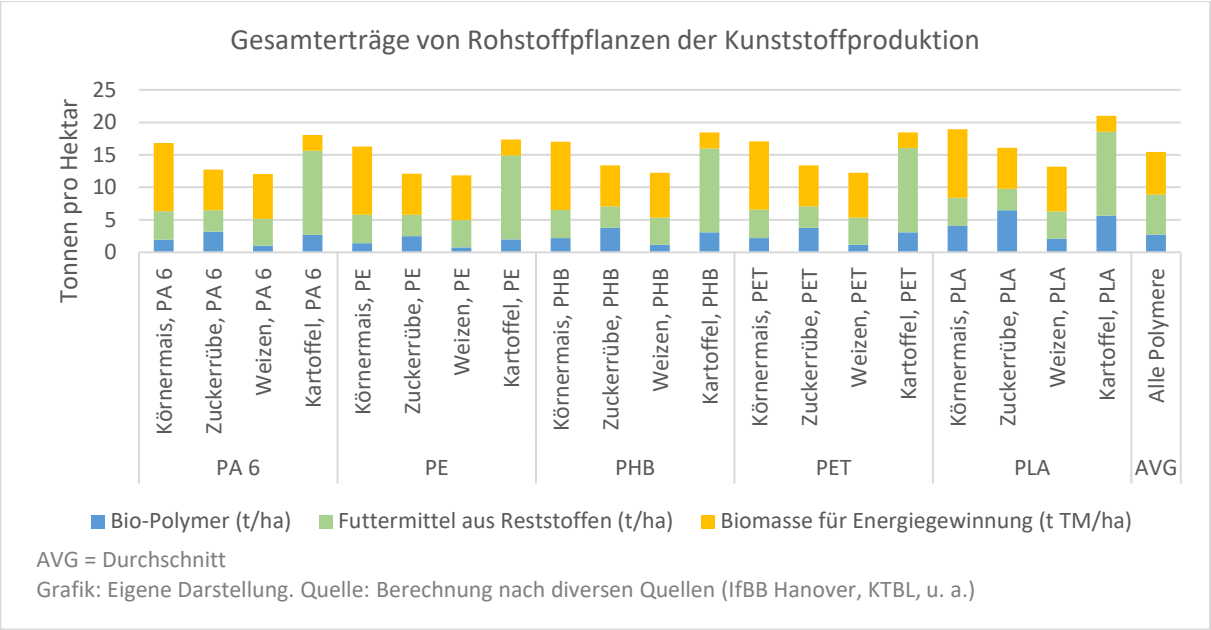


Abbildung 152: Gesamterträge von Rohstoffpflanzen der Kunststoffproduktion (t/ha)

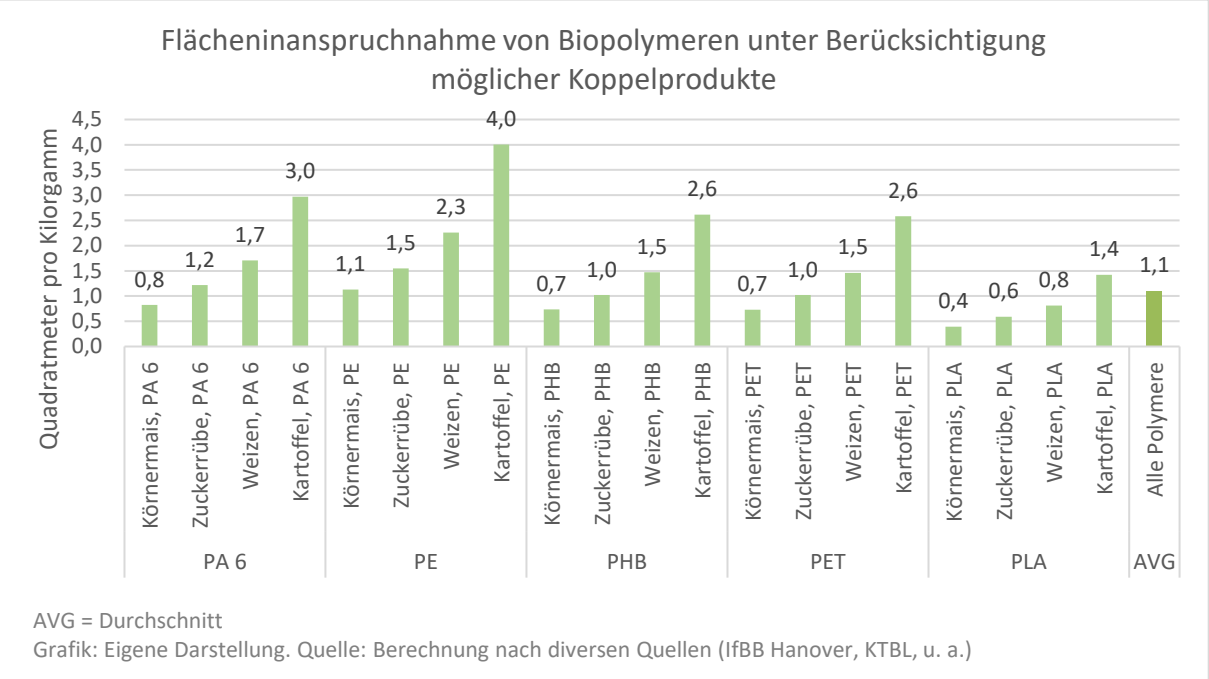
Tabelle 357 stellt die berechneten Flächengutschriften für Polymere auf Basis von Stärke und Zucker nach Rohstoffpflanze zusammenfassend dar. Sie betragen für Kunststoffe aus Körnermais, Weizen und Zuckerrübe zwischen 0,53 und 0,84 Hektar pro Hektar Anbaufläche. Im Falle der Nutzung von Kartoffelstärke ist die Flächeneffizienz wesentlich davon abhängig, ob die Stärke aus den Knollen der Stärkekartoffel oder aus Abfällen der Lebensmittelindustrie gewonnen wird. Wird die Stärkekartoffel eigens zur Stärkeproduktion angebaut, ergibt sich eine Flächengutschrift von 2.000 m²/ha. Werden Reststoffe aus der industriellen Speisekartoffelschälung genutzt, werden 0,97 ha gutgeschrieben. Aufgrund der Flächengutschriften steigt die Flächeneffizienz um Faktoren zwischen 1,2 und 6,2. Der Durchschnitt aller Polymere, die aus eigens für die Polymerproduktion angebauten Pflanzen hergestellt werden, steigt um den Faktor 3,4. Im Durchschnitt sinkt die Flächeninanspruchnahme damit von 3,7 m² pro Kilogramm Bio-Polymer auf 1,1 m²/kg. Die geringste Flächeninanspruchnahme weist PLA auf Basis von Körnermais mit 0,4 m²/kg.

Tabelle 357: Flächengutschriften für Biokunststoffe ohne Kaskadennutzung

Produkt	**Rohstoffpflanze**				
	Körnermais	**Zuckerrübe**	**Weizen**	**Stärke-kartoffel**	**Speise-kartoffel**
Lebensmittel	0	0	0	0	8.756
Futtermittel	4.049	3.445	3.982	0	
Festbrennstoff	0	0	4.318	0	
Biogassubstrat	4.348	2.211	0	1.997	945
SUMME	**8.397**	**5.656**	**8.300**	**1.997**	**9.701**

Quelle: Eigene Berechnung

Ebenfalls sehr gering ist die Flächeninanspruchnahme bei PLA auf Basis von Zuckerrübe und Weizen sowie bei PHB und PA 6 auf Basis von Körnermais. In Abbildung 153 ist die Flächeninanspruchnahme von Bio-Polymeren unter Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte in der Übersicht dargestellt.



AVG = Durchschnitt
Grafik: Eigene Darstellung. Quelle: Berechnung nach diversen Quellen (IfBB Hanover, KTBL, u. a.)

Abbildung 153: Flächeninanspruchnahme von Biopolymeren unter Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte (m²/kg)

Eine höhere Flächeneffizienz wird erzielt, wenn die dargestellten Polymere aus Reststoffen der industriellen Speisekartoffelverarbeitung hergestellt werden. Auf diese Weise können, wie in Tabelle 358 dargestellt, Werte von 0,33 bis 0,93 m² pro Kilogramm Bio-Polymer erreicht werden. Die Nutzung von Reststoffen aus der Speisekartoffelverarbeitung steigert die Flächeneffizienz der Kartoffelstärkenutzung im Vergleich zum Stärkekartoffelanbau um den Faktor Vier, wenn jeweils alle Koppelprodukte genutzt werden. Mit einem Durchschnittsbedarf von 0,57 m² pro Kilogramm Bio-Polymer liegt die Effizienz der Speisekartoffel deutlich über der Effizienz jener Pflanzen, die vorrangig zur Produktion biobasierter Polymere angebaut werden.

Tabelle 358: Flächeninanspruchnahme von Polymeren aus Reststoffen der Speisekartoffelverarbeitung (m²/kg)

Kennwert	Polymer				
	PA 6	PE	PHB	PET	PLA
Flächenbedarf (m²/kg)	0,70	0,93	0,61	0,60	0,33

Quelle: Eigene Berechnung

Durch die konsequente Nutzung von Koppelprodukten lässt sich die Flächeninanspruchnahme der Biopolymere also auf Werte zwischen 0,33 und 4,0 m² pro Kilogramm Bio-Polymer senken.

11.2.7.7 Recycling und Kaskadennutzung von Biokunststoffen

Neben der effizienten Nutzung von Koppelprodukten ist Recycling die wirkungsvollste Maßnahme zur Steigerung der Flächeneffizienz. „Die meisten Biokunststoffe sind für dieses Verfahren geeignet. Allerdings gibt es bisher nur wenig Biokunststoff-Produkte am Markt, so dass eine getrennte Sammlung derzeit nicht wirtschaftlich ist“ (FNR, 2018c). Wenn weder ein Recycling noch eine Kompostierung möglich sind, erfolgt in der Regel eine thermische Nutzung der Kunststoffabfälle. Die Biokunststoffe werden somit am Ende ihrer Nutzung zu energiereichen Brennstoffen mit Heizwerten zwischen 5,3 und 12,2 kWh/kg (Nachhaltigkeit und Verfügbarkeit biobasierter Werkstoffe, 2013 S. 17). Tabelle 359 zeigt die Heizwerte der Biopolymere bezogen auf den jeweiligen Hektarertrag. Diese infolge einer solchen Kaskadennutzung möglichen Energieerträge liegen zwischen 3,1 und 26,0 MWh/ha. Daraus folgen Flächengutschriften von 872 bis 3.893 m²/ha (vgl. Tabelle 359).

Tabelle 359: Heizwerte von Biokunststoffen und daraus folgende Flächengutschriften

Polymer, Rohstoff-Pflanze	Heizwert des Biopolymers (kWh/kg) [1)]	Heizwert des Biopolymerertrags (kWh/ha) [2)]	Flächengutschrift für Heizwert der Polymere (m²/ha) [2)]	Summe aller Flächengutschriften (m²/ha) [2)]
PA 6, Körnermais	8,6	11.183	2.151	10.549
PA 6, Zuckerrübe		23.273	3.484	9.638
PA 6, Weizen		3.950	1.098	9.399
PA 6, Kartoffel		9.360	2.973	4.970
PE, Körnermais	12,2	11.530	2.218	10.615
PE, Zuckerrübe		26.005	3.893	10.047
PE, Weizen		4.244	1.180	9.480
PE, Kartoffel		9.857	3.131	5.128
PHB, Körnermais	7,2	10.467	2.013	10.411
PHB, Zuckerrübe		23.297	3.488	9.642
PHB, Weizen		3.842	1.068	5.050
PHB, Kartoffel		8.916	2.832	4.830
PET, Körnermais	5,8	8.578	1.650	10.048
PET, Zuckerrübe		18.817	2.817	8.971
PET, Weizen		3.136	872	9.173
PET, Kartoffel		7.292	2.316	4.313
PLA, Körnermais	5,3	14.264	2.744	11.141
PLA, Zuckerrübe		29.321	4.390	10.544
PLA, Weizen		5.075	1.411	9.711
PLA, Kartoffel		11.995	3.810	5.807

Quellen: (1) Endres, 2013 (2) Eigene Berechnung

Sieben der zwanzig Biopolymere, die aus vorrangig zum Zweck der Kunststoffproduktion angebauten Pflanzen produziert werden, erhalten durch die vollständige Nutzung von Koppelprodukten und eine anschließende Kaskadennutzung Flächengutschriften von etwas mehr als 10.000 m² pro Hektar (vgl. Tabelle 359) und übersteigen damit sogar die Flächeneffizienz zahlreicher anderer Flächennutzungen. Flächengutschriften von über 10.000 m²/ha ergeben sich zudem für Kunststoffe, die aus den Kartoffelschalen hergestellt werden. In all diesen Fällen ist die Flächeninanspruchnahme der Biokunststoffproduktion also gleich null, sofern man davon ausgeht, dass grundsätzlich ein Bedarf an Futtermitteln und biogenen Energieträgern besteht, der ansonsten mit eigens dafür angebauten Pflanzen gedeckt werden müsste. Die Flächeninanspruchnahme von Biokunststoffen lässt sich folglich durch die Nutzung von Koppelprodukten und Kaskadennutzungen auf Werte zwischen null und 4.292 m²/t reduzieren (vgl. Abbildung 154). Wenn die Biopolymere vor der thermischen Nutzung zudem mehrmals durch ein Recycling einer neuen Nutzung zugeführt werden, reduziert sich ihre Flächeninanspruchnahme weiter.

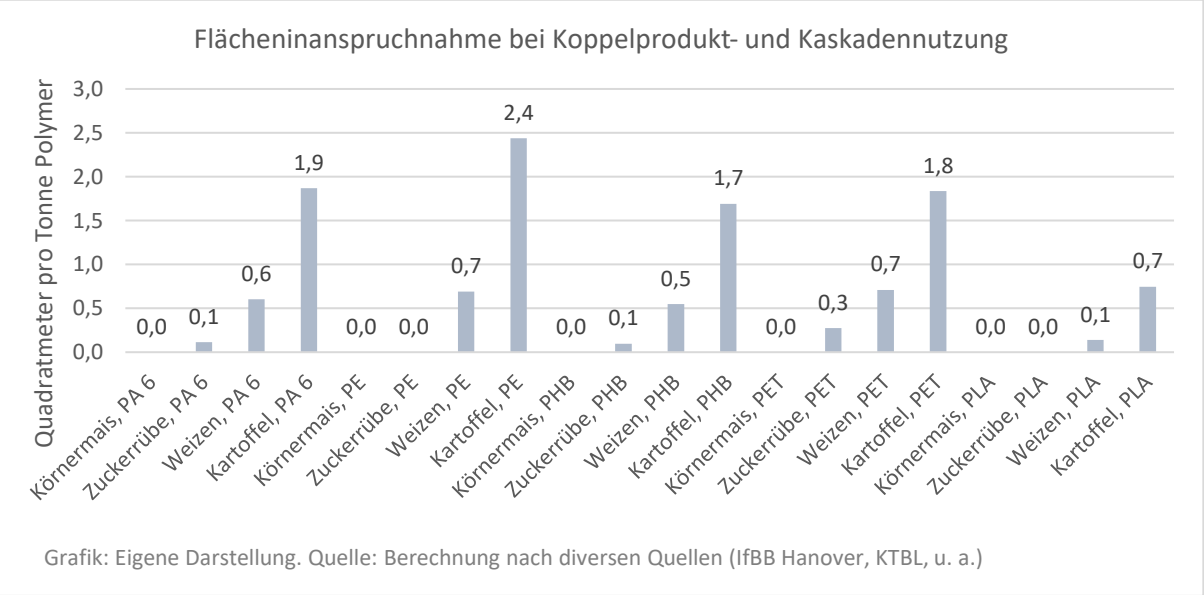


Abbildung 154: Flächeninanspruchnahme von Biopolymeren nach Koppelprodukt- und Kaskadennutzung

11.2.7.8 Flächeninanspruchnahme

Wie zuvor dargestellt wurde, ist die Flächeninanspruchnahme durch Biokunststoffe in vielen Fällen gleich null oder vernachlässigbar gering, sofern eine effiziente Produktion und Nutzung der Kunststoffe und ihrer Koppelprodukte erfolgt. Dennoch sind große Flächen zu belegen, um den heutigen Kunststoffbedarf mit nachwachsenden Rohstoffen zu decken. Da als Koppelprodukte hauptsächlich Energieträger und Futtermittel gewonnen werden können, entstehen erhebliche Flächenkonkurrenzen zu anderen stofflichen Produkten sowie zur Nahrungsmittelproduktion. Geht man von einem Kunststoffbedarf von 120 bis 150 kg/Ea aus, müssten bei

einem Durchschnittsertrag von 2,7 t Polymer pro Hektar und einer Bevölkerung von 82 Millionen Personen rund 4,1 Millionen Hektar mit Pflanzen zur Kunststofferzeugung belegt werden, die als Koppelprodukte vor allem Futtermittel und biogene Energieträger liefern. Im Mittel liefern die Koppelprodukte der Biokunststoffe rund sechs Tonnen Futtermittel mit rund 5,7 GJ ME pro Tonne und zusätzlich rund 26 MWh Bioenergie pro Hektar. Dies entspricht bei einer Anbaufläche von 4,1 Mio. Hektar (34 Prozent der Ackerfläche) rund 25 Millionen Tonnen Futtermittel und zusätzlich dem heutigen Endenergiebedarf von rund 6 Millionen Haushalten für Strom und Wärme. Durch Endenergieeinsparungen von 50 Prozent konnte die Anzahl der Haushalte auf 12 Millionen gesteigert werden. Bei rund 42 Millionen Haushalten im Jahr 2020 entspräche das 14 bis 29 Prozent der von den Haushalten benötigten Energie (Strom und Wärme ohne Mobilität).

Andererseits stünden in Deutschland mit rund 7,8 Millionen Hektar Ackerfläche nur noch 0,09 Hektar pro Einwohner für andere Zwecke zur Verfügung, wie etwa für die Produktion pflanzlicher Nahrung oder den Faserpflanzenanbau.

11.2.8 Oleochemie

Pflanzliche Öle sind nicht nur wertvolle Nahrungsmittel und Energieträger, sondern auch auf vielfältige Weise stofflich nutzbar. Öle werden unter anderem zur Produktion von Reinigungsmitteln, Kunststoffen, Farben und Lacken, Pflegeölen, Schmierstoffen, Kerzen, Körperpflegemitteln und Kosmetika verwendet. Aufgrund der großen Vielfalt und Komplexität der Verwendungen können hier nur die wichtigsten Verwendungen betrachtet werden, die im Jahr 2011 zusammen rund 60 Prozent des stofflichen Verbrauchs von Pflanzenölen ausmachten. Der Gesamtverbrauch von Pflanzenölen für stoffliche Nutzungszwecke lag im Jahr 2011 bei rund 1,2 Millionen Tonnen (FNR, 2018b S. 12). Der Bedarf, der sich aus einer nahezu vollständigen Umstellung auf nachwachsende Rohstoffe ergeben kann, wurde anhand der Produktkategorien geschätzt, deren Herstellung die größten Mengen an stofflich genutzten Ölen verbraucht. Dabei handelt es sich um Wasch- und Reinigungsmittel, Schmierstoffe, Farben und Lacke, Körperpflegeprodukte und Kosmetika sowie Kerzen.

Einer der wichtigsten Rohstoffe für die Herstellung von Körperpflege-, Wasch- und Reinigungsmitteln sind Tenside, die traditionell auf petrochemischer Basis gewonnen werden. Werden pflanzliche Öle für die Produktion genutzt, handelt es sich meist um Palmkern- oder Kokosöl, die jedoch beide nicht unumstritten sind[103]. Für die Produktion von Tensiden auf Basis heimischer Rohstoffe eignen sich vor allem Raps- und Leinöl. Diese heimischen Pflanzenöle sind jedoch chemisch weniger stabil als Palmkernöl oder Kokosöl und können sich unter Einfluss

[103] Nach Angaben des WWF hat der zunehmende Palmölverbrauch erhebliche negative Folgen: „So werden für den Palmölanbau in großem Ausmaß Regenwälder gerodet, bedrohte Arten wie der Orang-Utan vertrieben und Landnutzungsrechte missachtet.“ (Noleppa, 2016a S. 5)

von Licht und Sauerstoff schneller verändern. Die Entwicklung geeigneter Tenside auf Basis heimischer Pflanzenöle für die Wasch- und Reinigungsmittelproduktion schreitet trotzdem voran (Werner & Mertz, 2018). Der Konversionsfaktor zwischen Öl und Fettalkohol liegt bei rund 1,0. Somit entspricht die eingesetzte Menge an Pflanzenölen der Menge an verbrauchten Fettalkoholen in Tensiden (FNR, 2014 S. 533). Einige Hersteller bieten bereits diverse Reinigungs- und Pflegemittel an, die zwischen 10 und 100 Prozent Tenside enthalten, die auf Basis europäischer Pflanzenöle gewonnen werden (Werner & Mertz, 2018).

11.2.8.1 Verbrauch

Farben und Lacke: Der Verbrauch von Farben und Lacken in Deutschland lag im Jahr 2016 bei rund 1,46 Millionen Tonnen (Statista, 2018c). Bei der Herstellung von Naturfarben und -Lacken auf Basis nachwachsender Rohstoffe benötigt man nach Angaben des Herstellers Livos, bezogen auf die Gesamtproduktion[104], etwas mehr als 10 kg Rohstoffe[105] pro Tonne Endprodukt, wovon schätzungsweise ein Fünftel[106] auf Leinsaat entfällt (Livos, 2017).

Schmierstoffe: Der Verbrauch von Schmierstoffen betrug im Jahr 2017 rund eine Million Tonnen (Statista, 2018d). Obwohl Schmierstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen aufgrund ihrer Bioabbaubarkeit durchaus ökologische Vorteile aufweisen können, liegt ihr Anteil mit etwa 35.000 t nur bei rund 3 Prozent (Diepenbrock, 2014 S. 255). Für die Herstellung pflanzenölbasierter Schmierstoffe kommen vor allem Rapsöl, Sojaöl und Sonnenblumenöl infrage (Noleppa, 2016a S. 48).

Kerzen: In Deutschland liegt der Kerzenverbrauch nach Angaben des Europäischen Kerzenverbands (ECA) mit rund 2,6 Kilo pro Person und Jahr etwa doppelt so hoch wie der EU-Durchschnitt (Maaß, 2013). Der Grundstoff der Kerzenproduktion besteht zu mehr als 40 Prozent aus Palmöl, was zu einem Verbrauch von rund 94.000 t Palmöl führt (Noleppa, 2016a S. 35). Heimische Pflanzenöle werden für die Kerzenproduktion kaum genutzt und gelten in der Literatur als überwiegend ungeeignet (Verbraucherzentrale Bayern, 2015, zit. n. Noleppa, 2016, S. 45). Im Handel erhältlich sind inzwischen aber Kerzen aus gehärtetem Rapsöl (Alnatura, 2018), Sojaöl (Avocado Store GmbH, 2018)(NahGEMACHT GmbH, 2020). Eine weitere regenerative Alternative aus heimischen Quellen ist Bienenwachs, das jedoch nur in sehr geringem Umfang verfügbar ist.

Wasch- und Reinigungsmittel: Die privaten Haushalte verbrauchen rund 1,3 Millionen Tonnen Wasch- und Reinigungsmittel pro Jahr (Umweltbundesamt, 2015). Im Jahr 2015 enthielten die verbrauchten Wasch- und Reinigungsmittel rund 184.000 Tonnen Tenside (Forum

[104] 17.500 Tonnen Farben und Lacke pro Jahr.
[105] 180 Tonnen Leinsaat, Bienenwachs, Carnaubawachs, Japanwachs, Rizinusöl, Holzöl, Waschnüsse.
[106] Die aufgewendete Leinanbaufläche beträgt rund 20 Hektar (Livos, 2017), was in Deutschland durchschnittlich einem Ertrag von rund 35 t Leinsaat entspricht.

Waschen, 2017). Tenside stellten damit die mengenmäßig wichtigste Inhaltsstoffgruppe in Wasch-, Pflege- und Reinigungsmitteln für Privathaushalte dar. Rund 13.000 Tonnen dieser Tenside wurden ausschließlich auf Basis nachwachsender Rohstoffe, 79.000 Tonnen sowohl auf Basis nachwachsender als auch petrochemischer Rohstoffe und 92.000 Tonnen ausschließlich auf Basis petrochemischer Rohstoffe hergestellt (Forum Waschen, 2017). Der gesamte Tensidverbrauch in Deutschland wird auf 236.900 t pro Jahr geschätzt (FNR, 2014 S. 533). Der gewerbliche und industrielle Verbrauch dürfte somit bei ca. 53.000 t/a liegen. Im Teilmarkt der Körperpflegemittel und Kosmetika wurden im Jahr 2011 rund 46.400 t Tenside eingesetzt, zudem wurden 76.200 t Seifen abgesetzt (FNR, 2014 S. 531).

Für die Herstellung von Seifen wird hauptsächlich Palmöl verwendet, dessen gewichtsbezogener Anteil an der Seifenproduktion auf 40 bis 70 Prozent geschätzt wird (Noleppa, 2016a S. 33). Die Datengrundlage zu diesem Segment der Ölverwendung ist jedoch vergleichsweise unsicher (Noleppa, 2016a S. 33).

Grundsätzlich wäre es möglich, die Mineralölprodukte und Produkte auf Basis von Palm- und Kokosöl weitgehend durch heimische Pflanzenöle zu ersetzen. Daher wird angenommen, dass der potenzielle Bedarf bei heutigen Verbrauchsgewohnheiten zwischen 1,3 und 1,4 Millionen Tonnen Pflanzenöl pro Jahr umfasst, sofern ein vollständiger Umstieg erfolgt.

Tabelle 360: Geschätzter Bedarf an pflanzlichen Ölen für ausgewählte stoffliche Verwendungen

Produktgruppe	Verbrauch in Mio. Tonnen	Verbrauch in kg/Ea	Geschätzter Ölbedarf in kg/Ea [6]	Geschätzter Ölbedarf in Mio. Tonnen pro Jahr [6]
Farben und Lacke	[1] 1,46	17,80	0,89	0,07
Schmierstoffe	[2] 1,00	12,20	12,20	1,00
Tenside, privat	[3] 0,18	2,24	2,24	0,18
Tenside, gewerblich/ industriell	[4] 0,05	0,65	0,65	0,05
Kerzen	[5] 0,21	2,60	1,14	0,09
SUMME	**2,91**	**35,49**	**17,01**	**1,40**

Quellen: (1) Statista, 2018c; (2) Statista, 2018d; (3) Forum Waschen, 2017; (4) FNR, 2014; (5) ECA zit. n. Maaß, 2013 (6) Eigene Berechnung

Sofern sich die jeweiligen Segmente proportional entwickeln und der Anteil der hier dargestellten Segmente auch in Zukunft bei ca. 60 Prozent liegen sollte, könnte der Gesamtbedarf an pflanzlichen Ölen somit von 1,2 Millionen Tonnen im Jahr 2011 auf einen Wert von mehr als 2,0 Millionen Tonnen pro Jahr ansteigen.

11.2.8.2 Rohstoffe

Wertvolle Pflanzenöle in relevanten Mengen pro Hektar liefern in Deutschland Algen, Raps, Sonnenblume, Lein, Soja, Walnuss, Leindotter und Hanf.

11.2.8.3 Verwendungen

- **Algenöle** können auf vielfältige Weise genutzt werden. Bisher werden sie meist für die Herstellung von Nahrungsmitteln, Futtermitteln, Kosmetika oder Flüssigbrennstoffen verwendet. Andere stoffliche Nutzungen sind bisher kaum verbreitet, aber sicherlich möglich. Beispielsweise lässt sich aus dem Öl von Mikroalgen ein Bioasphalt herstellen, der ebenso haltbar sein soll, wie klassische Straßenbeläge (VDI, 2015).
- **Rapsöl** eignet sich unter anderem für die Produktion von Schmierstoffen, Motoröl, Hydrauliköl, Getriebe- und Sägekettenöl, Lacken und Farben, Lösungsmitteln, Tensiden und Weichmachern, Kerzen sowie Rapsasphalt.
- **Leinöl** ist einer der wichtigsten nachwachsenden Rohstoffe für die Herstellung von Naturfarben und Lacken, Ölfarben und natürlichen Holzschutz- und Korrosionsschutzmitteln (z. B. Leinölfirniss).
- **Sonnenblumenöl** wird zu Farben und Lacken, Kerzen sowie Öl- und Künstlerfarben verarbeitet und bei der Produktion von Leder- und Tuchwaren genutzt.
- **Sojaöl** wird unter anderem zur Produktion von Farben und Lacken, Druckfarben, Spachtelmassen, Kosmetik und Kerzen verwendet.
- **Hanföl** wird z. B. für die Herstellung von Farben und Lacken, Druckertinte, Holzschutzmitteln, Schmierstoffen und Wachsmalstiften genutzt.
- Aus **Leindotteröl** werden Farben und Lacke sowie biobasierte Polymere hergestellt.
- **Walnussöl** findet in der Ölmalerei Verwendung und eignet sich zudem für die Behandlung von Holzoberflächen und als Kosmetikrohstoff.

Alle hier dargestellten Öle können auch als Nahrungs- oder Futtermittel genutzt werden.

11.2.8.4 Koppelprodukte

Die möglichen Koppelprodukte der Pflanzenölproduktion sind, wie nachfolgend dargestellt, je nach Pflanze und Art des Anbausystems sehr unterschiedlich und zahlreich. Wahlweise können je nach regionalem Bedarf Brennstoffe, Nahrungsmittel (Honig, Presskuchen, Mehl), Futtermittel, Wertholz, Fasern (für Dämmstoffe oder Textilien) sowie Schäben für die Baustoffproduktion erzeugt werden.

11.2.8.5 Hektarerträge

11.2.8.5.1 Ertragspotenziale und Flächeninanspruchnahme im Vergleich

In Deutschland liegen die Ertragspotenziale von landwirtschaftlich genutzten Ölpflanzen ohne Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte zwischen 0,2 und 1,6 t Öl pro Hektar. Die bereits in Abschnitt 10.5.1.2 beschriebenen Erträge einschließlich möglicher Koppelprodukte (Mittelwerte) sind in Abbildung 155 dargestellt.

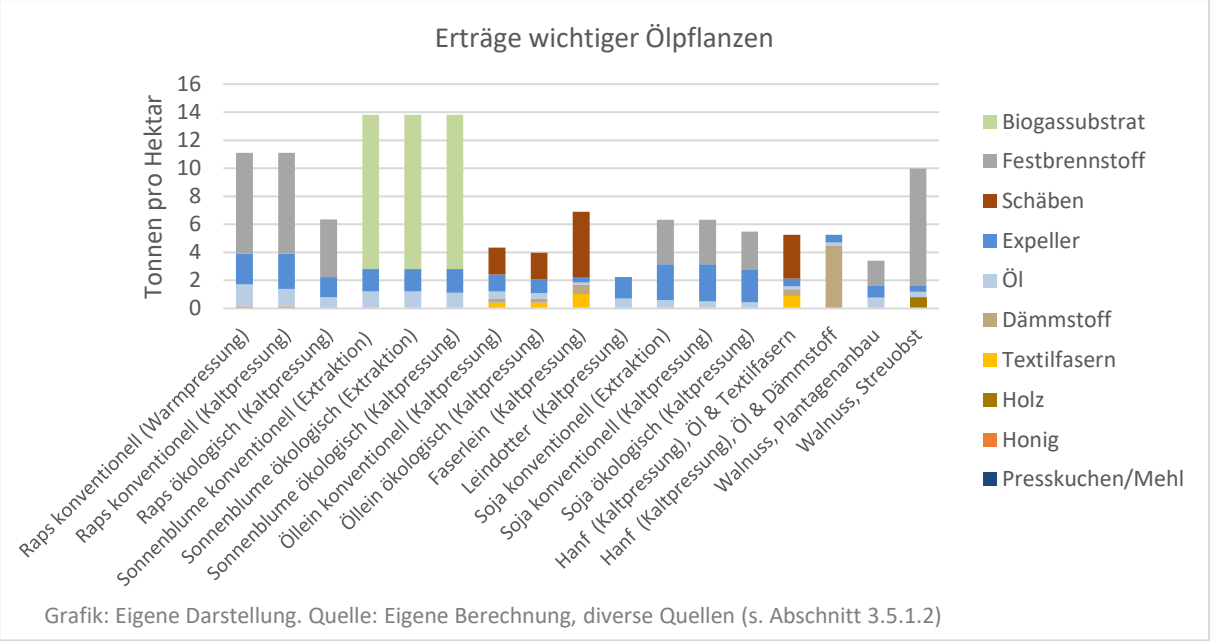


Abbildung 155: Hektarerträge wichtiger Ölpflanzen mit Koppelprodukten

In Tabelle 361 sind die Flächengutschriften dargestellt, die für die möglichen Koppelprodukte der Pflanzenölproduktion berechnet wurden.

Tabelle 361: Flächengutschriften für Koppelprodukte der Pflanzenölproduktion (m²/ha)

Produkt	**Raps** konventionell Warmpress.	**Raps** konventionell Kaltpressung	**Raps** ökologisch Kaltpress.	**Sonnen-blume** konventionell Extraktion	**Sonnen-blume** ökologisch Extraktion	**Sonnen-blume** ökologisch Kaltpressung
Mehl	0	0	0	0	0	0
Honig	131	131	75	41	41	41
Wertholz	0	0	0	0	0	0
Textilfasern	0	0	0	0	0	0
Dämmstoff	0	0	0	0	0	0
Futtermittel (Expeller)	2.102	2.957	1.691	2.139	2.139	2.440
Schäben	0	0	0	0	0	0
Festbrennstoff	4.142	4.142	2.369	0	0	0
Biogassubstrat	0	0	0	3.760	3.760	3.760
SUMME	**6.375**	**7.229**	**4.135**	**5.941**	**5.941**	**6.241**

Fortsetzung von **Tabelle 361**: Flächengutschriften für Koppelprodukte der Pflanzenölproduktion (m²/ha)

Produkt	**Öllein** konventionell Kaltpressung	**Öllein** ökologisch Kaltpressung	**Faserlein** Kaltpressung	**Soja** konventionell Extraktion	**Soja** konventionell Kaltpressung	**Soja** ökologisch Kaltpressung
Mehl	0	0	0	0	0	0
Honig	0	0	0	0	0	0
Wertholz	0	0	0	0	0	0
Textilfasern	429	429	1.061	0	0	0
Dämmstoff	263	263	650	0	0	0
Futtermittel (Expeller)	1.878	1.470	537	3.056	3.351	2.906
Schäben	1.903	1.903	4.713	0	0	0
Festbrenn-stoff	0	0	0	1.622	1.622	1.407
Biogassub-strat	0	0	0	0	0	0
SUMME	**4.472**	**4.064**	**6.960**	**4.678**	**4.973**	**4.313**

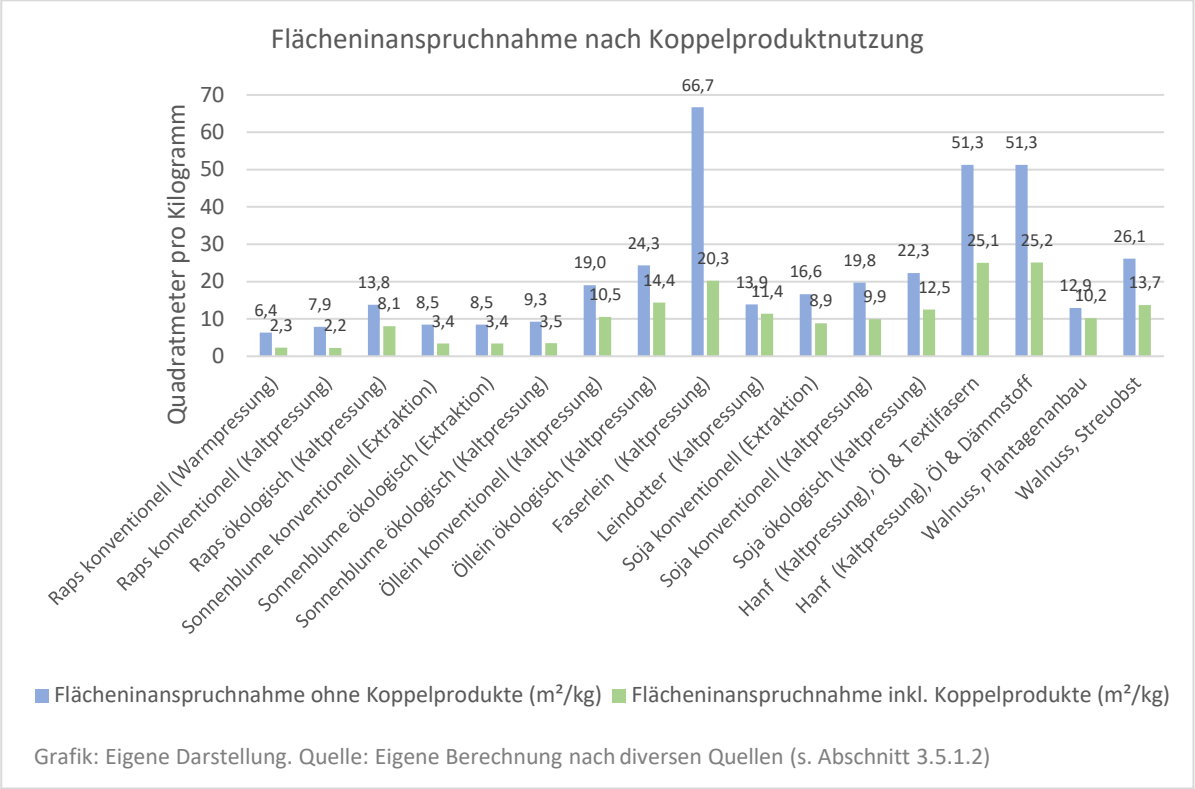
Produkt	**Leindotter** Kaltpressung	**Hanf** Kaltpressung, Öl & Textil-fasern	**Hanf** Kaltpressung, Öl & Dämm-stoff	**Walnuss,** Plantage	**Walnuss,** Streuobst	
Mehl	0	0	0	1.108	548	
Honig	0	0	0	0	0	
Wertholz	0	0	0	0	1.513	
Textilfasern	0	918	0	0	0	
Dämmstoff	0	473	4.500	0	0	
Futtermittel (Expeller)	1.767	595	595	0	0	
Schäben	0	3.128	0	0	0	
Festbrenn-stoff	0	0	0	970	2.685	
Biogassub-strat	0	0	0	0	0	
SUMME	**1.767**	**5.113**	**5.095**	**2.078**	**4.746**	

Quelle: Eigene Berechnung nach diversen Quellen (s. Text)

Während Leindotteröl mit 1.767 m²/ha die geringsten Flächengutschriften erhält, können Faserlein und Raps im konventionellen Anbau mit bis zu 6.960 m²/ha die höchsten Gutschriften angerechnet werden. In den meisten Fällen liegen die Gutschriften über 4.000 m²/ha. Die Flächeneffizienz der meisten Ölpflanzen kann folglich durch eine gezielte Nutzung möglicher Koppelprodukte erheblich gesteigert werden.

Unter Berücksichtigung der Koppelprodukte sinkt die Flächeninanspruchnahme von Raps im konventionellen Anbau auf rund 2,3 m²/kg bei Warmpressung und 2,2 m²/kg bei Kaltpressung. Raps erreicht damit die höchste Flächeneffizienz der in Deutschland nutzbaren Landpflanzen. Die Flächengutschriften aufgrund der Koppelprodukte führen hier dazu, dass die Ölgewinnung durch Kaltpressung flächeneffizienter ist, als die Ölgewinnung durch Extraktion. Die Flächeneffizienz des ökologischen Rapsanbaus bleibt mit 6,7 m²/kg bei Warmpressung und 8,1 m²/kg

bei Kaltpressung deutlich hinter der Flächeneffizienz des konventionellen Anbaus zurück. Aufgrund der geringeren Gesamterträge (einschl. Stroh) führt bei ökologischem Anbau die Warmpressung zu einer höheren Flächeneffizienz im Vergleich zur Kaltpressung. Im Gegensatz dazu ist es für die Ölgewinnung aus Sonnenblumenkernen nicht entscheidend, ob sie per Extraktion oder mittels Kaltpressung erfolgt. Sonnenblumen nehmen in beiden Fällen sowohl im ökologischen als auch im konventionellen Anbau durchschnittlich 3,5 m²/kg in Anspruch, weil auch die Stroherträge ähnlich ausfallen. Alle übrigen Ölpflanzen erreichen mit 8,9 bis 25,2 m²/kg eine deutlich geringere Flächeneffizienz, wobei Soja, Plantagenwalnuss und Leindotter mit Werten zwischen 8,9 und 11,4 m²/kg auf einem ähnlichen Niveau liegen. Die Ölerträge unter Berücksichtigung von Koppelprodukten sind in Abbildung 156 dargestellt.



Grafik: Eigene Darstellung. Quelle: Eigene Berechnung nach diversen Quellen (s. Abschnitt 3.5.1.2)

Abbildung 156: Ölerträge von Ölpflanzen nach Koppelproduktnutzung

Im Mittel erreichen Ölpflanzen im ökologischen Anbau im Vergleich zum konventionellen Anbau rund vier Fünftel der Flächeneffizienz, was vor allem darauf zurückzuführen ist, dass die Erträge von Sonnenblumen, Hanf und Walnuss im ökologischen Anbau die gleichen Erträge erzielen wie im konventionellen Anbau. Einen großen Unterschied gibt es jedoch beim Raps, der im ökologischen Anbau weniger als ein Drittel der Flächeneffizienz erreicht, die im konventionellen Anbau erzielt wird.

Wesentlich höhere Ölerträge als die dargestellten Landpflanzen liefern Mikroalgen. In offenen Becken erscheinen bei Algenerträgen von 10 bis 50 t TM/ha durchschnittliche Ölerträge von 12 t/ha realistisch. Hinzu kommen pro Hektar mehr als 18 t Algenpresskuchen, die z. B. als

Fischfutter in Aquaponikanlagen genutzt werden können. Noch höhere Algenölerträge sind in Reaktoren erreichbar, in denen bei Trockenmasseerträgen von rund 100 t/ha rund 40 t Öl und rund 60 t Algenpresskuchen pro Hektar produziert werden können.

11.2.8.6 Flächeninanspruchnahme

In der Landwirtschaft erhält man im Durchschnitt aller dargestellten Pflanzen, Anbauverfahren und Nutzungsvarianten rund 0,7 (0,2 – 1,6) t Öl pro Hektar. Ohne eine Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte entspricht dies einem Flächenbedarf von 13,7 (6,4 – 50,0) m²/kg. Unter Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte reduziert sich die Flächeninanspruchnahme auf 6,0 (2,2 – 13,7) m²/kg. Nutzt man nur die vier ertragreichsten Pflanzen Raps, Sonnenblume, Soja und Öllein im konventionellen Anbau, liegt die Flächeninanspruchnahme ohne Koppelprodukte bei 9,7 m²/kg und unter Berücksichtigung von Koppelprodukten bei 4,3 m²/kg. Im ökologischen Anbau liegen die Durchschnittswerte der gleichen vier Pflanzen ohne Koppelprodukte bei rund 14,3 m²/kg und mit Koppelprodukten bei 7,8 t, womit die Flächeneffizienz um 32 Prozent bzw. um 45 Prozent unter der des konventionellen Anbaus liegt.

Geht man von einem inländischen Bedarf von rund 1,3 Millionen Tonnen Öl pro Jahr aus, müssen demnach mindestens 555.600 Hektar in Anspruch genommen werden, wenn eine vollständige Nutzung aller Koppelprodukte erfolgt. Im ökologischen Anbau wird mindestens eine Fläche von über einer Million Hektar benötigt. Verzichtet man auf eine Nutzung möglicher Koppelprodukte, werden im konventionellen Anbau rund 1,262 Millionen Hektar benötigt, im ökologischen Anbau rund 1,857 Millionen Hektar.

Steigt der Verbrauch auf 2,0 Mio. Tonnen pro Jahr bewegen sich die entsprechenden Werte in einer Spanne zwischen 0,855 Millionen Hektar (bei Nutzung der Koppelprodukte) und 2,857 Millionen Hektar (ohne Nutzung der Koppelprodukte).

Pro Jahr müssten folglich, je nach Szenario, zwischen 5 und 24 Prozent der in Deutschland vorhandenen Ackerflächen für die Ölproduktion aufgewendet werden.

Sofern ein vollständiger Ersatz der bisher verwendeten Öle durch Öl aus Mikroalgen technisch möglich wäre, müssten theoretisch 32.500 bis 50.000 Hektar Reaktorfläche errichtet werden, um allein den inländischen Ölbedarf für die stoffliche Nutzung decken. Dies entspricht ungefähr der Fläche, die in Deutschland innerhalb von ein bis zwei Jahren für den Bau neuer Siedlungs- und Verkehrsflächen verbraucht wird (bei einem Flächenverbrauch von +/- 80 ha pro Tag).

11.2.9 Ethanol

Ethanol entsteht in der Natur, wenn zucker- oder stärkehaltige Stoffe durch Hefezellen oder Bakterien vergoren werden. Industriell wird es ebenfalls durch eine gezielte Gärung oder Destillation hergestellt. Ethanol wirkt desinfizierend und eignet sich zudem sehr gut als Lösungsmittel. Ethanol lässt sich sehr wirksam als Reinigungsmittel einsetzen und wird sowohl im Bereich der Privathaushalte als auch im industriellen Bereich genutzt. Die Farben- und Lackindustrie nutzt es als Lösungsmittel für Fette, Öle und Harze. Zudem kann man Bioethanol nutzen, um in einer Veresterung mit fermentativ hergestellter Bernstein- oder Zitronensäure Weichmacher für Biokunststoffe erzeugen, die zu 100 Prozent biobasiert sind und ein Ersatz für die als kritisch eingestuften Phthalate[107] sein können (Fraunhofer UMSICHT, 2015).

11.2.9.1 Verbrauch

Industriell erzeugtes Bioethanol wird heute zu großen Teilen als Treibstoff für Kraftfahrzeuge genutzt. Im Jahr 2017 betrug die Kraftstoffbeimischung in Deutschland rund 1,2 Millionen Tonnen (BDBe, 2018). Stofflich werden bisher nur geringe Mengen genutzt. Der Anteil alkoholischer Lösungsmittel hatte im Jahr 2015 einen Anteil von 3 Prozent an den in Privathaushalten verwendeten Wasch-, Pflege- und Reinigungsmitteln, was einem Gesamtverbrauch von 13.636 t entsprach (FNR, 2018b S. 14). Der Verbrauch pro Person lag somit bei rund 0,17 kg/Ea.

11.2.9.2 Rohstoffe

Bioethanol kann aus verschiedenen Pflanzen und pflanzlichen Teilen hergestellt werden:

- aus zuckerhaltigen Pflanzen wie Zuckerrüben und Zuckerrohr
- aus stärkehaltigen Pflanzen wie Getreide, Kartoffeln und Mais
- aus zellulosehaltigen Rohstoffen wie z. B. Stroh und Holz

Zucker wird in Deutschland nur aus Zuckerrüben gewonnen. Die wichtigsten für die Ethanolherstellung genutzten Getreide sind Weizen, Roggen und Triticale (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, 2012). Ethanol wird bisher hauptsächlich aus Stärke und Zucker hergestellt, die aus dem Korn bzw. aus den Rüben der Rohstoffpflanzen gewonnen werden. Um die Konkurrenz zur Nahrungsproduktion zu reduzieren, wird zunehmend auch das bei der Getreideproduktion anfallende Stroh als Rohstoff für die Ethanolproduktion genutzt. Dabei werden verschiedene sogenannte BtL-Verfahren angewendet, bei denen die Biomasse verflüssigt wird. BtL steht als Kürzel für Biomass to Liquid. Nach Unternehmensangaben hat die Firma Clariant ein BtL-Verfahren entwickelt, das es ermöglicht, aus 4 bis 5 Tonnen Getreidestroh eine Tonne Ethanol zu gewinnen, und dabei energieautark ist. Es benötigt somit keine von

[107] Ester der Phthalsäure

außen zugeführte Energie für den BtL-Prozess (Clariant, 2017). Das aus dem Stroh gewonnene Ethanol wird bereits für die Herstellung von Reinigungsmitteln eingesetzt (Werner & Mertz, 2018a).

11.2.9.3 Koppelprodukte

Beim Anbau von Getreide, Mais und Zuckerrüben fallen in der Landwirtschaft Stroh und Rübenblätter an. Das Stroh des Getreides kann, wie bereits dargestellt, auf verschiedene Weisen genutzt werden (sowohl energetisch als auch stofflich). Maisstroh und Rübenblätter können als Biogassubstrat genutzt werden. Rübenblätter liefern rund 95 m³ Biogas pro t Frischmasse (KTBL, 2012 S. 116), Maisstroh rund 324 l/kg TM (Fleschhut, 2016).

Bei der Herstellung von Ethanol aus Getreide oder Mais fällt pro Kubikmeter Ethanol rund eine Tonne Futtermittel an (Stölken, et al., 2007). Bei der Ethanolproduktion aus Weizenkorn handelt es sich dabei um Weizenkleie, Weizenkleber (Gluten) und Schlempe (BDBe, 2015 S. 15). Weizenkleie ist ein Reststoff aus Verarbeitung des Korns zu Mehl. Bei der Kleie handelt es sich um die mehrschichtige Schale, die das Endosperm umhüllt und am Gesamtgewicht des Weizenkorns einen Anteil von circa 14 Prozent hat (Horn Druck & Verlag, 2012-2015). Bei anderen Getreidearten kann der Anteil der Kleie auch deutlich größere Anteile am Korngewicht haben. So sind es z. B. bei Hafer rund 30 Prozent des Korngewichts (Kölln, 2018). Die Getreidekleie wird von Ethanolproduzenten heutzutage häufig energetisch (thermisch) genutzt (CropEnergies, 2018), in der Vergangenheit wurde sie als hochwertiges Futtermittel genutzt. Weizenkleie hat als Schweinefutter einen Energiegehalt von 8,48 MJ ME/kg FM (beweka, 2018c). Frische Roggentrockenschlempe weist einen Energiegehalt von 11,1 MJ ME/kg FM auf (beweka, 2018d), Weizentrockenschlempe liefert 10,9 MJ ME/kg FM (LfL Bayern, 2017b S. 73).

Bei der Nutzung von Zuckerrüben fallen bei einem Rübenertrag von 60 t/ha rund 3,3 t Rübenschnitzel oder Rübenpellets und 2,1 t Vinasse[108] an (vgl. Tabelle 353). Pro Kubikmeter Ethanol ergibt dies knapp 1,1 t Futtermittel. Der Energiegehalt von Rübenschnitzeln als Futtermittel liegt bei ca. 10,9 MJ ME/kg TM (Menke, et al., 2004).

Wenn sich andere Verwendungen (z. B. als Futtermittel oder Dünger) nicht anbieten, können Schlempen, Rübenschnitzel und Vinasse als Biogassubstrate genutzt werden. Das Gasbildungspotenzial von Nassschnitzeln (frisch od. sil.) liegt bei 76,1 m³/t FM, das von Pressschnitzeln (siliert) beträgt 125,1 m³/t FM (LfL Bayern, 2017a). Das Gasbildungspotenzial von Vinasse liegt bei 150 m³/t FM bzw. 540 Nl/kg TM (DMH, o. J.).

[108] Als Vinasse bezeichnet man jene Reststoffe, die nach der Vergärung des in der Melasse enthaltenen Zuckers und dem sich daran anschließenden Entzug des Ethanols am Ende des Produktionsprozesses übrigbleiben.

11.2.9.4 Hektarerträge

Ohne Koppelprodukte liegen die Ethanolerträge der wichtigsten Rohstoffpflanzen der Ethanolproduktion (Zuckerrübe, Weizen, Roggen, Triticale, Mais) zwischen 1,7 und 5,1 Tonnen pro Hektar, sofern ausschließlich das Korn bzw. die Rübe genutzt wird (vgl. Tabelle 362). Die mit Abstand höchsten Erträge liefert die Zuckerrübe vor Mais und Weizen.

Tabelle 362: Erträge wichtiger Ethanolpflanzen

Produkt	Zuckerrübe	Weizen	Roggen	Triticale	Mais
Biomasseerträge					
Rüben (t/ha)	[1] 60				
Korn (t/ha)		[1] 7,9	[1] 5,3	[1] 5,8	[1] 12,0
Stroh (t/ha)		[1] 8,4	[1] 6,5	[1] 6,8	[2] 10,5
Rübenblatt (t TM/ha)	[1] 6,3				
Herstellbare Ethanolmenge					
Bioethanol (l/ha)	[1] 6.452	[1] 3.034	[1] 2.219	[1] 2.327	[1] 4.775
Bioethanol (t/ha)	[1] 5,06	[1] 2,38	[1] 1,74	[1] 1,83	[1] 3,75

Quellen: (1) KTBL, 2012; (2) Fleschhut, 2016

Im folgenden Vergleich geben die Buchstaben K und S an, ob für die Ethanolherstellung Korn oder Stroh verwendet wurden. Wurde die Ganzpflanze als Rohstoff der Ethanolproduktion genutzt, ist dies mit dem Kürzel K+S (Korn + Stroh) gekennzeichnet. Nutzt man ausschließlich das bei der Getreideproduktion anfallende Stroh zur Ethanolherstellung (Variante S), können pro Hektar aus Roggenstroh durchschnittlich 1.840 l/ha, aus Triticalestroh 1.925 l/ha und aus Weizenstroh 2.378 l/ha gewonnen werden. In Abbildung 157 sind die Ethanolerträge wichtiger Rohstoffpflanzen nach Nutzungsvarianten dargestellt. Bei einer ausschließlichen Strohnutzung liegt der Ethanolertrag lediglich um rund ein Fünftel unter dem Ethanolertrag, der sich aus dem Korn gewinnen lässt (Variante K). Dementsprechend liegt der Ethanolertrag um rund 80 Prozent über dem reinen Kornethanolertrag, wenn zusätzlich zum Korn auch das Stroh für die Ethanolproduktion genutzt wird (Variante K+S).

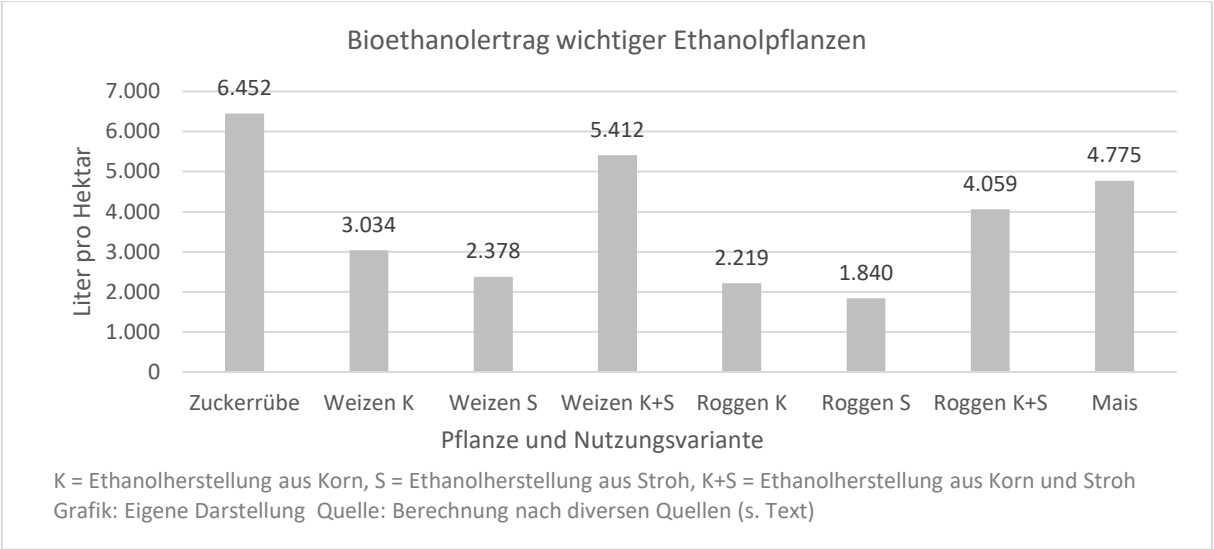


Abbildung 157: Ethanolertrag wichtiger Ethanolpflanzen nach Nutzungsvariante (Liter/ha)

Ein anderes Bild zeigt sich, wenn mögliche Koppelprodukte genutzt werden.

11.2.9.5 Ertragspotenziale im Vergleich

Im folgenden Vergleich wurden Zuckerrüben, Mais und verschiedene Nutzungen von Weizen und Roggen berücksichtigt. In zusätzlichen Varianten (V) wurden verschiedene Nutzungspfade verglichen. Dabei wurde zunächst untersucht, wie sich die Nutzung von Weizenkorn als Nahrungsmittel (Variante Weizen S, VN) im Vergleich zur Nutzung des Korns als Brennstoff (Variante Weizen S, VE) auf die Flächeneffizienz auswirkt. In einem weiteren Variantenvergleich wurde am Beispiel der Weizenganzpflanzennutzung (Weizen K+S) untersucht, ob sich die bei Ethanolproduktion anfallende Weizenkleie flächeneffizienter als Energieträger/Festbrennstoff (Variante Weizen K+S, VE) oder als Futtermittel (Variante Weizen K+S, VF) nutzen lässt.

Des Weiteren wurden folgende Annahmen getroffen:

- Rübenschnitzel und Getreideschlempen wurden als Futtermittel verwendet.
- Weizenkleie wurde in einer Variante energetisch (als Festbrennstoff) genutzt (Variante VE). In einer zweiten Variante wurde die Kleie als Futtermittel verwendet (Variante VF).
- Roggenkleie wurde als Festbrennstoff berücksichtigt.
- Getreidestroh wurde entweder als Rohstoff der Ethanolproduktion oder als Festbrennstoff berücksichtigt.
- Alle übrigen Koppelprodukte (Rübenblätter, Vinasse, Maisstroh) wurden in diesem Vergleich als Biogassubstrate verwendet.

Den verschiedenen Nutzungspfaden entsprechend ergeben sich aus diesen Annahmen die in Abbildung 158 dargestellten Hektarerträge.

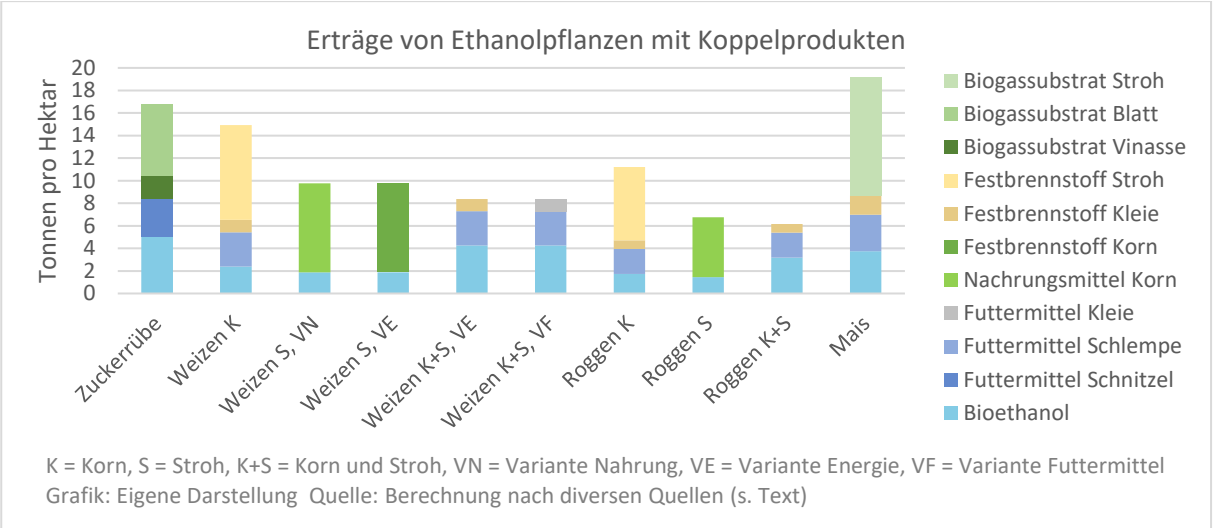


Abbildung 158: Erträge von Ethanolpflanzen inklusive Koppelprodukte (nach Nutzungsvariante)

Alle berücksichtigten Ethanolpflanzen liefern Energieträger mit hohen Energiegehalten. Für Getreide ergeben sich jedoch, je nach Nutzungspfad, sehr unterschiedliche Energieerträge. Die Beispielgetreide Weizen und Roggen liefern einschließlich des Heizwerts des Ethanols zwischen 13.870 und 55.721 kWh/ha. Zuckerrüben und Weizen liefern beinahe die gleichen Energieerträge, wenn das Korn der Weizenpflanze für die Ethanolproduktion und das Weizenstroh sowie die Weizenkleie als Festbrennstoffe genutzt werden. Der Endenergieertrag dieser Körnermaisnutzung liegt um rund ein Fünftel über dem der Biogaserzeugung auf Basis von Silomais. Die möglichen Endenergieerträge sind in Tabelle 363 dargestellt.

Tabelle 363: Energieerträge von Ethanolpflanzen pro Hektar (kWh/ha)

Produkt/ Energieträger	Zucker-rübe	Weizen K	Weizen S, VN	Weizen S, VE	Weizen K+S, VE	Weizen K+S, VF	Roggen K	Roggen S	Roggen K+S	Mais
Bioethanol aus Korn	37.634	17.697			17.697	17.697	12.943		12.943	27.853
Bioethanol aus Stroh			13.870	13.870	13.870	13.870		10.733	10.733	
Biogas aus Rübenblatt	14.703									
Biogas aus Stroh										33.918
Biogas aus Vinasse	2.813									
Festbrenn-stoff Korn				31.347				20.999		
Festbrenn-stoff Kleie		4.424			4.424		2.968			
Festbrenn-stoff Stroh		33.600					22.542			
Summe	**55.150**	**55.721**	**13.870**	**45.217**	**35.992**	**31.568**	**38.453**	**31.732**	**23.676**	**61.770**

K = Korn, S = Stroh, K+S = Korn und Stroh, VN = Variante Nahrung, VE = Variante Energie, VF = Variante Futtermittel
Quelle: Eigene Berechnung n. Clariant, 2017; LfL Bayern, 2017a; Fleschhut, 2016; KTBL, 2012; DMH, o. J.; Debruck, o. J.; KTBL, 2018;

Für die Ethanolproduktion ergeben sich aufgrund der hier berücksichtigten Koppelprodukte die in Tabelle 364 dargestellten Flächengutschriften. Anhand der Flächengutschriften wird deutlich, welch entscheidende Bedeutung der Nutzung der Koppelprodukte für die Effizienz der Ethanolproduktion zukommt. In sechs von zehn Fällen ist den Koppelprodukten mehr als die Hälfte der Flächeninanspruchnahme zuzurechnen.

Tabelle 364: Flächengutschriften für Koppelprodukte der Ethanolproduktion (m²/ha)

Produkt	Zucker-rübe	Weizen K	Weizen S (VN)	Weizen S (VE)	Weizen K+S (VE)	Weizen K+S (VF)	Roggen K	Rogg. S	Rogg. K+S	Mais
Getreide-korn			8.373					5.617		
Futter-mittel	3.445	2.715			2.715	3.537	1.985		2.161	2.881
Fest-brennstoff		4.875		4.019	567	567	3.270		381	
Biogas-substrat	2.246									4.348
SUMME	**5.690**	**7.590**	**8.373**	**4.019**	**3.282**	**4.105**	**5.256**	**5.617**	**2.541**	**7.230**

K = Korn, S = Stroh, K+S = Korn und Stroh, VN = Variante Nahrung, VE = Variante Energie, VF = Variante Futtermittel
Quelle: Eigene Berechnung

Aus der Nutzung möglicher Koppelprodukte ergeben sich deutliche Effizienzsteigerungen. So wird bei der Mais-Ethanol-Produktion in der untersuchten Variante eine Reduktion der Flächeninanspruchnahme auf 0,74 m²/kg möglich. Mais erreicht damit die höchste Flächeneffizienz aller Ethanolpflanzen. Mit jeweils 0,87 m²/kg folgen Zuckerrübe und Weizen, wenn das Stroh zur Ethanolproduktion und das Korn als Nahrungsmittel verwendet werden. Wird das Weizenkorn für die Ethanolproduktion genutzt und das Stroh als Festbrennstoff eingesetzt, wird ein Wert von 1,01 m²/kg erzielt. Alle übrigen Getreidenutzungen bleiben, wie in Abbildung 159 dargestellt, deutlich über 1,0 m² pro Kilogramm Ethanol. Im ökologischen Anbau, für den hier keine gesonderten Berechnungen durchgeführt wurden, dürften zwar die Erträge aller Ethanolpflanzen geringer ausfallen, der Abstand zwischen Mais und den anderen Ethanolpflanzen dürfte jedoch noch größer ausfallen als im konventionellen Anbau.

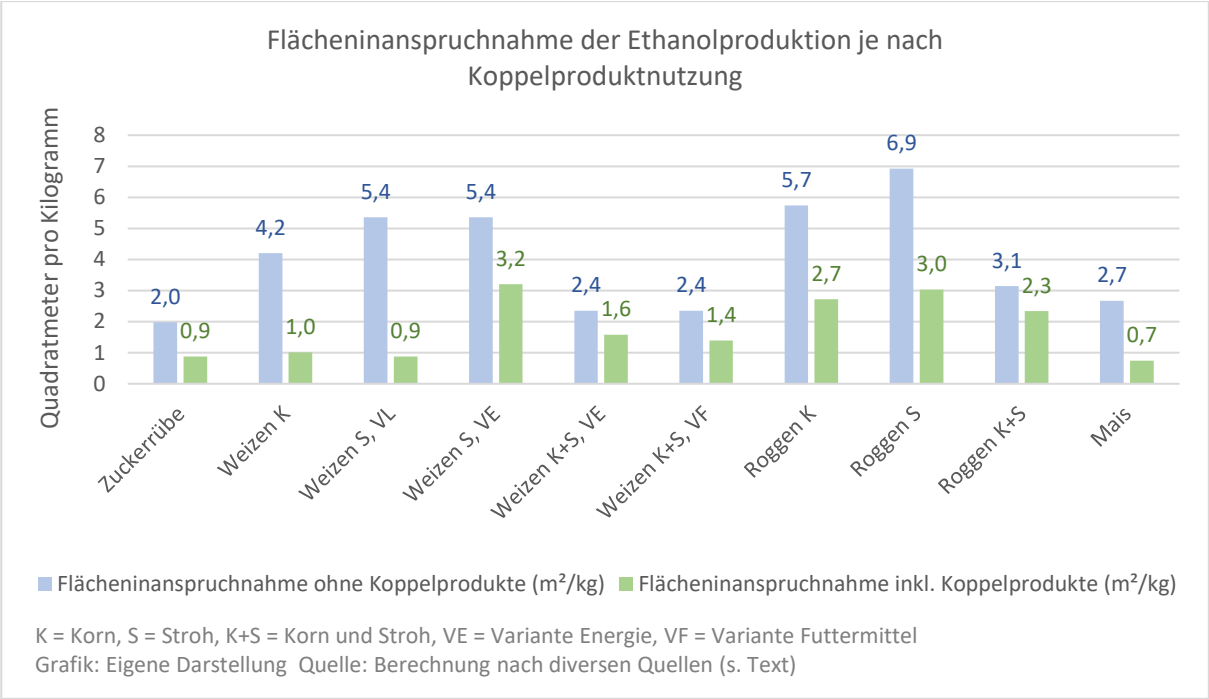


Abbildung 159: Flächeninanspruchnahme der Ethanolproduktion je nach Rohstoffpflanze und Koppelproduktnutzung (m²/kg)

11.2.9.6 Flächeninanspruchnahme

Geht man von einem Bedarf der Reinigungs-, Pflege- und Waschmittelproduktion von 13.636 t Alkohol pro Jahr aus, müssen in Deutschland auf einer Fläche von 7.543 (2.673 bis 9.740) Hektar Ethanolpflanzen angebaut werden. Bei einer vollständigen Nutzung der Koppelprodukte beträgt die tatsächliche Flächeninanspruchnahme der Ethanolproduktion jedoch lediglich 2.548 (696 bis 4.399) Hektar pro Jahr. Wählt man einen Mix der drei ertragreichsten Pflanzennutzungen, kann die tatsächliche Flächeninanspruchnahme auf 960 Hektar reduziert werden. Mit Blick auf den Klimawandel sind jedoch deutliche Ertragsrückgänge möglich, insbesondere, falls sich Dürren wie im Jahr 2018 künftig häufiger einstellen sollten.

11.3 Unsicherheiten und Datenlücken

Der Rohstoffsektor verfügt im Vergleich zu den anderen beiden Sektoren über die geringsten Erfahrungswerte, die kleinste Datenbasis und die meisten Datenlücken. Wahrscheinlich weist er aber auch noch die größten Potenziale zur Verbesserung der Effizienz auf. Dies gilt insbesondere für die Verarbeitung der Rohstoffe. Insgesamt wird die Datenbasis jedoch als ausreichend eingeschätzt, um die Produktionspotenziale zu bestimmen. Nicht ausreichend systematisch erfasst werden bisher die verbrauchten Mengen in den einzelnen Segmenten des Sektors.

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick zur Datenbasis mit Blick auf die wichtigsten Unsicherheiten und Datenlücken gegeben.

Unsicherheiten

Die Ertragspotenziale in Land- und Forstwirtschaft sind vor allem infolge des sich bereits vollziehenden Klimawandels mit gewissen Unsicherheiten verbunden. Dies betrifft die Forstwirtschaft vielleicht noch stärker als die Landwirtschaft, die sich mit ihren überwiegend einjährigen Nutzpflanzen schneller an ein verändertes Klima anpassen kann, sofern sie auf geeignetes Saatgut zurückgreifen kann. Da es sich bei einigen der wichtigsten Rohstoffpflanzen um Pflanzen handelt, die eher in wärmeren Klimazonen heimisch sind (z. B. Miscanthus), dürften die Ausfälle geringer ausfallen als bei alteingesessenen Nutzpflanzen, die mehr an das bisherige Klima angepasst sind. Zu letzteren zählt sicherlich die Faserнessel, in deren Fall es fraglich ist, wie gut sie häufigere und längere Trockenzeiten überstehen wird. Auch bei den wichtigen Rohstoffpflanzen Weizen und Mais könnten die Erträge sinken, sofern sich die Erkenntnisse von Zhao et al. auf Süddeutschland übertragen lassen (Zhao, et al., 2017).

Mit Blick auf die Verarbeitung bestehen Unsicherheiten insbesondere im Bereich der Oleochemie, die sowohl die benötigten Rohstoffmengen als auch die Aufkommen von Koppelprodukten und Reststoffen je Produkteinheit betreffen. Während die Datengrundlage zu den Produktsegmenten Farben und Lacke sowie Kerzen lediglich als dünn angesehen werden kann, muss sie im Bereich Reinigungs- und Waschmittel als unsicher betrachtet werden. Im Segment der Kosmetik ist keine zufriedenstellende Datenbasis vorhanden. Insgesamt ist die Datengrundlage des Sektors deutlich kleiner als dies bei den Sektoren Nahrung und Energie der Fall ist. Eine Einschätzung der Datenqualität ist in Tabelle 365 dargestellt.

Tabelle 365: Einschätzung der Datenqualität im Sektor Rohstoffe

Produktgruppe	Art der Quellen	Quantität der Bestätigungen	Einschätzung der Datenqualität
Baustoffe	v.a. Hersteller	mittel	gut/sehr gut
Dämmstoffe	v.a. Hersteller	mittel	sehr gut
Möbel	v.a. Hersteller	gering	gut
Fahrzeuge	v.a. Hersteller / FNR	gering	befriedigend/gut
Textilien	v.a. Hersteller	mittel	gut/sehr gut
Papier	v.a. Hersteller	mittel	gut/sehr gut
Kunststoffe	IfBB Hannover/Hersteller	sehr gering	gut/sehr gut
Farben und Lacke	Hersteller	sehr gering	gut/sehr gut
Schmierstoffe	Studie	sehr gering	befriedigend/gut*
Kerzen	Studie/Hersteller	sehr gering	befriedigend/gut*
Tenside	FNR/Hersteller/Studie	sehr gering	befriedigend/gut*
Ethanol	KTBL/Hersteller	sehr gering	gut/sehr gut
Körperpflege/Kosmetik	Hersteller	nicht vorhanden	nicht möglich

* Quellen weisen zum Teil auf unsichere Datenbasis hin

Datenlücken

Obwohl es zu den meisten Daten, die für die Berechnung der flächenbezogenen Kennwerte benötigt werden, nur einzelne oder wenige Quellen gibt, bestehen mit Blick auf die ausgewählten Produktsegmente kaum größere Datenlücken. Um genauere und vor allem differenziertere Berechnungen durchzuführen, muss die Datenverfügbarkeit jedoch insbesondere in der Produktgruppen Fahrzeuge (Karosseriebau und Innenausbau) und im Bereich der Oleochemie verbessert werden. Beispielsweise muss im Segment Farben und Lacke die Datengrundlage zum Rohstoffbedarf je Produkteinheit insbesondere mit Blick auf importierte nachwachsende Rohstoffe verbessert und erweitert werden. Im Produktsegment Köperpflege und Kosmetik ist insgesamt keine ausreichende Datengrundlage vorhanden. In der Produktgruppe Möbel mangelt es an Daten zum Textilfaserverbrauch der Möbelproduktion.

Weiterer Forschungsbedarf wird im Bereich der Verwendungsmöglichkeiten der neueren Rohstoffpflanzen Miscanthus, Sonnenblumen, Rutenhirse, Fasernessel und Paulownia gesehen. Dies gilt sowohl bezüglich der Erträge des ökologischen Anbaus als auch mit Blick auf mögliche Hauptprodukte und Koppelprodukte. Das Potenzial dieser Pflanzen scheint noch nicht ausreichend ausgeschöpft. Dies betrifft vor allem den Bausektor, der nicht zuletzt die Verwendungsmöglichkeiten diverser Produkte auf Basis von Reststoffen (v.a. Schäben) aus der Dämmstoff- und Textilfaserproduktion noch genauer untersuchen sollte. Von der Möglichkeit einer sinnvollen Verwendung der Koppelprodukte sollte es abhängig gemacht werden, welche Pflanzen bevorzugt als Rohstoffpflanzen der Textil- und Dämmstoffproduktion genutzt werden.

12 Energie

Im Gegensatz zur Nahrungsversorgung spielte die Ressource Fläche bei der Bereitstellung von Energie und Rohstoffen in den vergangenen 100 Jahren nur noch eine sehr untergeordnete Rolle. Durch den Umstieg von fossilen auf erneuerbare Energien wird die Fläche jedoch wieder zum entscheidenden Faktor. In der Folge konkurriert die Energiegewinnung mit der Nahrungsproduktion und dem Anbau nachwachsender Rohstoffe, aber auch mit dem Siedlungsbau und dem Naturschutz um die benötigten Flächen. Daher ist es von zunehmender Bedeutung, Flächennutzungskonkurrenzen durch hohe Effizienz, Synergieeffekte und sinnvolle Kombinationen zu entschärfen. Besonders geeignet sind daher Energiequellen, die z. B. die Artenvielfalt auf der Fläche erhöhen, eine gleichzeitige Nahrungsproduktion erlauben, die Wasserwirtschaft begünstigen, den Bodenschutz unterstützen, einen guten Erntefaktor und hohe Netto-Hektarerträge aufweisen. Viele Energiequellen vereinen jedoch nur einen Teil dieser Vorteile auf sich. Oft müssen daher standortangepasste Produktionssysteme gefunden werden, die durch die Kombination unterschiedlicher Energiequellen möglichst viele Vorteile verbinden und im Idealfall Synergieeffekte mit der Produktion von Nahrung und Rohstoffen hervorbringen. Nachfolgend soll daher der Fokus auf Effizienzkennwerte und ökologische Aspekte gerichtet werden. Zu den Flächenpotenzialen erneuerbarer Energien gibt es bereits zahlreiche Studien und umfangreiche Fachliteratur.

12.1 Energiebedarf

12.1.1 Endenergiebedarf nach Sektoren und Energieträgern

Der Endenergieverbrauch Deutschlands lag im Jahr 2017 mit 2.591 TWh trotz eines Bevölkerungswachstums um rund 2 Prozent unter dem Endenergieverbrauch des Jahres 1990 (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2018). Damit ist der Endenergieverbrauch pro Einwohner von rund 33,0 MWh/a auf 31,3/a MWh gesunken, was einem Rückgang von 5 Prozent entspricht. Im Jahr 2017 entfielen etwa 28,9 Prozent des Endenergieverbrauchs auf die Industrie, 29,5 Prozent auf den Verkehr, 26 Prozent auf die privaten Haushalte und 15,5 Prozent auf den Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistung (GHD).

Tabelle 366: Endenergieverbrauch in Deutschland 2011 – 2017 pro Einwohner nach Sektoren (kWh)

Sektor	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Industrie	9.108	8.925	8.772	8.708	8.613	8.783	9.060
Verkehr	8.880	8.826	8.982	8.948	8.859	9.054	9.245
Private Haushalte	8.069	8.374	8.791	7.485	7.780	7.999	8.151
GHD	4.655	4.641	5.022	4.618	4.826	4.699	4.842
Insgesamt	**30.712**	**30.766**	**31.567**	**29.759**	**30.078**	**30.535**	**31.298**

Quelle: Eigene Berechnung nach Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2018, und GENESIS Datenbank

Unter den Energieträgern hatten Kraftstoffe mit 29,3 Prozent und Gase mit 26,0 Prozent die größten Anteile. 20 Prozent entfielen auf Strom und 7,5 Prozent auf Heizöl. Steinkohle und Braunkohle trugen 5,1 Prozent bei, Fernwärme 4,4 Prozent. Sonstige Energieträger summierten sich auf 7,6 Prozent.

Tabelle 367: Endenergieverbrauch in Deutschland 2011 - 2017 pro Einwohner nach Energieträgern (kWh)

Energieträger	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Steinkohle	1.339	1.175	1.162	1.191	1.293	1.271	1.283
Braunkohle	326	319	318	291	282	292	303
Kraftstoff	8.595	8.551	8.766	8.718	8.713	8.960	9.161
Heizöl schwer	99	73	53	48	50	44	126
Heizöl leicht	2.426	2.587	2.772	2.324	2.231	2.153	2.234
Gas	7.717	7.820	8.152	7.295	7.547	7.758	8.148
Strom	6.488	6.498	6.478	6.316	6.264	6.272	6.277
Fernwärme	1.453	1.485	1.496	1.311	1.358	1.379	1.377
Sonstige	2.269	2.258	2.370	2.264	2.340	2.406	2.388
Insgesamt	**30.712**	**30.766**	**31.567**	**29.759**	**30.078**	**30.535**	**31.298**

Quelle: Eigene Berechnung nach Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2018, und GENESIS Datenbank

In Baden-Württemberg ist der Endenergieverbrauch pro Einwohner zwischen 1990 und 2017 von 27,6 MWh/a auf 26,4 MWh/a gesunken. Dies entspricht einem Rückgang um 4,5 Prozent. Der Rückgang seit 1990 war allerdings nicht kontinuierlich (vgl. Tabelle 368). Im Jahr 2013 lag der Verbrauch sogar über dem Vergleichswert aus dem Jahr 1990 (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2019a).

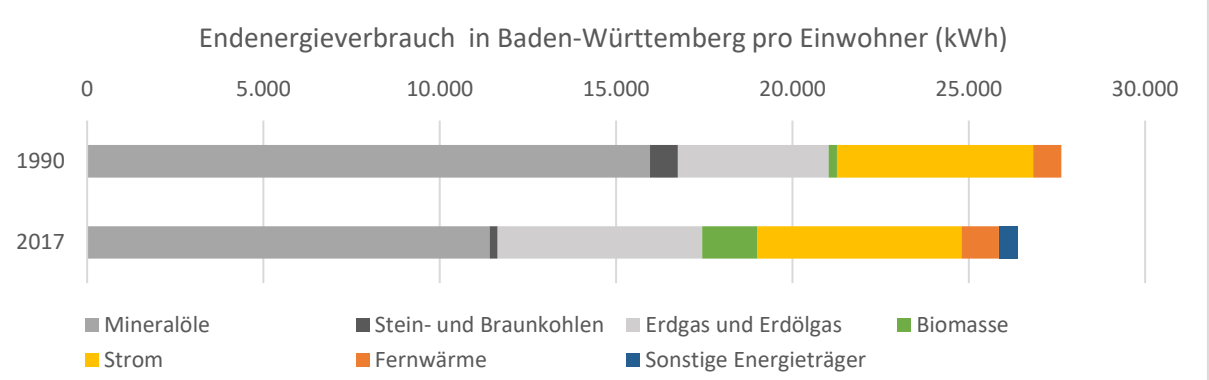
Im Integrierten Energie- und Klimaschutzkonzept Baden-Württemberg (IEKK) erklärte die Landesregierung von Baden-Württemberg im Jahr 2014, dass der Endenergiebedarf des Landes bis zum Jahr 2050 um rund 50 Prozent gesenkt werden muss, um den dann verbleibenden Bedarf weitestgehend mit erneuerbaren Energien decken zu können (UM Baden-Württemberg, 2014 S. 8).

Die größten Anteile haben immer noch mit großem Abstand die Mineralöle (43 Prozent) vor Strom (22 Prozent) und Erdgas und Erdölgas (22 Prozent). Der Anteil der fossilen Energieträger Mineralöle, Kohlen, Erdgas und Erdölgas ist zwischen 1990 und 2017 von 76 Prozent auf 66 Prozent gesunken.

Tabelle 368: Endenergieverbrauch in Baden-Württemberg nach Energieträgern pro Einwohner 2011 - 2017 und im Vergleichsjahr 1990 (kWh)

Energieträger	1990	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Mineralöle	15.963	11.574	11.440	11.762	11.159	11.197	11.315	11.411
Steinkohlen	638	142	92	81	114	113	88	97
Braunkohlen	151	147	133	116	105	111	129	137
Erdgas & Erdölgas	4.274	5.570	5.392	5.933	5.254	5.629	5.862	5.793
Biomasse	235	1.644	1.561	1.634	1.522	1.510	1.613	1.573
Strom	5.568	6.511	6.421	6.472	6.136	6.056	6.024	5.785
Fernwärme	801	1.155	1.141	1.228	985	1.017	1.037	1.063
Sonstige		373	412	466	508	524	505	535
Gesamt	**27.628**	**27.116**	**26.592**	**27.692**	**25.784**	**26.158**	**26.573**	**26.394**

Quelle: Eigene Berechnung nach Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2019d



Grafik: Eigene Darstellung. Quelle: STL BW (2019a, 2019d)

Abbildung 160: Endenergieverbrauch in Baden-Württemberg pro Einwohner 1990 und 2017 (kWh)

12.1.2 Datenbasis in den Landkreisen

Die Datengrundlage zum Energieverbrauch in den einzelnen Landkreisen ist in der Regel lückenhaft. Lediglich der Endenergiebedarf des Sektors Industrie wird regelmäßig erfasst und von den Statistischen Ämtern veröffentlicht. Der Energiebedarf des Sektors GHD kann dagegen in den meisten Fällen nur relativ grob über die genutzten Flächen und Vergleichswerte aus dem Bundesland oder anderen Landkreisen geschätzt werden. Nur gelegentlich liegen bereits Erhebungen zum Sektor GHD im Rahmen von Klimaschutzkonzepten vor. Etwas genauere Schätzungen sind zu den Sektoren Verkehr und Wohnen möglich. Benötigte Kennwerte für die Schätzung des Endenergiebedarfs des Sektors Verkehr sind die jährlichen Fahrleistungen der verschiedenen Kraftfahrzeugarten und die spezifischen Energieverbräuche der verschiedenen Kraftfahrzeugarten je Kilometer Fahrleistung bzw. je Personenkilometer oder

Tonnenkilometer. Der Energiebedarf des Wohnens kann über die Quadratmeter Wohnfläche, den durchschnittlichen Heizwärmebedarf pro Quadratmeter Wohnfläche sowie den durchschnittlichen Stromverbrauch pro Haushalt geschätzt werden. Daten zu Jahresfahrleistungen, Wohnflächen und Haushaltsgrößen in Bundesländern und Landkreisen liegen bei den Statistischen Landesämtern und in der Datenbank des Zensus 2011 vor.

Im Landkreis Ravensburg betrug der Endenergieverbrauch im Jahr 2012 ca. 28,0 MWh/EW (Energieagentur Ravensburg, 2015a S. 49), im Bodenseekreis lag er im gleichen Jahr bei 24,0 MWh/EW (Energieagentur Ravensburg, 2015b S. 58). Im Landkreis Konstanz ergab eine Schätzung für das Jahr 2013 einen Endenergieverbrauch von 23,7 MWh/EW (Simon, et al., 2017 S. 14). Für den Landkreis Esslingen wird ein Endenergieverbrauch von 23,2 MWh/EW im Jahr 2017 angegeben (IFEU Heidelberg, 2019 S. 14). Für den Landkreis Sigmaringen lagen noch keine vergleichbaren Erhebungen des Endenergieverbrauchs vor.

Eigene Berechnungen auf Basis von spezifischen Endenergiebedarfskennwerten für die Sektoren Verkehr, Wohnen, GHD und Landwirtschaft zuzüglich des Endenergieverbrauchs der Industrie[109] des Jahres 2017 ergaben für den Landkreis Ravensburg 27,7 MWh/EW, für den Bodenseekreis 24,4 MWh/EW, für den Kreis Konstanz 25,2 MWh/EW, für den Kreis Esslingen 23,1 MWh/EW und für den Kreis Sigmaringen 25,7 MWh/EW. Die hohe Übereinstimmung der Ergebnisse mit den bereits veröffentlichten Daten der Landkreise Ravensburg, Bodenseekreis und Esslingen spricht für gute Eignung der Bedarfskennwerte. Im Kreis Konstanz ergibt sich die Differenz zur Schätzung aus dem Jahr 2013 aus einer Verbesserung der Datengrundlage.

Die den Autonomiegradberechnungen zugrunde gelegten spezifischen Energieverbrauchswerte der verschiedenen Verkehrsmittel und Haushalte werden im Folgenden beschrieben.

12.1.3 Bedarfskennwerte Verkehr und Wohnen

12.1.3.1 Treibstoffverbrauch von Verkehrsmitteln

Personentransport: Der spezifische Kraftstoffverbrauch des deutschen Pkw-Bestandes ist zwischen den Jahren „2001 und 2010 von 8,5 auf 7,9 Liter Benzin je 100 Kilometer und von 6,9 auf 6,8 Liter Diesel je 100 Kilometer zurückgegangen“ (dena, 2012 S. 41). Bis zum Jahr 2017 ist der Verbrauch von Pkw mit Dieselmotor auf 7,0 Liter/100 km gestiegen, während der Verbrauch von Pkw mit Ottomotor leicht gesunken ist, auf 7,8 Liter/100 km. (Statista, 2019c) Sparsame Pkw mit Ottomotor kommen im Alltagsbetrieb auf Werte von 4,7 Liter/100 km, sparsame Diesel-Pkw sogar auf 3,7 Liter/100 km (Fisch und Fischl GmbH, 2019a).

Der Endenergieverbrauch von Pkw mit Erdgas liegt bei rund 5,0 kg CMG auf 100 km (Vgl. Anhang II, Tabelle 487). Bei einem Energiegehalt von 13,3 kWh/kg entspricht dies einem Verbrauch von 67 kWh/100 km. Sparsame Fahrzeuge kommen mit einem Verbrauch von ca. 3,0

[109] Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: Regionaldaten

kg/100 km auf einen Energiebedarf unter 50 kWh/100 km. Im Durchschnitt könnte der Verbrauch von Pkw mit Verbrennungsmotor um mindestens 44 Prozent gesenkt werden, wenn jeweils die sparsamsten Fahrzeuge genutzt würden.

Pkw mit Elektromotor benötigten in einem Praxistest des ADAC zwischen 14,7 und 28,1 kWh pro 100 km (ADAC, 2018). Im Alltagsbetrieb benötigen die 10 sparsamsten Elektroautos nach Daten des Vergleichsportals Spritmonitor (Fisch und Fischl GmbH, 2019a) zwischen 14,0 und 16,4 kWh/100 km (vgl. Anhang II, Tabelle 486). Der Endenergieverbrauch sparsamer Elektrofahrzeuge liegt somit um ca. 78 Prozent unter dem aktuellen Durchschnittsverbrauch der Pkw mit Verbrennungsmotoren. Im Vergleich zu den sparsamsten Verbrennern beträgt die Energieeinsparung noch rund 60 Prozent.

Tabelle 369: Energieverbrauch von Personenkraftwagen auf 100 km (kWh)

Verkehrsmittel	Durchschnittlicher Verbrauch 2018	Möglicher Bedarf, techn. Stand 2018
Pkw, Benzin	67,1	40,4
Pkw, Diesel	69,3	36,6
Pkw, Gas	66,5	39,9
Pkw, Strom	16,2	14,7

Quelle: Eigene Berechnung n. Fisch und Fischl GmbH, 2019a

Geht man davon aus, dass Pkw im Durchschnitt mit 1,5 Personen besetzt sind (Follmer, et al., Februar 2010 S. 13), liegt der Energiebedarf pro Personenkilometer (Pkm) bei sparsamen Verbrennern somit schon heute zwischen 0,24 und 0,27 kWh. Sparsame Elektrofahrzeuge liegen bei 0,10 kWh/Pkm. Der Energieverbrauch im öffentlichen Personennahverkehr liegt, je nach Verkehrsmittel, zwischen 0,02 und 0,13 kWh/Pkm (Umweltbundesamt Österreich, 2016a).

Tabelle 370: Energieverbrauch pro Personenkilometer nach Verkehrsmittel (kWh/Pkm)

Verkehrsmittel	Durchschnittlicher Verbrauch 2018	Möglicher Bedarf 2018
Pkw, Benzin	[2] 0,45	[2] 0,27
Pkw, Diesel	[2] 0,46	[2] 0,24
Pkw, Gas	[2] 0,44	[2] 0,27
Pkw, Strom	[2] 0,11	[2] 0,10
Zug	[1] 0,19	[1] 0,19
Bus	[1] 0,13	[1] 0,13
Straßenbahn	[1] 0,08	[1] 0,08
U-Bahn	[1] 0,02	[1] 0,02

Quellen: (1) Umweltbundesamt Österreich, 2016; (2) Eigene Berechnung;

Gütertransport: Leichte Nutzfahrzeuge (LNF) benötigen ca. 9 bis 11 Liter Diesel je 100 km Fahrleistung. Deutlich höher ist der Treibstoffverbrauch schwerer Nutzfahrzeuge (SNF): Der Treibstoffbedarf von Lastkraftwagen liegt in der Regel zwischen 18 und 21 Litern Diesel auf 100 km, schwere Sattelzüge benötigen ca. 28 bis 32 Liter Diesel auf 100 km (vgl. Anhang II: Tabelle 488). Pro Tonnenkilometer beträgt der Energiebedarf von Lkw 0,39 kWh. Binnenschiffe benötigen 0,11 kWh/tkm, Güterzüge 0,08 kWh/tkm. (Umweltbundesamt, 2018)

12.1.3.2 Energieverbrauch des Wohnens

Der durchschnittliche Wärmebedarf des Wohnens pro Quadratmeter liegt in Baden-Württemberg auf dem Niveau des gesamtdeutschen Durchschnitts und ist im Zeitraum 2002 - 2013 um rund 20 Prozent gesunken (co2online gGmbH, 2011/2014). Im Jahr 2018 betrug die Wohnfläche pro Person 46,7 m² pro Person (Statistisches Bundesamt, 2019h), die Zahl der Haushalte lag bei 41,38 Millionen (Statistisches Bundesamt, 2020). Der Endenergiebedarf für Wärme betrug ca. 527.858 GWh (BDEW, 2020). Daraus ergibt sich ein Wärmebedarf von 136 kWh pro Quadratmeter, wovon 81 Prozent auf die Heizung und 19 Prozent auf Wasserbereitung entfielen (vgl. Tabelle 371). Der Strombedarf der Haushalte ist vor allem durch die Haushaltsgröße nach Anzahl der Personen bedingt. Aktuellere Daten sind allerdings nicht so differenziert wie die Datenerhebung des BDEW aus dem Jahr 2009 (BDEW, 2010). Dennoch ist eine klare Tendenz der Entwicklung zu erkennen: Insgesamt hat der Stromverbrauch der Privathaushalte zwischen 2010 und 2017 um 7,6 Prozent abgenommen (Statistisches Bundesamt, 2019d). Im Jahr 2018 betrug er ohne Heizung und Warmwasserbereitung im gesamtdeutschen Durchschnitt rund 2,6 MWh pro Haushalt, was rund 29 kWh pro Quadratmeter entsprach.

Tabelle 371: Endenergieverbrauch der deutschen Haushalte im Jahr 2018 pro Haushalt und pro Quadratmeter Wohnfläche

Verwendung	Anteil [1)]	Endenergieverbrauch pro Haushalt 2018 (kWh) [2)]	Endenergieverbrauch pro m² 2018 (kWh) [3)]
Heizung	44,6%	10.326	110,2
Warmwasser	10,5%	2.431	25,9
Haushaltsgeräte und Kochen	4,8%	1.111	11,9
Kälteanwendungen	3,1%	718	7,7
Information/Kommunikation	2,3%	533	5,7
Beleuchtung	1,1%	255	2,7
Pkw	33,6%	7.779	83,0
Summe	**100,0%**	**23.152**	**247,1**
Summe ohne Pkw	**66,4%**	**15.373**	**164,1**

Quellen: (1) BDEW, 2020 (2) Eigene Berechnung nach BDEW, 2020, und (Statistisches Bundesamt, 2020) (3) Eigene Berechnung nach BDEW, 2020, Statistisches Bundesamt, 2019d, und Statistisches Bundesamt, 2020,

In Tabelle 372 ist der Stromverbrauch der Haushalte nach Haushaltsgröße in den Jahren 2009 und 2016 angegeben.

Tabelle 372: Stromverbrauch je Haushalt nach Haushaltsgrößenklassen 2009 (ohne Heizstromverbrauch)

Haushaltsgröße	2009 [1)]	2016 [2)]
1 Person	2.050	1.955
2 Personen	3.440	3.211
3 Personen	4.050	
3 Personen und mehr		4.975
4 Personen	4.750	
5 Personen und mehr	5.370	

Quellen: (1) BDEW, 2010, S. 14; (2) Statistisches Bundesamt, 2019

12.2 Flächenpotenziale erneuerbarer Energien

12.2.1 Windenergie

Das Potenzial der Onshore-Windenergie steigt in Deutschland von 240.000 kWh pro Hektar (inkl. Abstandsflächen) im Jahr 2008 auf 415.000 kWh/ha im Jahr 2020 (Agentur für Erneuerbare Energien, 2019). In Süddeutschland (Bayern) rechnet man laut Fraunhofer-Institut ISE und LfU Bayern mit 320.000 kWh/ha: Eine einzelne Anlage liefert im Schnitt ca. 4,8 GWh/a. Der Flächenbedarf für Fundament und Kranstellfläche beträgt 2.600 m^2 pro Anlage. Die Abstandsfläche in Windparks beträgt ca. 15 Hektar je Anlage. (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Bayerisches Landesamt für Umwelt, zit. n. StMWi, 2019) Fundament und Kranstellfläche nehmen somit weniger als 2 Prozent der Windparkfläche ein. Die übrige Fläche kann überwiegend land- oder forstwirtschaftlich genutzt werden. Windenergie lässt sich somit genauso mit der Nahrungsmittelproduktion wie mit dem Anbau von Energiepflanzen kombinieren.

Kleinwindenergieanlagen erzeugen, je nach Standort und Anlagenart zwischen 500 und 17.000 kWh/ha (Jüttemann, 2019).

Der Erntefaktor großer Windenergieanlagen (WEA) betrug 2011 an Inlandsstandorten 35,4, bei küstennahen Anlagen 40,8 und an Küstenstandorten 51 (2011). Inzwischen dürften sich diese Werte weiter verbessert haben.

12.2.2 Solarenergie

12.2.2.1 Energiebilanz der Solarenergie

Photovoltaik und Solarthermie weisen ebenfalls hohe Erntefaktoren auf, die jedoch nicht ganz an die von Windkraftanlagen heranreichen. So wird für Solarthermie ein Erntefaktor von 24 angegeben. Photovoltaikanlagen erreichen immerhin Werte von 7,5 bis 17. Dabei ist davon auszugehen, dass diese Werte sich weiter verbessern. Die besten Erntefaktoren erreicht die Dünnschicht-Technologie CIS. (Quaschning, 2015; Rech, o. J., S. 30)

12.2.2.2 Photovoltaik im Siedlungsbereich

12.2.2.2.1 Ertragspotenziale nach Stadtraumtypen

Nach BMVBS & BBR (2009) betrug das Ertragspotenzial im Siedlungsbereich auf dem Stand des Jahres 2009, je nach Stadtraumtyp, rund 29 bis 249 MWh pro Hektar (BMVBS & BBR, 2009 S. 32). Dabei ging man von ca. 100 kWh pro Quadratmeter Modulfläche aus (BMVBS & BBR, 2009 S. 12). Legt man der Schätzung die heutige Ertragserwartung von mindestens 120 kWh/m² zugrunde, kann man heute folglich, je nach Stadtraumtyp mit Erträgen zwischen 35 und ca. 248 kWh/ha rechnen. Die Erträge von Freiflächen-Photovoltaikanlagen sind im Vergleichszeitraum jedoch um mehr als ein Drittel gestiegen. Es ist daher wahrscheinlich, dass zumindest die Ertragspotenziale des Stadtraumtyps XI (Gewerbe- und Industriegebiet) ebenfalls in diesem Umfang gestiegen sind. Somit könnte man hier mit 335 MWh pro Hektar rechnen.

Die Potenziale der verschiedenen Stadtraumtypen in den Jahren 2009 und 2019 sind in Tabelle 373 dargestellt.

Tabelle 373: Potenzielle Energieerträge aus Photovoltaik nach Stadtraumtyp (MWh/ha)

SRT	Beschreibung	MWh/ha*a 2009 [1)]	MWh/ha*a 2019 [2)]
I	Altstadt	109	131
II	Innerstädtische Baublöcke der Gründer- und Vorkriegszeit	78	94
III	Wiederaufbau-Ensembles der 5Oer-Jahre	154	185
IV	Dörfliche und kleinteilige Strukturen	32	38
V	Werks- und Genossenschaftssiedlungen der Gründer- und Vorkriegszeit	29	35
VI	Siedlungen des sozialen Wohnungsbaus der 50er Jahre	88	106
VII	Hochhaussiedlungen der 7Oer-Jahre & Plattenbausiedlungen in den neuen Bundesländern	167	200
VIII	Geschosswohnungsbau seit den 60er Jahren	94	113
IX	Einfamilienhausgebiete	34	41
XI	Gewerbe- und Industriegebiete	248	298 - 335
XI	Zweckbau-Komplexe und öffentliche Einrichtungen	126	151

Quellen: (1) BMVBS & BBR, 2009, S. 32; (2) Eigene Berechnung

12.2.2.2.2 Dach- und Fassadenflächen

12.2.2.2.2.1 Flächenpotenziale in Deutschland und Bundesländern

Im Jahr 2007 schätzte das Ecofys-Institut die potenziell für Solaranlagen nutzbare Dachfläche in Deutschland auf rund 1.760 km². Die Fassadenfläche wurde auf rund 584 km² geschätzt. (EEM, 2019). Geht man auf Basis des Zensus 2011 von einer Gesamtbevölkerung von rund

80 Millionen Einwohnern aus, ergeben sich daraus rund 22 m² geeignete Dachfläche und rund 7 m² geeignete Fassadenfläche pro Einwohner.

Für das Bundesland Nordrhein-Westfalen hat das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) ein Dachflächen-Photovoltaikpotenzial von 68 TWh/a ermittelt (Energieagentur NRW, 2019), woraus sich ein Potenzial von ca. 26 m² pro Person ableiten lässt. Das größte Potenzial wurde mit 25,5 m² pro Einwohner im Landkreis Kleve (307.807 Einwohner) festgestellt. Die Bevölkerungsdichte des Kreises Kleve lag mit 250 Einwohnern pro Quadratkilometer (LANUV, 2013 S. 117) genau zwischen den Werten der Kreise Ravensburg und Bodenseekreis. Ähnliches trifft, wie im Folgenden dargestellt, auf das PV-Flächenpotenzial zu.

12.2.2.2.2.2 PV-Potenziale der betrachten Landkreisen

Eine vergleichbare Veröffentlichung zu den potenziellen Modulflächen auf Gebäudedächern in den Landkreisen Baden-Württembergs lag im Jahr 2019 nicht vor. Erfasst wurde jedoch die „Mögliche geeignete Modulfläche“ der einzelnen Gemeinden Baden-Württembergs im Rahmen des Energieatlas Baden-Württemberg. Um die Potenziale der Landkreise zu erhalten wurden die Potenziale der Gemeinden innerhalb der betrachteten Landkreise summiert.

Das Ergebnis der Berechnung und die auf dieser Basis geschätzten Potenziale pro Einwohner sind in Tabelle 374 dargestellt. Die Flächenpotenziale liegen zwischen 20,1 m²/EW im Kreis Konstanz und 35,8 m²/EW im Kreis Sigmaringen.

Tabelle 374: Photovoltaikpotenzial auf Dachflächen in den Kreisen Bodenseekreis, Esslingen, Konstanz, Ravensburg und Sigmaringen

Landkreis	**Bevölkerung** (Stand 2017)	**Potenzielle Modulfläche** [1] **(m²)**	**Modulfläche pro Einwohner** [2] **(m²)**	**Ertrags-potenzial** [2] **(MWh/a)**	**Ertrag pro Einwohner** [2] **(MWh/Ea)**
Bodenseekreis	214.655	4.788.112	22,3	574.573	2.677
Esslingen	522.402	10.595.799	20,3	1.271.496	2.434
Konstanz	284.014	5.699.160	20,1	683.899	2.408
Ravensburg	283.264	8.450.671	29,8	1.014.081	3.580
Sigmaringen	130.192	4.655.278	35,8	558.633	4.291

Quellen: (1) LUBW, 2019a (2) Eigene Berechnung

Die im Energieatlas erfassten Flächenpotenziale wurden mittels Laserscan-Befliegung ermittelt. Die Qualität der Daten wird als Grobschätzung (Punktdichte und/oder Punktverteilung zu gering) bezeichnet. (LUBW, 2019a). Daher wurden die Daten des Energieatlas am Beispiel zweier Städte mit den Ergebnissen von Erhebungen vor Ort verglichen:

Für die Städte Kirchheim unter Teck (Landkreis Esslingen) und Leutkirch im Allgäu (Landkreis Ravensburg) wurden die Dachflächenpotenziale im Rahmen der Erstellung ihrer Klimaschutzkonzepte berechnet. In Kirchheim unter Teck wurde ein Dachflächenpotenzial von 750.000 m² ermittelt (Green City Energy AG & KlimaKom eG, 2013 S. 70). Bei 39.389 Einwohnern im Jahr 2013 entspricht dies 19 m² pro Einwohner. Im Energieatlas Baden-Württemberg wird für Kirchheim unter Teck ein Potenzial von rund 22 m²/EW ausgewiesen, wovon ca. 5 Prozent (1 m²/EW) als bedingt geeignet eingestuft werden. Die Übereinstimmung mit den Daten des Energieatlas Baden-Württemberg ist daher hoch. In Leutkirch beträgt das vor Ort ermittelte Potenzial 1,07 Mio. Quadratmeter (Leyens, et al., 2013 S. 64). Bei 21.902 Einwohnern entspricht dies rund 49 m² pro Einwohner. Laut Energieatlas Baden-Württemberg beträgt das Modulflächenpotenzial rund 38 m² pro Einwohner, von denen rund 6 Prozent (2,2 m²/EW) als bedingt geeignet eingestuft werden (LUBW, 2019a). Die Abweichung der Atlasdaten von der Erhebung vor Ort beträgt somit mehr als 22 Prozent.

12.2.2.3 Photovoltaik auf Freiflächen

12.2.2.3.1 Ertragspotenziale klassischer Freiflächen-Photovoltaik

In Brandenburg erzeugt der Solarpark Lieberose, eine der größten Anlagen Deutschlands, rund 327 MWh pro Hektar und Jahr (Agentur für Erneuerbare Energien, 2017 S. 24). In Süddeutschland erreichten ertragreiche Freiflächen-Photovoltaik-Anlagen bisher Erträge von 475 (400 – 550) MWh pro Hektar (Simon, 2011 S. 130). Beispielsweise erzeugte der Solarpark Mutlanger Heide in den Jahren 2013 bis 2018 auf einer Fläche von 13,75 Hektar insgesamt 7.532.600 kWh (STWGD, 2019). Dies entspricht einem Durchschnittsertrag von 547,8 MWh pro Hektar und Jahr. Damit gehört die Anlage zu den ertragreichsten Bestandsanlagen. Neuere Module und Wechselrichter mit höheren Wirkungsgraden erlauben inzwischen jedoch deutlich höhere Erträge.

Der von den Stadtwerken Schwäbisch Gmünd im Jahr 2018 errichtete Solarpark Deponie Güggling soll 672,7 MWh pro Hektar und Jahr liefern (STWGD, 2019b). Das Unternehmen solarcomplex errichtete im Jahr 2017 einen Solarpark im Gewerbegebiet der Gemeinde Bingen (Landkreis Sigmaringen), der 737,5 MWh pro Hektar und Jahr erzeugen soll (solarcomplex AG, 2018). Die beiden neuen Anlagen könnten den Ertrag des Solarparks Mutlanger Heide somit um 23 Prozent bzw. um 33 Prozent übertreffen.

In der Regel findet unter klassischen Freiflächenanlagen keine energetische Biomassenutzung statt, obwohl dies grundsätzlich möglich wäre. Durchaus häufig wird aber zumindest eine Beweidung mit Schafen praktiziert.

12.2.2.3.2 Flächenpotenziale von Freiflächenanlagen

In Nordrhein-Westfalen wurde ein Modulflächenpotenzial auf Freiflächen von rund 210 km² ermittelt (LANUV, 2013 S. 77). Umgerechnet auf die Bevölkerung entspricht dies rund 12 m² Modulfläche pro Person. Unterstellt man einen Energieertrag von 120 kWh/m²*a, so ergibt sich pro Person ein jährlicher Energieertrag von ca. 1.430 kWh. Die größten Anteile am Freiflächenpotenzial haben Randstreifen und Parkplätze.

Tabelle 375: PV-Freiflächenpotenziale in Nordrhein-Westfalen (m²/Ea)

Freiflächenart	Modulfläche insgesamt [1] [Km²]	Modulfläche pro Einwohner [2] [m²]
Randstreifen	123,32	7,02
Parkplätze	48,04	2,73
Brach- und Freiflächen in Industrie- u. Gewerbegebieten	27,58	1,57
Deponien und Halden	8,25	0,47
Militärische Konversionsflächen	1,80	0,10
Summe Freiflächen	**210,14**	**11,89**

Quellen: (1) LANUV, 2013, S. 77 (2) Eigene Berechnung

In Baden-Württemberg wurde ein PV-Freiflächenpotenzial von 26.722 Hektar Konversionsflächen und Seitenrandstreifen ermittelt (LUBW, 2019b). Dies entspricht bei 10,9 Mio. Einwohnern rund 24,5 m² Anlagenfläche pro Einwohner. Der potenzielle Energieertrag liegt somit zwischen ca. 1.000 und 1.800 kWh/Ea. Der mögliche Ertrag stimmt damit weitgehend mit dem Potenzial in Nordrhein-Westfalen überein.

Wenn noch keine Datenerhebungen vorliegen, lässt sich z. B. das Freiflächenpotenzial in Industrie- und Gewerbegebieten hochrechnen. Dabei kann man Flächenanteile von ca. 12 Prozent annehmen. Rund zwei Drittel dieses Potenzials entfallen dabei auf Brach- und Freiflächen, ein Drittel auf Parkplätze (vgl. Tabelle 376).

Tabelle 376: Hochrechnungsfaktoren für Brach- und Freiflächen sowie Parkplätze nach LANUV, 2013

Flächenkategorie	Faktor
Anteil von Brach- und Freiflächen an Industrie- und Gewerbegebieten	0,08
Anteil von Parkplätzen an Industrie- und Gewerbegebieten	0,04
Anteil von Parkplätzen an Ortslagen nach ATKIS-Definition	0,01

Quelle: LANUV, 2013, S. 65

12.2.2.4 Agrophotovoltaik

Da seit Beginn des Jahres 2011 keine Freiflächenanlagen auf Acker- und Grünlandflächen (mit Ausnahme von Randstreifen) mehr vergütet werden, werden Solaranlagen heute nur noch selten auf landwirtschaftlichen Flächen errichtet. Dabei bietet es sich an, z. B. Solaranlagen mit einer landwirtschaftlichen Nutzung und effektivem Artenschutz zu verbinden.

12.2.2.4.1 Agrophotovoltaikanlagen auf Ackerland

Über einer 3.448,4 m² großen Ackerfläche am Bodensee wurden in fünf Meter Höhe Solarmodule mit einer Leistung von 194 Kilowatt peak (kWp) installiert. Aufgrund der erhöhten Montage der Module ist eine normale ackerbauliche Nutzung unterhalb der Anlage möglich. Im ersten Projektjahr 2017 wurde laut Fraunhofer ISE eine Steigerung der Landnutzungseffizienz auf 160 Prozent erzielt. Beim Kleegras fiel der Ertrag im Vergleich zur Referenzfläche nur um 5,3 Prozent geringer aus. Bei Kartoffeln, Weizen und Sellerie lag der Ertrag durch die Beschattung um rund 18 bis 19 Prozent unter den Werten der Referenzflächen. (Fraunhofer ISE, 2017)

Bei der zweiten Ernte im trockenen Sommer 2018 wurden bei drei der vier angebauten Kulturen (Winterweizen, Kartoffeln, Kleegras, Sellerie) unter der PV-Anlage höhere Erträge als auf der Referenzfläche erzielt. Die Teilverschattung unter den Solarmodulen schützte die Pflanzen vor zu starker Sonneneinstrahlung und steigerte dadurch die landwirtschaftlichen Ernteerträge. „Am stärksten profitierte Sellerie (+12 Prozent), während Winterweizen ein Plus von 3 Prozent und Kleegras ein Minus von 8 Prozent aufwiesen“ (IWR, 2019). Die hohe Sonneneinstrahlung steigerte zugleich die Solarstromproduktion. So lag die Landnutzungseffizienz insgesamt bei 186 Prozent im Vergleich zu den herkömmlich bewirtschafteten Flächen (IWR, 2019).

Tabelle 377: Ackerbauliche Erträge im Agrophotovoltaiksystem 2017/2018 im Vergleich zu den Referenzflächen

Versuchsjahr	Kleegras	Kartoffeln	Weizen	Sellerie
2017	95%	81%	81%	81%
2018	92%	100%	103%	112%
Durchschnitt	**93%**	**91%**	**92%**	**97%**

Quellen: Fraunhofer ISE, 2017; IWR, 2019

Somit ist bereits ersichtlich, dass Agrophotovoltaik eine deutliche Steigerung der Flächeneffizienz ermöglicht. Allerdings reagieren die verschiedenen Pflanzen je nach Witterung unterschiedlich auf die Teilverschattung, sodass sich die Ergebnisse der ersten Untersuchungsjahre nicht ohne weiteres auf andere Pflanzen übertragen lassen und von einem langjährigen Mittel abweichen können.

Durch die erhöhte Montage lohnt sich allerdings der Einsatz bifazialer Module, da Licht vom Boden reflektiert und an der Rückseite der Module aufgenommen werden kann. Bei günstigen Bedingungen (z. B. Schneefläche) können die PV-Module so bis zu 25 Prozent Mehrertrag erzielen (Fraunhofer ISE/Elsner; Universität Hohenheim, 2018). Dadurch können Einbußen, die aufgrund der größeren Modulabstände in Kauf genommen werden müssen, zu einem guten Teil kompensiert werden.

Im Jahr 2017 betrug der Ertrag der PV-Anlage 244.401 kWh, im Jahr 2018 lag er bei 249.857 kWh (Fraunhofer ISE, 2019). Umgerechnet entspricht dies einem Hektarertrag von 717 MWh/a. Damit übertrifft die Agrophotovoltaikanlage am Bodensee sogar die meisten der bestehenden Freiflächen-Photovoltaikanlagen herkömmlicher Konstruktionsweise.

12.2.2.4.2 Agrophotovoltaikanlagen auf Grünland

Mit geringeren Abständen können durch Freiflächenphotovoltaik auch mit herkömmlichen Modulen bis zu 700 MWh/ha gewonnen werden. Eine Nutzung des Aufwuchses ist jedoch auf Grünland sinnvoll. Die größeren Abstände von Agrophotovoltaikanlagen auf Grünland erlauben lediglich Erträge von ca. 450 (200 – 570) MWh pro Hektar und Jahr. Damit liefern APV-Anlagen auch mit herkömmlichen Modulen trotz der größeren Modulabstände mindestens das Achtfache des Brutto-Energieertrags einer auf Mais basierten Biogasproduktion und haben zudem einen deutlich positiveren Einfluss auf die Schutzgüter Boden, Wasser und Artenvielfalt. Mit bifazialen Modulen dürften auch hier bis zu 700 MWh pro Hektar möglich sein. Im Mittel wurde in Süddeutschland ein Potenzial von 570 MWh angenommen.

Eine Beweidung mit Schafen ist auch unterhalb der herkömmlichen Solaranlagen gut möglich und wird vielerorts bereits seit längerem praktiziert. Bei einer extensiven Nutzung des Grünlandes kann eine solche Flächennutzung zudem sehr förderlich für die Artenvielfalt sein. Bei Agrophotovoltaikanlagen ist dank der Höhe der Module auch eine Beweidung mit Rindern möglich. Alternativ zur Beweidung bietet sich bei größeren Bodenabständen auch die Kombination aus Photovoltaik und Biomasseproduktion an. Geht man davon aus, dass sich die Biomasseerträge ähnlich entwickeln, wie unter Anlagen auf Ackerflächen, so kann man mit mehr als 80 Prozent der üblichen Erträge rechnen. Bei einer extensiven Nutzung des Aufwuchses entspricht das ca. 11 MWh und mehr pro Hektar. Bei Milchviehhaltung dürfte der Milchertrag dürfte ca. 7.700 kg/ha betragen.

12.2.2.5 Ertragspotenzial Solarthermie

12.2.2.5.1 Freiflächen-Solarthermie

Die größte thermische Solaranlage Deutschlands ging im September 2016 in Senftenberg in Betrieb. Die Anlage der Stadtwerke Senftenberg soll auf einer Fläche von ca. 2,2 Hektar jährlich rund vier Gigawattstunden Wärme produzieren (Agentur für Erneuerbare Energien, 2017 S. 25). Dies entspricht einem Ertrag von 1,8 GWh pro Hektar und Jahr.

12.2.2.5.2 Gebäudeintegrierte Solarthermie

Solarthermie Anlagen können rund 50 Prozent der Solarstrahlung in Form von Wärme nutzbar machen, sodass der Ertrag, je nach Region, bei durchschnittlich 450 bis 600 kWh pro Quadratmeter Kollektorfläche und Jahr liegt (Christian Münch GmbH, 2019).

Nach Angaben des LANUV (2013) kann man für Potenzialschätzungen in Nordrhein-Westfalen vereinfachend einen Durchschnittsertrag von 500 kWh pro Quadratmeter Kollektorfläche zugrunde legen (LANUV, 2013 S. 83). Die mittlere jährliche Globalstrahlungssumme liegt in Nordrhein-Westfalen bei 1.004 kWh/m² (LANUV, 2019), in Baden-Württemberg liegt sie bei 1.038 kWh/m² (LUBW, 2013 S. 25). Im Landkreis Esslingen dürfte der Ertrag nach der Globalstrahlungskarte des LUBW etwa im Durchschnitt Baden-Württembergs liegen. Die Landkreise Bodenseekreis, Konstanz, Ravensburg und Sigmaringen können mit Erträgen rechnen, die etwas über dem Durchschnitt Baden-Württembergs liegen. Vereinfachend wurde daher ein Potenzial von 520 kWh/m² im Kreis Esslingen und in den weiteren Kreisen von 540 kWh/m² angenommen.

In der Studie des LANUV wurde für Nordrhein-Westfalen ein Gesamtpotenzial von 4,9 TWh/a zur Warmwasserbereitung ermittelt. Auf die Bevölkerung umgerechnet entspricht dies etwa 280 kWh/Ea. Die dicht besiedelte Stadt Köln erreicht mit 289 GWh/a sogar ein Potenzial von 287 kWh/Ea. (LANUV, 2013 S. 88). In Baden-Württemberg dürfte somit ebenfalls ein Potenzial von 290 kWh/Ea realistisch sein, ebenso im Kreis Esslingen. In den Kreisen Konstanz, Bodenseekreis, Ravensburg und Sigmaringen wird ein Potenzial von ca. 300 kWh/Ea erwartet.

12.2.3 Agrothermiesysteme (Photovoltaik und Erdwärme)

Der Begriff Agrothermie bezeichnet die Nutzung oberflächennaher Geothermie auf landwirtschaftlichen Flächen. Die großflächige Erschließung landwirtschaftlicher Flächen ermöglicht eine kostengünstige Verlegung von Erdkollektoren. Dabei kommt ein sogenanntes kaltes Nahwärmenetz zum Einsatz. Der Vorteil kalter Nahwärmenetze besteht vor allem in den minimierten Wärmeverlusten während des Transportes vom Ort der Wärmegewinnung zum Verbrauchsort. Ein besonderer Vorteil der Agrothermie besteht wiederum darin, dass die landwirtschaftliche Nutzung aufgrund des geringen Eingriffs in den Erdkörper nicht beeinträchtigt wird.

Folglich entsteht keine Flächenkonkurrenz zur Erzeugung von Nahrung oder Rohstoffen. Ein solches kaltes Nahwärmenetz mit insgesamt 1,5 Hektar Agrothermie-Kollektoren wurde im Jahr 2012 in der Gemeinde Wüstenrot für die Plusenergie-Mustersiedlung „Vordere Viehweide II“ installiert. Die 25 Wohnhäuser (15 Einfamilienhäuser, 10 Zweifamilienhäuser) der Mustersiedlung mussten zu diesem Zweck als KfW Effizienzhäuser 55 mit einem max. jährlichen Wärmebedarf von 55 kWh/m² konstruiert werden. Im Sommer lassen sich die Gebäude direkt aus dem Kaltwärmenetz kühlen. (König, 2017) Die 25 Wohnhäuser haben zusammen eine Wohnfläche von 4.400 m² und einen Gesamtwärmebedarf von 240 MWh/a. Bei einer Jahresarbeitszahl von 4,0 ergibt sich daraus ein Strombedarf der Wärmeversorgung über Wärmepumpen von 60 MWh/a. Hinzu kommt ein Bedarf von 90 MWh/a für Haushaltsstrom. (Pietruschka, et al., 2016 S. 98) Bei herkömmlichen Erdkollektoren mit geringeren Rohrabständen würde für die benötigte Wärmeleistung nach Beschaffenheit des Untergrundes, eine Fläche von 0,6 bis 1,1 ha benötigt. Insbesondere aufgrund der geringeren spezifischen Flächenentzugsleistung infolge des größeren Rohrabstandes wurde der Agrothermiekollektor zur Sicherheit auf 1,5 ha ausgelegt. (Pietruschka, et al., 2016 S. 100) Bei einem Wärmegewinn von 240 MWh/a ergibt sich ein Ertrag von 160 MWh/ha. Es ist aber davon auszugehen, dass der Flächenbedarf mit der Weiterentwicklung der Technik abnehmen wird. Nach Pietruschka kann man bereits heute davon ausgehen, dass die Agrothermie rund 400 MWh Wärme pro Hektar und Jahr bereitstellen kann (Pietruschka, et al., 2016 S. 101). Um die für die Wärmepumpen benötigten 60 MWh Strom bereitzustellen, benötigt man allerdings zusätzlich 0,09 bis 0,12 ha PV-Freiflächenanlage. Somit liegt der Freiflächenbedarf der Wärmebereitstellung für die Mustersiedlung ohne Berücksichtigung der landwirtschaftlichen Produktion bei rund 1,62 Hektar. Der Energieertrag des gesamten Wüstenroter Agrothermiesystems inklusive Wärmepumpenstromgewinnung liegt somit bei rund 148 MWh pro Hektar.

Tabelle 378: Flächenbedarf eines Agrothermiesystems

Energiebedarf	Energiegewinnung (MWh/a)	Flächenbedarf (ha)
Wärmebereitstellung durch Wärmepumpen [1)]	240	1,50*
PV-Strombedarf für Wärmepumpen [2)]	60	0,12
Endenergiebereitstellung insgesamt [2)]	**240****	**1,62***

Quellen: (1) Pietruschka, et al.,2016; (2) Eigene Berechnung nach Pietruschka, et al.,2016
* 1,50 ha davon werden lediglich unterirdisch benötigt und stehen daher nicht in Konkurrenz zur Nahrungsproduktion. **Der Strom darf hier nicht berücksichtigt werden, da er für die Wärmebereitstellung benötigt wird.

Da auf der Ackerfläche oberhalb der Agrothermiekollektoren weiterhin ohne Einschränkung Nahrung, Energiepflanzen oder Rohstoffpflanzen angebaut werden können, werden für die Wärmegewinnung nur maximal 0,12 Hektar Freifläche in Anspruch genommen, die ansonsten für andere Zwecke genutzt werden könnten. Auf diese mit Blick auf die Flächenkonkurrenz

relevante Fläche umgerechnet ergibt sich aus dem Energieertrag von 240 GWh/a somit ein Hektarertrag von 2.000 MWh/ha*a. Dies übertrifft den Energieertrag von ertragreichen PV-Freiflächenanlagen um den Faktor 3,4 (2,7 – 4,0).

Wird der für die Wärmepumpen benötigte Strom auf Gebäudedächern erzeugt, benötigt man für die Versorgung der 25 Gebäude ca. 500 m² PV-Modulfläche auf Dachflächen. Pro Gebäude entspricht dies rund 20 m². Berücksichtigt man das gesamte Dachflächenpotenzial in Deutschland (ca. 20 m²/Einwohner) und geht von einer Belegung von 3 Personen (Eltern und Kind) pro Einfamilienhaus (15 Häuser) und 6 Personen pro Zweifamilienhaus (10 Häuser) aus, so müssen die 105 Personen fast ein Viertel (4,8 m²) der pro Einwohner auf Dachflächen verfügbaren Modulpotenzialfläche für die Wärmegewinnung aufwenden. Die verbliebenden 15 m² Modulflächenpotenzial pro Person reichen aus, um mit rund 1,82 MWh/a immer noch mehr als den pro Person benötigten Haushaltsstrom zu erzeugen. Folglich kann der gesamte Energiebedarf des Wohnens für Wärme und Strom mit dem pro Einwohner verfügbaren Modulflächenpotenzial auf Gebäudedächern gedeckt werden.

12.2.4 Bioenergie

Die Bioenergie ist neben Wind- und Sonnenenergie die dritte der wichtigen erneuerbaren Energien mit großem Energiepotenzial, die in hohem Maße flächenabhängig sind und potenziell in Konflikt mit anderen Zielen geraten können. Mögliche Konflikte können sowohl mit Blick auf wirtschaftliche und soziale als auch auf ökologische und kulturelle Ziele entstehen. Die vergleichsweise kritische Betrachtung der Bioenergie ist vor allem darauf zurückzuführen, dass sie in einer Flächennutzungskonkurrenz zur Nahrungsproduktion gesehen wird. Denn angesichts des weiterhin zu erwartenden Wachstums der Weltbevölkerung und gleichzeitig zunehmender Ansprüche hinsichtlich des Fleisch- und Milchproduktkonsums in großen Teilen der Welt wird mit einer erheblichen Verknappung der pro Person verfügbaren landwirtschaftlichen Flächen gerechnet. Ein weiterer Grund für Kritik an der Bioenergienutzung ist der Anbau von Energiepflanzen in Monokulturen. In Deutschland handelt es sich dabei hauptsächlich um Energiepflanzen der ersten Generation, wie z. B. Mais, Raps oder Weizen. Zudem wird das ebenfalls in Monokulturen produzierte Palmöl importiert, dessen Nutzung in direktem Zusammenhang mit der zunehmenden Zerstörung tropischer Regenwälder gesehen wird. Hier wird daher zunächst auf das globale Ernährungspotenzial und die daraus ableitbaren Flächenpotenziale für eine Nutzung von ackerbaulich kultivierten Energiepflanzen eingegangen, die keine unveränderlichen Größen darstellen, sondern erheblich von hauptsächlich anthropogen geprägten Faktoren abhängig sind. Als solche sind insbesondere die globalen Ernährungsgewohnheiten, der menschlich verursachte Klimawandel und die vorherrschende Wirtschaftsweise in der Landwirtschaft zu nennen. (Vgl. Abschnitt 12.2.4.1)

Im nächsten Schritt erfolgt die Bewertung der Energiepotenziale. Hierbei wurde, sofern die nötigen Daten verfügbar waren, neben dem Brutto-Energieertrag pro Hektar auch das Verhältnis zwischen Energie-Input (Energieaufwand des Anbaus) zu Energie-Output berücksichtigt (Abschnitt 12.2.4.2). Da die Datengrundlage in diesem Bereich jedoch noch sehr lückenhaft ist, sind diese Daten zum Teil mit einigen Unsicherheiten verbunden.

Des Weiteren wird auf ökologische Aspekte eingegangen, deren genauere Betrachtung bei einer Beurteilung des Energiepflanzenanbaus auf Ackerflächen als unerlässlich angesehen wird. Dabei handelt es sich vor allem um die Auswirkungen auf Wasserhaushalt, Böden, Schadstoffeintrag, Artenvielfalt und Treibhausgasemissionen. (Vgl. Abschnitt 13.2)

12.2.4.1 Flächenkonkurrenz zur Lebensmittelproduktion

12.2.4.1.1 Globale Ernährungssituation

Prognosen der FAO kommen zu dem Schluss, dass bis zum Jahr 2030 etwa 50 Prozent und im Jahr 2050 ca. 70 Prozent mehr Nahrungsmittel benötigt werden als um das Jahr 2000, um die gewachsene und wohlhabendere Weltbevölkerung noch ernähren zu können (FAO, 2009 S. 2). Da sich zusätzliche Ackerflächen zu großen Teilen nur noch durch Entwaldung hinzugewinnen lassen, müsste die notwendige Produktionssteigerung zu 80 Prozent „durch eine intensivere, zugleich nachhaltige und umweltverträgliche Landwirtschaft realisiert werden“ (FAO, 2003 zit. n. WBGU, 2009, S. 67). Welche Fläche tatsächlich für die Ernährung einer Weltbevölkerung von 9 bis 10 Milliarden Menschen benötigt wird, hängt jedoch von vielen Faktoren ab. Neben den Folgen des Klimawandels werden vor allem die weitere Entwicklung der Ernährungsgewohnheiten und der Verschwendung von Lebensmitteln darüber entscheiden, ob bei einer ausreichenden Versorgung mit Lebensmitteln noch Ackerflächen für den Anbau von Energie- oder Rohstoffpflanzen verfügbar sein werden. Aus diesem Grund sind auch Szenarien realistisch, in denen eine gute Ernährungssicherheit auch ohne eine zusätzliche Intensivierung einer ohnehin schon intensiven Landwirtschaft möglich ist. Nach Einschätzung der FAO ließen sich bereits heute bis zu 13 Milliarden Menschen ernähren, wenn alle Möglichkeiten genutzt würden (FAO zit. n. BZ, 2013). Die jährlichen globalen Nahrungsmittelverluste einschließlich Verschwendung betragen etwa 30 Prozent bei Zerealien, 40 bis 50 Prozent bei Wurzelgewächsen, Früchten und Gemüsepflanzen, 20 Prozent bei Ölsamen, 20 Prozent bei Fleisch- und Molkereiprodukten und etwa 35 Prozent bei Fisch (FAO, 2019a). Insgesamt geht etwa ein Drittel der gesamten für den menschlichen Verbrauch bestimmten Lebensmittel verloren, rund 1,3 Milliarden Tonnen pro Jahr (FAO, 2019b). Die heutige Weltbevölkerung von rund 7,6 Milliarden wird somit von zwei Dritteln der erzeugten und für Ernährungszwecke bestimmten Lebensmitteln ernährt. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Zahl der überernährten Menschen heute mit ca. 2,1 Milliarden (Ng, et al., 2014) mehr als doppelt so hoch liegt, wie die Zahl der rund 803 Millionen Menschen, die an Unterernährung leiden (Statista, 2019h). Die Zahl der stark Überwichtigen ist zwischen den Jahren 1975 und 2014 um mehr als das Sechsfache gestiegen, von 105 auf 641 Millionen (NCD Risk Factor Collaboration, 2016).

Betrachtet man nur die Produktion pflanzlicher Lebensmittel, so zeigt sich ein großes Potenzial der Landwirtschaft. Anhand der globalen Produktionsmenge wichtiger pflanzlicher Lebensmittel wurde die theoretisch verfügbare Kalorienmenge geschätzt. Die globale Erzeugung, der jeweils angenommene Kaloriengehalt und die auf dieser Basis geschätzte Gesamtproduktion pflanzlicher Nahrungskalorien sind in Tabelle 379 dargestellt. Bei der Schätzung konnten nicht essbare Anteile (z. B. Gemüse- und Obstschalen oder Obstkerne) nicht abgezogen werden.

Presskuchen aus der Produktion pflanzlicher Öle wurden allerdings auch nicht berücksichtigt, welche wiederum die Kalorienerträge steigern können.

Tabelle 379: Geschätzte weltweite Kalorienbereitstellung durch den Anbau wichtiger pflanzlicher Nahrungsmittel im Jahr 2017 (Auswahl)

Nahrungsmittel	Globale Produktion (Tonnen) [1)]	Kalorien-gehalt (kcal/kg)	Global produzierte Kalorien 2017	Ernährbare Personen (Bedarf: 2300 kcal/d)
Getreide (ohne Reis & Mais)	1.075.770.340	3.150	3.657.619.156.000.000	4.356.901.913
Reis (geschliffen)	622.733.765	3.100	1.930.474.670.326.890	2.299.552.913
Mais	1.134.746.667	860	975.882.133.620.000	1.162.456.383
Kartoffeln	388.190.674	700	271.733.471.800.000	323.684.898
Sojabohnen	352.643.548	1.470	518.386.015.560.000	617.493.765
Sonstige Hülsenfrüchte	95.978.510	1.418	136.109.524.493.750	162.131.655
Maniok	291.992.646	1.280	373.750.586.880.000	445.206.179
Yams	73.018.874	1.580	115.369.820.920.000	137.426.827
Gemüse	291.364.958	270	78.668.538.660.000	93.708.801
Obst	23.752.880	620	14.726.785.600.000	17.542.329
Rohrzucker *	349.890.393	4.000	1.399.561.573.360.000	1.667.137.074
Rübenzucker *	54.182.825	4.000	216.731.301.120.000	258.167.125
Kakaobohnen	5.201.108	4.150	21.584.598.200.000	25.711.255
Walnüsse **	3.829.626	2.812	10.769.674.237.200	12.828.677
Sonstige Baumnüsse **	11.748.820	2.560	30.076.979.200.000	35.827.253
Erdnüsse **	47.097.498	4.358	205.227.347.535.000	244.463.785
Rapssaat (335 g Öl/kg) ***	76.238.340	2.948	224.750.626.320.000	267.719.626
Pflanzliche Öle (o. Raps-, Soja- und Erdnussöl)	[2)] 101.350.000	8.800	891.880.000.000.000	1.062.394.282
Summe pflanzlich	**4.898.381.472**	**2.215**	**11.073.302.803.833.000**	**13.190.354.740**

* Eigene Berechnung anhand der angenommenen Zuckerausbeuten von 19% der geernteten Biomasse bei Zuckerrohr und 18% bei der Rübenmasse bei Zuckerrüben; ** Angenommen wurden Kernanteile von 44% bei Walnüssen, 40% bei sonstigen Baumnüssen und 75% bei Erdnüssen. *** Der angenommene Kaloriengehalt bezieht sich auf das enthaltene Rapsöl ohne Presskuchen.
Quellen: (1) FAO, 2019c; (2) Statista, 2019e;

Die rund 4,95 Milliarden Tonnen pflanzlicher Erzeugnisse, die in Tabelle 379 dargestellt sind und direkt als Lebensmittel genutzt werden könnten, enthalten nach dieser Schätzung ausreichend Kalorien für 13,2 Milliarden Menschen. Hinzu kommen rund 247 Mio. Tonnen Nebenprodukte aus der Zuckerrübenverarbeitung (Rübenschnitzel, Melasse etc.), mehr als 50 Mio. Tonnen Rapspresskuchen und Rapsschrot sowie andere Schrote und Presskuchen aus der Pflanzenölproduktion, die großenteils als Futtermittel oder als Lebensmittel genutzt werden können. Zu den erzeugten pflanzlichen Lebens- und Futtermitteln kommen ca. 80 bis 90 Milli-

onen Tonnen Fangfisch, rund 1,86 Mio. Tonnen Honig sowie tierische Lebensmittel aus grünlandbasierter Produktion, für die weltweit mehr als 3 Milliarden Hektar Wiesen und Weiden genutzt werden können. Mit Blick auf die Überfischung der weltweiten Fischbestände sollte der globale Fischfang jedoch deutlich reduziert werden und damit nur noch eine geringe Rolle für die Welternährung spielen. Folglich können neben den Ackerflächen vor allem Wiesen und Weiden nachhaltig zur Welternährung beitragen, wenn sie ökologisch bewirtschaftet werden.

Tabelle 380: Anbaufläche, Ertrag und Flächeneffizienz wichtiger pflanzlicher Nahrungsmittel weltweit im Jahr 2017

Nahrungsmittel	Anbaufläche 2017 (ha) [1)]	Ertrag in t/ha [1)]	Ertrag in kcal/ha [2)]	Effizienz * [2)]	Anteil an Anbaufläche [2)]
Getreide	367.106.244	2,9	9.963.380	124%	26,6%
Mais	197.185.936	5,8	4.949.045	61%	14,3%
Reis geschliffen	167.249.103	3,7	11.542.511	143%	12,1%
Kartoffeln	19.302.642	20,1	14.077.527	175%	1,4%
Hülsenfrüchte	95.167.142	1,0	1.430.216	18%	6,9%
davon Lupinen	930.717	1,7	2.059.759	26%	0,1%
davon Linsen	6.582.779	1,2	3.620.810	45%	0,5%
Sojabohnen	123.551.146	2,9	4.195.720	52%	9,0%
Raps-Samen (335 g Öl/kg)	34.740.403	2,2	2.037.871	25%	2,5%
Gemüse insgesamt	20.569.164	14,2	3.824.586	47%	1,5%
davon Tomaten	4.848.384	37,6	9.024.107	112%	0,4%
Maniok	26.342.330	11,1	14.188.213	176%	1,9%
Yams	8.560.535	8,5	13.476.941	167%	0,6%
Obst	3.395.610	7,0	4.337.007	54%	0,2%
Rohrzucker	25.976.939	13,5	53.877.078	669%	1,9%
Rübenzucker	4.894.026	11,1	44.284.869	550%	0,4%
Kakaobohnen	11.748.127	0,4	1.837.280	23%	0,9%
Walnüsse	1.097.699	3,5	9.811.136	122%	0,1%
Sonstige Baumnüsse	10.686.462	1,1	2.814.494	35%	0,8%
Erdnüsse	27.940.260	1,7	7.345.220	91%	2,0%
Pflanzenöle (Ohne Raps-, Soja- und Erdnussöl)	228.859.597	0,4	3.897.062	48%	16,6%
SUMME	**1.374.373.365**	**3,6**	**8.056.983**	**100%**	**100%**

* Effizienz der Kalorienproduktion pro Hektar ohne Berücksichtigung von Nebenprodukten. 100 Prozent = 8,06 Millionen kcal pro Hektar
Quellen: (1) FAO, 2019, (2) Eigene Berechnung

Mit der dargestellten Pflanzenkombination können pro Hektar rund 9,6 Personen ernährt werden. Da der Verzehr großer Mengen Zucker nicht empfohlen wird, müsste man die Produktion von Rohrzucker deutlich reduzieren. Angenommen wurde deshalb eine Reduktion der Zuckerrohranbaufläche um 80 bis 90 Prozent. Verteilt man die dadurch freiwerdende Fläche auf Getreide und Kartoffeln, sinkt das Ernährungspotenzial auf 8,9 bis 9,0 Personen pro Hektar, was einem Gesamtpotenzial entspricht, das für ca. 12,2 Milliarden Menschen ausreicht. Dabei ist

noch nicht berücksichtigt, dass das nachhaltige Ertragspotenzial in vielen Entwicklungsländern weit größer eingeschätzt wird als die heutige Produktion. Pretty et al. (2002) haben 208 Projekte in 52 Entwicklungsländern analysiert, in denen 8,98 Millionen Bauern günstige und regional angepasste Maßnahmen (v.a. effizientere Wassernutzung und Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit) auf 28,92 Millionen Hektar übernommen haben. So konnten die Erträge pro Betrieb (Farm) um 37 Prozent und pro Hektar um 48 Prozent gesteigert werden (Pretty, et al., 2002). „Olivier de Schutter, UN-Beauftragter für das Recht auf Nahrung, hält den Beweis für erbracht, dass man binnen fünf Jahren die Erträge von 500 Millionen Kleinbauern dieser Welt nachhaltig verdoppeln könnte“ (Haerlin, 2011). Nach de Schutter haben Projekte in 57 Entwicklungsländern eine durchschnittliche Getreideertragssteigerung von 80 Prozent gezeigt. Bei den afrikanischen Projekten wurde eine durchschnittliche Steigerung von 116 Prozent erzielt. Neue Projekte in 20 afrikanischen Ländern haben eine Verdoppelung der Getreideerträge über eine Zeitdauer von 3-10 Jahren gezeigt (de Schutter, 2011).

Im Jahr 2017 haben 34 afrikanische Länder einen durchschnittlichen Getreideertrag von weniger als 1,60 t/ha erzielt. Alle übrigen afrikanischen Länder haben im Durchschnitt Erträge von 2,99 (1,66 – 7,31) t/ha erreicht (GBI-Genios, 2019). Ohne den Spitzenreiter Ägypten erzielen diese Länder noch einen Durchschnitt von 2,56 t/ha. Könnten die Länder, die im Jahr 2017 Erträge weniger als 1,60 t/ha erzielten, ihre Erträge bis zum Jahr 2035 auf diesen Durchschnitt von 2,56 anheben, entspräche dies für diese Länder einer durchschnittlichen Ertragssteigerung um 1,46 t/ha, was gegenüber dem Jahr 2017 einer relativen Ertragssteigerung von 133 Prozent gleichkommt. Eine solche Ertragssteigerung erscheint nach de Schutter 2011 durchaus realistisch. Bezogen auf den gesamten Kontinent Afrika stiege der Durchschnittsertrag durch diese Entwicklung, wie in Tabelle 381 dargestellt, um 1,03 t/ha, was einem Mehrertrag von rund 62 Prozent entspricht. Die Gesamtproduktion läge dann um 123 Millionen Tonnen über der des Jahres 2017. Dieses als Szenario A bezeichnete Szenario ist in Tabelle 381 dargestellt.

Tabelle 381: Getreideerträge in Afrika 2017 und unterstellte Erträge im Szenario A für das Jahr 2035

Region	Anbaufläche in Hektar	Ertrag in Tonnen	Ertrag in t/ha	Unterstellte Ertragssteigerung bis 2035 in t/ha	Unterstellte Ertragssteigerung bis 2035 in t/a
Afrika 2017	119.162.641	197.366.681	1,66	0,90	107.689.680
Afrikanische Länder mit mehr als 1,6 t/ha im Jahr 2017	35.115.155	104.948.174	2,99	0,00	0
Afrikanische Länder mit mehr als 1,6 t/ha 2017 o. Ägypten	31.939.462	81.731.350	2,56	0,00	0
Länder mit weniger als 1,6 t/ha im Jahr 2017	84.047.486	92.418.507	1,10	1,46	107.689.680
Afrika, Szenario 2050	119.162.641	305.056.361	2,56	-	-

Quellen: Eigene Berechnung nach FAOSTAT, zit. n. GBI-Genios, 2019

In einem weiteren Szenario (Szenario B) wurde davon ausgegangen, dass auch die 12 Länder, deren Erträge oberhalb von 1,6 t/ha aber unterhalb des kontinentalen Durchschnitts des Jahres 2017 lagen, ihren Ertrag auf den Durchschnittsertrag anheben. In diesem Szenario B erreicht der afrikanische Kontinent einen Durchschnittsertrag von 2,78 t/ha. Der Gesamtertrag liegt damit in Szenario B um rund 4 Prozent höher als in Szenario A. Dieser Vergleich zeigt, dass Maßnahmen in den ertragsarmen Ländern besonders wirksam sein könnten.

Tabelle 382: Getreideerträge in Afrika 2017 und unterstellte Erträge im Szenario B für das Jahr 2035

Region	Anbaufläche in Hektar	Ertrag in Tonnen	Ertrag in t/ha	Unterstellte Ertragssteigerung bis 2050 in t/ha	Unterstellte Ertragssteigerung bis 2050 in t/a
Afrika 2017	119.162.641	197.366.681	1,66	1,13	134.290.129
Afrikanische Länder mit mehr als 1,6 t/ha im Jahr 2017	35.115.155	104.948.174	2,99	0,33	11.446.088
Afrikanische Länder mit mehr als 1,6 t/ha 2017 o. Ägypten	31.939.462	81.731.350	2,56	0,36	11.446.088
Länder mit weniger als 1,6 t/ha im Jahr 2017	84.047.486	92.418.507	1,10	1,46	122.844.041
Afrika, Szenario 2035	119.162.641	331.656.810	2,78	-	-

Quellen: Eigene Berechnung nach FAOSTAT, zit. n. GBI-Genios, 2019

Die gesamte Berechnungstabelle zum Szenario B mit den einzelnen Ländern ist im Anhang II dargestellt (Tabelle 452).

Ähnliche Ertragssteigerungen dürften in Afrika auch bei anderen Kulturpflanzen zu erzielen sein. Allein die beschriebene Getreideertragssteigerung um 68 Prozent in Afrika könnte jedoch rechnerisch bereits ausreichend Kalorien für ca. 500 Millionen Menschen bereitstellen. Das globale Ernährungspotenzial stiege dadurch von ca. 12,2 auf ca. 12,7 Mrd. Menschen. Das Ernährungspotenzial der globalen Wiesen und Weiden ist dabei noch nicht berücksichtigt. Unberücksichtigt ist auch, dass in Afrika bei weitem nicht alle für Ackerbau geeigneten Flächen genutzt werden - vor allem aufgrund von Konflikten, mangelnder Wirtschaftlichkeit oder anderer Gründe. Schätzungen zufolge sind in Afrika insgesamt 630 bis 807 Millionen Hektar kultivierbar (UNEP, 2011; UNEP, 2016). Damit verfügt Afrika über rund 60 Prozent des bisher ungenutzten urbaren Landes weltweit. Das UNEP kommt daher zu dem Schluss, dass Afrika mehr Nahrung produzieren könnte, als es für seinen eigenen Bedarf benötigt (UNEP, 2016 S. 33). Aktuell (Stand 2016) werden etwa 256 Millionen Hektar abgeerntet (FAO, 2018a S. 47). Dies entspricht, je nach Schätzung, etwa 32 bis 42 Prozent der potenziell nutzbaren Fläche. Um die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen, bedarf es insbesondere einer besseren Marktzugänglichkeit für Kleinbauern, z. B. durch fairen Handel und verbesserte Infrastrukturen für Transport und Lagerung.

12.2.4.1.2 Unsicherheiten

Unsicherheiten bestehen nicht nur hinsichtlich möglicher Ertragssteigerungen in Entwicklungsländern, sondern auch bezüglich möglicher Ertragseinbußen in Industrieländern, die aus einer Umstellung auf ökologischen Landbau folgen können. Weitere Unsicherheiten folgen aus den Auswirkungen des Klimawandels sowie des Fortschreitens der Degradation von Acker- und Grünlandflächen: „560 Mio. ha (38 %) des globalen Ackerlandes gelten als degradiert, ebenso wie mehr als 680 Mio. ha (21 %) des Dauergrünlands. Jährlich sollen rund 10 Mio. ha allein durch Bodenerosion – dem wichtigsten Degradationsprozess – für die landwirtschaftliche Nutzung verlorengehen (0,7 % der derzeitigen globalen Ackerfläche)“ (Dusseldorp, et al., 2011 S. 151).

Die erwarteten Auswirkungen des Klimawandels auf die Erträge variieren je nach Pflanze und Anbauregion. Nach einer Zusammenfassung des wissenschaftlichen Erkenntnisstandes durch die Weltbank wird mit folgenden Auswirkungen gerechnet: Während die Erträge im Reisanbau vielerorts, wo die Temperaturen nicht bereits heute sehr hoch sind, steigen könnten (um 12 bis 17 Prozent), werden bei anderen wichtigen Kulturpflanzen schon bei einem Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur um 2° Celsius gegenüber dem vorindustriellen Niveau erhebliche Ertragsrückgänge erwartet. In Südbrasilien könnten beispielsweise die Soja- und Maiserträge im Vergleich zum Zeitraum 1971 – 2000 um 15 – 30 Prozent sinken. In anderen Regionen und bei anderen Pflanzen, wie z. B. bei Zuckerrohr, könnte es sogar zu Ertragssteigerungen oder lediglich zu geringen Rückgängen kommen. Steigt die Durchschnittstemperatur dagegen um mehr als 4° Celsius, wird in Brasilien im Durchschnitt aller analysierten Kulturpflanzen mit Ertragsrückgängen um 31 Prozent gerechnet (ohne mögliche Zugewinne infolge des höheren CO_2-Gehaltes der Luft). (The World Bank, 2014 S. 66)

In Afrika südlich der Sahara werden bei den wichtigen Kulturpflanzen Mais, Sorghum, Hirse, Erdnuss und Maniok insgesamt Rückgänge von -22 Prozent, -17 Prozent, -17 Prozent, -18 Prozent und -8 Prozent erwartet, wenn die globale Durchschnittstemperatur bis 2050 um 2,2° Celsius gegenüber dem vorindustriellen Niveau steigt. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Ertragseinbußen bei Mais, Sorghum, Hirse und Erdnuss dann größer als -7 Prozent sein werden, wird auf 95 Prozent geschätzt. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 5 Prozent erwartet man, dass die Schäden bei diesen Pflanzen 27 Prozent überschreiten werden. (The World Bank, 2013 S. 41)

Weltweit werden negative Auswirkungen des Klimawandels auf die Erträge häufiger sein als positive Auswirkungen (IPCC, 2014 S. 6).

12.2.4.1.3 Zwischenfazit Flächenkonkurrenz

Die dargestellten Daten zur heutigen Produktivität der Landwirtschaft und den Potenzialen in Entwicklungsländern belegen, dass bei einer Minimierung von Verlusten und Verschwendung sowie einer weitgehenden Durchsetzung des Grundsatzes „Feed no Food“ in der Viehhaltung allein auf den heute vorhandenen Ackerflächen ausreichend Nahrung für mehr als 12 Milliarden Menschen produziert wird bzw. werden kann. Eine massive Intensivierung der Landwirtschaft oder eine großflächige Ausweitung der Ackerflächen sind nicht zwingend erforderlich, wenn die genannten Effizienzpotenziale weitgehend ausgeschöpft werden. Schätzt man das Ertragspotenzial der weltweiten Wiesen und Weiden auf ein Fünftel der deutschen Ertragspotenziale, erscheint auch ein Ernährungspotenzial der Landwirtschaft, das für mehr als 13 Milliarden Menschen ausreicht, durchaus realistisch. Somit könnten selbst bei einer Weltbevölkerung von 9 bis 10 Mrd. Menschen mehr als 20 Prozent der landwirtschaftlichen Flächen für den Anbau von nachwachsenden Rohstoffen und Energiepflanzen verfügbar sein. Dazu müsste jedoch eine hohe Effizienz der Nutzung von Anbauflächen und der darauf erzeugten Lebensmittel zu einem vorrangigen Ziel der Ernährungswirtschaft werden. Dies gilt insbesondere, wenn die Landwirtschaft der Industrieländer zunehmend auf eine ökologische Wirtschaftsweise umgestellt werden soll.

Ein Verzicht auf die Nutzung von ackerbaulich kultivierten Energiepflanzen bereits vor dem Jahr 2050 führt, angesichts der zu erwartenden Ertragsrückgänge infolge des Klimawandels, langfristig nicht zu einer höheren Ernährungssicherheit, wenn dadurch das Ziel verfehlt wird, die globale Erwärmung auf maximal 2° Celsius gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen.

Zudem könnten in Deutschland allein durch eine Halbierung des Fleischkonsums auf das als gesund empfohlene Maß ähnlich große Flächenpotenziale für die Produktion pflanzlicher Nahrungsmittel freigesetzt werden[110] wie durch einen Verzicht auf die Energiepflanzennutzung, da der Anteil der Futtererzeugung an der Ackerflächennutzung im Jahr 2016 bei 46 Prozent lag. (BMEL, 2019 S. 90) Die Bereitstellung der Kalorien in pflanzlicher Form benötigt, wie bereits ausgeführt, deutlich weniger Ackerfläche.

12.2.4.2 Erträge und Energiebilanzen landwirtschaftlicher Energiepflanzen

Bei der Beurteilung der Effizienz von Energiepflanzen wird häufig entweder der Brutto-Energieertrag pro Hektar oder das Verhältnis von Energieaufwand zu Energieertrag, der sogenannte Erntefaktor (auch EROI = Energy Returned On Invested), als Kriterium gewählt. Beim Brutto-Energieertrag handelt es sich i. d. R. um den Heizwert eines biogenen Brennstoffs (z.

[110] Wie bereits dargestellt, stehen 80 bis 90 Prozent der bei der Fleischproduktion verfütterten pflanzlichen Kalorien nicht für die menschliche Ernährung zur Verfügung.

B. Holz, Stroh, Pflanzenöl, Biogas) pro Hektar oder den Strom, der von einem mit dem jeweiligen biogenen Brennstoff betriebenen Kraftwerk pro Hektar erzeugt werden kann. Sowohl der Brutto-Energieertrag als auch der Erntefaktor sind allerdings für sich betrachtet nur bedingt aussagekräftig, wenn es um die Flächeneffizienz von erneuerbaren Energieträgern geht. Der Netto-Energieertrag ist nach Ansicht des Wissenschaftlichen Beirates Agrarpolitik geeignet, „*die verschiedenen Optionen hinsichtlich ihrer möglichen Beiträge zu dem Ziel „Versorgungssicherheit" zu beurteilen. Bei der Ermittlung des Netto-Energieertrags pro Hektar werden bei Konversionslinien ohne Nebenprodukte sämtliche fossile Energieinputs incl. der Urproduktion, der Herstellung der Anlagen sowie bei der Konversion vom Brutto-Energieertrag abgezogen. Zur besseren Transparenz werden sowohl der Netto-Energieertrag ohne Gutschrift als auch derjenige mit Gutschrift ausgewiesen. Dieser Parameter wird umso wichtiger, je stärker es bei verschärfter Nutzungskonkurrenz um die knappe landwirtschaftliche Fläche darauf ankommt, mit Hilfe der Bioenergie je Hektar Fläche einen größtmöglichen Energieertrag zu erzielen*." (Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik, 2007 S. 73)

12.2.4.2.1 Energiebilanzen ohne Konversion

In Tabelle 383 und Tabelle 384 ist die Energiebilanz wichtiger Energiepflanzen in Deutschland ohne Konversion und ohne Berücksichtigung von Nebenprodukten dargestellt, soweit dazu Daten verfügbar waren. Der berechnete Erntefaktor stellt lediglich das Verhältnis des Energieertrags (nach erzeugten Energieträgern) zum Energieaufwand von Anbau und Ernte der jeweiligen Energiepflanze dar. Nicht berücksichtigt sind mögliche Energieaufwendungen für die Erstellung von Energieanlagen (z. B. BHKW oder Biogasanlagen), Leitungen (z. B. Nahwärmeleitungen) oder dezentralen Heizsystemen sowie für die Verarbeitung des Rohstoffs zum genannten Energieträger (z. B. Verarbeitung von Korn zu Ethanol oder von Stroh zu Briketts oder Pellets).

Unter dem Begriff Energiebilanz werden hier folgende Kennwerte zusammengefasst:

- der kumulierte Energieaufwand (KEA) von Anbau und Ernte
- der Energieaufwand der Rekultivierung der genutzten Anbauflächen nach dem Ende der Nutzung einer Kulturpflanze
- der Brutto-Energieertrag pro Hektar
- der Netto-Energieertrag pro Hektar
- der Erntefaktor (auch EROI oder Input-Output-Verhältnis)

Eine Berücksichtigung des Energieaufwandes der Konversion, der möglichen Verluste und möglicher Gutschriften durch Nebenprodukte wird anschließend, aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit, lediglich für einige Beispielhafte Pflanzen und Nutzungspfade dargestellt.

Tabelle 383: Energiepflanzen I – Energiebilanzen von Energiepflanzen nach erzeugtem Energieträger ohne Konversion und Berücksichtigung von Nebenprodukten

Energiepflanze, Nutzung	Kumulierter Energieaufwand (kWh/ha*a)	Energieaufwand Rekultivierung (kWh/ha*a) [2]	Brutto-Energieertrag (kWh/ha*a)	Netto-Energieertrag (kWh/ha*a) [11]	Ernte-faktor [11]
Ackergras- und Leguminosen-mischung, Biogas	[1] 4.183	0	[2] 37.937	**33.754**	**9,1**
Dauergrünland, Biogas	[1] 3.182	0	[2] 25.135	**21.953**	**7,9**
Durchwachsene Silphie, Biogas	[2] 1.706	[2] 56	[2] 31.121	**29.359**	**17,7**
Durchwachsene Silphie, Biogas, nur Strom	[2] 1.706	[2] 56	[2] 11.515	**10.863**	**6,5**
Miscanthus, Festbrennstoff, konventionell	[1] 2.957	[2] 27	[2] 78.882	**75.897**	**26,4**
Pappel (zweijähriger Umtrieb)	[7] 1.190	[8] 11	[7] 50.278	**49.070**	**41,6**
Weide (vierjähriger Umtrieb)	[1] 491	[2] 13	[2] 25.158	**24.654**	**49,9**
Silomais, Biogas	[1] 3.397	0	[2] 49.301	**45.904**	**14,5**
Silomais, Biogas, nur Strom	[1] 3.397	0	[2] 18.242	**14.844**	**5,4**
Silomais, Biogas, ökologisch	[1] 2.268	0	[11] 34.511	**32.243**	**15,2**
Silomais, Biogas, nur Strom, ökologisch	[4] 2.268	0	[11] 16.554	**14.287**	**7,3**
Körnermais, Ethanol	[1] 6.295	0	[2] 27.853	**20.830**	**3,9**
Körnermais, Ethanol, ökologisch	[4] 3.451	0	[4] 16.881	**13.430**	**4,9**
Körnermais, Ethanol (Korn) & Biogas (Stroh)	[4] 6.460	0	[4] 61.770	**55.310**	**9,6**
Körnermais, Ethanol (Korn) & Biogas (Stroh), ökologisch	[4] 3.495	0	[4] 37.436	**33.942**	**10,7**
Corn-Cob-Mix, Biogas	[1] 3.044	0	[2] 30.806	**27.761**	**10,1**
Corn-Cob-Mix, Biogas, nur Strom	[1] 3.044	0	[2] 11.398	**8.354**	**3,7**
Sonnenblume, Biogas	[1] 6.363	0	[10] 23.900	**17.537**	**3,8**
Sonnenblume, Pflanzenöl (Korn) & Biogas (Stroh)	[1] 6.557	0	[11] 29.819	**23.262**	**4,5**
Sorghum bicolor, Biogas	[1] 6.119	0	[2] 42.205	**38.855**	**6,9**
Sudangras-Hybrid, Biogas	[1] 2.577	0	[2] 30.833	**28.257**	**12,0**
Sudangras-Hybrid, Biogas, nur Strom	[1] 2.577	0	[2] 11.408	**10.455**	**4,4**
Winterraps, Rapsöl	[1] 5.282	0	[2] 13.889	**8.607**	**2,6**
Winterraps, Rapsöl (Korn) & Festbrennstoff (Stroh)	[5] 5.476	0	[11] 45.933	**40.387**	**8,4**
Winterraps, Rapsöl (Korn), Presskuchen (Korn) & Festbrennstoff (Stroh)	[6] 5.476	0	[11] 60.003	**53.916**	**11,0**
Wintertriticale Ganzpflanzensilage, Biogas	[1] 2.014	0	[9] 39.425	**37.411**	**18,6**
Winterweizen Ganzpflanze, Festbrennstoff	[1] 7.749	0	[2] 65.031	**54.473**	**8,4**
Winterweizen Ganzpflanzensilage, Biogas	[1] 3.410	0	[2] 38.459	**34.923**	**11,3**

Winterweizen Korn, Bioethanol	[1)] 6.046	0	[2)] 17.679	**11.732**	**2,9**
Winterweizen, Bioethanol (Korn) & Festbrennstoff (Stroh)	[5)] 6.151	0	[5)] 51.363	**45.212**	**7,4**
Winterweizen, Bioethanol (Korn) & Festbrennstoff (Stroh, Kleie)	[5)] 6.151	0	[5)] 55.721	**49.570**	**9,1**
Futterrüben, Biogas	[1)] 4.474	0	[2)] 40.098	**40.098**	**9,0**
Futterrüben, Biogas, nur Strom	[1)] 4.474	0	[2)] 14.836	**10.362**	**3,3**
Futterrüben, Ganzpflanze, Biogas	[2)] 5.132	0	[2)] 54.801	**49.669**	**10,7**
Futterrüben, Ganzpflanze, Biogas, nur Strom	[2)] 5.132	0	[2)] 20.276	**15.144**	**4,0**
Zuckerrüben, Bioethanol (Rüben)	[1)] 6.716	0	[2)] 37.778	**31.062**	**5,6**
Zuckerrüben, Bioethanol (Rüben), Biogas (Rübenblatt)	[1)] [2)] 7.374	0	[2)] 52.337	**44.963**	**7,1**
Zuckerrüben, Bioethanol (Rüben), Biogas (Rübenblatt, Vinasse)	[3)] 7.374	0	[11)] 55.150	**47.776**	**7,5**
Zwischenfrucht Grünschnittroggen, Biogas	[1)] 1.976	0	[2)] 12.555	**10.579**	**6,4**
Zwischenfrucht Sorghum bicolor, Biogas	[8)] 5.929	0	[2)] 16.062	**10.133**	**2,7**
Zwei-Kulturen-System Wintergerste & Sudangras-Hybrid	[2)] 9.248	0	[11)] 86.714	**77.466**	**9,4**

Angaben zur Wirtschaftsweise: Sämtliche Angaben beziehen sich auf den konventionellen Anbau, sofern nicht explizit ein ökologischer Anbau angegeben ist.
Textliche Angaben in Klammern: Genutzter Rohstoff zur Herstellung des vorgenannten Energieträgers.
Zahlenwerte in Klammern: Schätzwerte mit einer höheren Unsicherheit (geschätzt anhand von Vergleichswerten)
Quellen: (1) KTBL, 2018; (2) KTBL, 2012; (3) Eigene Berechnungen n. KTBL, 2012, LfL Bayern, 2017a, DMH, o. J.; Debruck, o. J.; KTBL, 2018; (4) Eigene Berechnungen n. KTBL, 2012, LfL Bayern, 2017a; Fleschhut, 2016; (5) Eigene Berechnung n. KTBL, 2012, Lewandowski, 2016, Kraft, 2017; (6) Eigene Berechnung n. KTBL, 2012, Lewandowski, 2016, Kraft, 2017; Biokompakt Heiztechnik, o. J. (7) (Burger, et al., 2012) (8) Schätzung n. KTBL, 2018 (8) Schätzung nach KTBL, 2012, 2018; (9) Sticksel, et al, 2018; (10) (FNR, 2013a) (11) Eigene Berechnung

Neben den mehr oder weniger etablierten Energiepflanzen der ersten und zweiten Generation, die in Tabelle 383 dargestellt sind, gibt es weitere interessante Energiepflanzen, deren Energiebilanz aufgrund einer lückenhaften Datengrundlage lediglich geschätzt werden konnte. Dabei handelt es sich um Rutenhirse (wird häufig auch als Switchgrass bezeichnet), Topinambur, Sida (Sida hermaphrodita, wird oft auch als Virginiamalve oder Sandmalve bezeichnet), Ungarisches Hirschgras (Agropyron elongatum, wird auch als Riesenweizengras, Hirschgras Ungarisches Riesengras oder Hohes Weizengras bezeichnet), Wildblumenmischungen, Nutzhanf und Paulownia. Die Schätzung ihrer Flächenpotenziale wird nachfolgend in den Abschnitten 12.2.4.2.1.1 bis 12.2.4.2.1.6 und 12.2.4.2.2.6 beschrieben.

Tabelle 384: Energiepflanzen II – Geschätzte Energiebilanzen weiterer Energiepflanzen nach erzeugtem Energieträger ohne Konversion und Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte

Schätzungen:	Kumulierter Energieaufwand (kWh/ha*a)	Energieaufwand Rekultivierung (kWh/ha*a)	Brutto-Energieertrag (kWh/ha*a)	Netto-Energieertrag (kWh/ha*a)	Erntefaktor
Rutenhirse (Switchgrass), 12 Jahre, Biogas	[1)] 1.688	[1)] 52	[2) 4)] 37.102	35.362	21,3
Rutenhirse (Switchgrass), 12 Jahre, Festbrennstoff	[1)] 2.957	[1)] 34	[2) 3)] 62.800	59.809	22,4
Topinambur, 4 Jahre, Biogas	[1)] 4.258	0	[5) 6)] 50.112	45.854	11,8
Sida, 21 Jahre, Festbrennstoff	[1)] 1.981	0	[7)] 46.750	44.769	22,6
Ungarisches Hirschgras, Biogas	[1)] 3.470	[1)] 40	[8, 9, 10)] 58.609	55.099	16,7
Ungarisches Hirschgras, Festbrennstoff	[1)] 2.856	[1)] 40	[8, 9, 10)] 75.000	72.104	25,6
Wildblumen-Mischung, Biogas	[1)] 2.326	[1)] 135	[11, 12)] 22.200	19.739	9,0
Hanf, Ganzpflanze, Festbrennstoff	[1)] 3.247	0	40.000	36.753	12,3
Paulownia; Festbrennstoff	[1)] 1.119	[1)] 15	48.983	47.848	43,2

Quellen: Eigene Berechnungen nach (1) KTBL, 2012; (2) Boese 2013; (3) Hartmann, 2018; (4) Haller & Fritz, 2015; (5) Vetter, et al., 2009; S. 71 – 76, (6) FNR, 2019; (7) Eigene Berechnung n. TFZ, 2017, Boese, 2013 und Haller & Fritz, 2015; (8) GFEL Szarvas o. J.; (9) Hartmann & Haller, 2014; (10) Geißendörfer, 2012, S. 23; (11) Vollrath & Marzini, 2016; (12) Degenbeck, 2015;

Der Vergleich der Energiebilanzen zeigt, dass mehrjährige Energiepflanzen zum Zeitpunkt nach der Ernte in der Regel deutlich bessere Energiebilanzen aufweisen als einjährige Energiepflanzen. Die höchsten Erntefaktoren zeigen schnellwachsende Hölzer, wie Weide (50), Pappel (42) und Paulownia (43). Ihnen folgen Miscanthus (26), Hirschgras (26), Sida (23), Rutenhirse (22) und Durchwachsene Silphie (17). Unter den einjährigen Energiepflanzen erreichen Silomais (15), Hanf (12) Sudangras (12) die höchsten Erntefaktoren. Die höchsten Netto-Energieerträge erzielen in diesem Vergleich ebenfalls mehrjährige Energiepflanzen. Bei thermischer Nutzung erzielt Miscanthus mit rund 76 MWh/ha den höchsten Wert, gefolgt von Hirschgras mit ca. 72 MWh/ha und Rutenhirse (Switchgrass) mit ca. 64 MWh/ha. Sie übertreffen den als Biogassubstrat genutzten Silomais damit um 39 bis 65 Prozent. Bei einer Biogasnutzung weist Hirschgras der Schätzung zufolge mit ca. 55 MWh/ha die höchsten Netto-Ertragspotenziale auf. Unter den einjährigen Energiepflanzen weisen Körnermais (Ethanol- & Biogasproduktion) mit 55 MWh/ha, Winterweizen (Festbrennstoff) und Winterraps (Öl + Festbrennstoffe) mit jeweils 54 MWh/ha die höchsten Netto-Energieerträge auf, wenn jeweils die ganze Pflanze inkl. Stroh energetisch genutzt wird.

Unter den mehrjährigen Pflanzen, die sich als Insektenweide anbieten, liefern Sida und Topinambur ähnlich hohe Netto-Energieerträge, allerdings ist der Anbau von Sida mit deutlich geringerem Aufwand verbunden, sodass der Erntefaktor deutlich höher liegt als beim Anbau von Topinambur.

Hinweise zur Berechnung

Der zusätzliche Energieaufwand für Bergung und Abtransport des Strohertrags als Nebenprodukt (z. B. bei Raps und Getreide) wurde nach Angaben des KTBL (2012) geschätzt: Für die Bergung von rund 8 Tonnen Getreidestroh werden ca. 4,93 Liter Diesel benötigt, für den Abtransport werden bei 2 km Feld-Hof-Entfernung zudem etwa 5,58 Liter Diesel benötigt. (KTBL, 2012 S. 58) Für das Häckseln, Abtransportieren und Festfahren von Maisstroh für die Biogasproduktion wurde ein Energieaufwand von 5,8 kWh pro Tonne FM angenommen[111].

12.2.4.2.1.1 Rutenhirse (Switchgrass)

Rutenhirse, auch Switchgrass genannt, eignet sich sowohl für die Nutzung in Biogasanlagen als auch für eine thermische Nutzung. Bei einer thermischen Nutzung beträgt der Heizwert rund 5,0 kWh/t TM (Hartmann, 2018 S. 4) und ist damit mit Miscanthus vergleichbar. Nach Hartmann (2018) lieferte Rutenhirse in einem dreijährigen Anbauversuch an vier Standorten in Bayern mittlere Erträge zwischen 6,9 und 9,4 t TM/ha (Hartmann, 2018 S. 3). Nach Boese (2013) wurden in einem fünfjährigen Anbauversuch an einem Standort in Sachsen-Anhalt 17,8 (12,3 – 20,2) t TM pro Hektar erzielt (Boese, 2013 S. 9). Zum Teil lässt sich die Differenz mit der kürzeren Dauer des Anbauversuchs in Bayern erklären, da die niedrigen Erträge des ersten Jahres hier stärker ins Gewicht fallen, als bei einer fünfjährigen Versuchsdauer. Mit Blick auf die Erträge der zweiten und dritten Standjahre erscheint es wahrscheinlich, dass die Erträge in Bayern bei einer fünfjährigen Versuchsdauer um 6 bis 7 Prozent höher liegen könnten. Hochgerechnet auf 10 Standjahre erscheinen demnach, umgerechnet auf die Nutzungsdauer, auch um ca. 10 Prozent höhere Erträge wahrscheinlich, was etwa 9,0 t TM/ha entspricht. In Sachsen-Anhalt erscheint über eine Gesamtnutzungsdauer von 10 Jahren ein mittlerer Ertrag von 18,6 t TM/ha*a möglich. Auf dieser Datenbasis wurde ein mittleres Ertragspotenzial von 13,8 (9,0 – 18,6) t TM/ha angenommen. Bei einem Heizwert von 4,4 – 4,7 kWh/kg TM[112] kann man mit einem Brutto-Energieertrag von 62,8 (39,6 – 87,4) MWh/ha rechnen.

Bei einer Biogasnutzung liegen die Erträge laut Literatur bei 8,0 – 16,0 t TM/ha (Haller, et al., 2015), nach Angaben der LK Niedersachsen sind Durchschnittserträge von 10 – 17 t/TM/ha zu erwarten (Landwirtschaftskammer Niedersachsen, 2010). Die Methanausbeute wurde

[111] Nach KTBL (2019) entsteht beim Häckseln, Abtransportieren und Festfahren von 30 t Silomais ein Energieaufwand von 631 MJ, was rund 175 kWh entspricht.
[112] Entspricht dem Heizwert von Miscanthus (KTBL, 2012; Giganteus, 2010)

durch das TFZ Straubing in Bayern „in zweijährigen Untersuchungen im Mittel über alle Standorte mit 300 (2015) und 271 (2016) Nl/kg oTM gemessen. Die Methanausbeute eines zweiten Aufwuchses kann höher, bis 320 Nl/kg oTM, ausfallen“ (Hartmann, 2018). Der Methanertrag liegt nach Boese bei rund 3.740 m³/ha (Boese, 2013 S. 11). Bei einer zehnjährigen Nutzungsdauer wird der Energieertrag daher auf 37,1 (21,6 – 51,0) MWh/ha*a geschätzt.

12.2.4.2.1.2 Topinambur

Topinambur ist eine vielseitig verwendbare Pflanze, mit hohen Biomasseerträgen, die sich sowohl für die Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln als auch für die Energiegewinnung gut eignen. Die Pflanze entwickelt ab September gelbe Blüten und ist damit eine der wenigen ackerbaulich genutzten Pflanzen, die im Spätsommer/Herbst noch eine Insektenweide (Pollen und Nektar) bieten.

Werden die Knollen genutzt, findet die Ernte von November bis März mit Erträgen zwischen 30 – 50 t FM/ha statt (FNR, 2019). Der Energieaufwand der Ernte ist dementsprechend hoch und vergleichbar mit dem Aufwand anderer Knollen.

Alternativ kann die Pflanze auch mehrjährig über drei bis vier Jahre genutzt werden. Bei einer mehrjährigen Nutzung wird in den ersten zwei bzw. drei Jahren, nur das Kraut genutzt, während die Knollen im Boden verbleiben. Im dritten bzw. vierten Jahr werden dann auch die Knollen geerntet und als Biogassubstrat verwendet. Das Kraut kann im Spätsommer mittels Feldhäcksler geerntet werden. Nach Angaben der FNR wurden im Versuchsanbau Krauterträge von ca. 10 – 20 t TM/ha erzielt (FNR, 2019). Nach Vetter et al. kann man im Mittel mit 10 – 16 t/TM rechnen (Vetter, et al., 2009 S. 75). Der TM-Gehalt des Krauts liegt bei ca. 25 bis 30 Prozent (FNR, 2019). Der mehrjährige Anbau erfordert jedoch im 2. und 3. Jahr ein Ausdünnen der Bestände, was nach Vetter et al. zu einem Abfallen der Erträge um 30 bis 40 Prozent führt. Im vierten Jahr ist mit weiteren Ertragsrückgängen zu rechnen. Die Biogasausbeute von Topinamburkraut liegt bei ca. 440 (358 – 535) Nl/kg oTM (Vetter, et al., 2009 S. 75). Die Knollen weisen eine Biogasausbeute von ca. 780 Nl/kg oTM auf (Vetter, et al., 2009 S. 75).

Bei einem einjährigen Anbau zum Zweck der Knollennutzung kann man mit ca. 60 t FM bzw. 12 t TM pro Hektar rechnen (Vetter, et al., 2009 S. 74). Die energetische Nutzung der Knollen ist jedoch aufgrund der geringen Lagerfähigkeit vergleichsweise kompliziert (Vetter, et al., 2009 S. 74). Zu den Potenzialen der zusätzlichen Krautnutzung werden in der Literatur keine Angaben gemacht. Gleiches gilt für die Knollenerträge am Ende einer vierjährigen Nutzung.

Auf Basis dieser Datengrundlage wurde eine Schätzung der Energiepotenziale beider Varianten durchgeführt. Dabei wurde unterstellt, dass der Knollenertrag bei einer mehrjährigen Nutzung im 4. Jahr aufgrund der Bestandsausdünnung bei ca. 60 Prozent des Knollenertrags liegt, der bei einer einjährigen Nutzung erzielt wird. Wie in Tabelle 385 dargestellt ergab diese

Schätzung einen potenziellen Brutto-Ertrag von ca. 50 MWh/a*a. Der Energieaufwand wurde anhand von Vergleichswerten aus dem Anbau von Kartoffeln (Knollen) und Silomais (Kraut) geschätzt. Dabei handelt es sich um eine grobe Schätzung mit einigen Unsicherheiten, die jedoch in ihrer Größenordnung plausibel erscheint. Der sich daraus ergebende Netto-Energieertrag beträgt knapp 46 MWh/ha*a, womit sich ein Erntefaktor von ca. 11,8 ergibt. Bei einer reinen Grünschnittnutzung ohne Nutzung der Knollen im vierten Jahr ergibt sich ein Brutto-Energieertrag von 42 MWh/ha und ein geschätzter Netto-Energieertrag von knapp 38 MWh/ha. Dies ist etwas mehr als von der FNR als Potenzial für Baden-Württemberg angegeben wird: Nach Angaben der FNR kann man dort Methanerträge von 3.000 bis 4.800 m³/ha erwarten, was einem Brutto-Energieertrag von 29,9 bis 47,9 MWh/ha entspricht (FNR, 2013a S. 38).

Tabelle 385: Geschätzte Energiebilanz von Topinambur ohne Konversion

Nutzungsjahr	Kumulierter Energieaufwand in kWh/ha*a	Brutto-Energie-ertrag in kWh/ha*a	Netto-Energie-ertrag in kWh/ha*a
Pflanzjahr	8.501	57.042	48.541
2. Jahr	1.812	39.929	38.117
3. Jahr	1.812	37.077	35.265
4. Jahr	4.910	66.400	61.490
Summe	17.033	200.448	183.414
Durchschnitt pro Jahr	**4.258**	**50.112**	**45.854**

Quelle: Eigene Berechnung nach FNR (2019), KTBL (2019) und Vetter, et al. (2009).

Für den einjährigen Anbau ohne Nutzung des Krautaufwuchses ergibt sich mit knapp 47 MWh/ha*a ein ähnlicher Netto-Energieertrag. Der geschätzte Erntefaktor liegt in diesem Fall jedoch mit 4,9 deutlich niedriger als bei der mehrjährigen Nutzung, die im 2. und 3. Jahr nur einen geringen Energieaufwand erfordert. Bisher hat sich der Topinamburanbau zur Biogasnutzung wegen der hohen Erntekosten und Verunreinigung der Topinamburknollen nicht durchgesetzt (FNR, 2013a S. 38). Aufgrund der unbekannten Potenziale der Koppelproduktnutzung (Kombination von Kraut- und Knollennutzung) und des tatsächlichen Energieaufwandes der Rohstoffproduktion wird zudem weiterer Forschungsbedarf gesehen. Sollten sich die Ergebnisse der hier durchgeführten Schätzung jedoch bestätigen, scheint der größte Vorteil von Topinambur in der Kombination eines beachtlichen Energieertrags mit einer spätsommerlichen Insektenweide zu bestehen. Mit Blick auf den Bodenschutz ist die mehrjährige Nutzung der einjährigen sicherlich vorzuziehen. Für die Praxis des Biogasanlagenbetriebs scheint Topinambur jedoch im Vergleich zu anderen Pflanzen weniger geeignet, da die sich jährlich verändernden Energieerträge der mehrjährigen Nutzung berücksichtigt werden müssen.

Tabelle 386: Geschätzte Energiebilanzen der ein- und mehrjährigen Topinamburnutzung ohne Konversion im Vergleich

Anbaumethode	Kumulierter Energie-aufwand in kWh/ha*a	Energie ertrag in kWh/ha*a	Netto-Energie-ertrag in kWh/ha*a	Ernte-faktor
Mehrjähriger Anbau	4.258	50.112	45.854	11,8
Einjähriger Anbau	11.860	58.500	46.640	4,9

Quelle: Eigene Berechnung nach FNR (2019), KTBL (2019) und Vetter, et al. (2009).

12.2.4.2.1.3 Sida

Sida hermaphrodita (Viginia Malve) ist eine aus Nordamerika stammende mehrjährige Staude, die im April/Mai austreibt, von Juli bis Oktober blüht und im Herbst oberirdisch komplett abtrocknet. Sie erreicht eine Lebensdauer von 20 bis 30 Jahren und kann 20 bis 25 Jahre als Energiepflanze genutzt werden (Sperr, o. J., S. 12). Die verholzten Triebe werden zwischen Dezember und April mit Maishäckslern geerntet, sobald die Blätter abgefallen sind und der Wassergehalt des Ernteguts unter 15 Prozent gesunken ist. Die Blätter bleiben auf dem Feld und dienen der Humusbildung. Bis zur Ernte bietet Sida Wildtieren einen wertvollen Schutzraum. Das trockene Erntegut kann direkt zu Pellets oder Briketts gepresst werden. Sida „wächst auch auf schlechteren Böden, die normalerweise nicht für den Ackerbau genutzt werden können. Außerdem ist sie extrem frosttolerant und überlebt Temperaturen bis zu minus 35 Grad Celsius“ (Forschungszentrum Jülich, 2016). Bodenqualität, Wasserversorgung und Temperatur haben großen Einfluss auf die Erträge. Bevorzugt werden schwere Standorte mit einer guten Wasserversorgung. (TFZ Bayern, 2017)

Während der Etablierung in den ersten 2 Jahren fallen die Erträge noch gering aus. Ab dem 3. Jahr kann man mit Erträgen von 7,0 – 15,0 t TM/ha rechnen (Sperr, o. J. S. 12). Die mittleren Erträge werden mit ca. 10 t TM/ha*a angegeben (Boese, 2013, S. 9; Haller & Fritz, 2015, S. 31). Der Heizwert des Häckselguts ist mit dem von Holz vergleichbar (TFZ Bayern, 2017). Bei einem Wassergehalt unter 15 Prozent ergibt sich somit ein Energiepotenzial von rund 52 MWh/ha*a ab dem 3. Erntejahr und von ca. 47 MWh/ha*a bezogen auf die gesamte Nutzungsdauer (vgl. Tabelle 387). Für die Schätzung der Energiebilanzen wurde eine Pflanzung anstelle einer Saat unterstellt. Diese „verschafft den Pflanzen einen Vorsprung vor Unkräutern und ermöglicht eine sicherere Etablierung“ (TFZ Bayern, 2017). Der Energieaufwand der Pflanzung wurde nach KTBL, 2019 anhand von Vergleichswerten für die Pflanzung der durchwachsenen Silphie geschätzt. Der Energieaufwand für Ernte und Rekultivierung wurde nach Vergleichswerten für den Anbau von Miscanthus geschätzt. Auf Basis dieser Schätzung ergibt sich ein Erntefaktor von 23.

Tabelle 387: Energiebilanz für Sida bei thermischer Nutzung ohne Konversion

Nutzungsjahr	Energieaufwand in kWh/ha*a	Energieertrag in kWh/ha*a	Netto-Energieertrag in kWh/ha*a
Anpflanzjahr	4.347	0	-4.347
1. Erntejahr	1.765	10.389	8.624
2. Erntejahr	1.765	36.361	34.596
3. – 19. Erntejahr	1.765	51.944	50.180
20. Erntejahr *	3.725	51.944	48.219
Durchschnitt pro Jahr	**1.981**	**46.750**	**44.769**

* Einschließlich Rekultivierung
Quelle: Eigene Schätzung nach TFZ Bayern, 2017, Boese (2013); Haller & Fritz (2015), Sperr (o. J.) und KTBL (2019)

Bei einer Nutzung als Biogassubstrat wird die grüne Pflanze ein- bis zweimal jährlich geerntet. Bei Versuchen in Bayern mit einem ersten Schnitt im Juli und einem zweiten Schnitt im Oktober wurde nach Haller & Fritz (2015) im ersten Jahr ein Ertrag von maximal 12,5 t TM/ha erzielt. Im zweiten Jahr stieg der Ertrag weiter an und ab dem dritten Jahr wurden Erträge von bis zu 15,0 t TM/ha erzielt (Haller, et al., 2015 S. 30). In der Tschechischen Republik wurden bei zwei Schnitten Erträge von 15 bis 20 t TM/ha erzielt (Ust'ak, 2008 S. 14). Erste Tests haben bei einer Ernte der grünen Biomasse im Juli ein Biogaspotenzial von 435 Nl/kg oTM gezeigt (O-leszek, et al., 2013, zit. n. Jablonowski, et al., 2016). Der TM-Gehalt des ersten Schnitts lag in Bayern zwischen 28 und 35 Prozent. Beim zweiten Schnitt ist der TM-Gehalt mit 18 bis 22 Prozent deutlich geringer ausgefallen (Haller, et al., 2015 S. 30). Es muss sich daher noch zeigen, ob sich der zweite Schnitt wirklich lohnt (Haller, et al., 2015 S. 30). Sein Anteil liegt in einem Bereich zwischen 18 und knapp 50 Prozent am gesamten TM-Aufkommen[113] (Haller, et al., 2015 S. 31). Auf der Basis dieser in der Literatur angegebenen Werte wurde ein mittlerer Ertrag von ca. 13,8 t TM/ha*a angenommen. Zudem wurde ein Anteil des zweiten Schnitts am gesamten TM-Aufkommen von bis zu 25 Prozent angenommen. Das Brutto-Energiepotenzial wurde damit auf ca. 34,8 MWh/ha*a geschätzt.

Mit Blick auf den Artenschutz wird die Biogasnutzung im Vergleich zur thermischen Nutzung als nachteilig eingeschätzt. Dafür spricht zum einen der Zeitpunkt der ersten Mahd zu Beginn der Blütezeit, womit die Pflanze nicht als wertvolle Bienenweide mit hohem Nektarpotenzial zur Verfügung steht. Zum anderen bietet die Pflanze bei einer thermischen Nutzung Wildtieren über den gesamten Winter einen wichtigen Unterschlupf. Der Pflanzenschutz erfolgt rein mechanisch. „Chemische Pflanzenschutzmittel sind nicht für den Einsatz in Sida zugelassen und werden von ihr auch nicht toleriert“ (TFZ Bayern, 2017).

[113] Werte wurden anhand einer Grafik abgelesen und können daher von den tatsächlichen Werten etwas abweichen.

12.2.4.2.1.4 Hirschgras

Das Hirschgras ist ein mehrjähriges Riesen-Weizengras, das keine besonderen Ansprüche an den Standort stellt. Es wächst an nahezu allen Standorten und kommt auch mit ungleichmäßiger Wasserversorgung zurecht. Nach der Etablierung ist die Pflanze frosthart, im Jugendalter können ihr Spätfröste allerdings noch Schaden zufügen (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, o. J.). Der Pflanzenschutz erfolgt im ersten Jahr ausschließlich mechanisch. Ab dem zweiten Jahr sind in der Regel keine Pflanzenschutzmaßnahmen mehr erforderlich, wenn der Bestand geschlossen ist (Haller, et al., 2015 S. 36). Durch sein ausgeprägtes Wurzelwerk kann Hirschgras Erosion entgegenwirken und zugleich Stickstoff speichern, wodurch es Nitrateinträge ins Grundwasser besser als intensivere Kulturen verhindern kann (FNR zit. n. LV Hessen, 2016).

Die Ernte erfolgt „zwei bis dreimal jährlich Mitte bis Ende Juni und Mitte bis Ende September bei voller Rispe mit rund 28 bis 32 % TS“ (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, o. J.). In seiner Herkunftsregion in Ungarn liegt der mittlere Ertrag der Sorte Szarvasi-1 bei ca. 16 t TM/ha*a (GFEL Szarvas, o. J.). In Deutschland wurden mehrfach Erträge von rund 18 t TM/ha (Straubing, Bayern) bis 19 t TM/ha (Triesdorf, Bayern) erzielt. An trockenen Standorten, wie in Triesdorf, fallen die Erträge zum Teil sogar höher aus, als bei Mais (Hartmann & Haller, 2014; Geißendörfer, 2012, S. 23). Die Biogasausbeute liegt zwischen 320 und 382 Nl/kg oTS (Geißendörfer, 2012 S. 24). Das Biogas enthält ungefähr 60 – 70 Prozent Methan, der Heizwert des Biogases beträgt im Mittel 6,25 kWh/Nm^3 (GFEL Szarvas, o. J.). Somit sind bei einer Biogasnutzung Brutto-Energieerträge von 38,7 (32,0 – 45,4) MWh/ha zu erwarten.

Bei einer Nutzung als Festbrennstoff erfolgen Anbau und Ernte ähnlich wie bei Miscanthus und Sida: Die Ernte erfolgt im Frühjahr, wenn der Wassergehalt unter 20 Prozent gesunken ist. Bisher wird Hirschgras jedoch fast ausschließlich als Biogassubstrat genutzt. Nimmt man Erträge von mindestens 16 t TM/ha an, sollten Brutto-Energieerträge von 75 MWh/ha*a und mehr realistisch sein. Damit ist Hirschgras nach Miscanthus die Energiepflanze mit dem höchsten Ertragspotenzial pro Hektar. Der Erntefaktor dürfte somit nur etwas geringer ausfallen als bei Miscanthus.

12.2.4.2.1.5 Wildpflanzenmischungen

Bei Wildpflanzenmischungen handelt es sich in der Regel um Kombinationen von bis zu 25 verschiedenen Wildpflanzen mit einem vielfältigen Blütenangebot, das für Insekten bis in den Spätsommer eine wertvolle Weide darstellt. Durch die große Zahl unterschiedlicher Blühpflanzen dauert die Blütezeit einer solchen Mischung wesentlich länger als die von einzelnen Blühpflanzen in Monokultur. Die vielfältigen Bestände bieten zudem Wildtieren wie Vögeln, Feldhasen, Fledermäusen und Rehen zusätzlichen Lebensraum (FNR, 2013a S. 40). Darüber hin-

aus vermindern Wildpflanzenmischungen mit mehrjährigen Arten die Gefahr von Bodenerosion und die Auswaschung von Nitrat und Pflanzenschutzmitteln in das Grund- oder Oberflächenwasser. Bei Versuchen im bayerischen Unterfranken und im Nordwestdeutschen Tiefland wurden unterschiedliche Mischungen verglichen, in denen insgesamt 80 Arten zum Einsatz kamen. Dabei wurden laut Vollrath & Kuhn Mischungen mit ökologischen und ökonomischen Ausrichtungen verglichen. Während die ökologisch ausgerichteten Mischungen deutlich unter den Trockenmasseerträgen von Silomais blieben, übertrafen einige ökonomische Mischungsvarianten diese im ersten Standjahr (Vollrath, et al., o. J.). In Baden-Württemberg lagen die Versuchserträge im Etablierungsjahr meist im Bereich zwischen 5 und 12 t TM/ha, am westlichen Bodensee wurden im 1. Jahr 7 – 11 t TM/ha mit einem TS-Gehalt von 28–35 % geerntet (FNR, 2013a S. 41). Die Trockenmasseerträge lagen damit bei etwa 60 Prozent der Maiserträge (FNR, 2013a S. 41).

Andere Versuche außerhalb Baden-Württembergs „zeigen, dass nach dem Etablierungsjahr das Ertragsniveau zunehmen kann und ab dem 2. Standjahr regelmäßig Erträge zwischen 8 und 15 t TM/ha erzielt werden können (FNR, 2013a S. 41). Die Methanausbeute liegt bei den wichtigsten ertragsbildenden Arten dieser Mischung zumeist etwas niedriger als beim Silomais“ (FNR, 2013a S. 41). Mittlerweile liegen aus Bayern Ergebnisse zur gesamten fünfjährigen Standzeit vor. Im Mittel aller Standorte lagen die Trockenmasseerträge bei etwa 55 Prozent der Maiserträge (Vollrath, et al., 2016). Zudem deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Mischungen „robuster gegenüber Witterungsextremen sind und mit Klimaveränderungen besser zurechtkommen als Monokulturen, die jährlich gesät werden müssen“ (Vollrath, et al., 2016). Die Methanerträge lagen meist zwischen 65 und 90 Prozent im Vergleich zu Mais (Vollrath, et al., 2016). Über die gesamte fünfjährige Standdauer wurden so etwa knapp 40 Prozent der Methanerträge von Mais erreicht (Vollrath, et al., 2016). Nach Degenbeck (2015) liegt der Methanhektarertrag der Wildpflanzenmischungen „im Mittel bei etwa der Hälfte von Silomais“ (Degenbeck, 2015). Im Durchschnitt der Angaben ist folglich mit einem Brutto-Energieertrag von 22,2 (19,7 – 24,7) MWh/ha*a zu rechnen.

12.2.4.2.1.6 Hanf

Hanf ist zwar keine mehrjährige Energiepflanze und muss daher jährlich ausgesät werden. Mit Stroherträgen von ca. 10 t und mehr pro Hektar als Hauptfrucht und ca. 2,5 t pro Hektar als Zwischenfrucht (vgl. Abschnitt 11.2.2.7.3) sowie einem sehr geringem Pflegeaufwand ist Hanf dennoch eine ökologisch interessante Energiepflanze, da sie kaum Pflanzenschutz benötigt und insbesondere als Zwischenfrucht eine interessante Alternative in der Fruchtfolge darstellt, wenn mehrjährige Energiepflanzen nicht infrage kommen, aber Festbrennstoffe für eine thermische Nutzung benötigt werden. Bei einem Heizwert, der mit Holzhackschnitzeln vergleichbar ist, sollten Brutto-Energieerträge von mehr als 40 MWh im Hauptfruchtanbau und mehr als 10 MWh im Zwischenfruchtanbau gut erreichbar sein.

12.2.4.2.2 Energiebilanzen inklusive Konversion

Für eine abschließende Beurteilung einer Energiepflanze ist die Berücksichtigung des Energieaufwandes der Konversion und möglicher Transportverluste unabdingbar. Allerdings weist die Datengrundlage diesbezüglich noch viele Lücken auf, sodass ein umfassender Vergleich der verfügbaren Energiepflanzen noch nicht möglich ist. So liegen verlässliche Analysen vollständiger Nutzungspfade bisher lediglich für etablierte und weitverbreitete Energiepflanzen vor, wie beispielsweise Mais. Wie groß der Einfluss der Konversion auf den Netto-Energieertrag und insbesondere auf den Erntefaktor sein kann, kann daher nur am Beispiel einiger weniger Energiepflanzen und Nutzungspfade veranschaulicht werden.

12.2.4.2.2.1 Mais

Der Brutto-Energieertrag von Silomais liegt in Deutschland bei einem Frischmasseertrag von 50 t/ha bei etwa 49.301 kWh/ha (KTBL, 2012 S. 69). Bei einer Nutzung in Biogasanlagen mit KWK ermöglicht dies einen Brutto-Stromertrag von 18.241 kWh/ha und einen Brutto-Wärmeertrag von 23.911 kWh/ha (KTBL, 2012 S. 69). Für die Rohstoffproduktion (Anbau, Ernte, Abtransport) ist ein Energieaufwand von ca. 3.397 kWh/ha erforderlich (KTBL, 2018). Bei einer Verwertung in Biogasanlagen (500 kW_{el}) erfordert die Konversion noch einmal einen Energieaufwand ähnlicher Größenordnung. Nach Angaben des Wissenschaftlichen Beirates Agrarpolitik (WBA) kann man mit ca. 3.014 kWh/ha rechnen (Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik, 2007 S. 107). Der WBA geht dabei von einem Silomaisertrag von 44,5 t FM/ha aus. Um die benötigten 10.398 t Silomais als Gärsubstrat bereitzustellen, werden 234 ha Anbaufläche benötigt[114] (Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik, 2007 S. 106). Unterstellt man stattdessen einen mittleren Ertrag nach Angaben des KTBL (2012), werden lediglich 208 Hektar für die gleiche Biomassebereitstellung benötigt. In diesem Fall steigt, bei gleichem Gesamtbiomasseaufkommen, der auf den Hektar umzulegende Energieaufwand der Konversion auf 3.391 kWh/ha. Somit ergibt sich ein kumulierter Energieaufwand von 6.788 kWh/ha.

Unter Berücksichtigung der Konversion sinkt der Erntefaktor, wenn die Abwärme des BHKW vollständig genutzt wird, somit von 14,51 auf einen Wert von 6,21. Bleibt die Abwärme ungenutzt, fällt der Erntefaktor auf einen Wert von 2,71. Bei der Kalkulation des WBA wurde eine nutzbare Wärmemenge von lediglich 0,313 kWh_{th}/kWh_{el} angenommen (vgl. Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik, 2007, S. 106,107). Legt man der Berechnung dieses Verhältnis zugrunde, ergibt sich ein Erntefaktor von 3,53 (vgl. Tabelle 388). Der Rückbau und die Entsorgung der Anlage sind in diesen Berechnungen nicht berücksichtigt.

[114] Die vom WBA angegebene Fläche beträgt 230 ha. In diesem Fall würde jedoch ein Hektarertrag von 45,2 tFM/ha benötigt, um die erforderliche Biomasse bereitstellen zu können.

Tabelle 388: Energiebilanz der Biogasproduktion in Biogasanlagen (500 kW_{el}) auf Basis von Silomais pro Hektar nach KTBL, 2012/2018 und WBA, 2007

Nutzung	KEA Rohstoff-produktion (kWh/ha*a)	KEA Konversion (kWh/ha*a)	Stromertrag (kWh/ha*a)	Wärmeertrag (kWh/ha*a)	Netto-Energieertrag gesamt (kWh/ha*a)	Erntefaktor
Silomais, KWK, Gesamtpotenzial	1) 3.397	3) 3.391	2) 18.241	2) 23.911	2) 42.152	4) 6,21
Silomais ohne Wärmenutzung	1) 3.397	4) 3.329	2) 18.241		2) 18.241	5) 2,71
Silomais, Wärmenutzung n. WBA	1) 3.397	3) 3.391	2) 18.241	3) 5.709	5) 23.950	5) 3,53

Quellen: (1) KTBL, 2018 (2) KTBL, 2012, S. 69 (3) Eigene Berechnung n. Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik, 2007, S. 106,107 (4) Eigene Berechnung n. Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik, 2007, S. 103. (5) Eigene Berechnung n. KTBL, 2012 und Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik, 2007, S. 106,107

12.2.4.2.2.2 Durchwachsene Silphie

Die Durchwachsene Silphie liefert ab dem dritten Erntejahr im Mittel etwa 55 t FM pro Hektar und Jahr (KTBL, 2012, S. 87; KTBL, 2018). Im Pflanzjahr ist kein Ertrag möglich, im zweiten Jahr ist nur ein geringerer Ertrag zu erwarten. Umgerechnet auf eine Gesamtnutzungsdauer von 12 Jahren ergibt sich ein Ertrag von ca. 49 t FM/ha*a sowie ein potenzieller Brutto-Energieertrag von 31.121 kWh/ha*a (KTBL, 2012, S. 87; KTBL, 2018).

Bei einer Nutzung in BHKW mit einem Gesamtwirkungsgrad von 85,5 Prozent ergibt sich somit, umgerechnet auf 12 Jahre, ein potenzieller Endenergieertrag von 26.608 kWh/ha*a (Strom und Wärme), wenn die gesamte Abwärme genutzt werden kann. Folglich ist ein Erntefaktor von 5,30 möglich. Kann die Abwärme nicht oder (nach WBA) nur teilweise genutzt werden, fallen der Netto-Energieertrag und der Erntefaktor jedoch, wie in Tabelle 389 dargestellt, mit 2,32 bzw. 3,01 deutlich geringer aus.

Tabelle 389: Energiebilanz der Biogasproduktion in Biogasanlagen (500 kW_{el}) auf Basis der Durchwachsenen Silphie pro Hektar

Substrat, Nutzung	KEA Rohstoff-produktion (kWh/ha*a)	KEA Konversion (kWh/ha*a)	Stromertrag (kWh/ha*a)	Wärmeertrag (kWh/ha*a)	Netto-Energieertrag gesamt (kWh/ha*a)	Erntefaktor
Silphie, KWK, Gesamtpotenzial	1.706	3.316	11.515	15.094	26.608	5,30
Silphie ohne Wärmenutzung	1.706	3.256	11.515		11.515	2,32
Silphie, Wärmenutzung n. WBA	1.706	3.316	11.515	3.604	15.119	3,01

Quellen: KTBL, 2012/2018; WBA, 2007; Eigene Berechnungen

12.2.4.2.2.3 Raps (Winterraps)

Pro Hektar können im Mittel etwa 3,5 t Rapskorn geerntet werden. Der mittlere Rapsölertrag hat einen Heizwert von 13,9 MWh/ha (KTBL, 2012 S. 178). Die Rapsstroherträge betragen, wie bereits beschrieben, ca. 7,2 t/ha. Der Heizwert von Pellets aus Rapsstroh liegt zwischen 4,3 und 4,7 kWh/kg (Kraft, 2017). Im Mittel beträgt der Heizwert des Strohertrags folglich ca. 32,3 kWh/ha.

Bei einem Kornertrag von 3,5 t/ha fallen zudem rund 2,2 t Rapsschrot oder 2,5 t Rapskuchen an. Als Gärsubstrat liefert Rapsschrot (Nebenprodukt der Extraktion) Biogasausbeuten von 496,1 m³/t FM und Rapskuchen (Nebenprodukt der Kaltpressung) 579,2 m³/t FM (LfL Bayern, 2019a). Dies entspricht einem Biogaspotenzial von 6,8 MWh/ha für Rapsschrot bzw. 9,1 MWh/ha für Rapskuchen. Pellets aus Rapskuchen (Rapspellets) haben einen Heizwert ca. 5,6 bis 6,5 kWh/kg (Biokompakt Heiztechnik, o. J.). Der mögliche Energieertrag bei einer thermischen Nutzung von Rapskuchen liegt somit bei ca. 14 (12 – 16) MWh pro Hektar. Je nach Nutzung der Rapspflanze liegt der Energieertrag somit zwischen rund 14 und 61 MWh/ha.

Im konventionellen Anbau von Winterraps (Rohstoffproduktion) entsteht ein Energieaufwand von 5.282 kWh/ha (KTBL, 2018). Für die Verarbeitung von Rapssaat zu Rapsöl und Rapskuchen (Konversion) werden bei Kaltpressung, wie bereits erwähnt, zwischen 90 (60 – 120) kWh pro Tonne Rapssaat benötigt (Ferchau, et al., 2009 S. 1). Bei einem Durchschnittsertrag von 3,5 t Rapssaat pro Hektar entsteht somit ein Energiebedarf von 315 (210 – 420) kWh. Bei der zentralen Biodieselproduktion wird ein Energieaufwand von 520 kWh angegeben [115] (Umweltbundesamt Österreich, 2012 S. 22). Für das Verarbeiten von trockenem Stroh zu Pellets für eine thermische Nutzung werden ca. 110 – 120 kWh je Tonne Pellets benötigt, bei Rapsstroh eher etwas niedriger (Kraft, 2017). Nimmt man einen Verlust durch Staubentwicklung und sonstige Verluste von max. 3 Prozent an [116], ergibt sich bei einem Strohertrag von 7,2 t/ha ein Pelletertrag von ca. 7,0 t/ha. Der Energieaufwand der Pelletierung beträgt somit bis zu 770 kWh/ha. Der kumulierte Energieaufwand des Transports zum Ort des Endverbrauchs und der Heizungsanlagen (für Herstellung und Betrieb der Öl- bzw. Pelletheizungen) konnte bei den Berechnungen nicht berücksichtigt werden. Zum Zeitpunkt der Auslieferung des Energieträgers an den Endverbraucher (Cradle to Gate) liegen die Erntefaktoren, je nach Nutzung der Rapspflanze, zwischen 0,96 und 8,15 (vgl. Tabelle 390).

[115] Es wird ein Energieaufwand von 1.554 kWh bezogen auf den unterstellten Hektarertrag von 2,99 t angegeben. (Umweltbundesamt Österreich, 2012 S. 22)

[116] Der durchschnittliche Verlust durch Staubentwicklung wurde in der Literatur sowie von den Unternehmen bisher noch nicht bestimmt.

Tabelle 390: Energiebilanz von Winterraps nach verwendeten Produkten, Cradle to Gate

Produkte und Verfahren der Ölgewinnung	Ertrag (t/ha)	KEA Rohstoff-produktion (kWh/ha*a)	KEA Öl-pressung (kWh/ha*a)	KEA Stroh-pelletierung (kWh/ha*a)	KEA Ge-samt (kWh/ha*a)	Netto-Ener-gieertrag (kWh/ha*a)	Ernte-faktor [13]
Öl; Kaltpressung	[1] 1,4	[2] 5.282	[4] 315		[12] 5.597	[10] 5.612	1,00
Öl und Stroh; Kaltpressung	[6] 8,6	[3] 5.476	[4] 315	[7] 770	[12] 6.561	[10] 36.692	5,59
Öl, Kuchen, Stroh; Kaltpress.	[6] 10,7	[3] 5.476	[4] 315	[7] 770	[12] 6.561	[11] 53.443	8,15
Öl; Extraktion	[8] 1,7	[3] 5.282	[5] 1.820		[12] 7.102	[10] 6.787	0,96
Öl und Stroh; Extraktion	[9] 8,9	[3] 5.476	[5] 1.820	[7] 770	[12] 8.066	[10] 37.868	4,69
Öl, Kuchen, Stroh; Extraktion	[9] 10,7	[3] 5.476	[5] 1.820	[6] 770	[12] 8.066	[11] 51.938	6,44

Quelle: (1) Ber. n. KTBL, 2012; FNR, 2018f (2) KTBL, 2018; (3) Schätzung n. KTBL, 2018; (4) Ber. n. KTBL, 2012; Ferchau et al., 2009; (5) Ber. n. KTBL, 2012; Umweltbundesamt Österreich, 2012; (6) Ber. n. KTBL, 2012; FNR, 2018f; Lewandowski, 2016; Trän, et al., 2016; (7) Ber. n. Kraft, 2017; Lewandowski, 2016; Trän, et al., 2016 (8) KTBL, 2012; (9) Ber. n. KTBL, 2012; FNR, 2018f; Lewandowski, 2016; Trän, et al., 2016; (10) Ber. n. Ferchau, et al., 2009; Kraft, 2017; KTBL, 2012; KTBL, 2018; Lewandowski, 2016; Umweltbundesamt Österreich, 2012; (11) Biokompakt Heiztechnik, o. J.; Ferchau, et al., 2009; Kraft, 2017; KTBL, 2012; KTBL, 2018; Lewandowski, 2016; Umweltbundesamt Österreich, 2012; (12) Summe der Einzelwerte (13) Eigene Berechnung auf Basis der übrigen Kennwerte

Ohne Nutzung der Koppelprodukte ist die Energiebilanz von Rapsöl negativ, wenn man den Energieaufwand von Transport sowie Herstellung und Betrieb der Ölheizung berücksichtigt. Die vorliegenden Daten machen somit deutlich, dass die Nutzung von Rapsöl mit Blick auf die Energiebilanz nur sinnvoll sein kann, wenn auch die Koppelprodukte Rapskuchen bzw. Rapsschrot und Stroh effizient genutzt werden (als Viehfutter oder Energieträger).

12.2.4.2.2.4 Miscanthus

Miscanthus liefert im Erntejahr einen Ertrag von rund 18 t TM und einen Brutto-Energieertrag von 85.140 kWh pro Hektar und Jahr (KTBL, 2012 S. 190). Da im Pflanzjahr und im zweiten Jahr noch nicht der volle Biomasseertrag möglich ist, wurde über die Gesamtnutzungsdauer von 20 Jahren ein Brutto-Energieertrag von knapp 79 MWh pro Jahr geschätzt. Der auf die Gesamtnutzungsdauer umgerechnete Energiebedarf der Rohstoffproduktion beträgt ca. 2.957 kWh/ha (KTBL, 2018). Die Brikettierung erfordert ca. 87 (84 – 90) kWh/t FM (Handler, et al., 2011 S. 59). Bei einen TM-Anteil von ca. 80 Prozent ergibt sich daraus über die gesamte zwanzigjährige Nutzungsdauer ein Energieaufwand von ca. 2.110 pro Hektar und Jahr. Bei einer Pelletierung entsteht nach Kraft (2017) mit ca. 2.790/ha*a ein etwas höherer Energieaufwand als bei der Brikettierung. Der Netto-Energieertrag zum Zeitpunkt der Auslieferung (Cradle to Gate) beträgt somit zwischen 73.107 und 75.897 kWh pro Hektar. Daraus ergibt sich ein Erntefaktor von 14,57 (13,66 – 15,48).

Tabelle 391: Energiebilanz von Miscanthus nach Endprodukt, Cradle to Gate

Biomasse	KEA Rohstoff-produktion (kWh/ha*a)	KEA Brikettierung (kWh/ha*a)	KEA Pelletierung (kWh/ha*a)	KEA Gesamt (kWh/ha*a)	Brutto-Energie-ertrag (kWh/ha*a)	Netto-Energie-ertrag (kWh/ha*a)	Ernte-faktor [4]
Stroh	[1] 2.985			[1] 2.985	[5] 78.882	[4] 75.897	26,43
Briketts	[1] 2.985	[2] 2.110		[4] 5.095	[5] 78.882	[4] 73.787	15,48
Pellets	[1] 2.985		[3] 2.790	[4] 5.775	[5] 78.882	[4] 73.107	13,66

Quelle: (1) KTBL, 2018; (2) Handler und Blumauer, 2011, S. 59; (3) Kraft, 2017; (4) Eigene Berechnung (5) Eigene Berechnung nach KTBL, 2012, S. 190;

12.2.4.2.2.5 Sida (thermisch)

Auf Basis der bereits dargestellten Energiebilanz des Sida-Hackguts zum Zeitpunkt nach der Ernte und des Energieaufwandes für Brikettierung und Pelletierung wurden die Erntefaktoren der Sida-Nutzung nach Endprodukt zum Zeitpunkt der Auslieferung (Cradle to Gate) geschätzt. Diese liegen für Briketts bei 14,5 und für Pellets bei 12,9.

Tabelle 392: Energiebilanz von Sida bei thermischer Nutzung nach Endprodukt, Cradle to Gate

Biomasse	KEA Rohstoff-produktion (kWh/ha*a)	KEA Brikettierung (kWh/ha*a)	KEA Pelletierung (kWh/ha*a)	KEA Gesamt (kWh/ha*a)	Brutto-Energie-ertrag (kWh/ha*a)	Netto-Energie-ertrag (kWh/ha*a)	Ernte-faktor
Hackgut	1.981			1.981	46.750	44.769	23,6
Briketts	1.981	1.250		3.231	46.750	43.519	14,5
Pellets	1.981		1.654	3.635	46.750	43.115	12,9

Quelle: Eigene Schätzungen und Berechnungen nach: TFZ Bayern, 2017; KTBL, 2018; Handler und Blumauer, 2011, S. 59; Kraft, 2017;

12.2.4.2.2.6 Kurzumtriebsplantagen (KUP)

Weiden liefern in Deutschland nach Angaben des KTBL Frischmasseerträge von 15,6 t/ha. Bei einem TM-Gehalt von 65 Prozent lassen sich daraus 26,4 MWh/ha*a gewinnen (KTBL, 2012 S. 213). Pappeln liefern in Süddeutschland (Bayern) Brutto-Energieerträge von ca. 50,3 MWh/ha*a (181 GJ/ha*a) bei Erntefaktoren von 29 – 55 (Burger, et al., 2012). Die Holzerträge des Blauglockenbaums (Paulownia) hängen sehr stark vom Standort und von der jeweiligen Verwendung der Pflanze ab. Als Pioniergehölz wächst er in der Jugend vergleichsweise schnell und erreicht die höchste Wuchskraft mit 20 bis 30 Jahren (Mosandl, et al., 2014). Wird der Baum zur Biomasseproduktion genutzt, um z. B. Energieholz zu gewinnen, sind Umtriebszeiten zwischen zwei und fünf Jahren üblich. Bei ersten Anbauversuchen wurde in Müllheim in einem fünfjährigen Umtrieb von 1996 bis 2001 ein mittlerer Ertrag von 11,4 t TM pro Hektar und Jahr erzielt (Hagemann, o. J.). „Der Pflanzenbestand von 70 Bäumen variierte sehr stark mit Wuchshöhen von 2,9 bis 6,8 m und Erträgen von 2,0 bis 25,7 t TM/ha u. Jahr“ (Hagemann,

o. J.). Bei Versuchen in Bulgarien hat sich „gezeigt, dass ein Ernterhythmus von 3 Jahren am effizientesten ist“ (Touraev, et al., 2012 S. 16). Für eine konservative Schätzung wurde mit einem 20 Prozent geringeren Ertrag gerechnet, was 9,1 t TM pro Hektar entspricht. Zudem wurde mit einem im Vergleich zur Pappel um 20 Prozent höheren Energieaufwand der Rohstoffproduktion gerechnet. Der Heizwert von Paulownia liegt über dem Heizwert der meisten heimischen Hölzer. Geht man von einem um bis zu 16 Prozent höheren Heizwert im Vergleich zu Fichten, dürften Energieerträge von 44 MWh/ha möglich sein, bei Erträgen von 11,4 t TM/ha auch bis zu 55 MWh/ha. [117]

Die hohen Erntefaktoren der KUP-Nutzung resultieren daher, dass lediglich bei Pflanzung und Ernte größerer Energiebedarf entsteht und die Ernte bei KUP lediglich alle zwei bis fünf Jahre durchgeführt werden muss. Nach einer Lufttrocknung lassen sich die Hackschnitzel anschließend in BHKW effizient verheizen. Wird das Holz zu Briketts verarbeitet, ist ggf. eine zusätzliche Trocknung erforderlich. „Der durchschnittliche Energieverbrauch für die Brikettierung von einer Tonne Obstbaumschnittholz beträgt [..] 58,40 kWh“ (Schmid, 2013 S. 152). Weiden, Pappeln und Paulownia weisen deutlich geringere Rohdichten auf, sodass der Energieverbrauch der Brikettierung dieser Holzarten unter diesem Wert liegen dürfte. Der Energieverbrauch der Holzpelletierung „liegt bei ca. 55-80 KW/to. Nadelhölzer sind leichter zu pelletieren als Hartholz. Bei der Pelletierung von Hartholz ist der Energieverbrauch ca. 30% höher - daher sollte das Material, wenn möglich gemischt werden. Es ist aber nichtsdestotrotz möglich auch nur Hartholz zu pelletieren“ (MÜNCH, 2007). Mehr als 90 Prozent des Energieverbrauchs der Pelletproduktion entfallen auf die Trocknung des Holzes.

Tabelle 393: Energiebilanz von Weidenholz aus KUP nach Verarbeitung

Biomasse	KEA Rohstoff-produktion (kWh/ha*a)	KEA Trocknung (kWh/ha*a)	KEA Brikett-/ Pelletproduktion (kWh/ha*a)	KEA Gesamt (kWh/ha*a)	Brutto-Energie-Ertrag (kWh/ha*a)	Netto-Energieertrag (kWh/ha*a)	Ernte-faktor
Weide, Hackschnitzel	1) 491	n. T. *		1) 491	1) 26.416	4) 25.925	4) 52,84
Weide, Briketts	1) 491	n. T. *	2) 470	4) 961	4) 28.088	4) 27.127	4) 28,24
Weide, Pellets	1) 491	3) 5.671	3) 464	4) 6.625	4) 29.760	4) 23.135	4) 3,49

* n. T. = natürliche Trocknung
Quellen: (1) KTBL, 2012; (2) Eigene Berechnung nach Schmid, 2013; (3) Eigene Berechnung. n. Witzlinger, 2002, zit. n. Zimmer, 2007; (4) Eigene Berechnung

[117] Zum Heizwert der Paulownia werden verschiedene Angaben gemacht: Touraev et al. geben nach Jürgen Müller (2001) einen Heizwert von 18,9 MJ für lufttrockenes Holz an (Touraev, et al., 2012 S. 10). Lufttrockenes Holz hat einen Wassergehalt von 20 Prozent und eine Feuchte von 25 Prozent. Nach Agraria weist ein Paulownia-Brikett bei einem deutlich geringeren Feuchtegehalt von 13% einen Heizwert von 18,828 MJ auf. (Agraria, 2019)

Pro Tonne kann man mit einem Energieverbrauch von ca. 21 kWh für das Zerkleinern, ca. 893 kWh für das Trocknen und ca. 52 kWh für das Verpressen rechnen[118] (Witzlinger, 2002 zit. n. Zimmer, 2007). Je nach Verarbeitung sinkt der Erntefaktor daher deutlich, wie in Tabelle 393 am Beispiel von Weidenenergieholz dargestellt.

12.2.4.2.2.7 Zwischenfazit Energiebilanz von Energiepflanzen

Bei der Nutzung erneuerbarer Energien ist Fläche praktisch der einzige Faktor, der der Energieerzeugung unabänderliche Grenzen setzt. In der Literatur wird unter den flächenbezogenen Kennwerten in der Regel der Brutto-Energieertrag angegeben. Deutlich weniger Veröffentlichungen nehmen zusätzlich die jeweiligen Energiebilanzen in den Blick. Die angeführten Fallbeispiele zeigen jedoch, dass sowohl der Brutto-Energieertrag als auch der Erntefaktor bezüglich der Flächeneffizienz einer Energiepflanze allein jeweils wenig Aussagekraft besitzen. Um die Flächeneffizienz beurteilen zu können, ist die Betrachtung des Netto-Energieertrags erforderlich. Der Erntefaktor ist nicht geeignet, um verschiedene Energiepflanzen bezüglich ihrer Flächeneffizienz zu vergleichen.

Beispielsweise weisen Brennstoffe aus Miscanthus zwar mit 13 – 26 deutlich niedrigere Erntefaktoren als Hackschnitzel aus KUP-Holz auf, deren Erntefaktoren zwischen 29 und 55 liegen – der durchschnittliche Netto-Energieertrag pro Hektar von Miscanthus übersteigt jedoch den durchschnittlichen Netto-Energieertrag von Hackschnitzeln aus KUP um 54 bis 207 Prozent.

Das Input-Output-Verhältnis ermöglicht es jedoch, die Effizienz der möglichen Nutzungspfade einer Energiepflanze zu vergleichen und muss deshalb als wichtiger ergänzender Kennwert für die Beurteilung der Flächeneffizienz gesehen werden. Des Weiteren zeigt sich, dass mehrjährige Energiepflanzen in der Regel höhere Erntefaktoren aufweisen als einjährige. Viele der mehrjährigen Energiepflanzen bieten hinsichtlich des Energieaufwandes mehrere Vorteile:

- Einmalige Pflanzung bei 10 bis 20 Jahren Nutzungsdauer
- einfache und kostengünstige Etablierung
- wenig aufwändige Bestandsführung
- hohe Krankheits-, Schädlings- und Trockenresistenz
- hohe Trockenmasseerträge pro Hektar
- Ernte und energetische Verwertung sind mit einfachen technischen Mitteln möglich
- Meist sind mehrfache Nutzungsoptionen vorhanden, die sowohl zentrale als auch dezentrale Nutzungen ermöglichen (Biogassubstrat oder verschiedene Festbrennstoffe)

[118] Bei den Angaben zum Energieverbrauch der Pelletproduktion handelt es sich um aus einem Diagramm abgelesene Werte. Daher sind leichte Abweichungen von den Werten in der ursprünglichen Quelle wahrscheinlich.

12.2.4.3 Forstwirtschaftlich erzeugte Energieträger

Bei forstwirtschaftlich erzeugten Brennstoffen handelt es sich, wie bereits in Abschnitt 11.1.1 dargestellt, überwiegend um Schwachholz aus Durchforstungen und Erntereste. Im Fall der Laubhölzer wird zudem auch häufig das Stammholz als Energieholz genutzt, da es als Bauholz weniger nachgefragt wird. Wird der gesamte Buchenholzertrag einschließlich des Starkholzes (Stammholz und starkes Astholz) energetisch genutzt, fallen pro Hektar jährlich etwas mehr als 6 t lufttrockenen Holzes mit einem Heizwert von ca. 25 MWh an. Aufgrund des Klimawandels und neuer, bereits zuvor beschriebener Verarbeitungsmöglichkeiten, wird Laubholz jedoch als Bauholz an Bedeutung gewinnen. Summiert man Konstruktionsholz, Bretter/Latten und Platten (z. B. Span-/OSB-Platten), können rund 60 Prozent des Buchenholzertrags als Bauholz verwendet werden[119]. Bei den übrigen zwei Fünfteln handelt es sich um Durchforstungsholz, Erntereste, Sägemehl und Rinde, die energetisch genutzt werden können und einen Heizwert von ca. 10,3 MWh/ha haben.

Im Falle des Fichtenholzertrages von etwas mehr als 6,1 t/ha (lufttrocken) ist der Stammholzanteil größer, sodass mehr Konstruktionsholz, Bretter und Latten pro Hektar gewonnen werden können (vgl. Tabelle 394). Dafür fällt kaum brauchbares Astholz für die Plattenproduktion an, sodass der Anteil (ca. 43 Prozent), der sich üblicherweise für die energetische Nutzung anbietet im Vergleich zur Buche etwas größer ist. Der Heizwert dieses Anteils beträgt ca. 11,1 MWh/ha.

Tabelle 394: Haupt- und Koppelprodukte der Bauholzproduktion aus Fichte und Buche bei energetischer Nutzung der Holzabfälle (t atro/ha)

Fichte		Buche	
Konstruktionsholz 1,5 (28%)	Bretter/Latten 0,6 (12%)	Konstruktionsholz 0,9 (18%)	Bretter/Latten 0,4 (7%)
OSB/Spanplatten 0,6 (11%)	Zellstoff-Rohstoff 0,0 (0%)	OSB/Spanplatten 1,6 (31%)	Zellstoff-Rohstoff 0,0 (0%)
Energie 2,2 (43%)	Rinde 0,3 (6%)	Energie 2,1 (41%)	Rinde 0,1 (12%)

Quelle: Eigene Berechnung

Wird das Holz für die Produktion von Möbeln verwendet, sind die Verluste bei der Verbreitung (Verschnitt, Späne, Mehl etc.) höher, sodass mehr Energieholz anfällt (vgl. Abschnitt 11.2.3).

[119] Es ist zu beachten, dass Bauholz, je nach Verwendungsort, trockener als lufttrocken sein muss.

Wird der Verschnitt zu Hackschnitzeln für die Zellstoff- oder Viskoseproduktion verarbeitet, ist der Energieholzertrag etwas geringer, was aber teilweise durch das Anfallen brennbarer Reststoffe aus der Zellstoff- bzw. Viskoseproduktion kompensiert wird. Insgesamt können so als Nebenprodukt der Möbel- und Viskoseproduktion ca. 13 MWh Endenergie pro Hektar Buchenforst gewonnen werden.

Höhere Hektarerträge als Fichten, Tannen und Buchen liefert in Deutschland vor allem die Douglasie. Dank neuer Verarbeitungstechniken gewinnt sie als Baustoff weiter an Verwendungsmöglichkeiten. Wie sich der Klimawandel in Deutschland auf ihre Anbaugebiete und Hektarerträge auswirken wird, ist jedoch noch kaum abzuschätzen[120].

Eichen liefern bei einer energetischen Nutzung des Vollertrags jährlich Brennstoff mit einem Heizwert von ca. 21 MWh pro Hektar. Wird ihr Holz zu Möbeln und Spanplatten verarbeitet, können als Nebenprodukt Brennstoffe (Schwachholz, Restholz, Rinde, Mehl) mit einem Heizwert von ca. 10,7 MWh/ha bereitgestellt werden. Die mittleren Energieerträge der genannten Baumarten sind in Abbildung 161 beispielhaft für einige stoffliche Nutzungspfade im Vergleich dargestellt. Sollte der Klimawandel zu steigenden Temperaturen und zugleich häufiger zu deutlich geringeren Niederschlägen während der Vegetationszeit führen, dürften jedoch sowohl Nadelbäume als auch die meisten der bisher heimischen Laubbäume künftig niedrigere Erträge liefern.

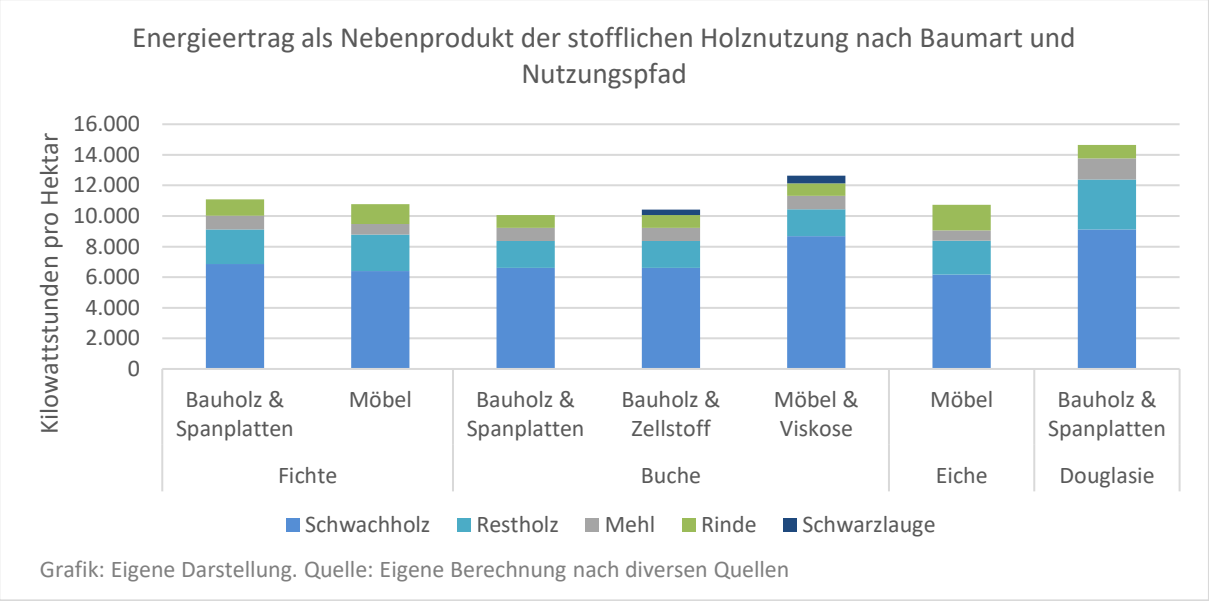


Abbildung 161: Energieertrag als Nebenprodukt der stofflichen Holznutzung nach Baumart und Nutzungspfad

[120] „Mit dem Klimawandel verschlechtern sich die Anbaubedingungen in den warm-trockenen Regionen, in den kühlen Wuchsgebieten verbessern sie sich. Je stärker der klimatische Spezialisierungsgrad der Herkünfte, desto risikoreicher wird der Anbau der Douglasie bei dem hohen Tempo und dem ungewissen Ausmaß des Klimawandels.“ (Kölling, 2008)

12.3 Unsicherheiten und Datenlücken

Die hier dargestellten technischen Potenziale erneuerbarer Energien gelten für die heutigen klimatischen Bedingungen. Infolge des Klimawandels können insbesondere die Bioenergie- und Wasserkraftpotenziale aufgrund von häufigeren Dürrephasen und stärker ausgeprägten Sturmereignissen abnehmen. In der Landwirtschaft ist daher einzukalkulieren, dass die Erträge mit hoher Wahrscheinlichkeit um einige Prozentpunkte sinken werden. Ähnliches gilt für die Forstwirtschaft, in der zudem eine großflächige Neustrukturierung der Baumbestände erforderlich werden dürfte. Da dabei insbesondere schnellwachsende Nadelbäume an Bedeutung verlieren dürften, ist schon allein aus diesem Grund mit abnehmenden Ertragspotenzialen zu rechnen. Grundsätzlich ist zu bedenken, die umsetzbaren Potenziale, die sowohl gesellschaftlich akzeptiert als auch wirtschaftlich erschließbar sind, im Vergleich zu den technischen Potenzialen in der Regel deutlich geringer ausfallen. So ist beispielsweise noch kaum absehbar, bis zu welchem Grad sich das Dachflächenpotenzial für Photovoltaik bis 2035 (1,5-Grad-Ziel) bzw. 2050 (Zwei-Grad-Ziel) ausschöpfen lässt und wie weit ungenutzte Dachflächenpotenziale durch Freiflächensolaranlagen kompensiert werden können, wenn für solche Anlagen die Akzeptanz in der Bevölkerung fehlt.

Tabelle 395: Einschätzung der Datengrundlage

Energiequelle	Art der Quellen	Quantität der Bestätigungen	Einschätzung der Datenqualität
Windenergie	AEE, Fraunhofer ISE	gering	gut/sehr gut*
Dachflächen-PV	LUBW, LANUV NRW	mittel	gut*
Freiflächen-PV	AEE, Anlagenbetreiber	mittel	sehr gut
Agro-PV	Fraunhofer ISE	gering**	sehr gut
Agrothermie	Pietruschka, et al.	keine	sehr gut
Energiepflanzen 1. Generation	KTBL, TFZ, LfL Bayern	hoch	sehr gut
Energiepflanzen 2. Generation	KTBL, FNR, TFZ, LfL Bayern, Diverse Studien	mittel	gut/sehr gut
Biogene Nebenprodukte/Reststoffe	FNR, KTBL, Diverse Studien	gering	gut
Biogene Abfälle	KTBL, LfL Bayern, Diverse Studien	mittel/gering	gut/sehr gut
Holz	BMEL, LWF Bayern, Diverse Studien	mittel	sehr gut bis befriedigend ***

* Bei den Flächenpotenzialen handelt es sich um technische Potenziale. Die LUBW weist zudem darauf hin, dass es sich bei den Daten zum Dachflächenpotenzial um eine Grobschätzung handelt.
** Daten beziehen sich auf den einzelnen Standort einer Pilotanlage in Süddeutschland
*** Zum Energieholzpotenzial des Schwachholzaufkommens liegt keine genauere nach Baumarten differenzierte Datengrundlage vor.

Datenlücken bestehen vor allem mit Blick auf die Erntefaktoren von biogenen Energieträgern. So mangelt es insbesondere mit Blick auf Energiepflanzen der zweiten Generation und auf

diverse forstwirtschaftlich erzeugte Energieträger an Erhebungen des kumulierten Energieaufwandes, weshalb die Erntefaktoren in einigen Fällen nur geschätzt werden konnten. Aufgrund der anhaltenden Diskussionen um die Energiebilanzen erneuerbarer Energieträger erscheint es sinnvoll, diese Datenlücken möglichst bald zu schließen.

13 Umweltaspekte

Erneuerbare Energien und nachwachsende Rohstoffe verändern das Landschaftsbild und bleiben nicht ohne Auswirkungen auf die Ökosysteme. Windenergieanlagen sind weithin sichtbar und können Vögel in ihren Brut- und Jagdrevieren erheblich beeinträchtigen. Freiflächenphotovoltaikanlagen sind ebenfalls visuell auffallend und können bei unvorsichtiger Errichtung und Pflege mit Bodenverdichtung und einem Rückgang der Artenvielfalt einhergehen. Der Anbau von Energie- und Rohstoffpflanzen wiederum nimmt Ackerfläche in Anspruch, die folglich nicht mehr für die Produktion von Nahrungsmitteln genutzt werden kann. Dies führt nicht nur zu einer Konkurrenz um knapper werdende Anbauflächen. Wenn der Anbau von Energie- und Rohstoffpflanzen dazu führt, dass Grünland umgebrochen oder Ur- und Regenwälder geworden werden, ist ihr Beitrag zum Klimaschutz, wie inzwischen mehrfach durch Studien belegt wurde, in der Regel zunichtegemacht. Eine Ausweitung der Ackerfläche durch Landnutzungsänderungen sollte daher weltweit vermieden werden. Neben der Klimabilanz des Anbaus werden aber auch die Auswirkungen von Energiepflanzen auf Böden, Gewässer und Artenvielfalt diskutiert. Experten des Naturschutzbundes NABU sehen in der „Landschaftsveränderung durch die industrielle Landwirtschaft mit dem dramatischen Anstieg von Mais- und Rapsmonokulturen sowie der zunehmende Einsatz von Pestiziden“ eine ernsthafte Gefahr für die Vogelbestände (NABU Nordrhein-Westfalen, 2016). In dieser Entwicklung der Landwirtschaft „wird auch eine der Ursachen für den Besorgnis erregenden Rückgang von Fluginsekten gesehen“ (NABU Nordrhein-Westfalen, 2016).

Die Naturschutzverbände haben daher mit Anlagenbetreibern Empfehlungen entwickelt, nach denen Energieanlagen umweltverträglich betrieben und gepflegt werden können und befürworten eine solche Nutzung ausdrücklich. Wie bereits in Abschnitt 12.2.4.2 dargestellt, weisen Energie- und Rohstoffpflanzen der zweiten Generation in der Regel bessere Energiebilanzen auf als ihre einjährigen Alternativen. Da sie überwiegend mehrjährig angebaut werden und zum Teil als Insektenweide dienen können, könnten sie aber auch ein Mittel sein, diesen negativen Folgen für den Naturschutz entgegenzuwirken. Denn mehrjährige Gräser und Stauden bieten einige gewichtige Vorteile gegenüber schnellwachsenden Gehölzen. So ist vielen von „ihnen gemein, dass das Erntegut sehr trocken, in der Regel weit unter 20% (8-15%) geerntet wird und die Erntemaschinen aus dem normalen Ackerbau (reihenlose Maishäcksler) verwendet werden können. Zudem ist auch die Biodiversität bei größeren Pflanzungen auch ein Thema, dass immer interessanter wird.“ (Sperr, 2018a)

Im Folgenden werden daher die Umweltaspekte der Nutzung von Wind- und Solaranlagen sowie von Energie- und Rohstoffpflanzen der zweiten Generation genauer betrachtet. Mehrjährige Energie- und Rohstoffpflanzen werden mit Blick auf flächenbezogene Umweltkennwerte mit ihren einjährigen Alternativen verglichen.

In Tabelle 396 sind die flächenbezogenen Umweltkennwerte dargestellt, die bei dem folgenden Vergleich betrachtet wurden.

Tabelle 396: Flächenbezogene Indikatoren der ökologischen Bilanzierung des Energie- und Rohstoffpflanzenanbaus

Indikator	Abschnitt
Vielfalt der Kulturpflanzen	6.2.1.
Lebensraumqualität	6.2.2.
Insektenweidepotenzial	6.2.3.
Schadstoffeintrag	6.2.4
Düngemittelaufwand	6.2.5
Störungen	6.2.6
Erosionsschutz	6.2.7
Wasserhaushalt	6.2.8
Treibhausgasemissionen	6.2.9

Quelle: Eigene Zusammenstellung

13.1 Umweltauswirkungen von Windenergie- und Solaranlagen

13.1.1 Windenergieanlagen

Windenergieanlagen sind mit einem unvermeidbaren Flächenverbrauch verbunden: „Die Fundamentfläche moderner Anlagen der 3-MW-Klasse liegt bei ca. 300-500 m², die größten derzeit errichteten Windkraftanlagen liegen bei einer Leistung von 7,6 MW bei einer Fundamentfläche von etwa 600 m². Die nach der Errichtung der Windenergieanlagen zurückzubauenden Lager- und Vormontageflächen benötigen teilweise nochmals ca. 0,2 ha“ (Bundesverband Boden e.V., o. J.). Im Durchschnitt summieren sich Fundament und Kranstellfläche einer Windenergieanlage der 3-MW-Klasse daher auf 2.600 m². Bei einer Errichtung in Waldgebieten kann diese mit einer dementsprechend großflächigen Rodung verbunden sein, wenn keine vorhandene Lichtung als Standort genutzt werden kann. Die Abstandsflächen betragen in Windparks mit 3-MW-Anlagen ca. 15 Hektar pro Anlage. Die Fundamentfläche beträgt somit rund 1,7 Prozent der Windparkfläche. Auf den übrigen 98 Prozent der Fläche ist die Fortführung der bisherigen land- oder forstwirtschaftlichen Nutzung möglich. „Für den Rückbau des Fundaments einer WEA ist ein erheblicher Aufwand nötig. Abhängig davon, ob die Anlage tief oder flach gegründet wurde, und je nach Beschaffenheit des Bodens variieren der Umfang der Bodenarbeiten und ihre Ausführung stark“ (Andre, 2018).

Die Nutzung der Windenergie steht auch wegen ihrer Beeinträchtigung der Lebensräume von Wildtieren in der Kritik. Betroffen sind, insbesondere durch Anlagen in Waldgebieten, vor allem

Vögel und Fledermäuse. Die Naturschutzverbände nennen daher eine größere Zahl von Ausschlusskriterien bei der Wahl geeigneter Anlagenstandorte. Einen vollständigen Verzicht auf die Nutzung der Windenergie fordern die großen Verbände jedoch nicht. Aus Sicht des BUND vertragen „Windkraftanlagen [..] sich dann mit dem Schutz der Natur, wenn ihr Standort sorgfältig ausgewählt worden ist und in der Einzelfallprüfung deutlich wird, dass keine erheblichen Schäden zu befürchten sind. Angesichts des Klimawandels, der eine der Hauptbedrohungen unserer biologischen Vielfalt darstellt, können diese Anlagen einen wertvollen Beitrag dazu leisten, die negativen Auswirkungen auf unsere Umwelt zu mindern“ (BUND, 2020).

13.1.2 Photovoltaikanlagen

Wie Windenergieanlagen sind auch Freiflächenphotovoltaikanlagen mit einem gewissen Flächenverbrauch verbunden. Dieser ist jedoch gering und vollständig reversibel. Der Nettoversiegelungsgrad durch die Errichtung von Freiflächensolaranlagen ist unter 5 Prozent zu halten, teilweise liegt er sogar unter 3 Prozent (BMU, 2005 S. 21). Aus Sicht der Naturschutzverbände ist es trotzdem wichtig, dass der vollständige Rückbau nach dem Nutzungsende gewährleistet ist. Grundsätzlich lassen sich Photovoltaikanlagen, wie bereits zuvor dargestellt, auch auf landwirtschaftlich genutzten Flächen so erreichten, dass unterhalb der Module die bisherige Bewirtschaftung weiterhin nahezu uneingeschränkt möglich ist. Dies gilt sowohl für Anlagen auf Grünland als auch für solche auf Ackerflächen (Agro-PV). Je nach Art der landwirtschaftlichen Nutzung ist jedoch ein höherer baulicher Aufwand erforderlich, um eine Einschränkung der Nutzung zu vermeiden. Bei einer Beweidung mit Schafen reicht ein Mindestabstand der Module zum Boden von 80 cm aus (Schalow, 2012), bei einer Nutzung mit Traktoren ist ein Mindestabstand von 5 Metern erforderlich. Die Kombination der beiden Nutzungen erhöht nicht nur die Wirtschaftlichkeit, sondern kann nach Einschätzung des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie (2020) bei extensiver Nutzung auch ökologische Vorteile bieten: „Bei geschickter Einbindung von PV-Freiflächenanlagen in vorhandene Biotop-Strukturen und Landschaftsbild können PV-Freiflächenanlagen die Landschaft ökologisch aufwerten, beispielsweise durch:

- Steigerung der Arten- und Strukturvielfalt durch Umwandlung von intensiv bewirtschaftetem Acker in extensives Grünland
- Verbesserung der Biotopvernetzung
- Reduzierung der Belastung durch Düngung und Pflanzenschutzmittel für die Schutzgüter Boden und Wasser
- Reduzierung bzw. Unterlassung der Bodenbearbeitung“

(Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, 2020).

Ein Pilotversuch des BUND und der solarcomplex AG hat am Beispiel des Solarparks Mooshof belegt, dass sich intensiv genutzte Landwirtschaftsflächen unterhalb einer Solaranlage innerhalb kurzer Zeit zu einer artenreichen Wiese entwickeln können:

> „Die Topographie der Geländeoberfläche wurde in einem technisch vertretbaren Rahmen belassen, so dass an mehreren Stellen auf Tonlinsen temporär offene Wasserflächen entstanden. Sowohl bei der Saatgutauswahl für die Wiesenfläche als auch bei der Pflanzenauswahl für die Hecke wurde auf autochthone Herkunft geachtet und ein spezieller Pflanzplan erstellt. [...] Die Grünpflege wird zweimal im Jahr durchgeführt, wobei wechselnde Bereiche auf der Fläche unbearbeitet bleiben. Das Mähgut wird von der Fläche abgefahren und führt so zu einer rascheren Aushagerung bei. Schon nach vier Jahren kann das Pflegekonzept als erfolgreich beurteilt werden, u.a. auch dadurch, dass der Solarpark mittlerweile zahlreiche "Rote Liste" Arten vorweisen kann.“ (solarcomplex AG, 2018)

Der Solarpakt Mooshof befindet sich zwischen Bodman-Ludwigshafen, Wahlwies und Espasingen an einer Bahnstrecke. Nach Erhebungen des BUND haben sich bereits in den ersten beiden Jahren z. B. der Kurzschwänzige Bläuling oder der Malven-Dickkopffalter eingefunden, die zu den gefährdeten Tierarten zählen. Des Weiteren wurden Schwalbenschwanz und Postillon beobachtet. Insgesamt ist der hohe Bestand an seltenen Insekten nach Einschätzung des BUND auffallend: „Bei den Heuschrecken finden sich neben den Rote- Liste-Arten Lauchschrecke und Weißrandiger Grashüpfer unter anderem Nachtigall-Grashüpfer, Rote Keulenschrecke und Sichelschrecke. An Feuchtstellen lassen sich Libellen wie die Becher-Azurjungfer und Heidelibelle beobachten.“ (Siebler, 2013)

13.2 Umweltauswirkungen von Energie- und Rohstoffpflanzen

Die Nutzung von Energiepflanzen kann zu gravierenden Schädigungen der biologischen Vielfalt und des Bodens führen. Dies gilt vor allem für einjährige Pflanzen, die in Monokultur und mit einem hohen Einsatz von chemischen Pflanzenschutzmitteln angebaut werden. Zudem können durch die Konkurrenz zur Lebensmittelproduktion und den zunehmenden Nachfragedruck Landnutzungsänderungen verursacht werden, die mit hohen biologischen Verlusten einhergehen. Es wurden daher Kennwerte erarbeitet, die im Folgenden dargestellt werden und als Orientierungswerte für die Einschätzung der Umwelteinflüsse dienen sollen. Auswirkungen auf Landnutzungsänderungen und der sogenannte ILUC-Faktor wurden hier jedoch nicht berücksichtigt, da eine dauerhafte Ausweitung der Anbauflächen für Energiepflanzen über die Grenze von 20 Prozent der Ackerfläche hinaus nicht als sinnvoll angesehen wird. Denn Landnutzungsänderungen führen nicht nur zu hohen Treibhausgasemissionen, wenn z. B. Grünland oder Waldflächen in Ackerland umgewandelt werden. Hof et al. (2018) kommen darüber

hinaus zu dem Schluss, dass eine erhebliche Ausweitung der landwirtschaftlichen Anbauflächen sich derart schädigend auf die Biodiversität auswirken kann, dass dies durch die positiven Effekte des erreichten Klimaschutzes nicht kompensiert werden kann (Hof, et al., 2018). In der vorliegenden Studie wird daher von der Prämisse ausgegangen, dass keine zusätzlichen Acker- und Grünlandflächen durch Landnutzungsänderungen gewonnen werden dürfen und der Anbau von Energiepflanzen nur auf bestehenden Ackerflächen erfolgen kann, die nicht für die Produktion von Lebensmitteln benötigt werden oder nicht mehr für den Anbau von Nahrungspflanzen genutzt werden können (beispielsweise infolge von Degradation). Wie bereits dargestellt, dürfte für den Anbau von Energiepflanzen und nachwachsenden Rohstoffen auch bei einer wachsenden Weltbevölkerung dauerhaft ein Anteil von ca. 20 Prozent der Ackerflächen nutzbar sein, sofern die Ziele des Pariser Klimaschutzabkommens aus dem Jahr 2015 nicht verfehlt werden und sowohl die Lebensmittelverschwendung als auch der Fleischverbrauch pro Person erheblich reduziert werden. Die Erzeugung von Futtermitteln belegt hierzulande aktuell den größten Anteil an den landwirtschaftlichen Nutzflächen. Im Jahr 2016 wurden in Deutschland rund 53 Prozent der landwirtschaftlichen Nutzflächen für Futtermittel aufgewendet (BMEL, 2019 S. 90), 14 Prozent für den Energiepflanzenanbau und knapp 2 Prozent für den Anbau von Industriepflanzen (BMEL, 2019 S. 67). Bezogen auf die Ackerfläche lag der Anteil der Futtererzeugung bei 46 Prozent. Der Anteil der Energiepflanzen betrug mit 2,38 Mio. Hektar rund 20 Prozent, der Anteil der Industriepflanzen lag mit rund 0,3 Mio. Hektar bei ca. 2,5 Prozent (BMEL, 2019). Für die Erzeugung von Nahrungsmitteln und andere Zwecke standen somit theoretisch 38 Prozent der Ackerfläche zur Verfügung. Im Jahr 2018 war der Anteil der Energiepflanzen nach ersten Schätzungen mit rund 18 Prozent (2,17 Mio. Hektar) deutlich gesunken (FNR, 2019 S. 5). Es wird davon ausgegangen, dass die Energiepflanzenanbaufläche in Deutschland höchstens vorübergehend über 20 Prozent steigen kann und mit dem Anwachsen der Weltbevölkerung bis zum Jahr 2050 wieder auf das heutige Niveau sinken muss. Somit sprechen sowohl ökologische Gründe als auch Aspekte der Ernährungssicherheit dafür, die Anbaufläche grundsätzlich nicht über den heutigen Flächenanteil von ca. 20 Prozent auszuweiten. Die Anteile innerhalb der Regionen, Landkreise und Gemeinden können jedoch von diesem Wert abweichen, da sowohl die landwirtschaftlichen Nutzflächen als auch die Potenziale der erneuerbaren Energien sehr ungleich verteilt sind und die unterschiedlichen Transporteignungen für ungleiche Flächenanteile der Energiepflanzen sprechen. Von diesen Annahmen ausgehend wurde untersucht, welche Effekte ein weitgehender Umstieg auf mehrjährige Energiepflanzen auf die Umwelt und wichtige Schutzgüter haben würde. Der Anteil der mehrjährigen Energiepflanzen an der Ackerflächennutzung betrug im Jahr 2016 nur 0,1 Prozent (FNR, 2019 S. 7). Die ausgewählten Kennwerte beziehen sich auf die direkten Auswirkungen des Energiepflanzenanbaus auf die Biodiversität der Kulturpflanzen, die Vielfalt der Lebensräume

für Wildtiere sowie auf die Eignung als Insektenweide, das Ausmaß des Einsatzes von Düngemitteln und chemischen Pflanzenschutzmitteln und die anbaubedingten Bodenschädigungen. Die ausgewählten Indikatoren für mögliche Umweltwirkungen und die durch sie betroffenen Schutzgüter sind in Tabelle 397 dargestellt.

Tabelle 397: Ausgewählte Umweltindikatoren des Energie- und Rohstoffpflanzenanbaus und von ihnen betroffene Schutzgüter

Indikator	Kennwert	SG Biodiversität	SG Boden	SG Wasser	SG Klima
Vielfalt der Kulturpflanzen	Zahl der Pflanzenarten	X		X	
Lebensraum für Insekten	Ja/Nein	X			
Bienenweide	Ja/Nein	X			
Lebensraum für Wildtiere	Ja/Nein	X			
Erosionsschutz	Ja/Nein		X	X	X
Störungsbedarf	Anzahl Störungen/ha*a	X	X		
Düngemittelbedarf	kg/ha*a	X	X	X	X
Pflanzenschutzmittelbedarf	Anzahl Anwendungen/ha*a	X	X	X	
Wasserbedarf	m^3/ha*a			X	
Vermiedene CO_2-Emissionen	t CO_2-Äq./ha*a				X

SG = Schutzgut. X = Das Schutzgut ist betroffen
Quelle: Eigene Zusammenstellung

Als Indikatoren wurden solche ausgewählt, die bei den durchgeführten Autonomiegradberechnungen flächenbezogene Aussagen zu Umweltwirkungen zulassen, wie z. B. der Anteil der Bienenweide an der Ackerfläche, der Anteil der durch mehrjährige Pflanzen vor Erosion geschützten Fläche, die Anzahl der Pflanzenschutzanwendungen pro Hektar, der Einsatz von Düngemitteln oder der Wasserbedarf pro Hektar.

13.2.1 Vielfalt der Kulturpflanzen

Ein wesentlicher Kritikpunkt bezüglich des Energiepflanzenanbaus ist die damit verbundene Ausweitung von ökologisch nachteiligen Monokulturen. Derzeit werden in Deutschland 17 Nahrungspflanzen in größerem Umfang ackerbaulich genutzt. Die acht wichtigsten dieser Pflanzen (Weizen, Gerste, Silomais, Winterraps, Roggen, Körnermais, Zuckerrüben und Kartoffeln) nahmen in Deutschland im Jahr 2016 80,7 Prozent und in Baden-Württemberg 79,5 Prozent der Ackerfläche ein (vgl. Tabelle 398).

Das übrige Fünftel wurde überwiegend zum Anbau von sonstigen Pflanzen zur Grünernte, Hülsenfrüchten, Gartenbauerzeugnissen und weiteren Pflanzen genutzt, die jeweils nur geringe Anteile an der Ackerfläche aufwiesen.

Tabelle 398: Anteile wichtiger Fruchtarten am Ackerland in Deutschland und in Baden-Württemberg im Jahr 2016

Fruchtart	Deutschland	Baden-Württemberg
Weizen (einschl. Spelz)	27,2%	28,1%
Roggen	4,9%	1,1%
Wintergerste	10,8%	17,6%
Körnermais	3,5%	7,8%
Kartoffeln	2,1%	0,7%
Zuckerrüben	2,8%	1,9%
Winterraps	11,2%	5,9%
Silomais	18,2%	16,4%
SUMME	**80,7%**	**79,5%**

Quellen: BMEL, 2018; Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2019: Regionaldatenbank

Der Anteil von Silomais und Raps an der Energiepflanzenfläche betrug im Jahr 2016 knapp 69 Prozent, was rund 14 Prozent der gesamten Ackerfläche in Deutschland entsprach (FNR, 2019 S. 5). Die übrigen 31 Prozent der Energiepflanzenfläche waren vor allem durch Getreide (20 Prozent), GPS (8 Prozent), Zuckerrüben (>2 Prozent) und Körnermais (>1 Prozent) belegt (FNR, 2019 S. 5). Damit wurden 72 Prozent der Energiepflanzenfläche durch 4 Pflanzenarten und weitere 20 Prozent durch verschiedene Getreide belegt.

Durch den Einsatz von Energie- und Rohstoffpflanzen der zweiten Generation werden dieser relativ geringen biologischen Vielfalt ca. 13 neue Kulturpflanzen mit unterschiedlichen Eigenschaften hinzugefügt, die vor allem als Alternativen zu den energetisch genutzten Anteilen von Silomais, Winterraps, Zuckerrüben und Getreide infrage kommen. Einige bieten sich zudem als Alternativen für den Futterbau an. Silomais, Winterraps und Zuckerrüben nehmen derzeit alleine ein Drittel der Ackerflächen in Deutschland und ein Viertel der Ackerflächen in Baden-Württemberg ein. Auf diesen Flächen könnte die Vielfalt der Pflanzen somit auf mehr als das Fünffache, von drei auf 16, gesteigert werden, wenn alle neuen Energiepflanzen eingesetzt werden. Zusätzliche Vielfalt auf den Ackerflächen lässt sich durch die Nutzung von Wildpflanzenmischungen schaffen.

Eine größere Artenvielfalt unter den Kulturpflanzen ist nicht nur ökologisch sinnvoll, sondern kann auch wirtschaftliche Vorteile bieten. So reduziert mehr Vielfalt sowohl Ertragsausfallrisiken infolge von Witterungsextremen als auch Risiken durch Schädlingsbefall.

13.2.2 Lebensraumqualität

Aufgrund der mangelnden Vielfalt unter den Kulturpflanzen mangelt es auf den Ackerflächen auch an der benötigten Vielfalt und Qualität der Lebensräume. Nur wenige Pflanzen bieten Insekten und Wildtieren ausreichend Deckung und Nahrung, was unter anderem auf den von

vielen Pflanzen erforderten Insektenschutz zurückzuführen ist. Mit den Insekten reduziert sich auch das Nahrungsangebot für Wildvögel. Die Zahl der Wildvögel, wie z. B. Feldlerche und Ortolan, hat auf landwirtschaftlichen Flächen seit 1980 deutlich abgenommen. Auch größere Tiere, wie Hasen und Rehe finden in den ausgeräumten Landschaften insbesondere in den Wintermonaten kaum mehr Unterschlupf. Energiepflanzen der zweiten Generation, insbesondere die thermisch genutzten Pflanzen Sida, Miscanthus, Rutenhirse und Hirschgras werden dagegen im März oder April geerntet und bieten Wildtieren den ganzen Winter hindurch wertvolle Deckung. Aus diesem Grund nutzen z. B. auch „mehr und mehr Jäger Sida als Deckpflanze für das Wild“ (Sperr, 2018a). Sida bietet als Blühpflanze besondere ökologische Vorteile. Aber auch im Falle einer Biogasnutzung bieten die überwiegend mehrjährigen Energiepflanzen der zweiten Generation, wie die Durchwachsene Silphie, Topinambur oder Sida deutliche Vorteile für den Wildtierschutz. Anders als beim Anbau vieler einjähriger Kulturen sind bei ihrem Anbau keine gravierenden Störungen während der Brutzeit der Wildvögel erforderlich. Untersuchungen ergaben auf Flächen mit Silphie und Topinambur signifikant mehr Brutnachweise als auf Flächen mit Wintergetreide oder Mais (Dziewiaty, 2011). Daher wird die Nutzung mehrjähriger Energiepflanzen von Dziewiaty (2011) empfohlen. Im Vergleich zu heute dominierenden Wintergetreiden und Mais können aber auch die einjährigen Sonnenblumen die Nahrungssituation und die Strukturvielfalt in der Landschaft verbessern. Grundsätzlich empfiehlt Dziewiaty für die Biogasnutzung von Ganzpflanzensilagen eine möglichst späte Mahd Ende Juni (Dziewiaty, 2011).

13.2.3 Insektenweide

13.2.3.1 Insektenweidepotenzial

Unter den Energiepflanzen der ersten Generation bietet lediglich Winterraps eine Bienenweide mit einem relevanten Nektarangebot. Ackergras- und Leguminosenmischungen enthalten zwar Blühpflanzen, wie z. B. Rotklee oder Luzerne. Ihr Schnitt erfolgt jedoch in der Regel im Stadium der Knospe bis zum Blühbeginn, um ein Gärsubstrat mit möglichst günstigen Eigenschaften zu erhalten (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, o. J. a). Auch bei einer Nutzung von Dauergrünland erfolgt in der Regel eine viermalige Mahd, sodass die Blütezeit der Wiesen stark eingeschränkt ist.

Von den 13 alternativen Pflanzen der zweiten Generation liefern mehr als die Hälfte mit Pollen und Nektar ein wertvolles Nahrungsangebot für Insekten. Doch obwohl sie neben einem guten Ertragspotenzial auch einen hohen Wert als Bienenweide aufweisen, werden Durchwachsene Silphie, Sida, Sonnenblumen und Topinambur bisher nur in sehr geringem Umfang als Energiepflanzen genutzt. Alle vier Pflanzen bieten neben Pollen ein reichliches oder sehr reichliches Nektarangebot. Insbesondere die Sida könnte eine Lücke schließen, „die mit anderen Pflanzen nur schwer umzusetzen war. [...] Durch die extrem lange und späte Blütezeit ist Sida

nämlich auch eine sehr wertvolle Trachtpflanze für Bienen und rückt so verstärkt in das Blickfeld von Imkern, die ihre Bienen unterstützen möchten“ (Sperr, 2018a). Noch mehr als Honigbienen profitieren Wildbienen und Hummeln von einer längeren Blütezeit nektarspendender Pflanzen, da sie im Gegensatz zur Honigbiene keine oder lediglich geringe Vorräte anlegen. Bei einjährigen Energiepflanzen, wie z. B. Mais oder Wintergerste, können allerdings Zwischenfruchtblühmischungen als Bienenweide eingesetzt werden. „Sie dienen als Nahrungs- und Bruthabitat für viele Bestäuberorganismen, sie sind wertvolle Nektarspender für die Honigbiene und andere Wildbienenarten und leisten somit einen wichtigen Beitrag zur Förderung der Biodiversität auf Ackerstandorten“ (Berendonk, 2012). Ihre Aussaat erfolgt im Zeitraum von Mitte Juli bis Ende September so früh wie möglich, um eine möglichst lange Blütezeit zu ermöglichen. Die Blütezeit der Zwischenfruchtblühmischungen kann sich dann im Idealfall von Ende August bis Ende Oktober erstrecken (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, 2012). Allgemein gilt: „Je früher die Saat erfolgt, desto stärker ist die Blühneigung und desto größer die Palette der zur Verfügung stehenden Arten“ (Berendonk, 2012).

Insgesamt bieten die 8 wichtigsten Energiepflanzen der ersten Generation ohne Zwischenfruchtblühmischungen im Durchschnitt pro Pflanze für ca. 0,66 Monate nektarproduzierende Blüten. Das Nektarangebot dauert lediglich zwei Monate von April bis Ende Mai. Durch den gezielten Einsatz von Zwischenfruchtblühmischungen kann im Idealfall wohl ein Durchschnittswert aller 8 Energiepflanzen von bis zu 1,50 Monaten pro Hektar und Jahr erreicht werden. Allerdings gibt es, wie in Tabelle 399 dargestellt, eine Lücke von Anfang Juni bis Ende Juli, in der für Insekten keine nektarspendenden Blüten zur Verfügung stehen.

Tabelle 399: Blühkalender für landwirtschaftliche Energiepflanzen der 1. Generation

G	Energiepflanze	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov
1	Ackergras- und Leguminosen										
1	Dauergrünland intensiv										
1	Futterrübe										
1	Körnermais						P	P	P		
1	Silomais						P	P	P		
1	Wintergerste				P						
1	Winterraps			N4	N4						
1	Winterweizen					P					
-	Zwischenfruchtblühmischungen							N3	N3	N3	

N = Blüte mit Nektarproduktion. Mit "N" wird der Nektarwert und mit "P" der Pollenwert dargestellt. Die Skala reicht jeweils von 0 bis 4, wobei die Zahl 4 für den höchsten Wert steht (0 = kein, 1 = gering, 2 = mittel, 3 = reich, 4 = sehr reich). Produziert eine Pflanze Nektar und Pollen, so ist der Nektarwert angegeben. Ist keine Ziffer angegeben, lagen zu diesen Pflanzen keine Werte vor. Die angegebenen Zahlen sind nur als Richtwerte zu sehen. Quellen: FNR, 2015a, S. 9; Haller & Fritz, 2015, S. 57;Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen; Deutscher Imkerbund; Apis; , 2018; Imkerei Zocher, 2019; Diverse Gärtnereien

Die 13 betrachteten Energiepflanzen der zweiten Generation bieten im Durchschnitt pro Pflanze über ca. 1,69 Monate nektarproduzierende Blüten. Dabei bieten die meisten der Nektarpflanzen unter ihnen ein reiches Nektarangebot. Lediglich das Nektarangebot von Topinambur und Paulownia ist nur mäßig bzw. gering. In Kombination bieten sie von März bis Ende Oktober ein durchgehendes Nektarangebot über insgesamt acht Monate. Zudem bieten sie ein besonders großes Nektarangebot in der Zeit nach dem Ende der Rapsblüte ab Juni bis Ende September.

Energiepflanzen der zweiten Generation sind damit im Durchschnitt auch deutlich bienenfreundlicher als die wichtigen Rohstoffpflanzen. Unter den in Tabelle 401 dargestellten ackerbaulich genutzten Rohstoffpflanzen ist Lein (mit zwei Nutzungen/Sorten) die einzige Pflanze, die zumindest eine geringe Nektarproduktion aufweist. Im Durchschnitt kommen die 8 ackerbaulich genutzten Rohstoffpflanzennutzungen somit lediglich auf 0,75 Monate Blütezeit pro Kulturpflanze und damit auf ein sehr geringes Nektarangebot. Die Zeit, in der auf den Ackerflächen überhaupt ein Nektarangebot existiert, ist mit nur drei Monaten deutlich kürzer als bei den Energiepflanzen der zweiten Generation. Besonders insektenfreundlich ist neben extensiv genutztem Wiesengras vor allem die Fasernessel, die als mehrjährige Nutzpflanze vor allem für Schmetterlinge eine wertvolle Lebensgrundlage bietet, aber auch für viele andere Insekten und Spinnen wertvollen Lebensraum schafft.

Tabelle 400: Blühkalender für landwirtschaftliche Energiepflanzen der 2. Generation

G	Energiepflanze	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov
2	Durchwachsene Silphie						N3	N3	N3		
2	Miscanthus								P	P	
2	Pappel		P	P	P						
2	Paulownia			N1	N1						
2	Rutenhirse/Switchgrass,						P	P	P		
2	Sida					N3	N3	N3	N3	N3	
2	Sonnenblume						N3	N3	N3		
2	Sorghum bicolor							P			
2	Sudangras-Hybrid						P	P			
2	Topinambur, Biogas							N2	N2		
2	Ungarisches Hirschgras					P	P				
2	Weide		N3	N3	N3						
2	Wildblumen-Mischung					N3	N3	N3	N3		

N = Blüte mit Nektarproduktion. Mit "N" wird der Nektarwert und mit "P" der Pollenwert dargestellt. Die Skala reicht jeweils von 0 bis 4, wobei die Zahl 4 für den höchsten Wert steht (0 = kein, 1 = mäßig, 2 = mittel, 3 = reich, 4 = sehr reich). Produziert eine Pflanze Nektar und Pollen, so ist der Nektarwert angegeben. Ist keine Ziffer angegeben, lagen zu diesen Pflanzen keine Werte vor. Die angegebenen Zahlen sind nur als Richtwerte zu sehen. Quellen: FNR, 2015a, S. 9; Haller & Fritz, 2015, S. 57; Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, Deutscher Imkerbund, Apis; 2018; Imkerei Zocher, 2019; Diverse Gärtnereien

Tabelle 401: Blühkalender für landwirtschaftliche Rohstoffpflanzen

G	Rohstoffpflanze	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov
1	Öllein					N1	N1	N1			
1	Faserlein					N1	N1	N1			
2	Fasernessel						P3	P3	P3	P3	
2	Hanf					P3	P3	P3			
2	Wiesengras			N	N	N	N	N	N		
2	Miscanthus								P	P	
2	Rutenhirse/Switchgrass						P	P	P		
1	Weizen, Stroh-Dämmstoff					P					
1	Roggen, Stroh-Dämmstoff				P	P					

N = Blüte mit Nektarproduktion. Mit "N" wird der Nektarwert und mit "P" der Pollenwert dargestellt. Die Skala reicht jeweils von 0 bis 4, wobei die Zahl 4 für den höchsten Wert steht (0 = kein, 1 = gering, 2 = mittel, 3 = reich, 4 = sehr reich). Produziert eine Pflanze Nektar und Pollen, so ist der Nektarwert angegeben. Ist keine Ziffer angegeben, lagen zu diesen Pflanzen keine Werte vor. Die angegebenen Zahlen sind nur als Richtwerte zu sehen. Quellen: FNR, 2015a, S. 9; Haller & Fritz, 2015, S. 57; Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, Deutscher Imkerbund, Apis; 2018; Imkerei Zocher, 2019; Diverse Gärtnereien

13.2.3.2 Exkurs: Fasernessel und Ökologie

Sofern sie mit ausreichend Stickstoff versorgt ist, ist die Fasernessel im Vergleich zu anderen Pflanzen eine anspruchslose Kulturpflanze, die mehrjährig (5 bis 10 Jahre) und ressourcenschonend genutzt werden kann. Während für die Produktion eines Baumwollshirts rund 15.000 Liter Wasser benötigt werden, beansprucht ein T-Shirt aus Nesselgarn nur rund 4.000 Liter Regenwasser (Mattes & Ammann zit. n. Schlupeck, 2017). Für den Anbau der Nessel werden keine Pflanzenschutzmittel benötigt, nur im Anpflanzjahr ist eine mechanische Unkrautbekämpfung erforderlich (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2009b). Durch das Speichervermögen der Nesselwurzeln wird zudem die Nährstoffauswaschung deutlich reduziert, weshalb sich auch ein Anbau in Wasserschutzgebieten anbietet. Der Anbau als Dauerkultur führt zu einer deutlichen Erhöhung des Humusgehaltes im Boden und somit auch zur Wasserspeicherfähigkeit des Bodens. Neben dem Humusaufbau wirkt sich auch der geringere Energieaufwand des Dauerkulturanbaus positiv auf die CO_2-Bilanz aus (Mattes & Ammann, 2015b). Die Nessel ist eine wichtige Futterpflanze für zahlreiche Schmetterlingsarten, darunter Tagpfauenauge, Distelfalter, Kleiner Fuchs, Admiral, Landkärtchen und C-Falter (BUND BKRH, o. J.). Zudem bietet sie Lebensraum auch für diejenigen Insekten an, welche die Brennnesselfresser als Nahrungsgrundlage (Raubmilben, Spinnen) oder als Vermehrungsgrundlage (Schlupfwespen) nutzen (Mattes & Ammann, 2015b).

13.2.3.3 Mögliche Pollen- und Honigerträge

Insbesondere für Bienen bieten nektarproduzierende Blühpflanzen eine wichtige Nahrungsgrundlage, womit sie auch für die Imkerei von erhöhtem Nutzen sind. Dies gilt insbesondere für die Energiepflanzen Raps, Silphie, Sida und Sonnenblumen, die jeweils eine reichliche bis sehr reichliche Nektarproduktion aufweisen. Zu diesen vier Energiepflanzen liegen bereits Erhebungen zum potenziellen Honigertrag pro Hektar vor, die sich, je nach Pflanze, zwischen 5 und 230 kg Honig pro Hektar bewegen. Die Pollen- und Nektarwerte der insektenfreundlichen Energie- und Rohstoffpflanzen mit hohem Ertragspotenzial sind in Tabelle 402 dargestellt.

Tabelle 402: Pollen- und Honigertragspotenzial von blühenden Energiepflanzen und Zwischenfrüchten

Pflanze	Pollenertrag (kg/ha*a)	Honigertrag (kg/ha*a)	Quellen
Raps	90 – 174	40 - 230	von der Ohe & von der Ohe, 1998; Pritsch, 2007, S. 133 zit. n. Moser, D.,2012, S. 10
Sonnenblume	reichlich	5 - 80	Ion, et. al, 2011, zit. n. Moosbeckhofer, et al., 2012, S. 6
Silphie	k. A.	150	N.L. Chrestensen, 2019, S. 7
Sida	k. A.	bis zu 120	Sperr, 2017
Topinambur	mäßig	mäßig	Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen; Deutscher Imkerbund; Apis, 2018
Wildpflanzenmischung	k. A.	k. A.	Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen; Deutscher Imkerbund; Apis, 2018
Fasernessel	reichlich	kein Nektar	Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen; Deutscher Imkerbund; Apis, 2018
Sorghum	reichlich	kein Nektar	Lunenberg, 2017
Flachs	gering	gering	Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen; Deutscher Imkerbund; Apis, 2018
Hanf	reichlich	kein Nektar	Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen; Deutscher Imkerbund; Apis, 2018
Zwischenfrucht Senf	reichlich	190	Crane, 1951
Zwischenfrucht Buchweizen	reichlich	reichlich	Lunenberg, 2017

Quelle: Eigene Darstellung

Raps weist hier zwar das höchste Honigertragspotenzial auf, aber Sida, Silphie und Sonnenblume benötigen keinen chemischen Pflanzenschutz um ihr volles Ertragspotenzial als Energiepflanze zu entfalten. Mit Blick auf den Insektenschutz verbinden sie damit zwei erhebliche Vorteile.

Unter den Zwischenfrüchten, die den Anbau einjähriger Energiepflanzen (v.a. Wintergetreide) ökologisch aufwerten können, wenn sie rechtzeitig zur Blüte kommen, weist vor allem Senf ein beachtliches Nektarertragspotenzial auf. Buchweizen produziert ebenfalls reichlich Nektar und

kann selbst als Biogassubstrat genutzt werden (Lunenberg, 2017).[121] Einen gewissen Wert als Bienenweide haben auch die überwiegend als Rohstoffpflanzen genutzten Fichten. Bienen nutzen hier den sogenannten Fichtenhonigtau: Andere Insekten „scheiden diesen süßen Tau tröpfchenweise aus. Alle Insekten, die diese Tröpfchen produzieren, stechen mit einem speziell geformten Rüssel die Pflanzen an. [...] Der Honigtau auf Blättern und Nadeln wird von der Honigbiene gesammelt. Die anschließende Honigbereitung erfolgt durch die Biene wie beim Nektar. Das Produkt ist der besonders würzige, dunkelbraune Honigtauhonig." (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen; Deutscher Imkerbund; Apis, 2019) Das Verbreitungsgebiet der Fichten wird infolge des Klimawandels jedoch deutlich schrumpfen. Damit entsteht erneut eine Lücke im Nahrungsangebot der Bienen und ein weiterer Grund, weshalb die Nektarproduktion beim Energiepflanzenanbau ein wichtiges Kriterium sein sollte.

13.2.4 Schadstoffeintrag

Der landwirtschaftliche Pflanzenbau kann mit einem erheblichen Schadstoffeintrag in die Umwelt einhergehen. Mineraldünger, Gülle, Gärrückstände aus Biogasanlagen, Biomasseaschen, Bioabfälle und Klärschlämme können neben den erwünschten Nährstoffen in unterschiedlichem Umfang auch unerwünschte Schadstoffe enthalten, wie z. B. Antibiotika-Rückstände oder Schwermetalle. Infolge des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln (PSM) können z. B. unerwünschte PSM-Rückstände im Boden verbleiben oder verlagert werden. Schadstoffeinträge in Gewässer und ins Grundwasser sind eine häufige Folge. Eine Folge des Klimawandels ist wiederum, dass „durch Starkregen immer öfter schädliche Substanzen ausgeschwemmt werden" (LfL Bayern, 2017a S. 39). Bei Anbau und Nutzung von Energiepflanzen zur Biogaserzeugung entstehen große Mengen an Gärresten, mit denen im Anschluss an die Vergärung erneut PSM-Rückstände auf die Anbauflächen gelangen können. Gärreste aus Biogasanlagen (NawaRo, Mitvergärung) sind jedoch deutlich geringer belastet als Komposte (LfL Bayern, 2019a).[122] Im Vergleich der Energiepflanzen zeigt sich, dass der Bedarf an Pflanzenschutzmitteln bei Energiepflanzen der zweiten Generation auch im konventionellen Anbau deutlich geringer ist als bei den Pflanzen der ersten Generation, die in der Regel konventionell angebaut werden. Insbesondere beim Anbau von mehrjährigen Pflanzen der zweiten Energiepflanzengeneration kommen Pflanzenschutzmittel selten oder gar nicht zur Anwendung. Wenn ein Einsatz von PSM erfolgt, dann in der Regel vor der Aussaat bzw. im ersten Jahr, bis die

[121] Für einen möglichst umweltverträglichen Anbau von Zwischenfrüchten ist die Wahl der richtigen Vor- und Folgefrüchte zu beachten. Z. B. kann Buchweizen beim Anbau vor Zuckerrüben (Folgefrucht) Probleme verursachen (Senger, 2016). Gute Vorfrüchte für Buchweizen sind z. B. Kartoffel, Getreide, Mais. Brachflächen sind wegen des Unkrautdrucks ungeeignet (TFZ, 2007).

[122] Eine Ausnahme stellen Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) dar. Insgesamt „wiesen die NawaRo-Gärreste meist deutlich niedrigere Schadstoffgehalte auf (mehrfach unter der Bestimmungsgrenze) als die aus Bioabfall-(Mit)Vergärungs-Anlagen. Der einzige organische Schadstoff, der in den NawaRo-Gärresten in höheren Konzentrationen auftrat, war das Fungizid Pentachlorphenol (Holzschutzmittel)" (LfL Bayern, 2019a).

Pflanze eine ausreichende Konkurrenzstärke erreicht hat. Dies gilt beispielsweise für die durchwachsene Silphie, die im ersten Jahr noch nicht über eine große Durchsetzungskraft verfügt. Miscanthus, Hirschgras, Sida und Rutenhirse benötigen auch im konventionellen Anbau keinerlei chemischen Pflanzenschutz. Auch Topinambur ist eine „sehr robuste Pflanze, es kommen maximal Mehltau, Graufäule und Weißschimmel vor. [...] Topinambur setzt sich gegen alle nicht erwünschten Kräuter durch. Ein Pflegegang im ersten Anbaujahr kann sinnvoll sein. Besonders Wurzelunkräuter wie z.B. Quecke können in der Aufwuchsphase lästig sein“ (Die Topinambur Manufaktur, 2019). Auch die einjährigen Pflanzen Sonnenblume und Hanf erreichen ihren vollen Ertrag ohne chemischen Pflanzenschutz. Dennoch ist im konventionellen Anbau von Sonnenblumen der Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel Insektizide und Herbizide, Intensitätsstufe 2) nicht unüblich (KTBL, 2018). Beim Anbau von Sudangras und Sorghum ist im konventionellen Anbau ein jährlicher Einsatz von Pflanzenschutzmitteln (Herbizid Intensitätsstufe 2) üblich (KTBL, 2018). Im Gegensatz dazu ist ein jährlicher Einsatz von Pflanzenschutzmitteln bei mehrjährigen Energiepflanzen der zweiten Generation auch im konventionellen Anbau in der Regel nicht nötig. Energiepflanzen der ersten Generation können ebenfalls ohne chemischen Pflanzenschutz angebaut werden, liefern dann aber deutlich geringere Erträge, die nicht mehr an die Erträge von Energiepflanzen der zweiten Generation heranreichen.

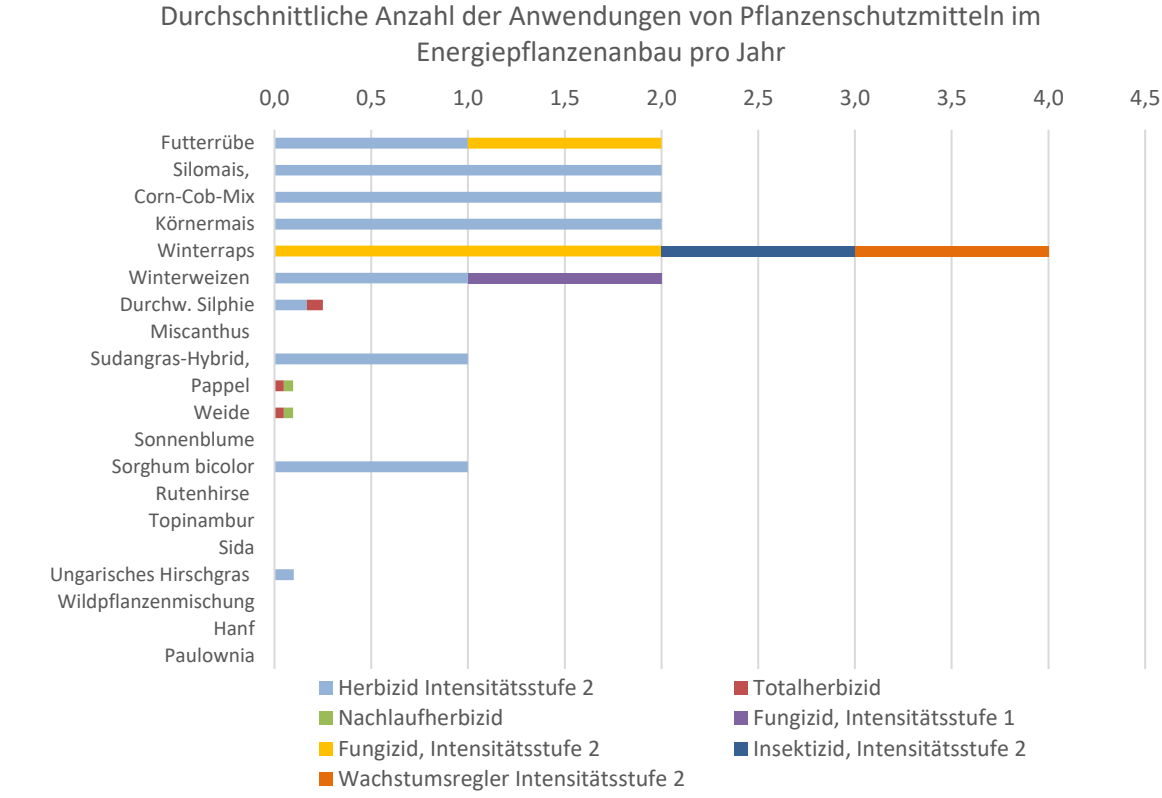
In Tabelle 403 und Abbildung 162 sind die empfohlenen Anwendungen von chemischen Pflanzenschutzmitteln über die gesamte Nutzungsdauer umgerechnet auf das einzelne Jahr dargestellt. Den höchsten Pflegeaufwand bringt der Anbau von Raps mit sich. Im ökologischen Anbau kommen auch beim Anbau dieser Pflanzen keine PSM zum Einsatz, allerdings sind die Brutto-Erträge von Getreide und Rüben, wie bereits dargestellt, um etwa die Hälfte geringer, bei Körnermais, Silomais und Winterraps muss man im Vergleich zum konventionellen Anbau mit Ertragseinbußen von ca. 40 Prozent rechnen.

Tabelle 403: Durchschnittliche Zahl der Anwendungen von Pflanzenschutzmitteln im Energiepflanzenanbau pro Jahr über die gesamte Nutzungsdauer

Kulturpflanze	Herbizid Intensitäts-stufe 2	Total-herbizid	Nachlauf-herbizid	Fungizid, Intensitäts-stufe 1	Fungizid, Intensitäts-stufe 2	Insektizid, Intensitäts-stufe 2	Wachstums-regler Inten-sitätsstufe 2
Energiepflanzen der 1. Generation							
Corn-Cob-Mix	2,000						
Futterrübe	1,000				1,000		
Körnermais	2,000						
Silomais	2,000						
Winterraps					2,000	1,000	1,000
Winterweizen	1,000			1,000			
Ø E-Pflanzen der 1. Generation	**1,333**	**0,000**	**0,000**	**0,167**	**0,500**	**0,167**	**0,167**

Energiepflanzen der 2. Generation							
Durchw. Silphie	0,167	0,083					
Hanf							
Miscanthus							
Pappel		0,048	0,048				
Paulownia		0,048	0,048				
Rutenhirse							
Sida							
Sonnenblume							
Sorghum bicolor	1,000						
Sudangras-Hybrid	1,000						
Topinambur							
Ungar. Hirschgras	0,100						
Weide		0,048	0,048				
Wildpfl.-Mischung							
Ø E-Pflanzen der 2. Generation	**0,162**	**0,013**	**0,007**	**0,000**	**0,000**	**0,000**	**0,000**

Quellen: KTBL, 2018; KTBL, 2012; Haller & Fritz, 2015



Grafik: Eigene Darstellung. Quellen: Eigene Berechnung nach: KTBL, 2018; KTBL, 2012; Haller & Fritz, 2015

Abbildung 162: Durchschnittliche Anzahl der Anwendungen von Pflanzenschutzmitteln im Energiepflanzenanbau pro Jahr über die Nutzungsdauer

Bei den Rohstoffpflanzen zeigt sich mit Blick auf den Bedarf an Pflanzenschutzmaßnahmen ein ähnliches Bild wie bei den Energiepflanzen. Wiesengras, Fasernessel, Lein, Hanf, Leindotter, Miscanthus, Rutenhirse (Switchgrass) und Paulownia kommen nahezu ohne chemischen

Pflanzenschutz aus. Sie bieten vor allem als Rohstoffe für die Herstellung von Papier, Textilien und ölbasierten Produkten interessante Alternativen. Die wesentlich weiter verbreiteten Pflanzen Mais, Weizen, Kartoffel und Zuckerrübe, die vor allem für die Herstellung von Kunststoffen, Stärke und Ethanol genutzt werden, sind dagegen im konventionellen Anbau mit einem deutlich höheren Einsatz von Pflanzenschutzmitteln verbunden. Auch hier ist natürlich ein ökologischer Anbau mit den entsprechend geringeren Erträgen möglich. Somit stellt sich auch unter diesem Aspekt die Frage nach der Nachhaltigkeit von sogenannten Biokunststoffen.

Im Fall der Textilfaserproduktion stellen Fasernessel, Hanf und Lein dagegen gute Alternativen zur bisher dominierenden Baumwolle dar, bei deren konventionellem Anbau erhebliche Mengen an Pflanzenschutzmitteln zum Einsatz kommen.

Tabelle 404: Durchschnittliche Zahl der Anwendungen von Pflanzenschutzmitteln im Rohstoffpflanzenanbau pro Jahr über die gesamte Nutzungsdauer

Kulturpflanze	Herbizid Intensitäts-stufe 2	Total-herbizid	Nachlauf-herbizid	Fungizid, Intensi-tätsstufe 1	Fungizid, Intensi-tätsstufe 2	Insektizid, Intensitäts-stufe 2	Wachstums-regler Inten-sitätsstufe 2
Wiesengras							
Fasernessel							
Öllein							
Faserlein							
Hanf							
Leindotter							
Miscanthus							
Rutenhirse							
Körnermais	1,00			1,00			
Weizen	2,00						
Kartoffel	1,00				1,00	1,00	
Futterrübe	1,00				1,00		
Paulownia		0,05	0,05				
Ø Rohstoff-pflanzen	**0,38**	**0,00**	**0,00**	**0,08**	**0,15**	**0,08**	**0,00**

Quellen: KTBL, 2018; KTBL, 2012; Haller & Fritz, 2015

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Anbau alternativer Energie- und Rohstoffpflanzen auch im konventionellen Anbau mit einem deutlich geringeren Einsatz von Pflanzenschutzmitteln verbunden ist, als der Anbau der etablierten Energie- und Rohstoffpflanzen. Die Anzahl der Anwendungen beim Anbau von Energiepflanzen der zweiten Generation ist, im Durchschnitt der hier betrachteten Pflanzen, um 92 Prozent geringer als beim Anbau von Energiepflanzen der ersten Generation.

Im konventionellen Anbau sind die meisten Energiepflanzen der zweiten Generation sogar mit einem geringeren Bedarf an PSM-Anwendungen verbunden, als die meisten Nahrungspflanzen. Mit Blick auf den Einsatz von Pflanzenschutzmitteln könnte die Nutzung von mehrjährigen

Energiepflanzen der zweiten Generation somit zu einer erheblichen Verbesserung der Gesamtsituation beitragen. Der direkte Vergleich der Durchschnittswerte von Energie- und Rohstoffpflanzen im konventionellen Anbau ist in Abbildung 163 dargestellt.

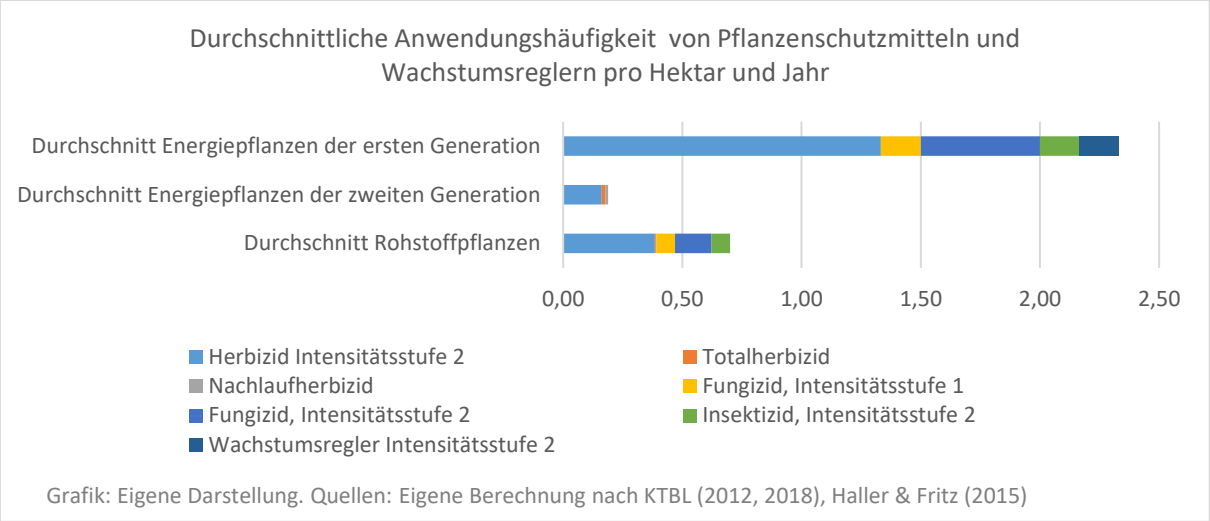


Abbildung 163: Durchschnittliche Anwendungshäufigkeit von Pflanzenschutzmitteln und Wachstumsreglern im konventionellen Anbau von Energie- und Rohstoffpflanzen im Vergleich

13.2.5 Düngemittelaufwand

Wo Landwirtschaft betrieben wird, ist nach Angaben des Umweltbundesamtes „deutschlandweit zu viel Nitrat im Grundwasser“ (Umweltbundesamt, 2018b). Sowohl mit Mineraldüngern als auch mit der Gülle aus Mastställen oder Gärresten aus Biogasanlagen wird das Nitrat in die Böden eingebracht. „Der Anteil, den die Pflanzen nicht verbrauchen und der im Boden nicht durch Denitrifikation abgebaut wird, gelangt als Nitrat in das Grundwasser. 18 Prozent des Grundwassers in Deutschland hält den geltenden Schwellenwert von 50 Milligramm Nitrat je Liter nicht ein“ (Umweltbundesamt, 2018b). Neben dem Grundwasser sind auch viele Gewässer mit zu großen Mengen an Nährstoffen aus der Landwirtschaft belastet. „An fast zwei Drittel aller Messstellen an Flüssen werden zu hohe Phosphor-Konzentrationen beobachtet“ (Umweltbundesamt, 2017 S. 60). Insbesondere, weil Trinkwasser in Deutschland größtenteils aus Grundwasser hergestellt wird, steigt der Bedarf an Technologien, die den Nitrateintrag in die Umwelt reduzieren. Ökologischer Landbau belastet das Grund- und Oberflächenwasser weniger mit Nährstoffen als der konventionelle Landbau. Eine andere Möglichkeit ist die Aufbereitung von Gülle, bei der Stickstoff und Phosphate zurückgewonnen werden. Da Stickstoff von den Pflanzen jedoch für ihr Wachstum benötigt wird, kann auf eine Düngung nicht verzichtet und folglich auch eine gewisse Auswaschung von Nitrat in die Gewässer und das Grundwasser nicht vollständig vermieden werden. Mit zunehmender Starkregenhäufigkeit infolge des Klimawandels kann das Risiko noch zunehmen, dass Nährstoffe schneller ausgewaschen werden, als sie von den Pflanzen aufgenommen werden können. Wasserversorger setzen da-

her zunehmend auf Kooperationen mit der Landwirtschaft und fördern den Umstieg auf Nutzpflanzen mit einem geringeren Bedarf an Dünge- und Pflanzenschutzmitteln. Hierbei bieten Energiepflanzen einen vergleichsweise großen Spielraum, da man, anders als bei der Erzeugung von benötigten Grundnahrungsmitteln, gezielt solche Pflanzen auswählen kann, die den geringsten Bedarf an Dünge- und Pflanzenschutzmitteln haben. Im direkten Vergleich weisen dabei vor allem Energiepflanzen der 2. Generation neben dem deutlich geringeren Bedarf an Pflanzenschutzmitteln auch einen geringeren Bedarf an Düngemitteln auf. Auffällig ist dabei vor allem der wesentlich geringere Bedarf an Stickstoff. Der Düngemittelbedarf der Nutzpflanzen variiert zwar je nach Standort und Nutzung der Pflanze erheblich. Eine Schätzung anhand der durchschnittlichen Bedarfswerte zeigt jedoch eine klare Tendenz. In der Schätzung wurden einzelne Pflanzen mehrfach berücksichtigt, da ihr Bedarf auch von ihrer Verwendung abhängig ist. So fällt z. B. der TM-Ertrag pro Hektar und in der Folge auch der Nährstoffbedarf von Rutenhirse oder Winterweizen bei einer Nutzung als Festbrennstoff höher aus, als bei einer Nutzung als Biogassubstrat. Im Durchschnitt der hier betrachteten Energiepflanzen liegt der Stickstoffbedarf der Pflanzen der zweiten Generation pro Hektar um 36 Prozent unter dem Durchschnittswert der Pflanzen der ersten Generation. Dabei bleibt jede Energiepflanze der zweiten Generation unter dem Stickstoffbedarf von Silomais und Winterraps, die heute den Energiepflanzenanbau dominieren (vgl. Abbildung 164 und Tabelle 405).

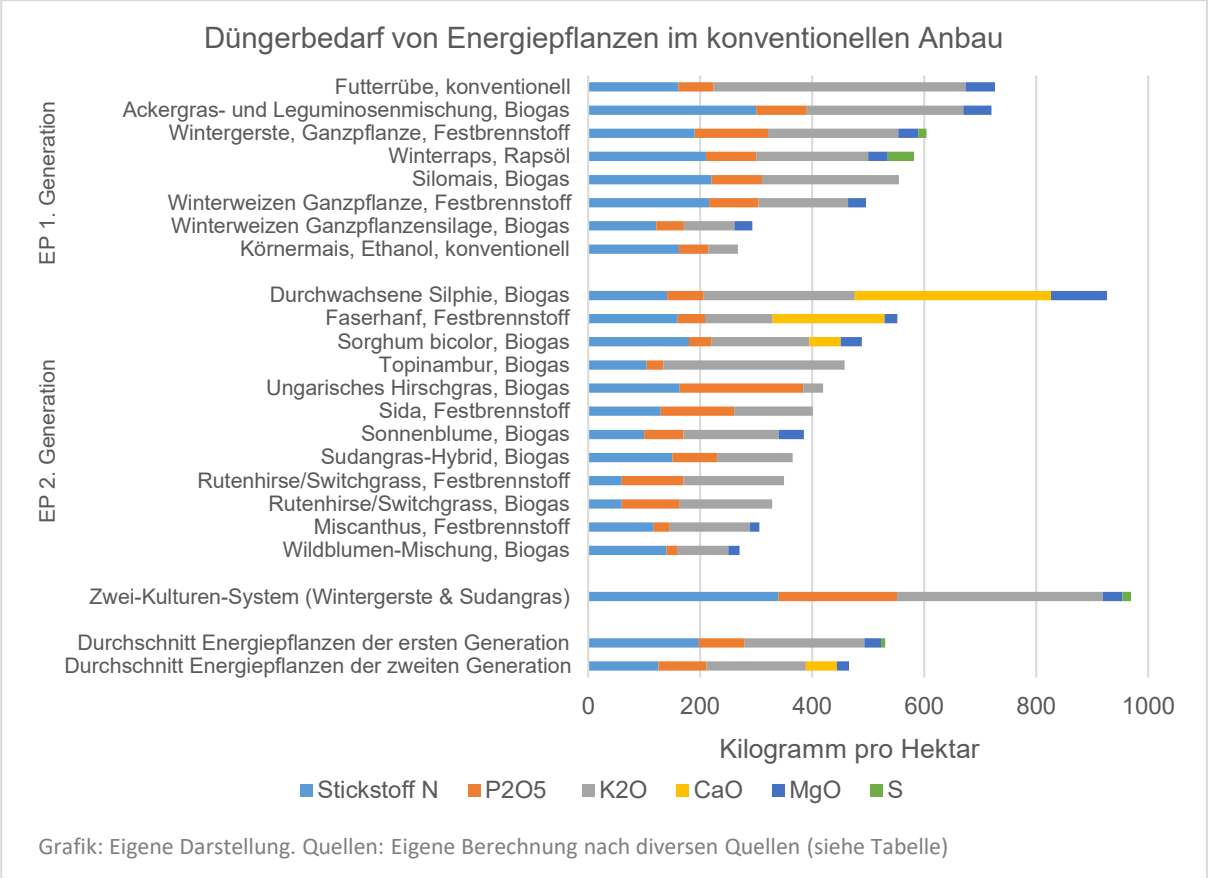


Abbildung 164: Düngerbedarf von Energiepflanzen im konventionellen Anbau

Insbesondere die Rutenhirse (Switchgrass) gilt als „Low-Input-Pflanze“, die nur wenig Pflanzenschutz und geringe Düngung benötigt. Aber auch Sonnenblumen (46 Prozent des Vergleichswerts), Topinambur (47 Prozent), Miscanthus (53 Prozent) und Sida (59 Prozent) benötigen im Vergleich zu Silomais pro Hektar wenig Stickstoff.

Tabelle 405: Düngerbedarf wichtiger Energiepflanzen im konventionellen Anbau (kg/ha*a)

	N	P_2O_5	K_2O	CaO	MgO	S	Quelle
Energiepflanzen der 1. Generation							
Ackergras- und Leguminosenmischung, Biogas	300	90	280		50		(1)
Futterrübe, konventionell	161	63	450		53		(2)
Körnermais, Ethanol, konventionell	162	53	53				(5)
Silomais, Biogas	220	90	245				(1)
Wintergerste, Ganzpflanze, Festbrennstoff	190	131	233		35	15	(4)
Winterraps, Rapsöl	210	90	200		35	47	(2)
Winterweizen Ganzpflanze, Festbrennstoff	216	88	160		32		(2)
Winterweizen Ganzpflanzensilage, Biogas	122	50	90		32		(2)
Energiepflanzen der 2. Generation							
Miscanthus, Festbrennstoff	117	28	143		17		(3)
Rutenhirse/Switchgrass, Biogas	60	102	166				(3)
Rutenhirse/Switchgrass, Festbrennstoff	60	110	179				(3)
Sudangras-Hybrid, Biogas	150	80	135				(1)
Sonnenblume, Biogas	100	70	170		45		(1, 9)
Sida, Festbrennstoff	130	131	140				(3)
Wildblumen-Mischung, Biogas	140	20	90		20		(3)
Ungarisches Hirschgras, Biogas	164	220	36				(3)
Topinambur, Biogas	104	30	324				(6)
Sorghum bicolor, Biogas	180	40	175	56	38		(7)
Faserhanf, Festbrennstoff	160	48	121	200	23		(8)
Durchwachsene Silphie, Biogas	141	65	270	350	100		(3)
Zwei-Kulturen-System							
Wintergerste & Sudangras	340	211	368	0	35	15	(1, 4)
Durchschnittswerte							
Energiepflanzen der 1. Generation	198	82	214	0	30	8	
Energiepflanzen der 2. Generation	126	86	177	55	22	0	
Relation 2. Generation zu 1. Generation	64%	105%	83%		75%	0%	

Quellen: (1) (LWK Niedersachsen, 2010); (2) Raiffeisen, 2017; (3) Haller & Fritz, 2015 ; (4) (BED, 2017b) (5) KTBL, 2018; (6) Vetter, et al., 2009; (7) (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2008) (8) (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2016b) (9) BED, 2017

Ähnlich gering ist der Bedarf der wichtigen Rohstoffpflanzen für stoffliche Nutzungen. Hier weisen Öllein, Rutenhirse, Hanf in Kombinationsnutzung, Faserlein und Miscanthus die geringsten Bedarfe an Stickstoff auf. Würden die hier betrachteten Rohstoffpflanzen zu gleichen Flächenanteilen genutzt, läge ihr Stickstoffbedarf bei ca. 70 Prozent des Stickstoffbedarfs, den die verglichenen Energiepflanzen der ersten Generation aufweisen.

Ein Umstieg auf diese Pflanzen würde daher hinsichtlich des Nitrateintrags ebenfalls zu einer Entlastung der Gewässer und des Grundwassers führen.

Tabelle 406: Düngebedarf wichtiger Rohstoffpflanzen im konventionellen Anbau (kg/ha*a)

Rohstoffpflanze	Stickstoff N	P_2O_5	K_2O	CaO	MgO	S	Quelle
Faserlein	100	69	102	0	23		(1)
Fasernessel	200	69	211	0	0		(2)
Hanf als Zwischenfrucht, Strohnutzung	53	16	40	67	8		(3)
Hanf, Kombinationsnutzung	80	24	60	100	12		(3)
Hanf, Strohnutzung	160	48	121	200	23		(3)
Öllein	35	83	163	0	48		(4)
Kartoffel	130	68	280		48		(5)
Körnermais	162	53	53	0	0	0	(6)
Leindotter	150	35	90	25	13		(7)
Miscanthus	117	28	143	0	17		(8)
Rutenhirse (Switchgrass)	60	110	179				(8)
Winterweizen	216	88	160		32		(5)
Winterraps	210	90	200		35	47	(5)
Zuckerrübe	161	63	450		53		(5)
Durchschnitt Rohstoffpflanzen*	**137**	**64**	**170**	**25**	**23**	**4**	

* Durchschnitt ohne Hanf im Zwischenfruchtanbau
Quellen: (1) (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2009a) (2) (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2009b); (3) (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2016b); (4) (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, 2016a); (5) Raiffeisen, 2017; (6) KTBL, 2018; (7) (BED, 2017a); (8) Haller & Fritz, 2015;

13.2.6 Störungen

Infolge des Ackerbaus und der Grünlandnutzung kommt es jährlich zu mehreren Störungen, die vor allem den Boden und die Wildtiere betreffen. Für Wildtiere geht die größte Gefahr von der Mahd aus: „Vor allem junge Hasen und Rehe ducken sich bei Gefahr und kauern regungslos am Boden, was ihnen beim Mähen zum Verhängnis wird. Die Maschinen zerstören Nester und Gelege von Vögeln, die auf Wiesen brüten. [...] Schätzungen zufolge sterben auf diese Weise jährlich mindestens 500.000 Wildtiere“ (Deutscher Tierschutzbund, 2019a).

Für den Ackerboden ist grundsätzlich jedes Befahren mit schwerem Gerät eine Belastung, die mit einer ungewünschten Verdichtung einhergehen kann. Bei der konventionellen Bodenbearbeitung (wendend) wird der Boden jährlich mit dem Pflug auf Krumentiefe gelockert. Dies stellt

den größten direkten Eingriff in den Boden mit dem höchsten Erosionsrisiko dar. Das Pflügen fördert zudem den ungewünschten Humusabbau, reduziert aber den Bedarf an Pflanzenschutzmaßnahmen. Alternativ kann die nicht wendende Bodenbearbeitung angewendet werden, was „im Vergleich zur konventionellen Bodenbearbeitung Verluste an Boden und Wasser vermindert“ (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, 2015). Das Erosionsrisiko und die Humusverluste sind deutlich geringer als bei der wendenden Bodenbearbeitung. Noch geringer fallen beide bei der Direktsaat aus. Sie belässt viel organische Substanz an der Oberfläche und weist einen weiter verbesserten Wasserhaushalt auf (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, 2015). Die Direktsaat ist im konventionellen Landbau aber in der Regel mit dem Einsatz von Totalherbiziden verbunden (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, 2015). Mehrjährige, widerstandsfähige und anspruchslose Pflanzen reduzieren die Häufigkeit dieser Bodenbearbeitungen erheblich. Bei einer Nutzung von Hirschgras, Durchwachsener Silphie, Sida oder Miscanthus ist eine wendende Bodenbearbeitung, je nach Pflanze, über die Nutzungsdauer von 10 bis über 20 Jahren ausgeschlossen und das Erosionsrisiko deutlich reduziert. Bei der Pflanzung von Miscanthus, Topinambur und Durchwachsener Silphie kommt es nur zu Beginn einmal zu erheblichen Störungen durch das Pflügen und das Pflanzen. Über eine Nutzungsdauer von 10 bis 20 Jahren sind diese Belastungen aber insgesamt sehr gering. Die Zahl der Schnitte bzw. Ernten ist allerdings auch bei Energiepflanzen der zweiten Generation nicht geringer - lediglich bei Kurzumtriebsplantagen erfolgt die Ernte nicht jährlich, sondern alle 2 bis 5 Jahre. Bei thermisch genutzten Beständen von Sida, Rutenhirse, Hirschgras und Miscanthus kann aber, im Vergleich zur Biogaspflanzennutzung, ein günstigerer Erntezeitpunkt vor der Brut- und Aufzuchtphase der meisten Wildtiere gewählt werden. Insgesamt ist die Zahl der erheblichen Störungen pro Jahr (ohne Düngung und Pflanzenschutzanwendungen) beim Anbau von Energiepflanzen der zweiten Generation um 47 Prozent geringer als beim Anbau von Energiepflanzen der ersten Generation und um 34 Prozent geringer als beim Anbau wichtiger Rohstoffpflanzen. Die jeweilige Störungshäufigkeit beim Anbau der verschiedenen Pflanzengruppen ist in Abbildung 165 dargestellt.

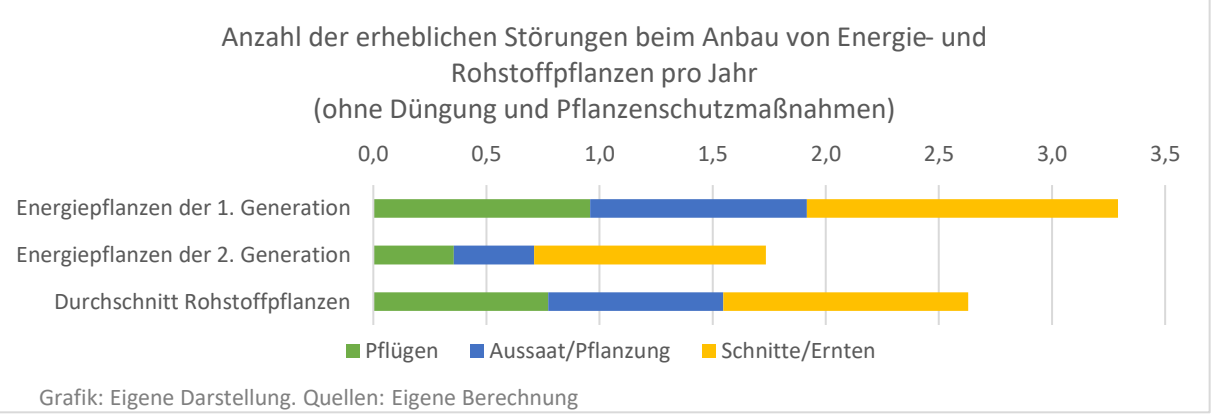


Abbildung 165: Anzahl der erheblichen Störungen beim Anbau von Energie- und Rohstoffpflanzen pro Jahr (ohne Düngung und Pflanzenschutzmaßnahmen)

Die Anzahl der erheblichen Störungen beim Anbau der einzelnen Energiepflanzen ist in Tabelle 407 dargestellt.

Tabelle 407: Anzahl der erheblichen Störungen beim Anbau von Energiepflanzen pro Jahr (ohne Düngung und Pflanzenschutzmaßnahmen)

	Nutzungs-dauer (Jahre)	**Pflügen**	**Aussaat/ Pflanzung**	**Schnitte/ Ernten**	**Summe der Störungen**
Ackergras- und Leguminosenmischung, Biogas	1,0 - 2,0	0,67	0,67	4,00	5,33
Futterrübe	1,0	1,00	1,00	1,00	3,00
Silomais	1,0	1,00	1,00	1,00	3,00
Corn-Cob-Mix	1,0	1,00	1,00	1,00	3,00
Körnermais	1,0	1,00	1,00	1,00	3,00
Winterraps	1,0	1,00	1,00	1,00	3,00
Winterweizen, Biogasnutzung	1,0	1,00	1,00	1,00	3,00
Winterweizen, thermische Nutzung	1,0	1,00	1,00	1,00	3,00
Durchwachsene Silphie	12,0	0,08	0,08	0,92	1,08
Sida, Biogasnutzung	20,0	0,05	0,05	1,50	1,60
Sida, thermische Nutzung	20,0	0,05	0,05	1,00	1,10
Topinambur, Krautnutzung	4,0	0,25	0,25	1,00	1,50
Topinambur, Knollennutzung	1,0	1,00	1,00	1,00	3,00
Sonnenblume	1,0	1,00	1,00	1,00	3,00
Wildpflanzen-Mischung	12,0	0,08	0,08	1,00	1,17
Miscanthus	21,0	0,05	0,05	1,00	1,10
Ungarisches Hirschgras, Biogasnutzung	10,0	0,10	0,10	2,00	2,20
Ungarisches Hirschgras, thermische Nutzung	10,0	0,10	0,10	1,00	1,20
Rutenhirse, Biogasnutzung	10,0	0,10	0,10	2,00	2,20
Rutenhirse, thermische Nutzung	10,0	0,10	0,10	1,00	1,20
Sudangras-Hybrid,	1,0	1,00	1,00	1,00	3,00
Sorghum bicolor	1,0	1,00	1,00	1,00	3,00
Hanf	1,0	1,00	1,00	1,00	3,00
Pappel (zweijähriger Umtrieb)	25,0	0,04	0,04	0,50	0,58
Weide (vierjähriger Umtrieb)	25,0	0,04	0,04	0,25	0,33
Energiepflanzen der 1. Generation	**1,1**	**0,96**	**0,96**	**1,38**	**3,29**
Energiepflanzen der 2. Generation	**10,8**	**0,36**	**0,36**	**1,02**	**1,74**

Quelle: Eigene Zusammenstellung

Die Anzahl der erheblichen Störungen beim Anbau der einzelnen Rohstoffpflanzen ist in Tabelle 408 dargestellt. Mit rund 2,6 Störungen pro Jahr ist sie um 51 Prozent höher als bei Energiepflanzen der 2. Generation. Der vorteilhafte Anteil mehrjähriger Pflanzen ist dagegen deutlich geringer.

Tabelle 408: Anzahl der erheblichen Störungen beim Anbau von Rohstoffpflanzen pro Jahr (ohne Düngung und Pflanzenschutzmaßnahmen)

	Nutzungs-dauer (a)	Pflügen	Aussaat/ Pflanzung	Schnitte/ Ernten	Summe der Störungen
Hanf	1,0	1,00	1,00	1,00	3,00
Fasernessel	5,0 – 10,0	0,13	0,13	2,00	2,27
Faserlein	1,0	1,00	1,00	1,00	3,00
Öllein	1,0	1,00	1,00	1,00	3,00
Leindotter	1,0	1,00	1,00	1,00	3,00
Miscanthus	21,0	0,05	0,05	1,00	1,10
Rutenhirse (Switchgrass)	10,0	0,10	0,10	1,00	1,20
Weizen	1,0	1,00	1,00	1,00	3,00
Kartoffel	1,0	1,00	1,00	1,00	3,00
Winterraps	1,0	1,00	1,00	1,00	3,00
Zuckerrübe	1,0	1,00	1,00	1,00	3,00
Mais	1,0	1,00	1,00	1,00	3,00
Durchschnitt Rohstoffpflanzen	**3,96**	**0,77**	0,77	**1,08**	**2,63**

Quelle: Eigene Zusammenstellung

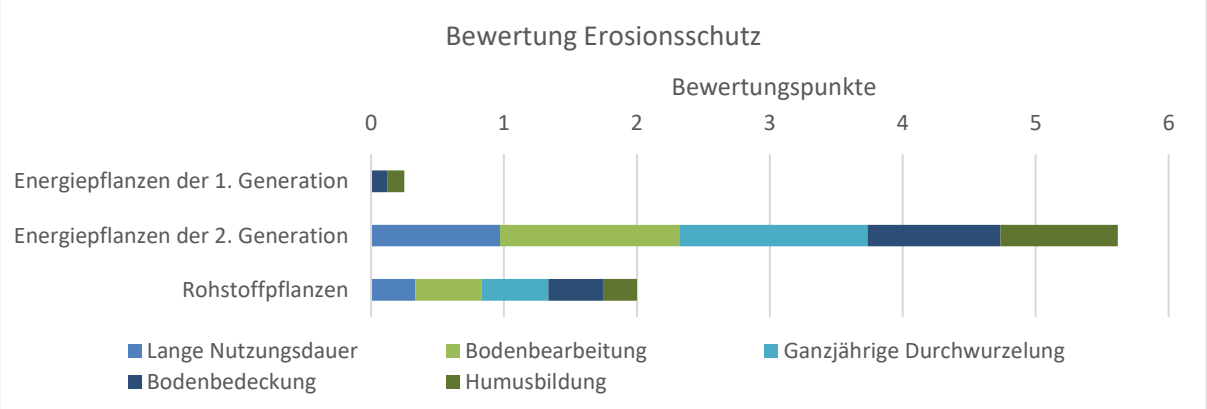
13.2.7 Erosionsschutz

Nach Einschätzung des Umweltbundesamtes muss in Deutschland ab dem Jahr 2040 ganzjährig mit einer starken Zunahme extremer Niederschläge gerechnet werden (Umweltbundesamt, 2011). Dies wird voraussichtlich zu häufigeren Überschwemmungen und einer verstärkten Erosion landwirtschaftlicher Böden führen. Das Risiko der Bodenerosion durch Wind und Wasser hängt wesentlich von der Bodenbearbeitung und der Bodenbedeckung ab. Ein hoher Humusgehalt und eine ganzjährige Durchwurzelung des Bodens schützen den Boden ebenfalls vor Erosion. Besonders für den Erosionsschutz geeignet sind daher mehrjährige Nutzpflanzen mit einer langen Nutzungsdauer, die wenig Bodenbearbeitung erfordern, zwischen Austrieb und Ernte über eine lange Standzeit den Boden bedecken (Schutz vor Austrocknung und Winderosion) und im Idealfall aktiv zur Humusbildung beitragen. Die Auswahl an wirtschaftlich interessanten Nutzpflanzen, die drei oder mehr dieser Kriterien erfüllen, ist eng begrenzt. Kulturarten mit hohem Bodenabtragspotenzial sind Kartoffel, Mais, Zuckerrübe und Winterweizen (Umweltbundesamt, 2016a). Sie sind zugleich auch die Pflanzen mit der schlechtesten Humusbilanz: „Je größer der Anteil an Getreide und vor allem an Mais und Hackfrüchten in der Fruchtfolge ist, umso negativer der Saldo. Weil bei diesen Fruchtarten die eingebrachten Mengen an Ernte- und Wurzelresten nicht ausreichen, um den Humusabbau zu kompensieren werden sie auch als "Humuszehrer" bezeichnet“ (Kolbe,

2016). Sogenannte Humusmehrer sind z. B. Ackergras, Leguminosen, Gemenge und Körnerleguminosen (Kolbe, 2016). Auch mehrjährige Pflanzen, wie Miscanthus oder Durchwachsene Silphie fördern grundsätzlich den Humusaufbau durch die reduzierte Bodenbearbeitung. Bereits während der Nutzungsphase aktiv zur Humusbildung beitragen können vor allem thermisch genutzte Sida hermaphrodita und schnellwachsende Gehölze, deren Blätter nach dem Abwurf durch die Pflanzen stets auf der Fläche verbleiben.

Betrachtet man die fünf vor Erosion schützenden Faktoren als Auswahlkriterien, so erfüllen Energiepflanzen der 2. Generation diese in deutlich höherem Maße als die Energiepflanzen der 1. Generation. Neun der dreizehn hier betrachteten Energiepflanzen erfüllen mindestens vier der fünf Kriterien. Vergibt man jeweils einen Punkt für ein mittleres Potenzial und zwei Punkte für ein hohes Potenzial, eines der Kriterien für Erosionsschutz zu erfüllen, schneiden sie um ein Vielfaches besser ab, als Energiepflanzen der 1. Generation, von denen kaum eine Pflanze in mehr als einem Fall ein mittleres oder hohes Potenzial aufweist, eines der Kriterien zu erfüllen. Kartoffel, Mais, Zuckerrübe und Winterweizen sind jeweils Humuszehrer mit relativ hohem Bodenabtragspotenzial. Lediglich Ackergras- und Leguminosenmischungen, die auch mehrjährig nutzbar sind, weisen im Vergleich relativ gute Werte auf.

Wesentlich besser als Energiepflanzen der ersten Generation schneiden im Durchschnitt die Rohstoffpflanzen ab, die für die stoffliche Nutzung verwendbar sind. Dies liegt jedoch vor allem an den mehrjährigen Nutzpflanzen Miscanthus, Fasernessel und Rutenhirse. Im Durchschnitt weisen Rohstoffpflanzen für die stoffliche Nutzung jedoch ein deutlich geringeres Erosionsschutzpotenzial auf als Energiepflanzen der 2. Generation. Der direkte Vergleich ist in Abbildung 166 dargestellt. Energiepflanzen der 1. Generation erreichen hier im Durchschnitt der fünf Kriterien lediglich einen Wert von 0,1 Punkten. Energiepflanzen der zweiten Generation erreichen dagegen durchschnittlich einen Wert von 1,1 und weisen damit ein mittleres Schutzpotenzial auf. Rohstoffpflanzen weisen mit durchschnittlich 0,3 Punkten lediglich ein geringes Schutzpotenzial auf.



Grafik: Eigene Darstellung. Quellen: Eigene Berechnung. Bewertung: siehe Text und Tabelle.

Abbildung 166: Bewertung des Erosionsschutzpotenzials von Energie- und Rohstoffpflanzen

In Tabelle 409 ist die Bewertung des Erosionsschutzpotenzials der einzelnen Energiepflanzen der ersten Generation dargestellt, in Tabelle 410 die Bewertung des Erosionsschutzpotenzials der Energiepflanzen der zweiten Generation. Ausschließlich Pflanzen der 2. Generation kommen in der Bewertung auf Gesamtwerte deutlich über 1,0.

Tabelle 409: Bewertung des Erosionsschutzpotenzials von Energiepflanzen der 1. Generation

Energiepflanze	Nutzungs-dauer	Bodenbe-arbeitung	Ganzjährige Durchwurze-lung	Bodenbe-deckung	Humus-bildung	Durch-schnitt
Ackergras- und Leguminosen	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,4
Futterrübe	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Silomais	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Corn-Cob-Mix	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Körnermais	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Winterraps	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Winterweizen, Biogasnutzung	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Winterweizen, therm. Nutzung	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ø Energiepfl. 1. Generation	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0,1**	**0,1**	**0,1**

Punktevergabe: 0 = gering, 1 = mittel, 2 = gut. Für die Nutzungsdauer wurde 1 Punkt je 10 Jahre Nutzungsdauer vergeben.
Quelle: Eigene Zusammenstellung

Dabei schneiden Pflanzen, die sich sowohl für eine Biogasnutzung als auch für eine thermische Nutzung eignen, im Falle der thermischen Nutzung besser ab. Der Erosionsschutz ist, neben dem Bedarf an Pflanzenschutz einer der Umweltaspekte, bei dem Energiepflanzen der zweiten Generation überdurchschnittlich gut abschneiden. Sida und Weide verbinden einen hohen Erosionsschutz mit einem hohen Wert als Lebensraum für Wildtiere, Bienen und andere bestäubende Insekten.

Der Anbau von Rohstoffpflanzen ist mit Blick auf den Erosionsschutz nur in wenigen Fällen vorteilhaft. Der Anteil der Pflanzen mit hohem Abtragspotenzial, wie Kartoffel, Mais, Zuckerrübe und Winterweizen, ist relativ hoch. Bei diesen Pflanzen handelt es sich vor allem um jene Pflanzen, die bisher die dominierenden Rohstoffe für die Herstellung von Biokunststoffen liefern. Pflanzen für die Produktion von Textilfasern und Zellstoffen für die Papierindustrie weisen im Durchschnitt bessere Werte auf.

Tabelle 410: Bewertung des Erosionsschutzpotenzials von Energiepflanzen der 2. Generation

Energiepflanze	Nutzungs-dauer	Bodenbe-arbeitung	Ganzjährige Durchwurze-lung	Bodenbe-deckung	Humus-bildung	Durch-schnitt
Durchwachsene Silphie	1,0	2,0	2,0	1,0	1,0	1,4
Sida, Biogasnutzung	2,0	2,0	2,0	1,0	1,0	1,6
Sida, thermische Nutzung	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Topinambur, Krautnutzung	0,5	2,0	2,0	0,0	1,0	1,1
Topinambur, Knollennutzung	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sonnenblume	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Wildpflanzen-Mischung	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0	1,2
Miscanthus	2,0	2,0	2,0	2,0	1,0	1,8
Hirschgras, Biogasnutzung	1,0	2,0	2,0	1,0	1,0	1,4
Hirschgras, therm. Nutzung	1,0	2,0	2,0	2,0	1,0	1,6
Rutenhirse, Biogasnutzung	1,0	2,0	2,0	1,0	1,0	1,4
Rutenhirse, therm. Nutzung	1,0	2,0	2,0	2,0	1,0	1,6
Sudangras-Hybrid,	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Sorghum bicolor	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Hanf	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Pappel (zweijähriger Umtrieb)	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Weide (vierjähriger Umtrieb)	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Ø Energiepfl. 2. Generation	**1,0**	**1,4**	**1,4**	**1,0**	**0,9**	**1,1**

Punktevergabe: 0 = gering, 1 = mittel, 2 = gut. Für die Nutzungsdauer wurden 0,5 Punkte je 5 Jahre Nutzungsdauer vergeben.
Quelle: Eigene Bewertung

Tabelle 411: Bewertung des Erosionsschutzpotenzials von Rohstoffpflanzen

Energiepflanze	Nutzungs-dauer	Bodenbe-arbeitung	Ganzjährige Durchwurze-lung	Bodenbe-deckung	Humus-bildung	Durch-schnitt
Hanf	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
Faserlein	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
Miscanthus	2,0	2,0	2,0	2,0	1,0	1,80
Leindotter	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
Öllein	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
Rutenhirse (Switchgrass)	1,0	2,0	2,0	2,0	1,0	1,60
Fasernessel	1,0	2,0	2,0	1,0	1,0	1,40
Weizen	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
Kartoffel	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
Winterraps	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
Zuckerrübe	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
Mais	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
Ø Rohstoffpflanzen	**0,33**	**0,50**	**0,50**	**0,42**	**0,25**	**2,00**

Punktevergabe: 0 = gering, 1 = mittel, 2 = gut. Für die Nutzungsdauer wurde 1 Punkt je 10 Jahre Nutzungsdauer vergeben.
Quelle: Eigene Bewertung

13.2.8 Wasserhaushalt

13.2.8.1 Einflüsse des Energie- und Rohstoffpflanzenanbaus

Die Landwirtschaft ist, wie bereits dargestellt, eine der wichtigsten Quellen für den Eintrag von Schadstoffen (Pflanzenschutzmittelrückstände, Hormone usw.) in Grundwasser und Gewässer. Zudem verursacht die Landwirtschaft eine ungewünschte Anreicherung von Nährstoffen in den Gewässern. Insgesamt gelten rund 92 Prozent der Flüsse und Seen in Deutschland als übermäßig belastet (BUND, 2018a). In einem guten ökologischen Zustand sind nur rund 7 Prozent der Flüsse und 26 Prozent der Seen (Umweltbundesamt, 2017 S. 16). Zudem verursachen Starkregen- und Hochwasserereignisse mit zunehmender Häufigkeit erhebliche Schäden. Da gleichzeitig das Risiko von Dürren zunimmt, kommen auf die Wasserwirtschaft mehrere neue Herausforderungen zu. Die Landwirtschaft, die von den steigenden Risiken besonders betroffen ist, ist selbst aber auch ein Akteur mit erheblichem Einfluss auf den Landschaftswasserhaushalt, die Regenwasserrückhaltung und das Grundwasserneubildungspotenzial.

Bewässerungslandbau spielte in Deutschland bisher nur eine untergeordnete Rolle, da für Deutschland ganzjährige Niederschläge charakteristisch waren. Deshalb waren im Jahr 2011 nur 3,3 Prozent der gesamten Landwirtschaftsfläche Deutschlands mit Bewässerungsanlagen

ausgestattet und der Anteil der landwirtschaftlichen Wasserentnahmen am Gesamtwasserverbrauch war demzufolge sehr gering (Umweltbundesamt, 2011 S. 29). Nach Einschätzung des Umweltbundesamtes könnte es jedoch infolge des Klimawandels künftig zu Konflikten zwischen Landwirtschaft und Wasserversorgern kommen[123]. Die Niederschläge verteilen sich ungleichmäßiger, Starkregen und Dürren werden häufiger, die Verdunstung wird verstärkt. So kann es von Jahr zu Jahr zu erheblichen Schwankungen der Niederschläge führen. Beispielsweise fielen im Jahr 2018 weniger als 60 Prozent des sonst üblichen Regens, die Niederschlagsmenge betrug lediglich 130 Liter pro Quadratmeter (Statista, 2019f). Starkregenfälle, die gerade nach längeren Phasen mit hohen Temperaturen wahrscheinlicher sind, bringen im Anschluss an eine längere Trockenheit hinsichtlich der Grundwasserneubildung wenig Ausgleich, da das meiste Wasser oberflächig direkt in die Vorfluter abfließt, wenn in kurzer Zeit mehr Regen fällt als der trockene Boden aufnehmen kann.

Dennoch werden zumindest für Baden-Württemberg bezüglich der Grundwasserneubildung bis 2050 keine größeren Veränderungen erwartet: „Die Grundwasserneubildung wird sich bis 2050 insgesamt nur wenig ändern. Aufgrund geänderter Niederschlagsverteilung nimmt die innerjährliche Schwankungsbreite mit niedrigeren Grundwasserständen im Sommer und höheren Grundwasserständen im Winter zu“ (LUBW, 2019). In anderen Teilen Deutschlands stellt sich die Situation jedoch anders dar. Schon heute ist der Niederschlag in Deutschland sehr ungleich verteilt. „Regionen wie Brandenburg und Sachsen-Anhalt sind besonders niederschlagsarm. Andere Regionen, z. B im Alpenvorland, sind sehr niederschlagsreich“ (Umweltbundesamt, 2017 S. 75). Künftig könnten sich Unterschiede innerhalb Deutschlands noch vergrößern.

Der Wasserverbrauch der Landwirtschaft und ihr Einfluss auf den oberflächigen Regenwasserabfluss und die Grundwasserneubildung hängen erheblich von den gegebenen klimatischen Bedingungen einer Region ab. Die Landwirtschaft kann ihren Wasserbedarf aber auch durch die Wahl geeigneter Anbaukulturen und deren Bewässerungsbedarf beeinflussen und, in einem gewissen Rahmen an die regionalen und lokalen Gegebenheiten anpassen (Umweltbundesamt, 2011 S. 29).

Entscheidende Faktoren für den Einfluss der Kulturpflanzen sind die sogenannte Interzeption (das vorübergehende Speichern von Niederschlag an Pflanzenoberflächen, von wo aus es verdunsten oder durch Abtropfen oder Ablaufen zum Boden gelangen kann) und die Verdunstung, die sich aus der Evaporation und der Transpiration der Pflanzen zusammensetzt. Wasser, das weder von den Pflanzen aufgefangen werden noch im Boden versickern kann, gelangt als Oberflächenabfluss unmittelbar über die Bodenoberfläche in die sogenannten Vorfluter

[123] Wasserknappheit: Umweltbundesamt warnt vor Streit ums Trinkwasser. ZEIT Online, 05. Juli 2019. https://www.zeit.de/wirtschaft/2019-07/trinkwasser-knappheit-sommer-trockenheit-umweltbundesamt. Abgerufen am 05. Juli 2019.

(Bäche, Flüsse). Die Versickerung ist, vereinfachend dargestellt, die Differenz zwischen dem Niederschlag und dem kapillaren Aufstieg (bei Grundwasseranschluss) einerseits und der Verdunstung (Evaporation und Transpiration) und dem Oberflächenabfluss andererseits. Nur die Versickerung trägt letztlich zur Grundwasserneubildung bei.

Interzeption, Evaporation und Transpiration variieren von Pflanze zu Pflanze jeweils erheblich. Der Transpirationskoeffizient (l H_2O/kg TM) gibt Auskunft darüber, wie viel Wasser eine Nutzpflanze für die Produktion von einem Kilogramm Trockenmasse transpiriert. „Bei allen Pflanzen gilt: Zwischen Transpiration (Wasserverbrauch) und Stoffproduktion (Trockenmassebildung) besteht ein linearer Zusammenhang“ (Grocholl, 2018). Der Transpirationskoeffizient ist jedoch keine Konstante, sondern ist abhängig von Wetter und Stressbedingungen (Loiskandl, o. J.). Bei den ackerbaulich genutzten Energiepflanzen, zu denen Daten zum jeweiligen mittleren Transpirationskoeffizienten vorliegen, reicht die Spanne von ca. 190 bis 700 Liter Wasser pro Kilogramm Trockenmasse.

Der Anteil der Interzeption hängt vor allem von der Struktur der Blätter und Blattoberfläche der jeweiligen Pflanze ab. „Infolge ihrer großen benetzbaren Oberfläche mit bis zu 27 Quadratmetern Blatt- oder Nadeloberfläche pro Quadratmeter Bestandesfläche weisen Waldbestände von allen Vegetationstypen die größten Interzeptionsverluste auf“ (Zimmermann, et al., 2008). Bei mehrjährigen Stauden wie Sida und Silphie dürften die Interzeptionsverluste aufgrund der großen Blattfläche wiederum höher sein als bei mehrjährigen Gräsern, deren vertikal ausgerichtete Halme das Wasser tendenziell eher in Richtung Boden leiten. Bisher liegen zu den Energiepflanzen der zweiten Generation jedoch keine ausreichenden Daten vor, um den Einfluss der jeweiligen Interzeption auf den Oberflächenabfluss und das Grundwasserneubildungspotenzial vergleichen zu können. Allerdings verbrauchen Kurzumtriebsplantagen und Miscanthus nach Gebel et al. (2011) in der Summe aller Faktoren „mehr Wasser als einjährige Ackerkulturen, sodass die Grundwasserneubildung bei ihrem Anbau zurückgeht. Beim großflächigen Anbau derartiger Dauerkulturen wird eine Beeinträchtigung des Landschaftswasserhaushaltes befürchtet, insbesondere in Gebieten mit Jahresniederschlagssummen unter 500 mm“ (Gebel, et al., 2011).

Über den Nutzen oder die Schadwirkung von Energie- und Rohstoffpflanzen bezüglich des Wasserhaushaltes lassen sich jedoch keine allgemeingültigen Aussagen treffen. Vielmehr ist dies von der jeweiligen Situation am Einsatzort abhängig. Wo nicht die Grundwasserneubildung, sondern der Schutz vor Hochwasser im Vordergrund steht, kann ein hoher Wasserverbrauch durch Interzeption und Transpiration sehr wünschenswert sein. So ergeben sich z. B. positive Effekte des KUP-Anbaus „im Sinne einer Reduzierung von Oberflächenabflüssen und damit einer Verbesserung der Wasserrückhaltung“ (Gebel, et al., 2011 S. 95). Bezüglich der

Effekte aller übrigen Energiepflanzen der zweiten Generation besteht jedoch noch Forschungsbedarf. Denn es ist zu erwarten, dass der Einfluss schnellwachsender Gräsern auf den Wasserhaushalt sich deutlich vom Einfluss schnellwachsender Baumarten unterscheidet.

13.2.8.2 Wasserbedarf von Energiepflanzen

Ein direkter Vergleich einer größeren Zahl verschiedener Energie- und Rohstoffpflanzen ist bisher nur bezüglich der durchschnittlichen Transpiration möglich. Die niedrigsten Transpirationskoeffizienten weisen, wie in Tabelle 413 dargestellt, Sudangras mit ca. 189 l H_2O/kg TM und Miscanthus mit 204 l H_2O/kg TM auf. Die höchsten Werte weist unter den ackerbaulich kultivierten Energiepflanzen die Ackergras- Leguminosenmischung mit etwa 700 l H_2O/kg TM auf. Umgerechnet auf den durchschnittlichen Hektarertrag transpiriert Sudangras somit nur rund 2,3 Kubikmeter Wasser pro Hektar und Jahr. Die Transpiration von Miscanthus liegt mit 3,7 m³/ha deutlich höher, jedoch immer noch unterhalb der Werte von Futterrüben, Mais, Winterweizen, Wintergerste und Winterraps und somit unterhalb aller wichtigen Energiepflanzen der ersten Generation. Nur Sudangras und die schnellwachsenden Gehölze (Weiden und Pappeln) transpirieren pro Hektarertrag weniger Wasser als Miscanthus, während Sorghum einen ähnlichen Wert wie Miscanthus aufweist. Nicht eingerechnet ist in dieser Bilanz allerdings die ungenutzte Blattmasse der schnellwachsenden Gehölze. Die Transpirationskoeffizienten (Mittelwert und Spanne) der einzelnen Energie und Rohstoffpflanzen sind in Tabelle 412 dargestellt. Die Angaben in der Literatur, auf denen die hier angegebenen Werte basieren, sind im Anhang II (Tabelle 490) im Einzelnen dargestellt.

Tabelle 412: Transpirationskoeffizienten (Mittelwert und Spanne) von Energie und Rohstoffpflanzen (l H2O/kg TM)

Nutzpflanze	Mittelwert*	Spanne	Quellen
Dauergrünland	750	750	(11)
Durchwachsene Silphie**	403	310 - 540	(1)
Faserlein	700	700	(7)
Fasernessel	k. A.	k. A.	-
Hanf	400	300 - 500	(2)
Kartoffel	430	210 - 624	(7, 4, 11, 12)
Mais	286	200 - 400	(4, 5, 6, 7, 8, 10, 11)
Miscanthus	204	171 - 250	(4, 5, 11)
Öllein	700	700	(7)
Pappel	302	302	(5)
Paulownia	k. A.	k. A.	-
Roggen	413	k. A.	(7, 12)
Rutenhirse (Switchgrass)	k. A.	k. A.	-
Sida	k. A.	k. A.	-
Sonnenblume	602	300 - 686	(5, 12)
Sorghum bicolor	244	200 - 300	(5, 7, 12)
Sudangras-Hybrid	189	128 - 300	(5, 12)
Topinambur	500	400 - 600	(11, 12)
Ungarisches Hirschgras	k. A.	k. A.	-
Weide	301	301	(5)
Wintergerste.	416	220 - 529	(3, 4, 7)
Winterraps	496	332 - 700	(4, 5, 7, 12)
Winterweizen	441	250 - 550	(4, 8, 7, 10)
Zuckerrübe	375	200 - 450	(4 8 9 10 11 12)

Die Angaben der verschiedenen Quellen sind im Anhang II in Tabelle 490 im Einzelnen dargestellt.
* Angaben des Landtags Baden-Württemberg wurden nach der angegebenen Quellenanzahl gewichtet
** Nach Dauber et al. (2015) liegt der Wasserbedarf pro kg TM der Silphie um ca. 54 Prozent über dem von Mais.
Quellen: (1) Dauber, et al., 2015; (2) Graf, et al., 2005; (3) Hofhansel, 2007; (4) Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg LTZ, 2010; (5) Landtag Baden-Württemberg, 2014; (6) Liebhard, 2012; (7) Loiskandl, o. J.; (8) Mauser, 2014; (9) MLUV Brandenburg , 2009; (10) Schaller & Weigel, 2007; (11) Stolzenburg, 2009; (12) Klimazwei, 2017

In Tabelle 413 sind Transpirationspotenziale pro Hektarertrag dargestellt, die auf Basis der mittleren Hektarerträge und der mittleren Transpirationskoeffizienten berechnet wurden.

Tabelle 413: Durchschnittliche Transpiration von Energiepflanzen je Kilogramm TM und je Hektarertrag nach Verwendung.

Nutzpflanze	Mittlerer Durchschnitts-ertrag in t TM/ha	Transpirations-koeffizient in l H_2O/kg TM, Mittelwert	Mittlere Trans-pirationspoten-ziale in l H_2O/ha
1. Generation			
Ackergras- und Leguminosenmischung	13,5	700	9.450.000
Dauergrünland, konventionell	10,0	750	7.507.500
Futterrübe	20,8	375	7.793.067
Silomais	17,5	286	5.010.833
Silomais, ökologisch	15,8	286	4.509.750
Körnermais	19,0	286	5.444.342
Körnermais, ökologisch	14,9	286	4.266.367
Winterraps	9,2	496	4.561.078
Winterweizen Ganzpflanze, Festbrennstoff	13,2	441	5.799.389
Winterweizen Ganzpflanzensilage, Biogas	12,3	441	5.399.188
Wintergerste, Ganzpflanze, Festbrennstoff	12,0	416	5.012.653
Wintergerste, Ganzpflanzensilage, Biogas	11,2	416	4.666.743
2. Generation			
Durchwachsene Silphie	17,0	403	6.844.166
Miscanthus	18,0	204	3.676.500
Sudangras-Hybrid	12,2	189	2.296.350
Pappel (zweijähriger Umtrieb)	10,0	302	3.020.000
Weide (vierjähriger Umtrieb)	7,0	301	2.107.000
Sonnenblume, Biogas	12,5	602	7.525.000
Sorghum bicolor	15,4	244	3.752.467
Topinambur	25,0	500	12.500.000
Faserhanf	13,0	400	5.200.000
Zwei-Kulturen-Nutzungssystem			
Wintergerste & Sudangras	24,2	302	7.309.003

Quellen: (Dauber, et al., 2015); (Hofhansel, 2007); (Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg LTZ, 2010); (Landtag Baden-Württemberg, 2014); (Liebhard, 2012); (Loiskandl, o. J.); (KTBL, 2012); (Mauser, 2014); (MLUV Brandenburg , 2009); (Schaller, et al., 2007); (Stolzenburg, 2009); (Klimazwei, 2017); (Vetter, et al., 2009);

In diesem Vergleich von Energiepflanzen und ihrer Verwendungen liegt der durchschnittliche Transpirationskoeffizient von Energiepflanzen der zweiten Generation je Kilogramm Trockenmasse um 18 Prozent und die potenzielle Transpiration je Hektarertrag um 12 Prozent unterhalb der Durchschnittswerte von Energiepflanzen der ersten Generation. Eine Kombination von Wintergerste und Sudangras in einem Zwei-Kulturen-Nutzungssystem senkt den Transpirationskoeffizienten pro Kilogramm Trockenmasse deutlich. Die Kombination zeigt aber auch den potenziell erheblichen Unterschied des Wasserbedarfs pro Hektar, der sich zwischen der

Kombination zweier einjähriger Energiepflanzen und der Nutzung von mehrjährigen Energiepflanzen ergibt. Folglich müssen im Vergleich der Wasserbilanz auch sonstige Zwischenfrüchte von einjährigen Energiepflanzen berücksichtigt werden.

Ohne Berücksichtigung von Zwischenfrüchten liegen die Energiepflanzen der zweiten Generation im Vergleich der Nutzungen um 0,7 m²/ha*a unter dem durchschnittlichen Transpirationspotenzial der Energiepflanzen erster Generation.

Tabelle 414: Vergleich der durchschnittlichen Transpiration von Energiepflanzen erster und zweiter Generation im konventionellen Anbau

Pflanzengruppe	Mittlerer Durchschnittsertrag in t TM/ha	Transpirationskoeffizient in l H_2O/kg TM, Mittelwert	Mittlere Transpirationspotenziale in l H_2O/ha
Energiepflanzen der 1. Generation (9 Nutzungen)	14,30	429	5.904.144
Energiepflanzen der 2. Generation (9 Nutzungen)	14,46	349	5.213.498
2. Generation im Vergleich zur 1. Generation	101%	82%	88%

Quelle: Eigene Berechnung auf Basis der in Tabelle 413 dargestellten Daten.

Im Vergleich der Energiepflanzennutzungen sticht Topinambur mit einem weit überdurchschnittlichen Transpirationswert deutlich hervor. Bei einem Verzicht auf Topinambur reduziert sich die Transpiration von Energiepflanzen der zweiten Generation pro Hektar noch einmal deutlich. Insgesamt liegt sie dann um 27 Prozent unter dem Wert der Energiepflanzen erster Generation, was ca. 1,6 m³/ha*a entspricht.

Tabelle 415: Vergleich der durchschnittlichen Transpiration von Energiepflanzen erster und zweiter Generation im konventionellen Anbau unter Verzicht auf Topinambur

Pflanzengruppe	Mittlerer Durchschnittsertrag in t TM/ha	Transpirationskoeffizient in l H_2O/kg TM, Mittelwert	Mittlere Transpirationspotenziale in l H_2O/ha
Energiepflanzen der 1. Generation (9 Nutzungen)	14,30	429	5.904.144
Energiepflanzen der 2. Generation (9 Nutzungen)	13,14	331	4.302.685
2. Generation im Vergleich zur 1. Generation	92%	77%	73%

Quelle: Eigene Berechnung auf Basis der in Tabelle 413 dargestellten Daten.

13.2.8.3 Wassereffizienz von Energiepflanzen

Da der Energieertrag wesentlich von der Verwendung der im Energiepflanzenanbau produzierten Biomasse abhängt, sind die mittleren Interzeptions- und Transpirationswerte in Litern pro Hektar alleine nicht ausreichend, um die Wassereffizienz von Energiepflanzen zu beurteilen. Auf Basis des mittleren Wasserbedarfs pro Hektar und des Energieertrags abzüglich des Energieaufwandes des Anbaus (ohne Konversion) wurde daher abgeschätzt, wie viel Wasser die Energiepflanzen (ohne Berücksichtigung der Interzeption) je Kilowattstunde Energieertrag über die Transpiration verbrauchen. Die Ergebnisse der Schätzung sind in Tabelle 416 dargestellt. Deutlich wird anhand dieser Berechnung, dass Kraftwärmekopplung und Koppelproduktnutzung (z. B energetische Strohnutzung) nicht nur für die Flächeneffizienz, sondern auch für die Wassereffizienz von entscheidender Bedeutung sind. Insgesamt zeigt sich eine erhebliche Spanne von 49 bis 651 Litern Wasser pro Kilowattstunde. Den geringsten Wasserverbrauch pro Kilowattstunde erzielt dabei die thermische Nutzung von Miscanthus, während die Nutzung der Durchwachsenen Silphie in Biogasanlagen den Höchstwert aufweist, wenn diese ohne Nutzung der Abwärme erfolgt.

Bemerkenswert ist zudem, dass der konventionelle Anbau von Mais nach dieser Berechnung weniger Wasser pro Kilowattstunde verbraucht als der ökologische Maisanbau. Es ist anzunehmen, dass dies auch auf andere Kulturpflanzen zutrifft.

Tabelle 416: Durchschnittliche Transpiration pro Kilowattstunde Netto-Energieertrag

Energiepflanze, Nutzung, Wirtschaftsweise	Mittlere Transpiration in l H_2O/ha	Netto-Energie-ertrag in kWh/ha*	Mittlere Trans-piration in l H_2O pro kWh
Energiepflanzen 1. Generation			
Ackergras- und Leguminosenmischung, Biogas, konv.	9.450.000	33.754	280
Dauergrünland, Biogas, konventionell	7.507.500	21.953	342
Futterrübe, Biogas, konventionell	7.793.067	40.098	194
Futterrübe, Ethanol, konventionell	7.793.067	30.869	252
Silomais, Biogas, konventionell	5.010.833	45.904	109
Silomais, Biogas, ökologisch	4.509.750	32.243	140
Silomais, Biogas, nur Strom, konventionell	5.010.833	14.844	338
Silomais, Biogas, nur Strom, ökologisch	4.509.750	10.501	429
Körnermais, Ethanol, konventionell	5.444.342	20.830	261
Körnermais, Ethanol, ökologisch	4.266.367	13.430	318
Körnermais, Ethanol & Biogas, konventionell	5.444.342	55.310	98
Körnermais, Ethanol & Biogas, ökologisch	4.266.367	33.942	126
Winterraps, Rapsöl, konventionell	4.561.078	8.607	530
Winterraps, Rapsöl & Festbrennstoff (Stroh), konv.	4.561.078	40.387	113
Winterweizen Ganzpflanze, Festbrennstoff (Stroh), konv.	5.799.389	53.916	108
Winterweizen Ganzpflanzensilage, Biogas, konv.	5.399.188	34.923	155
Winterweizen, Ethanol (Korn), konv.	5.799.389	11.732	494
Winterweizen, Ethanol (Korn) & Festbrennstoff, konv.	5.799.389	45.416	128
Wintergerste, Ganzpflanze, Festbrennstoff, konv.	5.012.653	49.315	102
Wintergerste, Ganzpflanzensilage, Biogas, konv.	4.666.743	26.481	176
Wintergerste; Ethanol (Korn), konv.	5.012.653	9.206	544
Wintergerste, Ethanol (Korn), Festbrennstoff (Stroh), konv.	5.012.653	37.276	134
Energiepflanzen 2. Generation			
Durchwachsene Silphie, Biogas, KWK, konventionell	6.844.166	28.396	241
Durchwachsene Silphie, Biogas, nur Strom, konventionell	6.844.166	10.507	651
Miscanthus, Festbrennstoff, konventionell	3.676.500	75.738	49
Sudangras-Hybrid, Biogas, KWK, konventionell	2.296.350	28.257	81
Sudangras-Hybrid, Biogas, nur Strom, konventionell	2.296.350	10.455	220
Pappel (zweijähriger Umtrieb), konventionell	3.020.000	49.070	62
Weide (vierjähriger Umtrieb), konventionell	2.107.000	24.654	85
Sonnenblume, Biogas, konventionell	7.525.000	20.605	365
Sorghum bicolor, Biogas, konventionell	3.752.467	38.855	97
Topinambur, Biogas, konventionell	12.500.000	52.922	236
Wildblumen-Mischung (mehrjährige Stauden)	k. A.	k. A.	k. A.
Faserhanf, Festbrennstoff, konventionell	5.200.000	36.753	141
Zwei-Kulturen-Nutzungssystem			
Wintergerste & Sudangras, konventionell	7.309.003	77.466	94

* Ohne Abzug des Energieaufwandes der Konversion
Quelle: Eigene Berechnung nach zuvor genannten Quellen (vgl. Tabelle 412 und Tabelle 413)

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die thermische Nutzung von Energiepflanzen sowohl bei Energiepflanzen der ersten Generation als auch bei Energiepflanzen der zweiten Generation die höchste Wassereffizienz aufweist. Dies gilt jedoch nur, wenn die Effekte der Ausbringung des Gärsubstrates der Biogaspflanzen unberücksichtigt bleiben. Es ist anzunehmen, dass die Gärsubstratausbringung sich zumindest infolge des möglichen Beitrags zum Humusaufbau positiv auf den Wasserhaushalt der landwirtschaftlichen Nutzflächen auswirkt. Während die thermisch genutzten Energiepflanzen der zweiten Generation eine bessere Wassereffizienz aufweisen als die thermisch genutzten Pflanzen der ersten Generation, ist das Verhältnis bei den Biogaspflanzen umgekehrt. Selbst bei einem Verzicht auf Topinambur, die einen deutlich überdurchschnittlichen Wasserbedarf aufweist, ist der Wasserverbrauch der Biogaspflanzen der ersten Generation pro Kilowattstunde um 14 Prozent geringer. Unter Berücksichtigung von Topinambur beträgt die Differenz 17 Prozent.

Tabelle 417: Wasserbedarf von Energiepflanzen pro Kilowattstunde im Vergleich

Energiepflanzengruppe und Nutzung	Mittlere Transpiration in l H_2O/ha	Netto-Energieertrag in kWh/ha*	Mittlere Transpiration in l H_2O pro kWh
Ø Energiepflanzen 1. Generation für Biogasnutzung (KWK)**	6.294.029	39.412	169
Ø Energiepflanzen 1. Generation für Ethanolproduktion***	5.717.869	36.876	160
Ø Energiepflanzen 1. Generation für thermische Nutzung	5.406.021	51.616	105
Ø Energiepflanzen 2. Generation für Biogasnutzung (KWK)**	5.104.496	29.028	196
Ø Energiepflanzen 2. Generation für thermische Nutzung****	4.438.250	56.246	95

* Ohne Abzug des Energieaufwandes der Konversion.
** Es wurden nur die Nutzungsvarianten mit Kraftwärmekopplung ausgewählt. Topinambur wurde aufgrund des deutlich überdurchschnittlichen Wasserverbrauchs nicht berücksichtigt.
*** Es wurden nur die Nutzungsvarianten mit energetischer Verwertung des Strohs ausgewählt.
**** Es wurden nur Miscanthus und Faserhanf berücksichtigt, da die Interzeption bei Pappeln und Weiden im Vergleich eine deutlich größere Rolle spielen dürfte als bei Stauden und Gräsern.
Quelle: Eigene Berechnung

13.2.8.4 Wasserbedarf von Rohstoffpflanzen

Wie im Fall der Energiepflanzen liegen bisher nicht für alle Rohstoffpflanzen Daten zum Wasserbedarf vor. Man kann jedoch davon ausgehen, dass sowohl die Fasernessel als auch die Rutenhirse im Vergleich zu anderen Rohstoffpflanzen eine gute Wassereffizienz aufweisen. So trägt die Fasernessel z. B. durch einen beachtlichen Humusaufbau zu einer Verbesserung der Wasserspeicherfähigkeit des Bodens bei (Mattes & Ammann, 2015b).

Der Transpirationskoeffizient der Rohstoffpflanzen liegt im Durchschnitt um ein Drittel über dem Durchschnittswert von Energiepflanzen der zweiten Generation. Pro Hektar transpirieren sie jedoch mit 5,2 m³/a ungefähr die gleiche Menge Wasser wie die Energiepflanzen der zweiten Generation und 11 Prozent weniger als die Energiepflanzen der ersten Generation. Die

Transpirationskoeffizienten und die zu erwartende Transpiration pro Hektar sind, soweit bekannt, in Tabelle 418 dargestellt.

Tabelle 418: Wasserbedarf von Rohstoffpflanzen

Rohstoffpflanze	Mittlerer Durchschnittsertrag in t TM/ha	Transpirationskoeffizient in l H_2O/kg TM, Mittelwert	Mittlerer Wasserbedarf in l H_2O/ha
Fasernessel	7,0	k. A.	k. A.
Öllein	6,0	700	4.200.000
Faserlein	8,0	700	5.600.000
Hanf	10,0	400	4.000.000
Hanf als Zwischenfrucht	2,5	400	1.000.000
Miscanthus	18,0	204	3.676.500
Wiesengras	6,0	700	4.200.000
Rutenhirse (Switchgrass)	13,5	k. A.	k. A.
Winterweizen	13,2	441	5.799.389
Mais	17,5	286	5.010.833
Kartoffel	15,8	430	6.790.050
Zuckerrübe	20,9	375	7.830.533
Leindotter	4,5	k. A.	k. A.
Ø Rohstoffpflanzen	**11,7**	**471**	**5.234.145**

Quellen: (Graf, et al., 2005); (Hofhansel, 2007); (Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg LTZ, 2010); (Landtag Baden-Württemberg, 2014); (Liebhard, 2012); (Loiskandl, o. J.); (KTBL, 2012); (Mauser, 2014); (MLUV Brandenburg , 2009); (Schaller, et al., 2007); (Stolzenburg, 2009); (Vetter, et al., 2009);

13.2.8.5 Zusammenfassung

Energiepflanzen der zweiten Generation erhöhen die Vielfalt der Energiepflanzen deutlich. Damit bieten sich wesentlich mehr Möglichkeiten, für unterschiedliche Standorte und Anforderungen geeignete Kombinationen von Energiepflanzen zu finden. Gleiches lässt sich über Nutzpflanzen für die Erzeugung alternativer Rohstoffe (z. B. Hanf, Fasernessel, Lein, Miscanthus und Rutenhirse) sagen. Durch ihr höheres Speichervermögen können mehrjährige Energie- und Rohstoffpflanzen wie die Nesseln zudem die Nährstoffauswaschung reduzieren, weshalb sich auch für einen Anbau in Wasserschutzgebieten anbieten. Der Anbau vieler Dauerkulturen führt zu einer deutlichen Erhöhung des Humusgehaltes im Boden, wodurch auch die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens verbessert wird.

Die Vermutung, dass insbesondere die mehrjährigen Energiepflanzen der zweiten Generation den Wasserhaushalt unter veränderten klimatischen Rahmenbedingungen aufgrund eines erhöhten Wasserbedarfs grundsätzlich negativ beeinflussen könnten, wurde angesichts der großen Vielfalt ihrer Eigenschaften nicht bestätigt.

Allerdings besteht hinsichtlich des Einflusses auf den Landschaftswasserhaushalt und das Grundwasserneubildungspotenzial noch erheblicher Forschungsbedarf. Dies betrifft insbesondere die Interzeption. Auch liegen zur Transpiration mehrerer Energiepflanzen der zweiten Generation bisher noch keine Daten vor, wie z. B. zu den Pflanzen Rutenhirse, Sida, Ungarisches Hirschgras und Paulownia.

13.2.9 Treibhausgasemissionen

13.2.9.1 Relevanz und Datengrundlage

Die Ökobilanz von Energie aus Biomasse ist im Allgemeinen noch von großen Unsicherheiten geprägt, sodass in diesem Bereich noch erheblicher Forschungsbedarf gesehen wird (FNR, 2019). Dies betrifft im Besonderen auch die Klimabilanz der Produktion:

> „Viele ökonomische Szenarien zum Klimaschutz behandeln Bioenergie als "CO2-neutral": Bei der Verbrennung wird so viel CO2 freigesetzt, wie zuvor in der Wachstumsphase aus der Luft gebunden wurde. Diese Aspekte wurden in vielen Studien untersucht. Dabei hat sich die Minderung der Emissionen immer wieder bestätigt, auch wenn die Höhe der Minderung aufgrund verschiedenster Rahmenbedingungen unterschiedlich ausfallen kann. Da nur Emissionen entstehen, die zeitnah durch Biomasse gebunden wurden und werden, entstehen zusätzliche Emissionen nur durch den Produktionsprozess.“ (FNR, 2019).

Die Gesamtemissionen des Produktionsprozesses bis zur Bereitstellung eines Energieträgers für die Nutzung durch den Endverbraucher setzen sich aus den Emissionen zusammen, die durch den Anbau (Rohstoffproduktion), den Transport und die Verarbeitung entstehen. Je nachdem, ob eine Pflanze, die sich für alle Nutzungen eignet, als Festbrennstoff, als Biogassubstrat oder als Rohstoff für die Flüssigbrennstoffproduktion verwendet wird, fallen bereits die Emissionen der Rohstoffproduktion unterschiedlich aus. Gleiches gilt in noch höherem Maße für den Transport und die Verarbeitung.

Daher können die Emissionen, die bei der Nutzung einer Energiepflanze pro Kilowattstunde bzw. pro Hektar verursacht werden, je nach Nutzungspfad erheblich variieren. In der Regel sind die durch den Ersatz von fossilen Energieträgern durch einheimische Biomasse vermiedenen Treibhausgasemissionen größer als die Emissionen, die bei der Produktion regionaler biogener Energieträger verursacht werden. Kommt es allerdings durch den Anbau von Energiepflanzen direkt oder indirekt zu Landnutzungsänderungen (wie z. B. zu Grünlandumbruch oder Waldrodung), so ist die Klimabilanz in vielen Fällen negativ. Wenn indirekt Landnutzungsänderungen (indirect Land Use Change) verursacht werden, gilt es, den sogenannten iLUC-Faktor zu berücksichtigen, der die THG-Emissionen integriert, die durch die verursachten Landnutzungsänderungen freigesetzt werden.

Des Weiteren verursacht der Transport von biogenen Energieträgern unter Umständen derart große Mengen an Treibhausgasen, dass eine Nutzung nur innerhalb eines gewissen Radius sinnvoll sein kann. Wie bereits dargestellt, mangelt es bisher jedoch an verlässlichen Daten zu den Treibhausgasemissionen, die bei der Produktion und Bereitstellung biogener Energieträger entstehen. Dies gilt insbesondere für den Anbau und die Verarbeitung von Energiepflanzen der zweiten Generation. Treibhausgasbilanzen, die Anbau, Transport und Verarbeitung umfassen, liegen bisher fast ausschließlich für verschiedene Nutzungspfade von Energiepflanzen der ersten Generation vor. Die besten Datengrundlagen liegen zu Mais, Raps, Zuckerrübe, Weizen und Holz/KUP vor. Des Weiteren wurden Nutzungen von Sonnenblumen und Soja bilanziert. Energiepflanzen der zweiten Generation betreffend besteht hingegen insgesamt noch großer Forschungsbedarf. Für Miscanthus und Silphie liegen zumindest teilweise Daten zur Klimabilanz vor. Aufgrund der großen Heterogenität der vorliegenden Daten und ihrer Grundlagen wird im Folgenden nur ein Überblick über die Größenordnung der produktionsbedingten Emissionen und der potenziellen Emissionsminderungen gegeben.

13.2.9.2 Anbaubedingte Treibhausgasemissionen

Bei einem Vergleich des Anbaus von Energiepflanzen im Oberrheintal zeigten sich große Unterschiede zwischen einjährigen und mehrjährigen Energiepflanzen. Während der Anbau von Mais 3,77 t CO_2-Äq./ha und der Anbau von Triticale 4,07 t CO_2-Äq./ha verursacht, fallen die Werte von Miscanthus mit 1,32 t CO_2-Äq./ha und Weiden mit 0,69 t CO_2-Äq./ha deutlich geringer aus (Müller-Sämann, et al., 2010). Da Miscanthus und Weiden keine „Humuszehrer“ sind und vergleichsweise wenig Düngung benötigen, ließe sich zudem ein großer Teil der anbaubedingten Emissionen vermeiden, indem auch bei der Herstellung der Düngemittel und bei der Feldbearbeitung fossile Energieträger durch erneuerbare Energien ersetzt werden. Nach Hölscher et al. (2007) ist Miscanthus der Dauerwiese und der Salix aufgrund des höheren Einsparpotenzials vorzuziehen (Hölscher, et al., 2007 S. 33).

Tabelle 419: Anbaubedingte Treibhausgasemissionen unterschiedlicher Bioenergieträger im Oberrheintal (Hölscher et al. 2007)

Art der Biomasse	Treibhauspotenzial (kg CO_2 Äq./ha)
Silomais für Biogas	3.770
Triticale für Biogas	4.072
Miscanthus für Feuerung	1.320
Weide (KUP) für Feuerung	679
Dauerwiese für Biogas	1.169

Quelle: Hölscher et al. 2007 zit. n. Müller-Sämann & Hölscher, 2010, S. 08

Die in der weiteren Literatur angegebenen anbaubedingten Treibhausgasemissionen diverser Energiepflanzennutzungen unterscheiden sich zum Teil erheblich. Nicht immer ist dabei ersichtlich, ob Koppel- bzw. Nebenprodukte berücksichtigt wurden oder welche Energieträger beim Anbau der Pflanzen zum Einsatz kamen. Schwierig zu vergleichen sind deshalb insbesondere Klimabilanzen von Pflanzennutzungen, bei denen nicht die ganze Pflanze einheitlich verwertet wird, sondern einzelne oder mehrere Teile der Pflanze nicht oder auf unterschiedlichen Nutzungspfaden verwertet werden. Dies trifft vor allem auf Raps und Weizen zu, für deren Stroh und Nebenprodukte der Öl- bzw. Ethanolproduktion es zahlreiche unterschiedliche Verwendungsmöglichkeiten gibt. In der Literatur werden zudem bei der Berechnung der Klimabilanzen unterschiedliche Energieaufwendungen berücksichtigt. So geben Knoblauch et al. (2009) einen Energieaufwand des Weizenanbaus für die Bioethanolproduktion von 8,96 GJ/ha an (Knoblauch, et al., 2009 S. 31). Dieser Wert erscheint sehr niedrig, denn er entspricht in der Größenordnung den Angaben des KTBL zum Energieaufwand von Weizenganzpflanzensilage für die Biogasproduktion (10,5 GJ/ha), während der Energieaufwand des Weizenanbaus zur Ethanolproduktion nach Angaben des KTBL mit 21.674 MJ/ha (nicht wendend) bzw. 22.040 MJ/ha (wendend) deutlich höher liegt (KTBL, 2019).

Zu bedenken ist auch, dass in vielen Bilanzen das beim Ethanolweizenanbau anfallende Stroh nicht enthalten ist, was direkte Vergleiche der Klimabilanzen erschwert. Eine thermische Nutzung des Strohs wäre mit einem zusätzlichen Energieaufwand beim Anbau verbunden, aber auch mit einem erheblichen potenziellen Energieertrag, der bei einer vollständigen Nutzung des Strohertrags bis zu 33.684 kWh/ha betragen kann (KTBL, 2012 S. 50)[124] und somit erheblichen Einfluss auf die Klimabilanzen haben kann. Nach Thrän et al. können 27 bis 43 Prozent des theoretischen Strohpotenzials genutzt werden (Thrän, et al., 2016 S. 294). Knoblauch et al. empfehlen wiederum eine energetische Nutzung von nicht mehr als „30 % des Strohaufkommens im Verfahren Verbrennung“ (Knoblauch, et al., 2009 S. 34), um die Gefahr der Humuszehrung zu vermeiden. Diese Beispiele zeigen, dass der Energieaufwand und der Energieertrag sehr unterschiedlich ausfallen können, je nachdem, welche Anbauverfahren, Koppelprodukte bzw. Reststoffnutzungen und Nutzungsanteile des Strohs angenommen werden. Infolgedessen fallen auch die jeweiligen Klimabilanzen des Anbaus unterschiedlich aus. Insgesamt scheint mit Blick auf die Klimabilanzen noch weiterer Forschungsbedarf zu bestehen. Dabei erscheint es sinnvoll, deutlich mehr Nutzungsvarianten als bisher zu vergleichen und dabei mehr Vergleichbarkeit durch mehr Einheitlichkeit herzustellen, beispielsweise bei der Berücksichtigung möglicher Koppelprodukte.

[124] Zum Vergleich: Bei der Produktion von Korn und Stroh für eine thermische Nutzung liegt der Energiebedarf pro Hektar inklusive Pressen und Abtransportieren der Strohballen bei 28.627 MJ/ha (nicht wendend) bzw. 28.993 MJ/ha (wendend), was rund 7.953 bis. 8.054 kWh/ha entspricht (KTBL, 2019).

13.2.9.2.1 Treibstoffe

Knoblauch et al. (2009) beziffern die anbaubedingten Emissionen der Weizenethanolproduktion laut der „Leitlinie für Biogas-Weizen“ auf 1.315 CO_2-Äq./ha (Knoblauch, et al., 2009 S. 31). Legt man allerdings den deutlich höheren Energieaufwand des Weizenanbaus für die Ethanolproduktion nach KTBL (2019) zugrunde, dürften die Emissionen sicherlich höher ausfallen, als von Knoblauch et al. angegeben. Eine Überprüfung dieser Annahme war jedoch nicht möglich, da weder das KTBL noch Knoblauch et al. den Energieaufwand des Anbaus nach Energieträgern differenziert angeben. Für Rapsöl und Rapsdiesel werden von Knoblauch et al. 1.520 kg CO_2-Äq./ha angegeben. In einer ähnlichen Größenordnung bewegen sich die Emissionen für die Gewinnung von Ethanol aus Zuckerrüben mit 1.626 kg CO_2-Äq./ha, die auf Basis von Angaben der FNR (2015, S. 32) und des KTBL (2012, S. 117) errechnet wurden. Die THG-Emissionen pro Kilowattstunde bewegen sich zwischen 43 und 110 g CO_2/kWh (vgl. Tabelle 420).

Tabelle 420: Anbaubedingte CO_2-Emissionen wichtiger Treibstoffe

Art der Biomasse	Energieertrag in kWh/ha	THG in g CO_2/kWh	THG in kg CO_2/ha
Rapsöl	2) 13.780	5) 110	2) 1.520
Raps-Biodiesel	2) 16.361	5) 93	2) 1.520
Weizen-Ethanol	3) 15.833	5) 83	3) 1.315
Zuckerrüben-Ethanol	4) 37.634	1) 43	5) 1.626

Quellen: (1) FNR, 2015, S.32; (2) Knoblauch et al., 2009, S. 28; (3) Knoblauch et al., 2009, S. 31; (4) KTBL, 2012, S. 117; (5) Eigene Berechnung auf Basis der jeweiligen beiden in der Literatur angegebenen Werte

13.2.9.2.2 Brennstoffe für die thermische Nutzung

Für die Produktion von Brennstoffen, die einer thermischen Nutzung zugeführt werden sollen, kommen vor allem schnellwachsende Gehölze (Weiden, Pappeln, Paulownia), Miscanthus, Sida und Getreide infrage. Wenn die gesamte Pflanze für diesen Zweck genutzt wird, liegen die Emissionen pro Kilowattstunde im Falle von Miscanthus bei 17 g CO_2/kWh und im Falle des Weidenanbaus bei 27 g CO_2/kWh (Müller-Sämann & Hölscher, 2010; KTBL, 2012). Bei einer Nutzung von Weizenkorn ergeben sich ca. 76 g CO_2/kWh (Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik, 2007 S. 91). Im Falle einer thermischen Nutzung von Korn und Stroh wurden die Emissionen anhand der vorliegenden Daten auf 41 g CO_2/kWh geschätzt (KTBL, 2012, S. 49; Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik beim BMELV, 2007, S. 91). Nutzt man Rapsöl und Rapsstroh thermisch, erhöhen sich die anbaubedingten Emissionen durch die Strohbergung[125] von 1.520 kg CO_2/ha um schätzungsweise ca. 24 kg auf 1.544 kg CO_2/ha (Knoblauch et al.,

[125] Dieselverbrauch Strohballenpresse: 4,2 Liter/ha; Dieselverbrauch Strohballenabtransport: 4,7 Liter/ha. (Schätzung nach KTBL, 2018)

2009; Lewandowski, 2016; KTBL, 2019). Je nach Pflanze und Nutzung, liegen die Emissionen bekannter Energiepflanzen somit zwischen 679 und 2.513 kg CO_2 pro Hektar (Tabelle 421).

Tabelle 421: Anbaubedingte CO_2-Emissionen wichtiger Brennstoffe für die thermische Nutzung

Brennstoff	Energieertrag in kWh/ha	THG in g CO_2/kWh	THG in kg CO_2/ha
Miscanthus, Briketts	3) 78.882	7) 17	1) 1.320
Miscanthus, Pellets	3) 78.882	7) 17	1) 1.320
Weide, Hackschnitzel	2) 25.158	7) 27	1) 679
Weizen, Korn ohne Strohnutzung	2) 31.123	7) 76	4) 2.363
Weizen, Ganzpflanze (Korn & Strohbriketts)	2) 61.923	7) 39	5) 2.393
Raps, Pellets & Öl	6) 43.253	7) 38	6) 1.650

Quellen: (1) Müller-Sämann & Hölscher, 2010; (2) KTBL, 2012; (3) Eigene Berechnung nach KTBL, 2012 und 2018; (4) Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik, 2007; (5) Eigene Berechnung nach: Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik, 2007; KTBL, 2012; (6) Eigene Berechnung nach: FNR, 2015; Lewandowski, 2016; Kraft, 2017; KTBL, 2012; (7) Eigene Berechnung

Zu den anbaubedingten Emissionen der Rutenhirse lagen keine nachvollziehbaren Daten vor. Die mehrjährige Nutzungsdauer, der geringe Düngemittelbedarf und die Ähnlichkeiten hinsichtlich Anbau und Ernte lassen jedoch annehmen, dass sie sich ungefähr auf dem Niveau von Miscanthus bewegen dürften. (Miscanthus benötigt zwar etwas mehr Düngemittel, liefert aber auch deutlich höhere Erträge.) Bisher nicht verfügbar sind Daten zum Anbau der Energiepflanzen Sida und Hirschgras. Da es sich aber auch bei diesen beiden Pflanzen um anspruchslose mehrjährige Pflanzen mit Humusbildungspotenzial handelt, dürften auch ihre Emissionen im Vergleich zu den meisten einjährigen Energiepflanzen eher gering ausfallen.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die anbaubedingten Emissionen von Brennstoffen für die thermische Nutzung pro Kilowattstunde deutlich geringer ausfallen, als die Emissionen, die bei der Herstellung von Treibstoffen entstehen. Allerdings besteht in vielen Fällen noch Forschungsbedarf, um die Klimabilanzen der neueren Energiepflanzen genauer beziffern zu können.

13.2.9.2.3 Biogas

Im Falle der Biogaspflanzen reicht die Spanne der anbaubedingten THG-Emissionen von 848 bis 4.072 kg CO_2/ha (vgl. Tabelle 422). Auch hier ist die Spanne der angegebenen Daten zu den einzelnen Pflanzen in der Literatur relativ groß. Laut Wissenschaftlichem Beirat Agrarpolitik betragen die anbaubedingten THG-Emissionen von Silomais 2.310 kg CO_2/ha (Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik 2007, S. 107). Um 63 Prozent über diesem Wert liegen sie nach Angaben von Hölscher et al. (2007) im Oberrheintal mit 3.770 kg CO_2/ha (Hölscher et al, 2007 zit. n. Müller-Sämann & Hölscher, 2016, S. 8). Demnach ergibt sich entweder ein Emissionsfaktor von 47 g CO_2/kWh oder ein Emissionsfaktor von 76 g CO_2/kWh. Für eine konservative

Schätzung würde im Folgenden der höhere Wert gewählt. Deutlich geringer sind durch den Energiepark Hahnennest angegebenen Emissionswerte für den Anbau der Durchwachsenen Silphie mit 221 kg CO_2/ha. Dort erfolgt im Vergleich zum Anbau nach den KTBL-Angaben praktisch keine zusätzliche Düngung. Zugleich fällt der Energieertrag im Vergleich zum vom KTBL beschriebenen Anbauverfahren um 18 Prozent bzw. 9,74 MWh pro Hektar geringer aus.

Tabelle 422: Anbaubedingte CO_2-Emissionen wichtiger Biogaspflanzen

Biogassubstrat, Nutzung	Energieertrag in kWh/ha	THG in g CO_2/kWh	THG in kg CO_2/ha
Silomais, Biogas	[2] 49.301	[6] 76	[1] 3.770
Silomais, Strom & Wärme	[2] 42.152	[6] 89	[1] 3.770
Durchwachsene Silphie, Biogas *	[3] 25.344	[6] 7	[3] 221
Durchwachsene Silphie, Strom & Wärme *	[3] 21.669	[6] 9	[3] 221
Triticale GP-Silage, Biogas	[4] 46.111	[6] 88	[3] 4.072
Triticale GP-Silage, Strom & Wärme	[6] 39.425	[6] 103	[3] 4.072
Getreide Korn, Biogas	[5] 27.825	[6] 47	[5] 1.315
Getreide Korn, Strom & Wärme	[5] 21.071	[6] 62	[5] 1.315

* Ohne Berücksichtigung des Humusaufbaus
Quellen: (1) Müller-Sämann & Hölscher, 2010; (2) KTBL, 2012; (3) Energiepark Hahnennest, 2016; (4) Sticksel, et al., 2018 (5) Knoblauch et al., 2009, S. 21 (6) Eigene Berechnung

Nach Berechnungen des Energieparks Hahnennest bindet die Silphie mit fast 2,0 t deutlich mehr Kohlenstoff im Boden (vgl. Tabelle 423) als bei der Feldbearbeitung freigesetzt wird (Energiepark Hahnennest GmbH & Co. KG, 2016). Ohne Berücksichtigung dieses Effekts reicht die Spanne der Emissionen der hier dargestellten Biogaspflanzen von 9 bis 103 g CO_2/kWh.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die anbaubedingten Emissionen von Biogaspflanzen sowohl pro Kilowattstunde als auch pro Hektar eine große Spanne aufweisen. Zudem besteht noch erheblicher Forschungsbedarf, nicht zuletzt, da zu vielen Pflanzen der zweiten Generation noch keine Klimabilanzen vorliegen.

13.2.9.3 CO_2-Minderung durch Kohlenstoffanreicherung im Boden

Mehrjährige Energiepflanzen fördern die Humus- und Kohlenstoffanreicherung in ackerbaulich genutzten Böden deutlich stärker als die meisten einjährigen Energiepflanzen. Beispielsweise wird beim Anbau der Silphie im Vergleich zu Mais eine große Menge cellulosereicher Reststreu in den Boden zurückgeführt (Emmerling, 2016). Da unter der Silphie und anderen Dauerkulturen die Regenwurmfauna gefördert wird, kann dieser Streu gut in den Boden eingearbeitet werden. In Vergleichsuntersuchungen durch Emmerling „war der Humus-(Corg-)Gehalt der Böden unter Durchwachsene Silphie relativ um 2–8% im Versuchszeitraum von lediglich

fünf Jahren angestiegen“ (Emmerling, 2016). So werden unter den Anbaubedingungen in Deutschland ca. 2,0 t Kohlenstoff pro Hektar und Jahr im Boden eingelagert. 1,50 t C entfallen dabei auf die Humusmehrung und 0,45 t C auf die Humusreproduktion durch das Ausbringen der Gärreste (Energiepark Hahnennest GmbH & Co. KG, 2016).

Ähnliche Potenziale zur Einlagerung von Kohlenstoff im Boden zeigen auch Sida und Miscanthus: Bei Versuchen in Litauen wurden unter Sida eingelagerte Kohlenstoffmengen festgestellt, die ca. 83 – 97 Prozent der Werte betrugen, die unter der Silphie gemessen wurden[126] (Šiaudinis, et al., 2017). Wurde kein Kalk ausgebracht, lagerte die Sida im Vergleich mit der Silphie sogar mehr Kohlenstoff ein (Šiaudinis, et al., 2017). Beim Anbau von Miscanthus am Oberrhein wurden Kohlenstoffanreicherungen im Boden von 1,0 bis 2,5 t C/ha*a festgestellt (Müller-Sämann, et al., 2010). Damit lagern Miscanthus und Durchwachsene Silphie pro Hektar deutlich mehr Kohlenstoff im Boden ein, als Kurzumtriebsplantagen mit schnellwachsenden Gehölzen. So sind bei der Nutzung von Pappeln Einlagerungen von 0,4 – 1,4 t C/ha*a zu erwarten[127] (Kay, et al., 2019). Geht man im Mittel von einer Einlagerung von ca. 1,0 t C/ha*a aus, entspricht dies etwa den Werten, die durch eine Aufforstung erzielt werden (Müller-Sämann, et al., 2010).

Die Angaben in der Literatur zur Kohlenstoffeinlagerung durch Rutenhirse beziehen sich hauptsächlich auf den Anbau in Nordamerika. Sie wurden daher in Tabelle 423 in Klammern gesetzt. Soweit heute bekannt, kann man beim Anbau mehrjähriger Energiepflanzen von einem Einlagerungspotenzial von 0,3 bis 2,5 t C/ha*a ausgehen (vgl. Tabelle 423). Bei einem Umrechnungsfaktor von 3,67 kg CO_2 pro Kilogramm Kohlenstoff können somit 1,0 - 9,2 t CO_2 pro Hektar und Jahr zumindest vorübergehend im Boden gebunden werden. Wie groß die dauerhafte Kohlenstoffspeicherung ist, hängt in hohem Maße von der sich anschließenden Nutzung und ihrer Humusbilanz ab. Geht man jedoch von einer durchschnittlichen Einlagerung von 1,0 bis 1,5 t C/ha*a und einer dauerhaften Speicherung von mindestens 50 Prozent des eingelagerten Kohlenstoffs aus, so konnten auf einer Anbaufläche von 1,5 bis 2,0 Millionen Hektar etwa 0,5 Prozent der heutigen THG-Emissionen Deutschlands kompensiert werden.

[126] Werte wurden aus Grafik abgelesen, weshalb geringfügige Abweichungen von den tatsächlichen Werten möglich sind.
[127] Regionaler Bezug: Kontinentale Niederungen in Europa

Tabelle 423: Mögliche Kohlenstoffanreicherung in Ackerböden durch ausgewählte mehrjährige Energiepflanzen und damit mögliche CO_2-Minderung

Nutzpflanze	Kohlenstoff-anreicherung (t C/ha*a)	Mittlere CO_2-Minderung (t CO_2/ha*a)	Quellen
Miscanthus	1,0 – 2,5	3,7 – 9,2	Müller-Sämann & Hölscher, 2010
Durchwachsene Silphie	1,5 – 2,0	5,5 – 7,2	Energiepark Hahnennest, 2016
Pappel (KUP)	0,4 – 1,4	1,6 – 5,2	Kay, et al., 2017
Sida	1,8	6,4	Schätzung n. Šiaudinis et al., 2017, und Energiepark Hahnennest, 2016
Rutenhirse*	(0,3 – 2,0)	(1,0 – 7,2)	Hill, et al., 2006; Searchinger, et al., 2008; Follett, et al., 2012

* Werte für Nordamerika (USA)

Im Vergleich zu den mehrjährigen Energiepflanzen fällt die Bilanz der wichtigsten einjährigen Biogaspflanzen mehrheitlich negativ aus (vgl. Tabelle 424). Nur Grünschnittroggen weist nach Willms et al. (2019) eine Anreicherung von Kohlenstoff im Boden durch Humusbildung auf. Klee-, Luzerne- und Ackergras, die auch mehrjährig genutzt werden können, weisen dagegen eine deutlich positive Bilanz auf (Willms, et al., 2019).

Tabelle 424: Anbaubedingte Änderung der Humusvorräte für ausgewählte einjährige Energiepflanzen nach dynamischer HE-Methode und nach VDLUFA (Willms, et al., 2019)

Nutzpflanze	Änderung des Humus-C (t/ha) n. dyn. HE-Methode	Änderung des Humus-C (t/ha) n. VDLUFA
Sorghum	-0,60	k. A.
Grünschnittroggen	0,09	0,12 – 0,16
Silomais	-0,97	-0,56 – -0,80
GPS-Getreide	-0,60	-0,28 – -0,40
Zum Vergleich:		
Klee-, Luzerne-, Ackergras	0,83	0,60 – 0,80

Quelle: Willms, et al., 2019

13.2.9.4 Unsicherheiten und Forschungsbedarf

In Anbetracht der großen Spanne der Angaben und der teils sehr unterschiedlichen Anbausysteme (z. B. bei Getreide) können die hier dargestellten Angaben zu den Klimabilanzen von Energiepflanzen lediglich als Orientierungswerte verstanden werden. Je nach Standort und Ertragsleistung fallen die anbaubedingten Emissionen derselben Pflanze sowohl pro Hektar als auch pro Kilowattstunde unterschiedlich aus. Eingeschränkt ist die Vergleichbarkeit der vorliegenden Bilanzen auch, da die Berücksichtigung von Koppelprodukten in den bisherigen Veröffentlichungen selten vollständig übereinstimmt und zudem nicht immer nachvollziehbar ist.

Ein umfassender Vergleich der Energiebilanzen von Energiepflanzen der ersten und zweiten Generation lässt sich bisher nicht ziehen. Forschungsbedarf besteht vor allem hinsichtlich des Anbaus von Energiepflanzen der zweiten Generation unter den Anbaubedingungen in Deutschland. Nachvollziehbare Klimabilanzen des Anbaus mehrjähriger Energiepflanzen in Deutschland liegen bisher nur in einzelnen Fällen vor. Des Weiteren mangelt es bisher auch an vergleichbaren Klimabilanzen für ökologisch angebaute Energiepflanzen der ersten Generation. Es wird vermutet, dass im ökologischen Anbau von Mais und Wintergetreide zwar die Kohlenstoffbilanz im Boden verbessert wird und der kumulierte Energieaufwand pro Hektar geringer ausfällt, die Klimabilanzen pro Kilowattstunde dadurch aber nicht unbedingt wesentlich anders ausfallen müssen, da auch die Erträge deutlich geringer ausfallen. Es wäre daher zu prüfen, welchen Effekt diese Faktoren auf die Klimabilanz haben. Schätzungen, die die Humusbilanz nicht berücksichtigen, sind für einen Vergleich der Klimabilanzen von Energiepflanzen nur bedingt geeignet.

Forschungsbedarf besteht zudem im Bereich der Optimierung des Anbaus hinsichtlich der Klimawirkung. Bisher kommen bei der Feldarbeit und bei der Erzeugung der Düngemittel überwiegend fossile Energieträger zum Einsatz. Der Anbau von Energiepflanzen erfolgt bisher fast ausschließlich konventionell. Durch einen Umstieg auf erneuerbare Energien und eine ökologische Wirtschaftsweise dürften sich die Klimabilanzen der meisten hier dargestellten Energiepflanzen der zweiten Generation und der aus ihnen hergestellten Energieträger noch erheblich verändern. Entscheidend dürfte dabei sein, wie gut die Etablierung der Pflanzen im ökologischen Anbau gelingt.

13.2.9.5 Treibhausgasbilanz biogener Energieträger

Neben den anbaubedingten Emissionen und Kohlenstoffeinlagerungen müssen bei einem Vergleich der Treibhausgasbilanzen von biogenen Energieträgern auch jene Emissionen berücksichtigt werden, die bei Transport, Verarbeitung und Vertrieb einschließlich Lagerung verursacht werden. Die Summe dieser Emissionen kann anschließend den Emissionen gegenübergestellt werden, die durch den Ersatz eines fossilen Energieträgers vermieden werden. Die Differenz aus beiden Werten ergibt die Netto-CO_2-Minderung.

Dies ist jedoch nur gewährleistet, sofern die Nutzung von Energiepflanzen nicht zu Landnutzungsänderungen führt. In Deutschland handelt es sich dabei häufiger um Grünlandumbruch als um Waldrodung. Mögliche Auswirkungen des Grünlandumbruchs wurden bereits in Abschnitt 10.5.2.2.1.4 skizziert. Ein steigender Importbedarf bei landwirtschaftlichen Produkten kann aber auch zu Landnutzungsänderungen im Ausland führen, wie z. B. zur vermehrten Rodung von Regenwald. In Abschnitt 13.2.9.7 werden daher als Ergänzung in einem vereinfachten Beispiel die möglichen Emissionen aus Regenwaldrodung dargestellt.

13.2.9.5.1 Transport

Die transportbedingten Emissionen ließen sich im Rahmen des vorliegenden Vergleichs nur grob schätzen, da sie von vielen Faktoren abhängen, die sich von Fall zu Fall unterscheiden können. Zu diesen Faktoren gehören die Art des Energieträgers und sein Transportgewicht, die Art und Energieeffizienz des Transportmittels und die Transportstrecke.

Vereinfachend wurde unterstellt, dass für den Transport von Pellets und Briketts ein Transportfahrzeug mit einem zul. Gesamtgewicht von 7,5 t und einer möglichen Nutzlast von 3,0 t verwendet wird. Auf längeren Strecken benötigen moderne Lkw dieser Art heute einschließlich der Leerfahrten weniger als 180 kWh/100 km. Es wurde angenommen, dass der Verbrauch einschließlich der leeren Rückfahrten auf kurzen Strecken von 5 km bis 10 km um mindestens 25 – 50 Prozent höher liegt. Daraus ergibt sich ein Treibstoffverbrauch von bis zu 270 kWh/100 km. Bei einem Hackschnitzeltransport werden nach KTBL-Dieselbedarfsrechner für den Transport von 4,6 t Hackschnitzeln pro Hektar vom Feld zum Kunden über 6 km Distanz rund 8,4 Liter Diesel benötigt (KTBL, 2019b). Dies entspricht umgerechnet etwa 679 kWh/100 km. Als Transportgewicht wurde vereinfachend das Erntegewicht der Energiepflanzen ohne Lagerungsverlust unterstellt. Als durchschnittliche Transportstrecke für Festbrennstoffe wurde eine einfache Strecke von 10 km bis zum Endverbraucher (bei dezentraler Nutzung) angenommen.

Im Falle der Biogassubstrate wurde unterstellt, dass künftig Kraftwärmekopplung zum Standard wird. Da der Energieaufwand und die Realisierbarkeit des Transportes von Biogas bzw. Bioerdgas mittels eines direkten Leitungsanschlusses an ein örtliches Gasnetz nicht abgeschätzt werden konnte, wurde unterstellt, dass das Biogassubstrat vom Feld zu einer Biogasanlage in Siedlungsnähe transportiert werden muss, um eine direkte Abwärmenutzung zu ermöglichen. Damit wurde gezielt ein Szenario mit hohem Transportenergieaufwand gewählt. Als Transportstrecke wurden für die einfache Fahrt 6 km unterstellt und der Energieaufwand entsprechend des Energiebedarfs des Hackschnitzeltransports (lt. KTBL-Dieselbedarfsrechner) geschätzt. Die transportbedingten Emissionen bei der Bereitstellung von Treibstoffen wurden nach Angaben der FNR (2015b) geschätzt. Allgemein lässt sich sagen, dass der Transport in der Emissionsbilanz von biogenen Energieträgern eine untergeordnete Rolle spielt und bei Transportstrecken unter 100 Kilometern von sehr geringer Relevanz ist.

13.2.9.5.2 Konversion

Die Konversion von Energieträgern ohne Nutzung umfasst die nach der Ernte erfolgende Verarbeitung eines biogenen Rohstoffs zu dem Produkt, das am Ende der Lieferkette an den Endverbraucher übergeben wird. Die Betrachtung endet mit der Übergabe. Der Energieverbrauch der Nutzung durch den Endverbraucher (z. B. BHKW oder Privathaushalt) und die dabei entstehenden Emissionen werden nicht berücksichtigt. Im Falle von Biogasanlagen, die

nicht Biogas oder Bioerdgas, sondern Strom oder Wärme an den Endverbraucher liefern, müssen die dort verursachten Emissionen jedoch berücksichtigt werden. Die Verarbeitung biogener Rohstoffe zu Treibstoffen und Biogas bzw. Bioerdgas ist mit einem relativ hohen Energieverbrauch verbunden und verursacht damit relevante Mengen an Treibhausgasen. Die konversionsbedingten Emissionen der Produktion von Biotreibstoffen wurden nach FNR (2015b) berechnet. Durch die FNR werden für die einzelnen Flüssigbrennstoffe Emissionswerte pro Kilowattstunde angegeben (FNR, 2015b S. 32).

Bisherige Erhebungen zu den konversionsbedingten THG-Emissionen bei einer Biogasnutzung von Energiepflanzen beziehen sich bisher nahezu ausschließlich auf Substratmischungen, die sich aus Maissilage oder Getreidesilage und landwirtschaftlichen Reststoffen und Abfällen, wie Gülle oder Mist, zusammensetzen. Berechnungen zur Konversion von Silphie oder anderen Energiepflanzen der zweiten Generation sind bisher nicht verfügbar. Die konversionsbedingten Emissionen der Biogasproduktion auf Basis der Durchwachsenen Silphie wurden daher geschätzt. Diese Schätzung kann jedoch nur als grobe Schätzung betrachtet werden, da sie mit diversen Unsicherheiten behaftet ist. Neben den fehlenden spezifischen Messdaten zur Nutzung von Silphie als Gärsubstrat bestehen die Unsicherheiten insbesondere im Bereich der klimawirksamen Emissionen von Biogasanlagen, die sich von Anlage zu Anlage erheblich unterscheiden können. Der wichtigste Faktor ist hierbei das Entweichen von Methan, das sich nicht vollständig vermeiden lässt. Der Methanschlupf bewegt sich in der Regel zwischen 0,4 und 2,0 Prozent. Schmehl et al. geben einen Methanschlupf von 1,8 Prozent an (Schmehl, et al., 2012 S. 39), nach Röther liegt der Mittelwert bei ca. 1,0 Prozent (Röther, 2016 S. 7). Liebetrau et al. (2013) rechnen sowohl in der Biogasanlage (1,0 Prozent) als auch im BHKW (1,5 Prozent) mit Methanverlusten, die sich auf ca. 2,5 Prozent summieren (Liebetrau, et al., 2013 S. 184). Um Biogas als Bioerdgas nutzen und z. B. ins Erdgasnetz einspeisen zu können, muss das Biogas aufbereitet werden, um die erforderliche Qualität herzustellen. Mit dem Verfahren der Biogasaufbereitung wird der Methangehalt im Biogas erhöht und unerwünschte Bestandteile werden entfernt. Auch bei diesem Verfahren kommt es in der Regel zu relevanten „Methanemissionen bei der Regenerierung des Adsorbers bzw. Waschmittels“ (Baum, et al., 2008 S. 32). Nicht selten wurden bei Messungen im Laufe herkömmlicher Verfahren Verluste von bis zu einem Zehntel und mehr festgestellt, die damit deutlich über den Angaben der Hersteller lagen, welche den Methanschlupf auf weniger als zwei Prozent bezifferten (Baum, et al., 2008 S. 32). Inzwischen wurden die Verfahren verbessert, sodass von Herstellern mittlerweile Verluste von weniger als 0,5 Prozent angegeben werden. Geht man also von 1,0 Prozent Schlupf im Fermenter und 1,0 – 2,0 Schlupf bei der Biogasaufbereitung aus, beträgt die Summe ebenfalls ca. 2,5 Prozent. Ganz genau sind die Methanverluste von Biogasanlagen jedoch kaum zu beziffern, da Leckagen, Reparaturen oder Druckschwankungen schwer erfassbar sind. Geht man davon aus, dass die Netzeinspeisung zum Standard

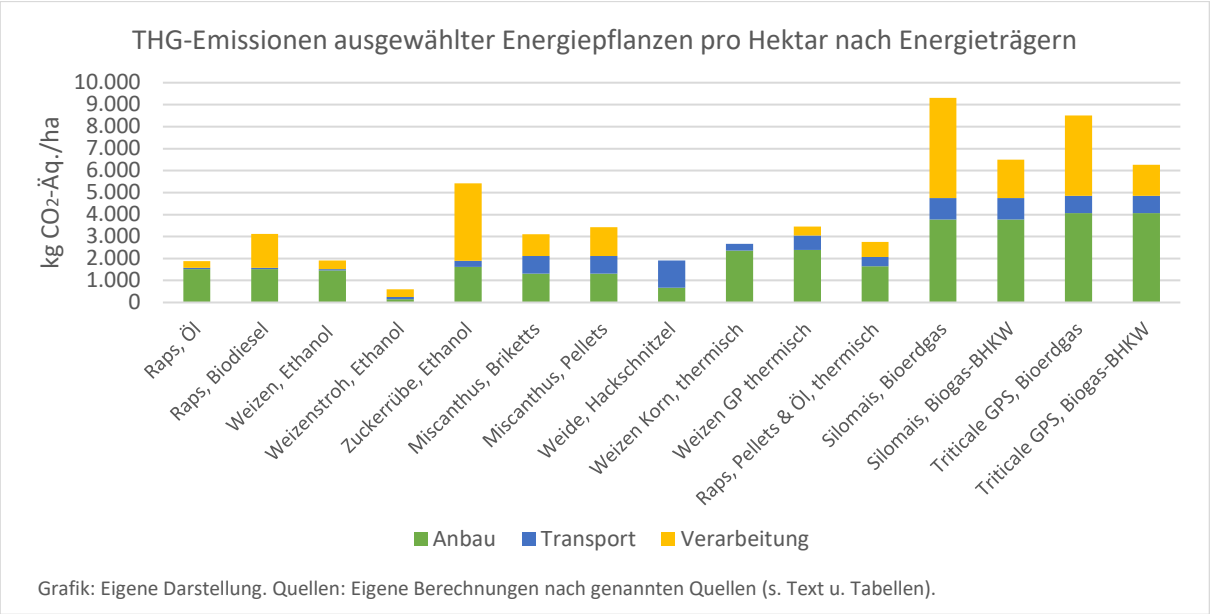
wird, entstehen neben den Emissionen der Biogasanlagen- und Leitungserstellung auch Emissionen beim Betrieb der Biogasanlage und der Biogasaufbereitungsanlage. Laut WBA (2007) belaufen sich die konversionsbedingten Emissionen der Biogasnutzung von Mais bei einem Substratinput von 44,5 t/ha auf 4.557 kg CO_2-Äq./ha (Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik, 2007 S. 111). Dabei wurde ein Emissionsfaktor von 0,264 kg CO_2-Äq./kWh_{el} unterstellt, der damit um 44 Prozent unter dem Emissionsfaktor des geschätzten deutschen Strommixes im Jahr 2018 liegt. Bei einem Emissionsfaktor von 0,474 kg CO_2-Äq./kWh_{el} ergeben sich konversionsbedingte Emissionen von 5.444 kg CO_2-Äq./ha, was 0,122 kg CO_2-Äq. pro Tonne Maissilage-Substrat entspricht. Bei einem höheren oder niedrigeren Maissilage-Input pro Hektar steigen oder sinken die Emission der Konversion pro Hektar dementsprechend. Mangels Daten zur Klimabilanz der Verarbeitung anderer Energiepflanzen wurden die Emissionen der Nutzung von Triticale-GPS und Getreide-Korn auf Basis der Angaben zur Silomaisverarbeitung geschätzt. Diese Schätzung ist daher mit erheblichen Unsicherheiten verbunden. Eine Schätzung zur Klimabilanz anderer Biogaspflanzen war mangels Datengrundlage nicht möglich.

Die Verarbeitung von Festbrennstoffen ist im Vergleich zur Biogasproduktion mit einem geringen Energieaufwand und dementsprechend geringen Emissionen verbunden. Der Energieaufwand der Verarbeitung von Stroh zu Pellets beträgt 110 – 120 kWh je Tonne Pellets (Kraft, 2017). Bei der Brikettierung werden ca. 84 – 90 kWh/t FM benötigt (Handler & Blumauer, 2011, S. 59). Legt man der Berechnung den geschätzten Emissionsfaktor des deutschen Strommixes im Jahr 2018 von 0,474 kg CO_2-Äq./kWh zugrunde (Statistia, 2019d), ergeben sich somit Emissionen von 52 – 57 kg CO_2-Äq. pro Tonne Strohpellets und 40 – 43 kg CO_2-Äq. pro Tonne Strohbriketts. Mit dem Fortschreiten der Energiewende werden diese Emissionen im Laufe der kommenden Jahre weiter sinken. Die geschätzten Emissionen der Bereitstellung verschiedener ausgewählter Energieträger sind in Tabelle 425 dargestellt. Pro Hektar entstehen bei der Produktion von Bioerdgas auf Basis von Mais oder Triticale mit 8,5 – 9,3 t CO_2-Äq./ha mit Abstand die höchsten THG-Emissionen. Bei einer direkten Nutzung von Biogas ohne Aufbereitung zu Bioerdgas sind die Emissionen mit ca. 6,5 t CO_2-Äq./ha deutlich geringer. Am geringsten fallen die Emissionen pro Hektar bei der Produktion von Treibstoffen aus. Dies ist jedoch vor allem auf die geringen zu transportierenden und zu verarbeitenden Anteile an der insgesamt produzierten Biomasse zurückzuführen. So macht der Rapsölertrag lediglich 15 Prozent des Biomasseertrags des Rapsanbaus aus. Ganz anders stellen sich die Verhältnisse dar, wenn die Emissionen auf die bereitgestellte Endenergie umgerechnet werden. Pro Kilowattstunde fallen die Emissionen von Festbrennstoffen eindeutig am geringsten aus, während Treibstoffe und Biogas auf einem ähnlichen Niveau liegen.

Tabelle 425: Emissionen der Bereitstellung verschiedener ausgewählter Energieträger pro Kilowattstunde und pro Hektar

Energieträger, Nutzung	g CO_2-Äq./kWh				kg CO_2-Äq./ha			
	Anbau	Transport *	Konversion	Gesamt*	Anbau	Transport *	Konversion	Gesamt*
Raps, Öl	[1] 110	[1] 4	[1] 23	[1] 137	[2] 1.520	[2] 50	[2] 315	[2] 1.885
Raps, Biodiesel	[1] 93	[1] 4	[1] 94	[1] 191	[2] 1.520	[2] 59	[2] 1.540	[2] 3.119
Weizen, Ethanol	[1] 83	[1] 7	[1] 65	[1] 155	[2] 1.465	[2] 45	[2] 407	[2] 2.740
Weizenstroh, Ethanol	[1] 11	[1] 7	[1] 25	[1] 43	[2] 150	[2] 100	[2] 350	[2] 599
Zuckerrübe, Ethanol	[1] 43	[1] 7	[1] 94	[1] 144	[2] 1.626	[2] 271	[2] 3.523	[2] 5.419
Miscanthus, Briketts	[4] 17	[6] 10	[7] 13	[6] 39	[3] 1.320	[6] 787	[7] 1.000	[6] 3.107
Miscanthus, Pellets	[4] 17	[6] 10	[8] 17	[6] 36	[3] 1.320	[6] 787	[8] 1.322	[6] 3.429
Weide, Hackschnitzel	[4] 27	[6] 49	0	[6] 76	[3] 679	[9] 1.225	0	[6] 1.904
Weizen Korn, thermisch	[4] 76	[6] 10	0	[6] 86	[3] 2.363	[6] 307	0	[6] 2.670
Weizen GP thermisch	[4] 39	[6] 10	[8] 7	[6] 56	[3] 2.393	[6] 646	[8] 421	[6] 3.460
Raps, Pellets & Öl, thermisch	[2] 38	[6] 10	[5] 16	[6] 64	[2] 1.650	[6] 427	[5] 680	[6] 2.757
Silomais, Bioerdgas	[4] 76	[6] 20	[11] 92	[6] 189	[3] 3.770	[6] 982	[10] 4.557	[6] 9.309
Silomais, Biogas-BHKW	[4] 89	[6] 23	[12] 42	[6] 154	[3] 3.770	[6] 982	[10] 1.751	[6] 6.503
Triticale GPS, Bioerdgas	[4] 88	[6] 17	[13] 79	[6] 184	[3] 4.072	[6] 785	[11] 3.646	[6] 8.503
Triticale GPS, Biogas-BHKW	[4] 103	[6] 20	[13] 36	[6] 159	[3] 4.072	[6] 785	[11] 1.401	[6] 6.258

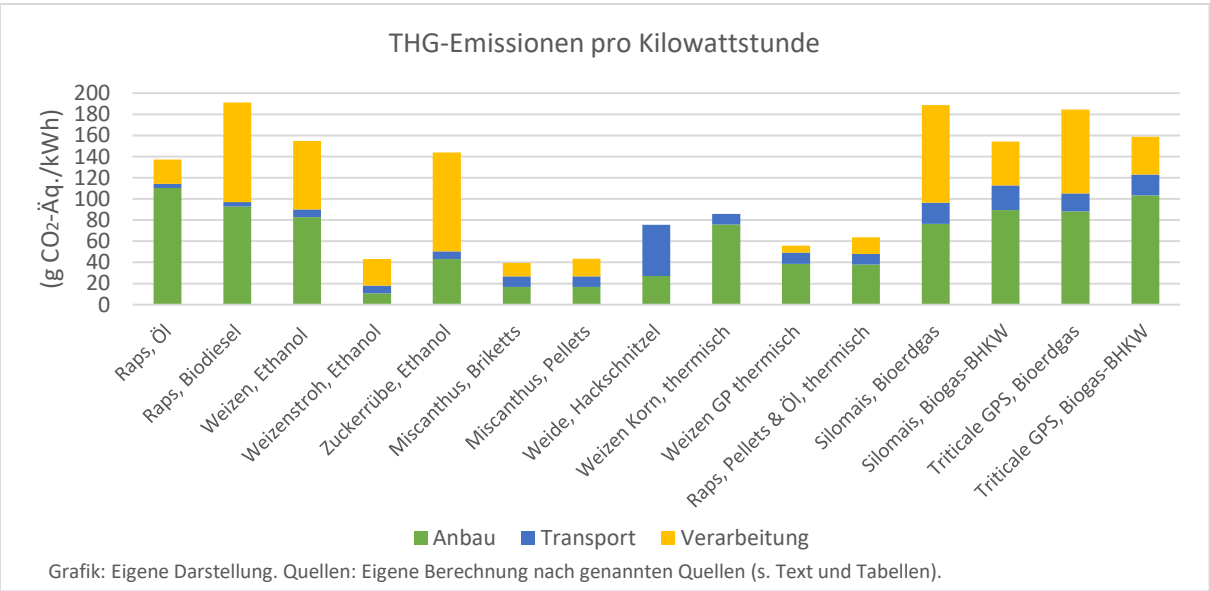
* Transport inkl. leere Rückfahrt. Die angenommenen Transportdistanzen betragen bei Biogassubstraten 2,5 km und bei Brennstoffen für die thermische Nutzung 10 km.
GP=Ganzpflanze, GPS=Ganzpflanzensilage
Quellen: (1) FNR, 2015b; (2) Eigene Berechnung n. FNR, 2015b, und KTBL, 2012; (3) Müller-Sämann & Hölscher, 2016 (4) Eigene Berechnung n. Müller-Sämann & Hölscher, 2016, und KTBL, 2012;(5) Ber. n. FNR, 2015b; KTBL, 2012; Kraft, 2017; Ferchau, et al., 2009; Statista 2019d; (6) Eigene Berechnung; (7) Ber. n. KTBL, 2012; Statista, 2019d; (8) Ber. n. KTBL, 2012; Kraft, 2017; Statista 2019d; (9) Ber. n. KTBL, 2019b (10) Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik, 2007; (11) Schätzung n. Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik, 2007; Sticksel et al., 2018; KTBL, 2012;



Grafik: Eigene Darstellung. Quellen: Eigene Berechnungen nach genannten Quellen (s. Text u. Tabellen).

Abbildung 167: Treibhausgasemissionen ausgewählter Energiepflanzen bei Anbau, Transport und Verarbeitung pro Hektar nach Verwendung (kg CO_2-Äq./ha)

Die Produktion von Festbrennstoffen für die thermische Nutzung verursacht mit 39 – 86 g CO_2-Äq./kWh deutlich geringere Emissionen als die Herstellung von Biotreibstoffen mit 43 – 191 g CO_2-Äq./kWh. Noch unberücksichtigt sind dabei jedoch die potenziellen Kohlenstoffeinlagerungen durch mehrjährige Energiepflanzen. Rechnet man diese ein, entzieht die Nutzung von Miscanthus als Brennstoff der Atmosphäre ca. 38 – 42 g CO_2-Äq./kWh. Insgesamt wirkt ein Miscanthusfeld somit als CO_2-Senke mit einem Bindungspotenzial von ca. 3,2 t CO_2-Äq./ha.



Grafik: Eigene Darstellung. Quellen: Eigene Berechnung nach genannten Quellen (s. Text und Tabellen).

Abbildung 168: Treibhausgasemissionen ausgewählter Energiepflanzen bei Anbau, Transport und Verarbeitung pro Kilowattstunde nach Verwendung (kg CO_2-Äq./kWh)

Die Produktion von gasförmigen Energieträgern auf Basis der einjährigen Biogaspflanzen Mais und Triticale verursacht dagegen Emissionen von 159 bis 189 g CO_2-Äq./kWh. Mit Blick auf

das Humusbildungspotenzial und den geringen Energieaufwand beim Anbau von Biogaspflanzen der zweiten Generation dürfte im Biogasbereich jedoch erhebliches Potenzial zur Senkung der Emissionen bestehen. Berücksichtigt werden muss, dass es sich bei den dargestellten Emissionswerten zu erheblichen Teilen um Momentaufnahmen handelt, da sich die durch Anbau, Transport und Konversion verursachten Emissionen im Laufe der Energiewende kontinuierlich verändern werden. So gehen z. B. die konversionsbedingten Emissionen der Bioerdgasproduktion auf Basis von Silomais zu einem Viertel auf den Stromverbrauch zurück, der aufgrund des heutigen Strommixes noch hohe Emissionen verursacht. Nach einer vollständigen Umstellung der Stromerzeugung auf erneuerbare Energien entfallen diese größtenteils. Etwa die Hälfte der Emissionen der Bioerdgasproduktion auf Basis von Silomais ist zudem auf Methanverluste zurückzuführen. Auch in diesem Bereich besteht sicherlich noch Potenzial für Verbesserungen. Gleiches gilt für den Anbau der meisten Energiepflanzen und den Transport der Energieträger.

13.2.9.5.3 Potenzielle Emissionsminderung

Die potenzielle Emissionsminderung durch den Einsatz biogener Energieträger ohne Berücksichtigung von Methanschlupf und Kohlenstoffeinlagerung ist in Tabelle 426 dargestellt.

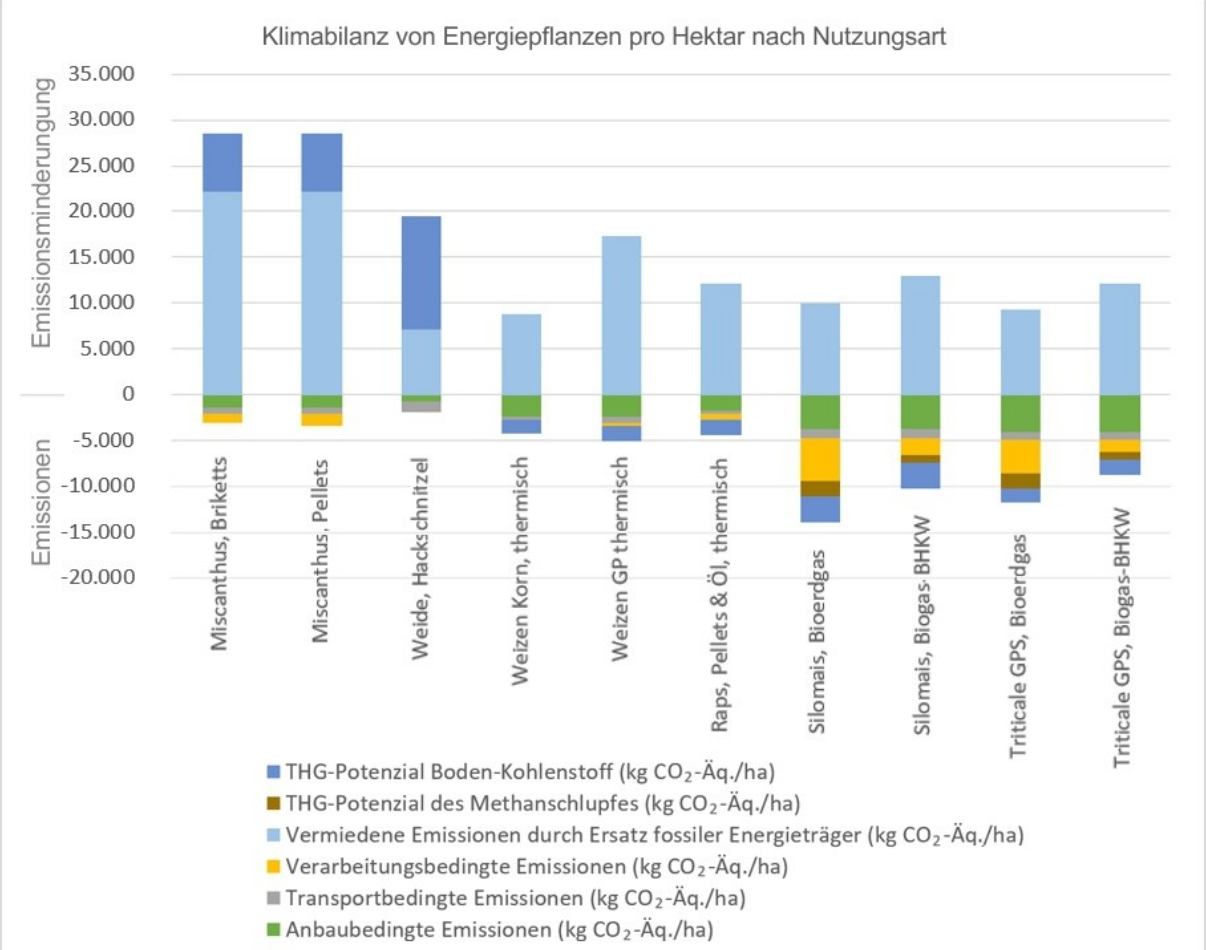
Tabelle 426: Potenzielle Emissionsminderung ohne Methanschlupf und Kohlenstoffeinlagerung

Energiepflanze, Nutzung	Brutto-Energieertrag (kWh/ha)	Emissionsfaktor (g CO_2/kWh) *	Brutto-CO_2-Vermeidung (kg/ha)	Netto-CO_2-Vermeidung (kg/ha)
Raps, Öl	13.778	0,266	4.217	2.332
Raps, Biodiesel	16.361	0,266	4.217	1.098
Weizen, Ethanol	17.697	0,259	4.584	1.844
Weizenstroh, Ethanol	13.870	0,259	3.592	2.993
Zuckerrübe, Ethanol	37.634	0,259	9.747	4.328
Miscanthus, Briketts	78.882	0,281	22.166	19.059
Miscanthus, Pellets	78.882	0,281	22.166	18.737
Weide, Hackschnitzel	25.158	0,281	7.069	5.165
Weizen Korn, thermisch	31.123	0,281	8.746	6.075
Weizen GP thermisch	61.923	0,281	17.400	13.940
Raps, Pellets & Öl, thermisch	43.253	0,281	12.154	9.397
Silomais, Bioerdgas	49.301	0,202	9.959	650
Silomais, Biogas, BHKW	42.152	0,309	13.009	6.506
Triticale GPS, Bioerdgas **	46.111	0,202	9.314	812
Triticale GPS, Biogas, BHKW **	39.425	0,309	12.167	5.909

* Angegeben ist der Emissionsfaktor des ersetzten fossilen Energieträgers: Pflanzenöl und Biodiesel ersetzen Diesel, Ethanol ersetzt Benzin, thermisch genutzte Brennstoffe ersetzen Heizöl, Bioerdgas ersetzt Erdgas, Biogas ersetzt durch Nutzung im BHKW Strom (37,0%) und Wärme (48,5%).
**Bei den Werten für Triticale handelt es sich um eine Schätzung
Quelle: Eigene Berechnung auf Basis der zuvor dargestellten Kennwerte

Wie in Tabelle 426 angegeben, werden beispielsweise bei einem Ersatz von Heizöl durch Miscanthusbriketts pro Hektar Anbaufläche mehr als 22 t CO_2-Emission vermieden. Werden bei Pflanzung, Ernte, Brikettierung und Transport fossile Energien (Diesel, Strom aus nicht erneuerbaren Quellen, etc.) eingesetzt, werden dadurch mehr als 3 Tonnen CO_2 pro Hektar emittiert. Zugleich werden der Atmosphäre beim Anbau rund 6,4 t CO_2 durch Kohlenstoffeinlagerung im Boden entzogen. So ergibt sich in der Summe eine CO_2-Minderung von rund 25 t pro Hektar und Jahr. Dies ist etwas weniger als bei einer stofflichen Nutzung des Miscanthusstrohs. Bei einem Ertrag von 18,0 (12,0 – 25,0) t TM/ha können in Miscanthusbaustoffen pro Hektar rund 34 (22 – 47) t CO_2 langfristig gebunden werden (KTBL, 2012; Schwarz, Greef & Schnug, 1993)

Eine auf Energiepflanzen basierende Biogasproduktion geht immer mit einem gewissen Methanschlupfrisiko einher. Die daraus resultierenden Emissionen liegen in der Regel zwischen null und zwei Prozent der Methanproduktion.

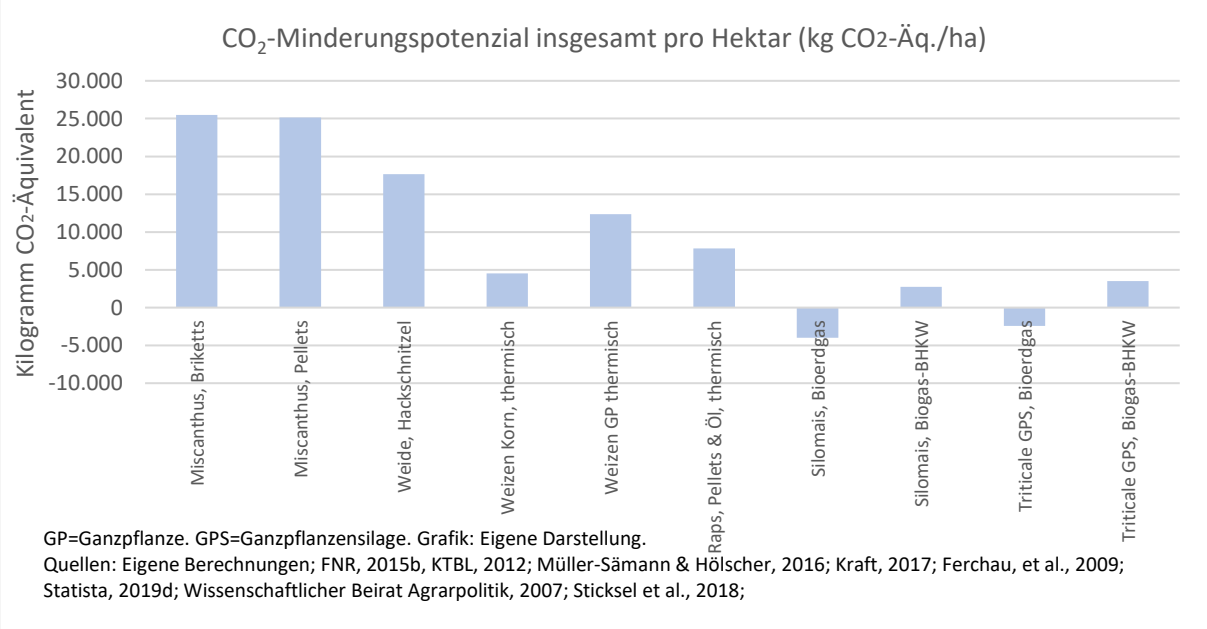


Grafik: Eigene Darstellung
Quellen: Eigene Berechnungen; FNR, 2015b, KTBL, 2012; Müller-Sämann & Hölscher, 2016; Kraft, 2017; Ferchau, et al., 2009; Statista 2019d; Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik, 2007; Sticksel et al., 2018;

Abbildung 169: Klimabilanz ausgewählter Energiepflanzen pro Hektar nach Nutzung (kg CO_2-Äq./ha)

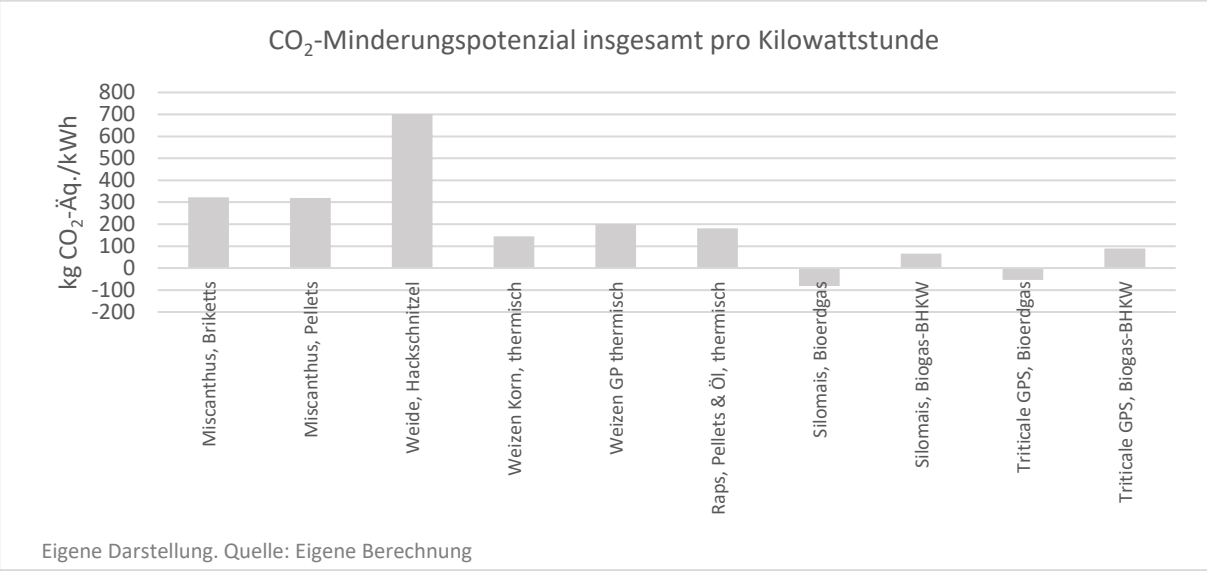
Mit einer fortschreitenden Umstellung auf erneuerbare Energien werden sich die Emissionen, die bei Anbau, Verarbeitung und Transport entstehen, immer weiter reduzieren.

Da viele einjährige Pflanzen wie Mais und Getreide im konventionellen Anbau eher zu einem Humusabbau anstatt zu einer Kohlenstoffeinlagerung führen, fällt die Klimabilanz von Biogas auf Basis von Mais oder Getreide insgesamt deutlich weniger positiv aus als bei humusmehrenden Pflanzen, die direkt verbrannt werden. Bei einer Verarbeitung von Biogas zu Bioerdgas können die Emissionen aufgrund des höheren Energieaufwandes und des Methanschlupfes sogar größer sein als die Emissionsvermeidung. Wird das Bioerdgas jedoch in Kraft-Wärmekopplung genutzt, führt die Verstromung bei den heutigen Emissionsfaktoren des Strommixes wieder zu einer positiven Klimabilanz. Das CO_2-Minderungspotenzial ausgewählter Energiepflanzen ist in Abbildung 170 pro Hektar und in Abbildung 171 pro Kilowattstunde dargestellt.



GP=Ganzpflanze. GPS=Ganzpflanzensilage. Grafik: Eigene Darstellung.
Quellen: Eigene Berechnungen; FNR, 2015b, KTBL, 2012; Müller-Sämann & Hölscher, 2016; Kraft, 2017; Ferchau, et al., 2009; Statista, 2019d; Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik, 2007; Sticksel et al., 2018;

Abbildung 170: CO_2-Minderungspotenzial ausgewählter Energiepflanzen pro Hektar insgesamt (kg CO_2-Äq./ha)



Eigene Darstellung. Quelle: Eigene Berechnung

Abbildung 171: CO_2-Minderungspotenzial ausgewählter Energiepflanzen pro Kilowattstunde Bruttoenergieertrag (kg CO_2-Äq./kWh)

13.2.9.6 CO_2-Absorptionspotenzial von Rohstoffpflanzen

Erneuerbare Energien bieten vor allem die Möglichkeit, Energie mehr oder weniger klimaneutral bereitzustellen. Einige Energiepflanzen können zudem, wie bereits beschrieben, die Einlagerung von Kohlenstoff in den Boden fördern und somit als CO_2-Senke wirken. Die stoffliche Nutzung von Rohstoffpflanzen bietet darüber hinaus die Möglichkeit, deutlich größere Mengen langfristig in Gebäuden, Möbeln oder anderen langlebigen Konsumgütern zu binden. Beispielsweise können mit Baustoffen aus Miscanthus bei Hektarerträgen von 18 (12 – 25) t TM und einem Absorptionspotenzial von rund 1,87 t CO_2 pro Tonne Trockenmasse (Schwarz, et al., 1993) rund 34 (22 – 47) t CO_2 pro Hektar gebunden werden . Dies entspricht ungefähr dem Treibhausgasausstoß von drei Bundesbürgern im Jahr 2017.

Tabelle 427: CO_2-Absorptionspotenzial von Miscanthus bei dauerhafter stofflicher Nutzung

Kennwert	niedrig	mittel	hoch
Ertragspotenzial (t FM/ha)	[1] 12,5-17,5	[1] 17,5-27,5	[1] 27,5-35,0
Mittlerer Ertrag (t TM/ha)	[1] 12,0	18,0	25,0
CO_2-Absorption (t CO_2/ha)	[2] 22,4	33,6	46,7

Quellen: (1) KTBL, 2012; (2) Eigene Berechnung nach KTBL, 2012, und Schwarz, Greef, & Schnug, 1993;

Zu fertigen Produkten liegen jedoch nur in Ausnahmefällen vollständige Klimabilanzen vor, die auch die Verarbeitung beinhalten. Ein Beispiel ist der bereits dargestellte Hanfdämmstoff der Firma Hock, der pro Kubikmeter rund 71,9 kg CO_2 absorbiert. Der Energieaufwand der Herstellung setzte im Jahr 2010 rund 57,5 kg CO_2-Äq./m³ frei (Hock GmbH, o. J. S. 11). Geht man einen Dämmstoffertrag von ca. 86 Kubikmeter pro Hektar aus (vgl. 11.2.2.9) aus, können damit zum Zeitpunkt der Auslieferung ab Werk mehr als 1,2 t CO_2/ha dauerhaft gebunden werden. Da inzwischen nicht der gesamte Strohertrag zu Dämmstoff verarbeitet wird und der Emissionsfaktor des deutschen Strommixes seit 2010 deutlich gesunken ist, dürfte sich das Absorptionspotenzial dementsprechend erhöht haben.

Mangels Datenverfügbarkeit konnten an dieser Stelle keine weiteren Beispiele angeführt werden. Wie die beiden Beispiele andeuten, dürfte das Potenzial der CO_2-Absortption durch eine stoffliche Nutzung pro Hektar jedoch beachtlich sein, sobald der deutsche Strommix überwiegend auf erneuerbaren Energien basiert.

13.2.9.7 Treibhausgasemissionen durch importbedingte Landnutzungsänderungen

Neben den direkten Emissionen und Emissionsminderungen durch die lokale Produktion müssen auch indirekte Effekte berücksichtigt werden. Wird z. B. durch den Bau von neuen Wohngebieten oder den Anbau von Energie- oder Rohstoffpflanzen in Deutschland Nahrungsproduktion verdrängt, müssen diese Nahrungsmittel aufgrund der hohen Importabhängigkeit der aktuellen deutschen Ernährungsgewohnheiten aus dem Ausland bezogen werden. Da die deutschen Durchschnittserträge deutlich über den globalen Durchschnittserträgen liegen, müssen im Ausland jedoch größere Flächen in Anspruch genommen werden, um die gleiche Menge an Nahrungsmitteln bereitzustellen. So lagen z. B. die Maiserträge in Deutschland in den vier Jahren 2014 bis 2017 um den Faktor 1,74 und die Weizenerträge um den Faktor 2,35 über dem globalen Durchschnitt. Wird Weizen aus Brasilien importiert, müssen dort ca. drei Hektar in Anspruch genommen werden, um den Verlust von einem Hektar in Deutschland zu kompensieren. Für die Kompensation eines Hektar Mais benötigt man in Brasilien etwa 1,5 bis zwei Hektar, im Fall von Soja wird nur etwas mehr als ein Hektar benötigt[128].

Vereinfachend kann man daher von knapp zwei Hektar ausgehen, die benötigt werden, um den Verlust von einem Hektar Ackerlands in Deutschland durch Importe zu kompensieren. Wird diese Fläche in Südamerika durch Regenwaldrodung gewonnen, setzt dies beachtliche Mengen Kohlenstoff frei: Nach IPCC, 2006, umfasst ein Hektar südamerikanischer Regenwald rund 220 (210-280) t TM überirdischer Biomasse (IPCC, 2006 S. 4.54) bei einem Kohlenstoffanteil von 0,47 (0,44 – 0,49) t C/t TM (IPCC, 2006 S. 4.48). Hinzu kommen pro Tonne oberirdischer Biomasse rund 0,24 (0,22 – 0,33) t TM unterirdische Biomasse (Wurzeln). Geht man von einer vollständigen Freisetzung des in der oberirdischen Biomasse enthaltenen Kohlenstoffs bei der Rodung (z. B. bei Brandrodung) aus, so ergeben sich daraus bei einem Umrechnungsfaktor von 3,67 rund 362 t/CO_2 pro Hektar bzw. 36,2 kg CO_2/m².

Da die Produktivität deutscher Ackerflächen, wie dargestellt, fast doppelt so hoch ist, ergibt sich somit bezogen auf den Anbauflächenverlust in Deutschland potenziell ein CO_2-Ausstoß von rund 720 t CO_2 pro Hektar - allein aus der möglicherweise indirekt verursachten Waldrodung. Hinzukommen u. a. Emissionen aus Transport und Lagerung.

Dieses vereinfachte Beispiel macht deutlich, in welcher Größenordnung sich solche indirekten Effekte durch eine zusätzliche Flächeninanspruchnahme im Ausland bewegen können.

[128] Die Sojaerträge in Brasilien liegen im Schnitt knapp unter 3 t/ha und damit nur etwas unterhalb der deutschen Erträge (vgl. FAOSTAT und KTBL, 2019).

13.3 Unsicherheiten und Datenlücken

Mit Blick auf die dargestellten Umweltkennwerte bestehen die größten Unsicherheiten sicherlich in den Bereichen Wasserhaushalt und Klimawirkung/Treibhausgasemissionen. Der Wasserhaushalt wird durch den Anbau von Nutzpflanzen sehr unterschiedlich beeinflusst. Bisher liegen jedoch noch zu einem relevanten Teil der Nutzpflanzen keine Transpirationskoeffizienten vor. Noch weniger Daten liegen zum Einfluss der Pflanzen auf Interzeption und Evaporation vor. Hier lässt die Datengrundlage keinen sinnvollen Vergleich zu. Es erscheint jedoch empfehlenswert, diese Datenlücken zu schließen, nicht zuletzt, um den Einsatz der Energiepflanzen besser auf die Anforderungen der Wasserwirtschaft abstimmen zu können und die ihre unterschiedlichen Eigenschaften optimal nutzbar zu machen. Die Angaben zu den Klimabilanzen von Energiepflanzen weisen, wie bereits dargestellt, eine große Spanne auf. Zudem ist die Vergleichbarkeit der vorliegenden Bilanzen dadurch eingeschränkt, dass die Berücksichtigung von Koppelprodukten in den bisherigen Veröffentlichungen selten vollständig übereinstimmt und zudem nicht immer nachvollziehbar ist. Als Orientierungswerte können die vorliegenden Werte aber sehr dienlich sein. Bezüglich der Vergleichbarkeit der Klimabilanzen von Energiepflanzen erster und zweiter Generation sollte die Datengrundlage jedoch dringend verbessert werden. Hier wird noch erheblicher Forschungsbedarf gesehen. Insbesondere mangelt es an Daten zum ökologischen Anbau von Energie- und Rohstoffpflanzen. Das Schließen dieser Datenlücken erscheint besonders relevant, um den Klimaschutz noch gezielter mit anderen positiven Wirkungen auf Natur- und Umweltschutz verknüpfen zu können. In Tabelle 428 erfolgt eine Einschätzung der Datenbasis zu den flächenbezogenen Umweltkennwerten.

Tabelle 428: Einschätzung der Datenbasis zu flächenbezogenen Umweltkennwerten

Produktgruppe	Einschätzung der Datenverfügbarkeit	Einschätzung der Datenqualität
Vielfalt der Kulturpflanzen	gut	gut
Lebensraumqualität	befriedigend	gut
Insektenweidepotenzial	gut, mit kleineren Lücken	gut
Schadstoffeintrag	gut bis befriedigend	gut
Düngemittelaufwand	gut bis befriedigend	gut
Störungen	gut bis befriedigend	gut/befriedigend
Erosionsschutz	gut	gut
Wasserhaushalt	große Datenlücken*	gut
Treibhausgasemissionen	große Datenlücken**	befriedigend***

* Für viele Pflanzen liegen bereits Transpirationskennwerte vor. Es mangelt an Daten zu Interzeption und Evaporation. ** Bilanzen liegen nur zu einem Teil der Pflanzen vor. *** Teilweise mangelt es an Vergleichbarkeit, z. B. aufgrund der unterschiedlichen Berücksichtigung von Koppelprodukten
Quelle: Eigene Einschätzung

14 Basisdaten der Landkreise

Für die Berechnung der möglichen Autonomiegrade werden neben den zuvor dargestellten Bedarfsmengen und Ertragskennwerten verschiedene Daten zur Bevölkerung, dem Energieverbrauch, den Flächen und der Landnutzung der Landkreise benötigt, die in den folgenden Tabellen zusammengefasst sind.

14.1 Bevölkerung

Neben der Bevölkerung im Jahr 2017 ist in Tabelle 429 die Bevölkerung im Jahr 2035 gemäß der Vorausrechnung des Statistischen Landesamtes Baden-Württemberg dargestellt. Der Landkreis Esslingen weist die größte Bevölkerung auf, in den Kreisen Konstanz und Ravensburg leben etwa halb so viele Menschen. Die Bevölkerung im Bodenseekreis entspricht etwa 40 Prozent und die Bevölkerung des Landkreises Sigmaringen etwa einem Viertel der Bevölkerung des Kreises Esslingen. Die Zahl der Einwohner pro Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche unterscheidet sich deutlich und variiert zwischen 2,4 Personen pro Hektar im Kreis Sigmaringen und 26,7 Personen pro Hektar im Kreis Esslingen.

Tabelle 429: Bevölkerung der Landkreise

Kennwert	Einheit	LKR Konstanz	LKR Esslingen	LKR Ravensburg	Bodensee-kreis	LKR Sigmaringen
Bevölkerung 2017	Einwohner	284.015	532.447	283.264	214.655	130.192
Bevölkerungs-prognose 2035	Einwohner	290.502	548.769	293.007	217.943	133.890
Erw. Bevölkerungs-zuwachs bis 2035	Prozent	2,3	3,1	3,4	1,5	2,8
Personen pro ha LNF	Personen	8,5	26,7	3,3	6,4	2,4
Personen pro Haushalt	Personen	2,1	2,2	2,4	2,2	2,4

Quelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: Regionaldatenbank, Stand August 2019

Die Zahl der Personen pro Haushalt liegt zwischen 2,1 im Kreis Konstanz und 2,4 im Kreis Sigmaringen. Die Zahl der Personen pro Haushalt hat Einfluss auf den Energiebedarf der Privathaushalte pro Person. So benötigen Einpersonenhaushalte durchschnittlich fast doppelt so viel Strom pro Person wie ein Haushalt mit 5 oder mehr Personen.

14.2 Stromverbrauch der Privathaushalte

Im Jahr 2017 lag der Stromverbrauch bei 1.955 kWh pro Einpersonenhaushalt und 3.216 kWh pro Zweipersonenhaushalt. In Haushalten mit drei oder mehr Personen betrug er 4.985 kWh

pro Haushalt (Statistisches Bundesamt, 2019f). Über die Anzahl der Privathaushalte der jeweiligen Haushaltsgrößen, dargestellt in Tabelle 430, kann der Stromverbrauch der Haushalte geschätzt werden.

Tabelle 430: Private Wohnhaushalte nach Haushaltsgröße 2017

Landkreis	1 Person	2 Personen	3 und mehr Personen
Konstanz	52.686	42.620	39.981
Esslingen	87.915	75.944	78.987
Ravensburg	41.468	37.703	43.688
Bodenseekreis	36.101	32.961	30.218
Sigmaringen	17.723	17.686	20.603

Quelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: Regionaldatenbank, 2019

Der anhand dieser Daten geschätzte Stromverbrauch der Privathaushalte beläuft sich auf Werte zwischen 1.483 kWh/Ea im Landkreis Ravensburg und 1.547 kWh/Ea im Landkreis Konstanz. Die Differenz zwischen diesen beiden Landkreisen beträgt somit 4,3 Prozent.

Tabelle 431: Geschätzter Stromverbrauch der Privathaushalte pro Einwohner

Kennwert	Einheit	LKR Konstanz	LKR Esslingen	LKR Ravensburg	Bodensee-kreis	LKR Sigmaringen
Stromverbrauch	kWh/Ea	1.547	1.521	1.483	1.524	1.492

Quelle: Eigene Berechnung

Der Landkreis Konstanz benötigt somit nach dieser Schätzung 18 GWh Strom mehr als er benötigen würde, wenn der Stromverbrauch der Haushalte dem Wert des Landkreises Ravensburg entsprechen würde. Für die Bereitstellung dieser zusätzlich benötigten Energie werden ca. 4 große Windenergieanlagen mit einem Jahresertrag von 4,5 GWh pro Anlage benötigt.

14.3 Pkw-Neuzulassungen

Über die Neuzulassungen pro Jahr kann der Bedarf an nachwachsenden Rohstoffen für die Automobilherstellung berechnet werden. Die Automobilproduktion findet zwar in der Regel nicht im eigenen Landkreis statt, rechnerisch müssen der Rohstoffbedarf und der damit verbundene Flächenbedarf jedoch berücksichtigt werden. Zudem sind die Lieferwege in Baden-Württemberg aufgrund der zahlreichen Hersteller und Zulieferer relativ kurz, sodass eine Produktion der Rohstoffe zumindest im Kreis Esslingen durchaus infrage kommt. Die Werte bewegen sich in einer Größenordnung zwischen 29 und 48 Neuzulassungen je 1.000 Einwohner, was insgesamt 4.394 bis 25.665 Neuzulassungen pro Jahr entspricht (Kraftfahrt-Bundesamt, 2019). Es bestehen somit erhebliche Unterschiede zwischen den Landkreisen.

Tabelle 432: Pkw-Neuzulassungen in den Landkreisen 2017

Kennwert	Einheit	LKR Konstanz	LKR Esslingen	LKR Ravensburg	Boden-seekreis	LKR Sigmaringen
Pkw-Neuzulassungen	Pkw/Jahr	8.349	25.665	8.971	8.591	4.294
Pkw-Neuzulassungen pro 1.000 EW	Pkw/1.000 Einwohner	29,40	48,20	31,67	40,02	32,98

Quelle: Kraftfahrt-Bundesamt, August 2019;

14.4 Jahresfahrleistungen

Die Jahresfahrleistungen der Kraftfahrzeuge sind einer der beiden entscheidenden Faktoren für den Energieverbrauch des Straßenverkehrs und daher eine notwendige Grundlage für die Schätzung des Energiebedarfs.

Tabelle 433: Jahresfahrleistungen in den Landkreisen 2017 insgesamt (Mio. km)

Verkehrsmittel	Einheit	LKR Konstanz	LKR Esslingen	LKR Ravensburg	Boden-seekreis	LKR Sigmaringen
Krafträder	Mio. km	32,7	55,1	38,9	41,4	22,5
Pkw	Mio. km	1.699,8	3.496,4	2.362,7	1.510,20	923,4
LNF	Mio. km	127,4	275,6	174,7	94,3	61,4
SNF, Busse	Mio. km	112,7	243,6	177,7	84,2	61,0

Quelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: Regionaldatenbank, 2019

Das Verkehrsaufkommen pro Einwohner in den Landkreisen unterscheidet sich erheblich. So liegt allein die Jahresfahrleistung der Pkw im Landkreis Ravensburg um 39 Prozent über dem Vergleichswert des Landkreises Esslingen.

Tabelle 434: Jahresfahrleistungen in den Landkreisen 2017 pro Einwohner (km/Einwohner)

Verkehrsmittel	Einheit	LKR Konstanz	LKR Esslingen	LKR Ravensburg	Boden-seekreis	LKR Sigmaringen
Krafträder	km/EW	115	103	137	193	173
Pkw	km/EW	5.985	6.567	8.341	7.035	7.093
LNF	km/EW	449	518	617	439	472
SNF, Busse	km/EW	397	458	627	392	469

Quelle: Eigene Berechnung

14.5 Wohnfläche

Die Wohnfläche pro Einwohner wurde anhand von Daten des Zensus 2011 zur Wohnfläche der vorhandenen Wohnungen und der Wohnungsfertigstellungen zwischen 2011 und 2017

geschätzt. Für das Jahr 2017 ergab sich somit eine Spanne von 42,5 m²/Einwohner im Landkreis Esslingen bis 48,3 m²/Einwohner im Landkreis Sigmaringen. Sofern sich die Bevölkerungsentwicklung in der Größenordnung der Vorausberechnung bewegt, wird sich die Wohnfläche pro Einwohner bis 2035 durch den Neubau nur unwesentlich verändern, insbesondere, wenn die Neubauwohnfläche nicht erheblich von den unterstellten 50 m² Wohnfläche pro Neubürger abweicht.

Tabelle 435: Wohnflächenentwicklung in den Landkreisen 2011 – 2035

Kennwert	Einheit	Bodensee-kreis	LKR Esslingen	LKR Konstanz	LKR Ravens-burg	LKR Sigmaringen
Wohnfläche 2017*	1.000 m²	9.817	22.631	12.521	12.435	6.286
Wohnfläche pro Einwohner 2017*	m²/EW	45,7	42,5	44,1	43,9	48,3
Unterstellter Neubau pro Neubürger	m²	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
Neubaubedarf insgesamt pro Jahr (Prognose)	m²	9.133	45.339	18.019	27.064	10.272
Wohnfläche 2035 (Prognose)	1.000 m²	9.981	23.447	12.845	12.923	6.471
Wohnfläche pro EW 2035	m²/EW	45,8	42,7	44,2	44,1	48,3

* Daten zur Wohnfläche werden in der Zensus2011-Datenbank in Größenintervallgruppen angegeben. Die Berechnungsergebnisse können daher von den tatsächlichen Werten abweichen. Eine Überprüfung der Wohnfläche pro Einwohner war nur im Landkreis Konstanz möglich, wo sich jedoch eine gute Übereinstimmung der Werte zeigte.
Quellen: Eigene Berechnung nach Zensus 2011-Datenbank und Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Regionaldatenbank, 2019

14.6 Abfallaufkommen

Bei den Abfällen, die für das regenerative Energiepotenzial eine größere Relevanz haben, handelt es sich vor allem um das Aufkommen an Bio- und Grünabfällen und das Altholzaufkommen der Kategorien A I bis A IV. Bio- und Grünabfälle können in Biogasanlagen zur Energiegewinnung genutzt werden. „Altholz der Kategorien A I und A II kann in Anlagen nach 1. BImSchV zur energetischen Verwertung eingesetzt werden (= Restholz)“ (MLR Baden-Württemberg, 2010 S. 102). Das Bioabfallaufkommen des Jahres 2017 lag in den Landkreisen zwischen 13.000 und 72.000 Tonnen. Daten zum Altholzaufkommen in den Landkreisen lagen nicht vor, weshalb die Aufkommen über den Durchschnittswert des Bundeslandes geschätzt wurden. Das Altholzaufkommen des Landes Baden-Württemberg im Jahr 2008 betrug „519.000 Tonnen, von denen rd. 400.000 Tonnen tatsächlich energetisch verwertet wurden“ (MLR Baden-Württemberg, 2010 S. 102). Bei einer Bevölkerung von 10.749.506 Einwohnern entspricht dies einem Aufkommen von 48 kg pro Einwohner.

Tabelle 436: Bioabfallaufkommen in den Landkreisen 2017

Abfallart	Einheit	LKR Konstanz	LKR Esslingen	LKR Ravensburg	Boden-seekreis	LKR Sigmaringen
Bioabfall	1.000 t/a	40	72	34	35	13

Quelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: Regionaldatenbank, 2019

14.7 Freiflächen

Die Landkreise verfügen sowohl absolut als auch pro Einwohner über Freiflächen sehr unterschiedlicher Größe. Der Landkreis Esslingen verfügt mit nur 0,126 ha pro Einwohner über die geringsten Freiflächen. Somit stehen dort nur 9,4 Prozent der Freiflächen zur Verfügung, die im Landkreis Sigmaringen pro Einwohner genutzt werden können. Die Landkreise Konstanz und Bodenseekreis können im Vergleich zum Kreis Esslingen ungefähr die dreifache Menge an Freiflächen nutzen, der Landkreis Ravensburg sogar die achtfache Menge. Bei den Autonomiepotenzialberechnungen wurde, dem Ziel der Bundesregierung entsprechend (BMUB, 2007 S. 31), angenommen, dass 5 Prozent der Waldflächen aus ökologischen Gründen nicht mehr forstwirtschaftlich bewirtschaftet werden[129].

Tabelle 437: Freiflächen in den Landkreisen 2017

Freiflächen	Einheit	LKR Konstanz	LKR Esslingen	LKR Ravensburg	Boden-seekreis	LKR Sigmaringen
Insgesamt [1)]						
Landwirt. Fläche	ha	40.225	28.306	94.083	36.776	59.418
LNF	ha	33.372	19.908	86.042	33.530	54.773
Acker	ha	18.648	9.988	27.384	13.720	34.631
Grünland	ha	13.548	9.495	56.968	11.673	20.046
Obstanlagen	ha	1.032	191	1.536	7.523	21
Rebland	ha	66	120	0	539	0
Waldfläche	ha	27.366	18.573	45.361	18.469	46.120
Pro Einwohner [1)]						
LNF	ha/EW	0,165	0,055	0,504	0,210	0,574
Acker	ha/EW	0,066	0,019	0,097	0,064	0,266
Grünland	ha/EW	0,048	0,018	0,201	0,054	0,154
Rebland	ha/EW	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000
Wald	ha/EW	0,096	0,035	0,160	0,086	0,354
SUMME	ha/EW	0,375	0,126	0,962	0,415	1,348

Quelle: (1) Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: Regionaldatenbank, Stand 2016/2017 (2) Eigene Berechnung

[129] In der Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt (NBS) der Bundesregierung wird bis zum Jahr 2020 eine natürliche Waldentwicklung auf 5 Prozent der gesamten Waldfläche bzw. 10 Prozent der öffentlichen Wälder angestrebt. Im April 2019 waren 2,8 Prozent der Waldfläche für die natürliche Entwicklung gesichert. (Bundesamt für Naturschutz, 2019)

14.8 Flächenverbrauch

Das Ausmaß des Flächenverbrauchs in den einzelnen Landkreisen unterscheidet sich erheblich. Dabei zeigt sich eine klare Tendenz, dass der Flächenverbrauch pro Einwohner umso geringer ist, je dichter ein Landkreis bereits besiedelt ist. Auf die vorhandenen Flächen bezogen, ist der jährlich verbrauchte Freiflächenanteil jedoch im Landkreis Esslingen am größten. Setzt sich die bisherige Entwicklung unverändert fort, wird das voraussichtliche Produktionspotenzial der Landwirtschaft bis zum Jahr 2035 zwischen 1,0 Prozent im Kreis Sigmaringen und 1,5 Prozent im Kreis Esslingen abnehmen. In Verbindung mit dem prognostizierten Bevölkerungswachstum wird sich dies erheblich auf die Autonomiepotenziale auswirken.

Tabelle 438: Flächenverbrauch in den Landkreisen 2000 – 2018

Freiflächenverbrauch	Einheit	LKR Konstanz	LKR Esslingen	LKR Ravensburg	Bodenseekreis	LKR Sigmaringen
Flächenverbrauch pro Jahr 2000 - 2008 [1)]	ha	90,6	100,5	148,3	77,6	65,4
Flächenverbrauch pro Jahr 2008 - 2018 [1)]	ha	51,0	32,4	103,0	44,5	60,8
Flächenverbrauch pro Jahr 2008 - 2018 [2)]	Prozent	0,15 %	0,16 %	0,12 %	0,13 %	0,11 %
Flächenverbrauch pro Einwohner und Jahr 2008 - 2018 [2)]	m²/Ea	1,80	0,61	3,64	2,07	4,67
Prognostizierter LNF-Verlust bis 2035 [2)]	Prozent	1,4 %	1,5 %	1,1 %	1,2 %	1,0 %

Quelle: (1) Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: Regionaldatenbank, Stand August 2016/2017
(2) Eigene Berechnung

14.9 Baumbestand

Infolge des Klimawandels ist mit großen Veränderungen bei der Zusammensetzung des Baumbestandes und der Höhe des Holzaufkommens zu rechnen. Dies trifft besondere auf die Landkreise Ravensburg, Bodenseekreis und Sigmaringen zu, die Nadelbaumanteile zwischen 60 und 70 Prozent aufweisen (MLR Baden-Württemberg, 2019). Mit 43 bzw. 33 Prozent sind die Nadelbaumanteile in den Kreisen Konstanz und Esslingen geringer. Die zu erwartenden Veränderungen bei den Erträgen müssen deshalb jedoch nicht wesentlich geringer ausfallen, denn trockene Sommer wie in den Jahren 2018 und 2019 können auch Buchen größeren Schaden zufügen, als dies bisher bei Schätzungen zu den Auswirkungen des Klimawandels erwartet wurde. In Norddeutschland sind die Böden durch die anhaltende Trockenheit „bis in zwei Meter Tiefe ausgetrocknet, die Buchen verdursten regelrecht. Infolge der Trockenheit befallen zahlreiche Schadorganismen die bereits geschwächten Bäume“ (Landesforsten Niedersachsen, 2019). In Süddeutschland sind die Folgen bisher etwas geringer, aber mit

deutlichen regionalen Unterschieden. Die vorliegende Potenzialschätzung zu den Autonomiegraden, die auf den heutigen Baumbeständen basiert, ist dementsprechend mit Unsicherheiten behaftet und muss künftig mithilfe eines Monitorings überprüft und angepasst werden.

Tabelle 439: Anteile der Baumarten am Baumbestand in den Landkreisen

Baumart	Einheit	LKR Konstanz	LKR Esslingen	LKR Ravensburg	Boden-seekreis	LKR Sigmaringen
Buche	Prozent	32	34	10	23	21
Eiche	Prozent	4	16		4	4
Sonstige Laubbäume	Prozent	21	17	20	13	6
Fichte	Prozent	28	19	60	43	58
Tanne	Prozent				3	
Lärche	Prozent	5			3	3
Kiefer	Prozent	7	8		9	3
Douglasie	Prozent				2	
Sonstige Nadelbäume	Prozent	3	6	10		5
Anteil Nadelbäume	**Prozent**	**43**	**33**	**70**	**60**	**69**

Quelle: MLR Baden-Württemberg, 2019

14.10 Obstanlagennutzung

Die Anteile der Kulturpflanzen an den Obstanlagen unterscheiden sich von Landkreis zu Landkreis erheblich. Die größten Anteile an der Obstanlagenfläche entfallen in der Regel auf Äpfel. In Sigmaringen werden dagegen mit einem Anteil von 80 Prozent vor allem Erdbeeren angebaut. Im Gesamtwert der fünf Landkreise dominieren Apfelbestände, mit einem Anteil von rund 76 Prozent. Sonstige Baumobstbestände haben einen Anteil von rund 12 Prozent, Erdbeeren von 10 Prozent und Strauchbeeren von weniger als 3 Prozent.

Tabelle 440: Anteile der Obstarten an der Obstanlagenfläche

Obstarten	Einheit	LKR Konstanz	LKR Esslingen	LKR Ravensburg	Boden-seekreis	LKR Sigmaringen
Äpfel	Prozent	79	34	63	80	17
Birnen	Prozent	4	4	2	3	3
Pflaumen/Zwetschgen	Prozent	2	3	3	4	0
Süßkirschen	Prozent	3	9	8	4	0
Sauerkirschen	Prozent	0	2	1	1	0
Mirabellen/Renekloden	Prozent	0	0	0	0	0
Strauchbeeren	Prozent	2	7	7	2	0
Erdbeeren im Ertrag	Prozent	6	34	12	4	80
Erdb. nicht im Ertrag	Prozent	4	7	4	2	0

Quelle: (1) Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2019: Regionaldatenbank, Stand 2016/2017

14.11 Viehbestände

Die Viehbestände pro Einwohner in den Landkreisen unterscheiden sich ähnlich deutlich, wie die pro Einwohner verfügbaren Landwirtschaftsflächen. Dementsprechend unterscheiden sich auch die Futtermittelbedarfe und die potenziell energetisch nutzbaren Aufkommen an Mist und Gülle. Mit den verschiedenen Szenarien wurden den gewählten Ernährungsweisen und geplanten Flächennutzungen entsprechende Viehbestände berechnet. In den berechneten Szenarien und den sich daraus ergebenden Autonomiepotenzialen wurden nicht die aktuellen Viehbestände berücksichtigt, sondern jene Viehbestände bzw. jene Anteile der Viehbestände, die von den vor Ort vorhandenen Futterflächen ernährt werden können. Eine flächengebundene Viehhaltung wurde als nachhaltigste Form der Viehhaltung angenommen und entspricht den Regeln der ökologischen Landwirtschaft (LTZ Augustenberg, 2020 S. 2). In Tabelle 441 sind die Viehbestände des Jahres 2016 dargestellt. Aktuellere Daten lagen noch nicht vor.

Tabelle 441: Viehbestände der Landkreise 2016

Viehbestand	Einheit	LKR Konstanz	LKR Esslingen	LKR Ravensburg	Boden-seekreis	LKR Sigmaringen
Rinder	Tiere	25.707	8.862	143.904	22.726	37.686
Milchkühe	Tiere	9.151	2.271	70.163	9.226	13.646
Schweine	Tiere	15.012	6.539	50.978	14.273	100.727
Zuchtsauen	Tiere	1.157	949	6.612	1.002	10.928
Schafe	Tiere	4.388	13.335	5.279	4.296	3.887
Pferde	Tiere	1.984	2.667	3.599	1.656	1.617
Ziegen	Tiere	262	975	1.191	963	751
Hühner	Tiere	117.078	77.928	100.972	k. A.	189.421

Quelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: Regionaldatenbank, Stand August 2019

14.12 Solarpotenzial der Gebäude

Das durch die LUBW ermittelte Solarpotenzial auf Dachflächen in den Landkreisen liegt zwischen 20,1 m² pro Einwohner im Landkreis Konstanz und 35,8 m² pro Einwohner im Landkreis Sigmaringen (LUBW, 2019a). Das Ertragspotenzial von Solarthermieanlagen wurde anhand der Globalstrahlungskarte auf 520 bis 540 kWh/m² geschätzt.

Tabelle 442: Solarpotenzial auf Dachflächen 2017

Solar-Potenzial	Einheit	LKR Konstanz	LKR Esslingen	LKR Ravensburg	Boden-seekreis	LKR Sigmaringen
Geeignete Dachflächen für Solaranlagen [1)]	m²/EW	20,1	20,3	29,8	22,3	35,8
Energieertrag Solarthermie [2)]	kWh/m²	540	520	540	540	540

Quellen: (1) (LUBW, 2019a) (2) Eigene Schätzung nach Globalstrahlungskarte

14.13 Windenergie

Im Jahr 2015 verfügten die betrachteten Landkreise im Bereich der Windenergie nur über geringe Erzeugungskapazitäten. Mit knapp 17 GWh pro Jahr lag der Kreis Ravensburg dabei deutlich vor den Kreisen Sigmaringen und Esslingen. In den Kreisen Konstanz und Bodenseekreis waren im Jahr 2015 noch keine Anlagen in Betrieb. Die Potenziale unterscheiden sich ebenfalls deutlich.

Für den Landkreis Esslingen liegt bisher allerdings keine Potenzialstudie vor. Der Verband Region Stuttgart (2016/2018) gibt für den gesamten Landkreis Esslingen neben einer bestehenden Windenergieanlage insgesamt drei mögliche konfliktfreie Standorte für Windenergieanlagen an (Verband Region Stuttgart, 2016/2018). Geht man von einer Anlage pro Standort aus, sollte ein Potenzial von mindestens 12 bis 18 GWh/a erschließbar sein. Gemeinsam mit der Bestandsanlage läge das Gesamtpotenzial dann bei mindestens 15 bis 21 GWh/a. Möglicherweise ist das Potenzial aber auch größer: Allein im Klimaschutzkonzept der Stadt Kirchheim unter Teck wurde ein technisches Potenzial von 19,8 GWh/a ermittelt.

Trotzdem dürfte das Windenergiepotenzial, auch bei einer höheren Anzahl von Anlagen an den drei potenziellen Standorten deutlich geringer sein, als das Gesamtpotenzial im vergleichsweise dünn besiedelten Landkreis Sigmaringen, das in einer Untersuchung aus dem Jahr 2012 auf 299 GWh pro Jahr geschätzt wurde (Regionalverband Bodensee-Oberschwaben, 2012 S. 32). Die Gesamtpotenziale von Bodenseekreis und Kreis Ravensburg wurden auf 101 GWh/a und 240 GWh/a geschätzt (vgl. Tabelle 443). Wie groß jeweils die umsetzbaren Potenziale sind, ist jedoch noch nicht bekannt. Im Landkreis Konstanz wurde das technische Potenzial auf ca. 120 GWh/a geschätzt, das umsetzbare Potenzial dagegen auf ca. 60 GWh/a.

Tabelle 443: Bestand und Potenzial der Windenergie in den Landkreisen

Windenergiepotenzial	Einheit	LKR Konstanz	LKR Esslingen	LKR Ravensburg	Bodenseekreis	LKR Sigmaringen
Erzeugungskapazität 2015 [1)]	MWh/a	0	3.000	16.781	0	3.801
Erzeugungspotenzial Insgesamt	MWh/a	[2)] 60.000	[4)] 20.000	[3)] 240.000	[3)] 101.000	[3)] 299.000

Quellen: (1) Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2019; (2) Simon & Szaguhn, 2017, S. 125; (3) Regionalverband Bodensee-Oberschwaben, 2012; (4) Eigene Schätzung n. Verband Region Stuttgart, 2016/2018.

14.14 Erzeugungskapazität flächenunabhängiger Energien

Neben den flächenabhängigen Energiequellen Solarenergie, Bioenergie und Windenergie werden in den Landkreisen bereits Wasserkraft und Klärgas als erneuerbare Energiequellen

genutzt. Die vorhandenen Erzeugungskapazitäten im Jahr 2015 sind in Tabelle 444 dargestellt. Geothermie wurde bis dahin noch nicht genutzt. (Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2019) Aktuellere Daten waren nicht verfügbar.

Tabelle 444: Erzeugungskapazität flächenunabhängiger erneuerbarer Energien 2015

Energiequelle	Einheit	LKR Konstanz	LKR Esslingen	LKR Ravensburg	Bodenseekreis	LKR Sigmaringen
Wasserkraft	MWh/Jahr	19.604	63.233	46.746	2.631	16.534
Klärgas etc.	MWh/Jahr	2.941	4.803	1.327	1.289	233
Geothermie	MWh/Jahr	0	0	0	0	0

Quelle: Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, 2019

14.15 Energieverbrauch der Industrie

Der Energieverbrauch der Industrie in den Landkreisen wird regelmäßig durch das Statistische Landesamt Baden-Württemberg veröffentlicht (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2018f). Die Spanne reicht von 3.781 kWh pro Einwohner im Kreis Sigmaringen bis zu 6.966 kWh pro Einwohner im Kreis Ravensburg.

Tabelle 445: Energieverbrauch der Industrie in den Landkreisen 2017

Energieträger	Einheit	LKR Konstanz	LKR Esslingen	LKR Ravensburg	Bodenseekreis	LKR Sigmaringen
Strom	TJ	2.158	4.140	2.272	1.750	1.093
Gas	TJ	2.128	2.734	3.907	1.417	491
Öl	TJ	67	437	178	84	112
Wärme	TJ	288	665			76
Kohle	TJ					
Erneuerbare	TJ	9	31	740		
Sonstige	TJ	0	35	7	3	
SUMME	TJ	**4.650**	**8.042**	**7.104**	**3.254**	**1.772**

Quelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2018f

14.16 Energieverbrauch GHD und öffentliche Liegenschaften

Der Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel und Dienstleistung (GHD) und der Energieverbrauch des öffentlichen Sektors werden bisher nicht systematisch nach Landkreisen differenziert erfasst bzw. veröffentlicht. Beide Werte wurden daher anhand des bundesweiten Durchschnitts geschätzt. Der Energieverbrauch des Sektors GHD betrug im Jahr 2009 rund 4,8 MWh/Ea. Rund 34 Prozent des Energieverbrauchs entfielen auf Strom (Umweltbundesamt, 2012). Sofern die Effizienzsteigerungen des Sektors GHD beim Verbrauch von Gas und Öl der Entwicklung im Sektor Wohnen nahekommen, dürfte der Verbrauch zwischen 2009 und 2017 um ca. 16 Prozent gesunken sein. Bei einem konstanten Stromverbrauch ergibt sich daraus eine Reduktion des Energiebedarfs von rund 11 Prozent.

Der öffentliche Sektor hat in Deutschland mit einem Verbrauch von rund 60 TWh pro Jahr einen Anteil von knapp zweieinhalb Prozent am Endenergieverbrauch (dena, 2019). In Städten mit Sitz überregionaler Verwaltung liegt der Energiebedarf der öffentlichen Hand deutlich über dem Durchschnitt, wie z. B. in der Landeshauptstadt Stuttgart. Daher ist davon auszugehen, dass der Energiebedarf der öffentlichen Einrichtungen in den hier betrachteten Landkreisen eher unter dem bundesweiten Durchschnitt liegt. Der geschätzte Endenergiebedarf von Gewerbe, Handel, Dienstleistung und öffentlichen Einrichtungen ist in Tabelle 446 dargestellt.

Tabelle 446: Energieverbrauch von Gewerbe, Handel, Dienstleistung und öffentlichen Einrichtungen

Energieträger	Einheit	GHD	Öffentliche Liegenschaften
Strom	kWh/Ea	1.640	40
Gas	kWh/Ea	1.360	95
Öl	kWh/Ea	1.260	85
SUMME	kWh/Ea	4.260	220

Quellen: Eigene Schätzung nach Umweltbundesamt (2012) und Dena (2019).

14.17 Beheizungsstruktur

Zur bestehenden Beheizungsstruktur in den Landkreisen liegen bisher keine verfügbaren Daten vor[130]. Sie wurde daher vereinfachend für alle Landkreise einheitlich geschätzt. Bei der Schätzung wurde jeweils von der Beheizungsstruktur des Landes Baden-Württemberg ausgegangen, die anschließend anhand von Informationen aus den vorhandenen Klimaschutzkonzepten der Landkreise angepasst wurde. Nach der Schätzung des Statistischen Landesamtes Baden-Württemberg hatte Heizöl in Baden-Württemberg im Jahr 2010 mit 43,4 Prozent den größten Anteil an der Wohnungsbeheizung, gefolgt von Gas mit 41,4 Prozent. Fernwärme wurde in 8,5 Prozent der Wohnungen genutzt, erneuerbare Energien hatten einen Anteil von 5,8 Prozent, sonstige Energiearten summierten sich auf 1,0 Prozent (Krentz, 2012). Da es sich bei Fernwärme in der Regel um Abwärme von Anlagen handelt, die mit Festbrennstoffen, Gas oder Öl betrieben werden, wurde ihr Anteil proportional den vorherrschenden Energieträgern Öl und Gas zugeteilt, da die Kohlenutzung in den Landkreisen keine große Rolle spielt. Da der Anteil erneuerbarer Energien seit dem Jahr 2010 insgesamt gewachsen ist, der Anteil des Energieträgers Holz am Neubau jedoch nur bei ca. 5 Prozent liegt, wurde der Anteil biogener Brennstoffe (v.a. Holz und Holzpellets) im Jahr 2012 auf ca. 6 Prozent geschätzt. Solarthermie und Umweltwärme hatten bisher nur geringe Anteile an der Wärmebereitstellung. Im Landkreis Ravensburg wurden ihre Anteile im Jahr 2012 auf 0,6 Prozent und 0,2 Prozent geschätzt (Energieagentur Ravensburg gGmbH, 2015a S. 56), im Landkreis Konstanz wurde der Anteil

[130] Die Schätzung des Statistischen Landesamtes zur Beheizungsstruktur in Baden-Württemberg beruht auf einer landesweiten Befragung. Die vorhandenen Datenbestände zu den Landkreisen werden aus Gründen des Datenschutzes nicht veröffentlicht, eine anonymisierte Auswertung der Daten liegt bisher nicht vor.

von Wärmepumpen im Jahr 2012 auf ca. 1,3 Prozent geschätzt (Simon, et al., 2017). Von 2012 bis 2016 lag der Anteil von Wärmepumpen im Neubau zwischen 30 und 32 Prozent und stieg im Jahr 2017 auf 37 Prozent (Statista, 2019c). Im Kreis Ravensburg ist der Wohnungsbestand von 2012 bis 2017 um 4,6 Prozent gewachsen, im Kreis Konstanz um 4,0 Prozent und im Kreis Esslingen um 2,8 Prozent. Sofern der Anteil von Wärmepumpen am Neubau auf dem Niveau des bundesweiten Durchschnitts gelegen hat, dürfte ihr Anteil am Bestand im Kreis Ravensburg auf 1,6 Prozent und im Kreis Konstanz auf 2,5 Prozent gestiegen sein. Für den Kreis Esslingen lag keine Schätzung zur Beheizungsstruktur vor. Sollte der Anteil der Wärmepumpen im Jahr 2012 auf dem Niveau des Kreises Konstanz gelegen haben, dürfte ihr Anteil im Jahr 2017 ca. 2,1 Prozent betragen. (Vgl. Anhang II, Tabelle 489) Vereinfachend wurde daher ein Wärmepumpenanteil von 2 Prozent für alle Landkreise unterstellt.

14.18 Endenergiebedarf

Der auf Basis der zuvor genannten Landkreisdaten geschätzte Endenergiebedarf der Landkreise im Jahr 2017 ist in Tabelle 447 dargestellt. Neben dem berechneten Wert ist, sofern vorhanden, jeweils ein Vergleichswert aus früheren Erhebungen dargestellt. Für den Landkreis Sigmaringen lagen keine vergleichbaren Daten vor. Eine nennenswerte Unsicherheit bei der Schätzung des Energiebedarfs der Landkreise besteht vor allem mit Blick auf den Sektor GHD, zu dem keine Erhebungen auf Landkreisebene vorliegen.

Mit Blick auf die vorhandenen Vergleichswerte aus früheren Energiebilanzen erscheinen die berechneten Endenergiebedarfswerte jedoch durchaus plausibel: Im Landkreis Esslingen liegt der berechnete Wert mit 23,0 kWh/Ea lediglich um 0,9 Prozent unter dem Vergleichswert, der im Klimaschutzkonzept des Landkreises für das Jahr 2017 mit 23,2 kWh/Ea angegeben wird (IFEU Heidelberg, 2019 S. 14). Im Landkreis Ravensburg liegt er mit 27,7 MWh/Einwohner um 1,1 Prozent unter dem Vergleichswert des Jahres 2012. Im Bodenseekreis liegt der berechnete Energiebedarf des Jahres 2017 mit 24,0 MWh/Einwohner auf dem Niveau des Vergleichswertes des Jahres 2012. Im Kreis Konstanz existiert eine Schätzung des Endenergieverbrauchs aus dem Jahr 2017 (Simon, et al., 2017). Die Abweichung des berechneten Bedarfs vom Vergleichsweit aus dem Jahr 2017 um 1,5 MWh/Ea ist auf eine verbesserte Datengrundlage zurückzuführen. Davon betroffen sind sämtliche Sektoren.

Die Übereinstimmung der berechneten Endenergiebedarfswerte ist unerwartet hoch und deuten auf eine gewisse Stagnation des Endenergieverbrauchs hin. Die Ursachen dieser Stagnation können hier nicht im Detail nachvollzogen werden. Die vorliegenden Daten deuten aber darauf hin, dass die geringen Verbrauchseinsparungen vor allem auf industrielle Entwicklungen, Zunahmen bei den Jahresfahrleistungen im Transportverkehr und eine stagnierende

Treibstoffeffizienz im Pkw-Verkehr zurückzuführen sind. So bewegt sich der Treibstoffverbrauch des Pkw-Bestandes seit mehreren Jahren auf dem gleichen Niveau von ca. 7,3 Litern pro 100 Kilometer.

Tabelle 447: Endenergiebedarf in den Landkreisen 2017 insgesamt in MWh/Ea

Landkreis	Bedarf 2017 berechnet*	Vergleichs-wert	Bezugsjahr des Vergleichswertes	Quelle des Vergleichswertes
Bodenseekreis	24,0	24,0	2012	(Energieagentur Ravensburg, 2015b S. 58)
Esslingen	23,0	23,2	2017	(IFEU Heidelberg, 2019 S. 14)
Konstanz	25,2	23,7	2014	(Simon, et al., 2017 S. 14)
Ravensburg	27,7	28,0	2012	(Energieagentur Ravensburg gGmbH, 2015a S. 49)
Sigmaringen	25,0	-	-	-

* Eigene Berechnung

Im Bodenseekreis ist der Endenergieverbrauch der Industrie insgesamt um 3,3 Prozent gestiegen. Die Zunahmen des industriellen Energieverbrauchs und der Bevölkerung halten sich damit ungefähr die Waage. Allerdings ist die Fahrleistung im Straßenverkehr ist um 2,9 Prozent von 1.781,6 Mio. km im Jahr 2012 (Energieagentur Ravensburg, 2015b S. 46) auf 1.730,1 Mio. km im Jahr 2017 (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2019b) gesunken.

Anders als im Bodenseekreis ist im Kreis Ravensburg der Endenergieverbrauch der Industrie deutlich gesunken, während die Fahrleistung um knapp 1 Prozent zugenommen hat. In allen Landkreisen hat zudem der Transportverkehr zugenommen, der damit einen wachsenden Anteil zum Verkehrsaufkommen und zum Treibstoffverbrauch sowohl insgesamt als auch pro 100 Kilometer beiträgt.

Anhang II. Weitere Berechnungsgrundlagen

14.19 Nahrung / Ernährung

14.19.1 Bevölkerungsstruktur in Deutschland und Baden-Württemberg nach Altersgruppen

Tabelle 448: Bevölkerung in Deutschland 2017 nach Altersgruppen und Geschlecht (in 1.000)

Altersgruppe	Männer	Frauen	Insgesamt
unter 15 *	6.332	5.771	12.103
15 bis unter 20 Jahre	2.132	1.942	4.075
20 bis unter 25 Jahre	2.326	2.090	4.416
25 bis unter 50 Jahre	13.622	13.102	26.724
51 bis unter 65 Jahre	9.224	9.334	18.558
65 Jahre und älter	7.536	9.380	16.916
Gesamtbevölkerung	41.172	41.619	82.792

Quelle: Statistisches Bundesamt, 2019
* Für diese Altersgruppe wurde in der Statistik kein Anteil der Geschlechter angegeben. Die Anteile wurden daher auf Basis des Durchschnitts der Altersgruppe „15 bis unter 20 Jahr2“ geschätzt: 52,3 Prozent männlich, 57,7 Prozent weiblich.

Tabelle 449: Bevölkerung in Baden-Württemberg nach Altersgruppen und Geschlecht

Altersgruppe	Männer	Frauen	Insgesamt
unter 15 *	777.300	733.658	1.510.958
15 bis unter 20 Jahre	267.435	240.508	507.942
20 bis unter 25 Jahre	401.152	360.761	761.913
25 bis unter 50 Jahre	1.068.108	1.017.744	2.085.852
51 bis unter 65 Jahre	1.964.993	1.944.470	3.909.463
65 Jahre und älter	956.677	1.219.086	2.175.763
Gesamtbevölkerung	5.435.665	5.516.228	10.951.893

Quelle: Statistisches Bundesamt, 2019

14.19.2 PAL-Wert

Definition nach DGE (2018): „Der PAL-Wert (engl. physical activity level) ist das Maß für die körperliche Aktivität. Er bezeichnet den für körperliche Aktivitäten aufzuwendenden täglichen Mehrverbrauch an Energie in Verhältnis zum Ruheenergieverbrauch.

Die Höhe des PAL-Werts hängt von der Berufs- und Freizeitaktivität ab. Folgende Tabelle hilft bei der Bestimmung des PAL-Werts. Wer sportlich aktiv ist oder sonstige anstrengende Freizeitaktivitäten ausübt (30-60 Minuten, 4- bis 5-mal je Woche), kann zusätzlich pro Tag 0,3 PAL-Einheiten zu den genannten PAL-Werten hinzurechnen.“ (DGE, 2018c)

Tabelle 450: PAL-Wert nach Aktivität/Lebensweise

PAL	Beispiele
1,2 - 1,3	gebrechliche, immobile, bettlägerige Menschen (ausschließlich sitzende oder liegende Lebensweise)
1,4 - 1,5	Büroangestellte, Feinmechaniker (ausschließlich sitzende Tätigkeit mit wenig oder keiner anstrengenden Freizeitaktivität)
1,6 - 1,7	Laboranten, Studenten, Fließbandarbeiter (sitzende Tätigkeit, zeitweilig auch zusätzlicher Energieaufwand für gehende und stehende Tätigkeiten, wenig oder keine anstrengende Freizeitaktivität)
1,8 - 1,9	Verkäufer, Kellner, Mechaniker, Handwerker (überwiegend gehende und stehende Arbeit)
2,0 - 2,4	Bauarbeiter, Landwirte, Waldarbeiter, Bergarbeiter, Leistungssportler (körperlich anstrengende berufliche Arbeit oder sehr aktive Freizeittätigkeit)

Quelle: DGE, 2018c

„Die Referenzwerte für Energie sind Richtwerte, die als Orientierung dienen. Sie wurden für die verschiedenen Altersgruppen auf Basis von männlichen und weiblichen Referenzpersonen mit bestimmtem Körpergewicht und bestimmter Körpergröße und für verschiedene Ausmaße der körperlichen Aktivität (PAL-Wert) abgeleitet. Ziel der Richtwerte ist das Erreichen einer ausgeglichenen Energiebilanz bzw. einer Energiebilanz, mit der langfristig ein gesundheitsförderndes Körpergewicht erreicht wird. Nur die Richtwerte für Säuglinge wurden unabhängig von der körperlichen Aktivität abgeleitet und betragen für männliche bzw. weibliche Säuglinge im Alter von 0 bis unter 4 Monaten von 550 bzw. 500 kcal pro Tag und im Alter von 4 bis unter 12 Monaten von 700 bzw. 600 kcal pro Tag.“ (DGE, 2018c)

In Tabelle 451 sind die „Richtwerte für die durchschnittliche Energiezufuhr bei Personen unterschiedlichen Alters in Abhängigkeit vom Ruheenergieumsatz und der körperlichen Aktivität (PAL-Werte; PAL = *physical activity level*; Maß für die körperliche Aktivität) “ (DGE, 2018b) dargestellt. Diese Orientierungswerte gelten für den Normbereich: „Bei Abweichungen vom Normbereich, insbesondere bei Übergewicht und bei geringer körperlicher Aktivität, sind individuelle Anpassungen der Richtwerte notwendig. Entscheidender Kontrollparameter ist das aktuelle Körpergewicht.“ (DGE, 2018b)

Tabelle 451: Richtwerte für die Energiezufuhr in kcal/Tag nach DGE

Altersgruppe	PAL-Wert 1,4		PAL-Wert 1,6		PAL-Wert 1,8	
	m	w	m	w	m	w
1 bis unter 4 Jahre	1.200	1.100	1.300	1.200	—	—
4 bis unter 7 Jahre	1.400	1.300	1.600	1.500	1.800	1.700
7 bis unter 10 Jahre	1.700	1.500	1.900	1.800	2.100	2.000
10 bis unter 13 Jahre	1.900	1.700	2.200	2.000	2.400	2.200
13 bis unter 15 Jahre	2.300	1.900	2.600	2.200	2.900	2.500
15 bis unter 19 Jahre	2.600	2.000	3.000	2.300	3.400	2.600
19 bis unter 25 Jahre	2.400	1.900	2.800	2.200	3.100	2.500
25 bis unter 51 Jahre	2.300	1.800	2.700	2.100	3.000	2.400
51 bis unter 65 Jahre	2.200	1.700	2.500	2.000	2.800	2.200
65 Jahre und älter	2.100	1.700	2.500	1.900	2.800	2.100

PAL = physical activity level.
Quelle: DGE, 2018

14.19.3 Getreideerträge in Afrika

Tabelle 452: Getreideerträge in Afrika 2017 und unterstelltes Ertragspotenzial 2050 nach Ländern

Land	Anbaufläche in Hektar	Ertrag in Tonnen	Ertrag in t/ha	Unterstellte Ertragssteige-rung bis 2050 in t/ha	Unterstellte Ertragssteige-rung bis 2050 in t/a
Ägypten	3.175.693	23.216.824	7,31	0,00	0
Algerien	3.510.637	3.478.073	0,99	1,57	5.511.700
Angola	3.196.553	2.891.266	0,90	1,66	5.306.278
Äthiopien	10.352.596	26.276.867	2,54	0,02	207.052
Benin	1.271.298	1.894.163	1,49	1,07	1.360.289
Botsuana	98.376	39.440	0,40	2,16	212.492
Burkina Faso	4.026.919	4.063.197	1,01	1,55	6.241.724
Burundi	269.387	380.776	1,41	1,15	309.795
Demokratische ReS. Kongo	3.878.977	2.988.342	0,77	1,79	6.943.369
Dschibuti	7	13	1,86	0,70	4,9
Elfenbeinküste	1.531.365	3.290.000	2,15	0,41	627.860
Eritrea	470.505	302.462	0,64	1,92	903.370
Gabun	29.292	46.898	1,60	0,96	28.120
Gambia	256.913	217.833	0,85	1,71	439.321
Ghana	1.646.322	3.083.453	1,87	0,69	1.135.962
Kamerun	2.439.549	4.061.556	1,66	0,90	2.195.594
Kap Verde	31.699	5.314	0,17	2,39	75.761
Kenia	2.518.033	3.711.048	1,47	1,09	2.744.656
Kongo (Republik Kongo)	37.186	30.823	0,83	1,73	64.332
Lesotho	219.222	216.325	0,99	1,57	344.179
Liberia	235.824	302.692	1,28	1,28	301.855
Lybien	233.377	178.922	0,77	1,79	417.745
Madagaskar	896.390	3.387.220	3,78	0,00	0
Malawi	1.950.168	3.711.454	1,90	0,66	1.287.111
Mali	5.808.757	8.866.592	1,53	1,03	5.983.020
Marokko	5.568.363	9.787.246	1,76	0,80	4.454.690
Mauretanien	260.566	357.300	1,37	1,19	310.074
Mauritius	115	602	5,23	0,00	0
Mosambik	2.231.836	1.945.143	0,87	1,69	3.771.803
Namibia	290.888	126.809	0,44	2,12	616.683
Niger	10.887.761	5.899.777	0,54	2,02	21.993.277
Nigeria	19.747.805	28.873.225	1,46	1,10	21.722.586
Südafrika	3.347.247	18.905.871	5,65	0,00	0
Ruanda	495.109	634.901	1,28	1,28	633.740
Sambia	1.573.766	3.899.237	2,48	0,08	125.901
Sao Tomé und Principe	463	964	2,08	0,48	222,24
Senegal	1.327.539	1.692.684	1,28	1,28	1.699.250
Sierra Leone	764.491	1.495.419	1,96	0,60	458.695
Simbabwe	1.790.089	1.102.705	0,62	1,94	3.472.773
Somalia	343.661	187.978	0,55	2,01	690.759
Sudan	7.766.323	5.236.294	0,67	1,89	14.678.350
Südsudan	540.119	764.000	1,41	1,15	621.137
Swasiland	76.784	87.391	1,14	1,42	109.033
Tansania	6.537.832	10.092.940	1,54	1,02	6.668.589
Togo	1.141.964	1.301.069	1,14	1,42	1.621.589
Tschad	3.292.418	2.716.901	0,83	1,73	5.695.883
Tunesien	1.071.362	1.642.301	1,53	1,03	1.103.503
Uganda	1.868.620	3.831.448	2,05	0,51	952.996
Zentralafrikanische ReS.	152.475	142.923	0,94	1,62	247.010

AFRIKA INSGESAMT 2017	**119.162.641**	**197.366.681**	**1,66**	**1,13**	**134.290.129**
Länder mit mehr als 1,6 t/ha im Jahr 2017	35.115.155	104.948.174	2,99	0,33	11.446.088
Länder mit mehr als 1,6 t/ha im Jahr 2017 ohne Ägypten	31.939.462	81.731.350	2,56	0,36	11.446.088
Länder mit weniger als 1,6 t/ha im Jahr 2017	84.047.486	92.418.507	1,10	1,46	122.844.041
AFRIKA INSGESAMT 2050	**119.162.641**	**331.656.810**	**2,78**	**-**	**-**

14.19.4 Baumobstanbau

Tabelle 453: Baumobstanbau in Baden-Württemberg (Anbauflächen und Erträge)

	1992	1997	2002	2007	2012	2016	2018
Anbaufläche in Hektar							
Äpfel	11.051	10.842	9.689	9.651	10.172		
Birnen	668	786	730	705	668		
Pflaumen/ Zwetschgen	1.911	2.026	1.761	1.728	1.508		
Süßkirschen	1.793	2.023	1.939	1.990	2.076		
Sauerkirschen	458	254	266	208	206		
Erträge in dt							
Äpfel	4.163.420	2.534.352	3.122.782	3.525.328	2.930.501	2.824.714	4.641.256
Birnen	256.078	197.640	490.393	174.897	100.859	91.775	183.187
Pflaumen/ Zwetschgen	246.273	131.560	213.352	284.558	96.969	125.170	261.661
Süßkirschen	156.470	54.562	143.353	196.570	106.513	108.589	227.634
Sauerkirschen	69.011	14.177	20.065	25.321	12.085	10.726	22.592
Erträge in t/ha							
Äpfel	37,7	23,4	32,2	36,5	28,8	27,8	38,3
Birnen	38,3	25,1	67,2	24,8	15,1	13,7	21,6
Pflaumen/ Zwetschgen	12,9	6,5	12,1	16,5	6,4	8,3	14,7
Süßkirschen	8,7	2,7	7,4	9,9	5,1	5,2	8,3
Sauerkirschen	15,1	5,6	7,5	12,2	5,9	5,2	8,2
Mirabellen/ Renekloden						7,4	14,9

Quelle: Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2019

14.19.5 Milch und Milchprodukte

Tabelle 454: Betriebliche Kennwerte der verglichenen Milchviehhaltungssysteme

SN	Datenquelle	HF	W	Region	B	Kühe/B	FR	LNF/B (ha)	Kühe/ha LNF
1	Eilers, 2013	WH	Ö	BRD, BW	7	38,7	KR	44,2	0,88
2	Sutter et al., 2013	SH	K	Schweiz	1	24,0	TMR	19,2	1,25
3	Sutter et al., 2013	WH	K	Schweiz	1	28,0	KR	22,1	1,27
4	Leisen & Mersch, 2013	WH	Ö	BRD, Niederungen	10	k. A.	KR	k. A.	1,90
4a	Leisen & Mersch, 2013	WH	Ö	BRD, Mittelgebirge	6	k. A.	KR	k. A.	1,80
5	Verhoeven et al, 2018	WHi	Ö	NRW, Niederung	1	45,0	KR	25,0	1,80
6	Gräfe, 2010	SH, GB	K	BRD, Hessen	-	k. A.	TMR	k. A.	1,47

SN=Systemnummer, HF=Haltungsform, W=Wirtschaftsweise, B=Betrieb(e), FR=Futterration, LNF=Landwirtschaftliche Nutzfläche, SH=Stallhaltung, WH=Weidehaltung (Voll- und Teilweide), WHi=Weidehaltung intensiv (Kurzrasen, Vollweide), GB=Grünlandbasiert, Ö=Ökologisch, K=Konventionell, KF=Kraftfutter, KR=Kraftfutterreduziert, TMR=Teilmischration mit Kraftfutter
Quellen: (1) Eilers, 2013; (2 & 3) Sutter et al., 2013; (4) Leisen & Mersch, 2013 (5) Verhoeven et al, 2018 (6) Gräfe, 2010

Tabelle 455: Angenommener Fettgehalt nach Käsesortengruppe

Käsesortengruppe	Fettgehalt i. FM	Fettgehalt i. TM
Hartkäse	32,0%	52,0%
Schnittkäse	25,0%	45,0%
Weichkäse	23,0%	49,0%
Sauermilch-, Koch- und Molkenkäse	0,5%	10,0%
Pasta Filata	16,0%	45,0%
Schmelzkäse	26,0%	45,0%

Quellen: Angaben diverser Hersteller; (Fddb, 2019); (Bundesamt für Justiz, 2019)

Tabelle 456: Durchschnittlicher Kaloriengehalt der Käsesortengruppen

Käsesorte	kcal/100 g nach Kalorientabellen Spanne [1)]	kcal/kg nach Kalorientabellen Mittelwert [2)]	kcal/kg nach Berechnung [3)]
Hartkäse	370 - 420	3.950	3.986
Schnittkäse	250 - 360	3.050	3.089
Weichkäse	275	2.750	2.802
Sauermilch-, Koch- und Molkenkäse	120 - 131	1.255	1.285
Frischkäse	90 - 270	2.700	2.720
Pasta Filata	250 - 295	2.725	2.761
Schmelzkäse	273 - 343	3.080	3.089

Quellen: (1) Sun Sirius GmbH; Yazio GmbH; Fddb; Institut für Ernährungsinformation (2) Eigene Berechnung (3) Eigene Berechnung auf Basis des Kaloriengehaltes von Molke und der angegeben Fettgehalte in der jeweiligen Frisch- und Trockenmasse (vgl. Tabelle 455) und den daraus folgenden Trockenmassegehalten

Tabelle 457: Milcherzeugung und Anlieferung inländischer Milcherzeuger 2005-2015

Kennwert	2005	2007	2009	2011	2012	2013	2014	2015
Bevölkerung (1000) [1)]	82.437	82.218	81.802	80.328	80.524	80.767	81.198	82.176
Milcherzeugung (1.000 t) [2)]	28.453	28.403	29.199	30.336	30.685	31.338	32.395	32.685
Milcherzeugung (kg/Ea) [3)]	345	345	357	378	381	388	399	398
Milchanlieferung (1.000 t) [2)]	27.380	27.321	28.248	29.339	29.718	30.315	31.389	31.495
Milchanlieferung (kg/Ea) [3)]	332	332	345	365	369	375	387	383

Quellen: (1) Statistisches Bundesamt: GENESIS-Onlinedatenbank (2) BLE, 2018 (3) Eigene Berechnung

14.19.6 Futterbau

Tabelle 458: Energieaufwand im Futterbau pro Hektar nach Futtermittel

Rationskomponente	MJ/ha	kWh/ha
Weidegras [1)]	2.292	637
Heu [1)]	6.406	1.779
Maissilage [1)]	8.051	2.236
Kleegrassilage [1)]	6.194	1.721
Grassilage [1)]	5.921	1.645
Stroh + Heu [2)]	3.743	1.040
Stroh [2)]	1.080	300
Kraftfutter (Mischung) [2)]	9.619	2.672
Körnermais [1)]	20.305	5.641
Ackerbohne [1)]	11.952	3.320
Futtererbsen [1)]	13.080	3.633
Futtergerste [1)]	6.572	1.826
Futterhafer [1)]	6.871	1.908
Futterweizen [1)]	6.540	1.817
Triticale [1)]	6.850	1.903
Soja [1)]	6.744	1.873
Luzerne/Kleegras	7.561	2.100

Quellen: (1) KTBL Verfahrensrechner Pflanzenbau (2) Eigene Berechnung nach Anteilen der Bestandteile

14.19.7 Schweinemast

Tabelle 459: Futtermischungen für die Ferkelzucht

Futtermittel	Futtermischung	
	I – IV	V
Weizen	36,0 %	16,0 %
Gerste	37,0 %	15,0 %
Roggen		12,5 %
Triticale		12,5 %
Brotmehl		12,5 %
Sojaöl	1,0 %	
Sojaschrot	21,0 %	
Rapsschrot		7,5 %
Sonnenblumenschrot		12,5 %
Weizennachmehl		5,0 %
Weizenkleberfutter		2,0 %
Quelle	(1)	(2)

Quellen: (1) Meyer & Vogt, 2016; (2) Lindermayer, et al., 2010;

Tabelle 460: Futtermischungen für die Schweinemast

Futtermittel	Futtermischung				
	I	II	III	IV	V
Weizen	18,0 %	18,0 %	36,0 %	36,0 %	18,0 %
Gerste	15,0 %	15,0 %	40,5 %	40,5 %	15,0%
Roggen	17,5 %	17,5 %	5,0 %	5,0 %	17,5 %
Triticale	17,5 %	17,5 %			17,5 %
Brotmehl					
Sojaöl					
Sojaschrot	4,0 %	4,0 %	16,0 %	16,0 %	
Rapsschrot	4,2 %	4,2 %			5,8 %
Sonnenblumenschrot					1,9 %
Weizennachmehl	5,0 %	5,0 %			5,0 %
Weizenkleberfutter	7,5 %	7,5 %			7,5 %
Weizenkleie	7,6 %	7,6 %			5,2 %
Getreideschlempenfutter					3,0 %
Quelle	(1)	(1)	(2)	(2)	(3)

Quellen: (1) Meyer & Vogt, 2016; (2) Lindermayer, et al., 2010; (3) Meyer & Vogt, 2017

14.20 Landwirtschaft

14.20.1 Energiebedarf der Landwirtschaft

Tabelle 461: Kumulierter Energieaufwand (KEA) des konventionellen Gemüsebaus nach KTBL, 2018 (kWh/ha)

Gemüseart	Diesel*	Betriebs-stoffe	Betriebs-mittel	Maschinen, Anlagen und Gebäude	Gesamt
Blumenkohl	2.312	3.158	7.594	761	11.513
Broccoli	2.354	3.503	8.249	794	12.546
Buschbohnen	743	1.014	2.286	885	4.185
Chinakohl	2.233	3.931	4.012	6.295	14.238
Eissalat	3.183	4.345	5.044	1.300	10.689
Erbsen	678	925	3.083	681	4.689
Feldsalat	1.219	1.913	2.706	559	5.178
Grünkohl	2.659	5.889	5.583	2.114	13.586
Gurke	16.245	22.184	15.122	4.464	41.770
Kohlrabi	3.597	4.910	9.596	1.985	16.491
Kopfkohl	2.389	3.264	9.282	1.518	14.064
Kopfsalat	4.124	5.631	5.926	2.927	14.484
Möhren	1.939	3.372	1.818	1.044	6.234
Porree	2.584	3.680	11.788	1.521	16.989
Radies	1.765	2.693	1.541	900	5.135
Rosenkohl	2.192	3.684	15.930	1.281	20.895
Rote Beete	2.043	3.121	7.171	1.886	12.178
Spargel	2.610	4.636	3.509	3.283	11.428
Speisekürbis	1.837	2.558	6.364	805	9.727
Speisezwiebeln	2.217	3.147	6.417	1.435	10.999
Spinat	1.431	2.172	1.667	519	4.358
Zucchini	16.073	21.950	10.236	4.559	36.745
Gemüse im Durchschnitt	3.474	5.076	6.587	1.887	13.551

* Eigene Berechnung nach KTBL, 2018
Tabelle: Eigene Darstellung. Quelle: KTBL, 2018 (Leistungs-Kostenrechner Pflanzenbau)

Tabelle 462: Kumulierter Energieaufwand des konventionellen Futterbaus nach KTBL, 2018

Futtermittel	Diesel*	Betriebs-stoffe	Betriebs-mittel	Maschinen, Anlagen und Gebäude	Gesamt
Silomais Silage	479	655	4.633	888	6.176
Körnermais	786	1.073	2.831	7.413	11.316
Winterweizen Ganzpflan-zensilage	508	694	7.464	727	8.886
Futtergerste	734	1.002	4.411	2.225	7.638
Futtertriticale	718	981	3.732	1.650	6.363
Futterhafer	687	938	3.069	1.972	5.978
Soja	851	1.162	2.411	1.134	4.707
Raps	787	1.074	3.854	249	5.178
Gras Frischfutter	682	931	5.197	468	6.595
Gras Anwelksilage	1.202	1.641	5.985	777	8.402
Ackerland im Durchschnitt	**694**	**947**	**4.051**	**2.032**	**7.030**
Grünland im Durchschnitt	**942**	**1.286**	**5.591**	**622**	**7.499**

* Eigene Berechnung nach KTBL, 2018
Tabelle: Eigene Darstellung. Quelle: KTBL, 2018 (Leistungs-Kostenrechner Pflanzenbau)

Tabelle 463: Kumulierter Energieaufwand des ökologischen Gemüsebaus nach KTBL, 2018

Gemüseart	KEA (kWh/ha)				
	Diesel*	Betriebs-stoffe	Betriebs-mittel	Maschinen, Anlagen und Gebäude	Gesamt
Blumenkohl	2.274	3.106	9.203	1.280	13.588
Broccoli	2.230	3.046	3.434	748	7.228
Buschbohnen	1.260	1.721	830	933	3.484
Chinakohl	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Eissalat	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Erbsen	673	919	2.030	691	3.639
Feldsalat	1.401	2.162	2.342	658	5.162
Grünkohl	2.329	3.181	6.490	1.065	10.736
Gurke	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Kohlrabi	2.329	3.181	6.490	1.065	10.736
Kopfkohl	2.577	3.520	10.065	1.591	15.176
Kopfsalat	2.214	3.024	4.195	705	7.924
Möhren	2.608	4.234	3.607	1.908	9.749
Porree	3.101	4.334	6.230	1.654	12.219
Radies	1.164	1.722	670	551	2.943
Rosenkohl	1.563	2.687	3.384	1.346	7.418
Rote Beete	1.976	2.698	2.420	1.335	6.454
Spargel	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Speisekürbis	1.577	2.187	2.862	673	5.722
Speisezwiebeln	2.038	2.783	4.000	1.330	8.113
Spinat	1.065	1.681	581	449	2.711
Zucchini	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
Gemüse im Durchschnitt	**1.905**	**2.717**	**4.049**	**1.058**	**7.824**

* Eigene Berechnung nach KTBL, 2018
Tabelle: Eigene Darstellung. Quelle: KTBL, 2018 (Leistungs-Kostenrechner Pflanzenbau)

Tabelle 464: Kumulierter Energieaufwand des ökologischen Futterbaus nach KTBL, 2018

Futtermittel	KEA (kWh/ha)				
	Diesel *	Betriebs-stoffe	Betriebs-mittel	Maschinen, Anlagen und Gebäude	Gesamt
Silomais Silage	759	1.036	611	804	2.451
Körnermais	967	1.319	433	4.546	6.298
Winterweizen Ganzpflanzen-silage	666	909	1.327	672	2.909
Winterweizen Futterweizen	798	1.089	1.938	1.278	4.306
Futtergerste	765	1.045	1.451	1.410	3.906
Futtertriticale	844	1.152	2.080	1.239	4.471
Futterhafer	897	1.224	1.156	1.528	3.908
Soja	916	1.251	1.566	830	3.646
Raps	899	1.227	174	808	2.209
Weide (Milchvieh)	185	253	20	72	345
Gras Frischfutter	476	650	49	228	927
Gras Anwelksilage	408	557	49	219	824
Ackerland im Durchschnitt	**835**	**1.139**	**1.193**	**1.457**	**3.789**
Grünland im Durchschnitt	**357**	**486**	**39**	**173**	**699**

* Eigene Berechnung nach KTBL, 2018
Tabelle: Eigene Darstellung. Quelle: KTBL, 2018 (Leistungs-Kostenrechner Pflanzenbau)

14.20.2 Flächeneffizienzberechnungen

Tabelle 465: Flächeneffizienz herkömmlicher Landwirtschaft, Teil 1

Kennwert	Konventioneller Landbau Gemüse	Ökologischer Landbau Gemüse	Konventioneller Landbau Gemüse & Fleisch (72% FF-Anteil)	Ökologischer Landbau Gemüse & Fleisch (72% FF-Anteil)
Brutto-Stromertrag PV-Anlage (kWh/ha)	484.620	484.620	484.620	484.620
Netto-Stromertrag PV-Anlage (kWh/ha)	450.004	450.004	450.004	450.004
Pflanzenöl-Ertrag (kWh/ha)	13.168	7.506	13.168	7.506
Energieaufwand Ölpflanzenanbau (kWh/ha)	5.282	2.209	5.282	2.209
Netto-Energieertrag Ölpflanzenanbau (kWh)	7.886	5.297	7.886	5.297
Grundfläche (ha)	1,00	1,00	1,00	1,00
Produktionsfläche (ha)	1,00	1,00	1,00	1,00
Gemüseanbaufläche (ha)	1,00	1,00	0,29	0,29
Fleischproduktionsfläche (ha)			0,72	0,72
Energie für Maschinen, Anlagen, Gebäude (kWh)	1.887	1.058	1.991	1.343
Dieselbedarf Gesamt (kWh)	3.640	1.905	1.534	1.140
Betriebsstoffe Gesamt (kWh)	1.436	812	591	449
Betriebsmittel Gesamt (kWh)	6.587	4.049	2.730	2.007
Energiebedarf Gesamt (kWh)	13.550	7.824	6.845	4.940
Flächenbedarf Dieselverbrauch (ha)	0,46	0,36	0,19	0,22
Flächenbedarf Energiebedarf Betriebsstoffe (ha)	0,18	0,15	0,07	0,08
Flächenbedarf Energiebedarf Betriebsmittel (ha)	0,02	0,01	0,01	0,01
Flächenbedarf Energieverbrauch Gesamt (ha)	**0,67**	**0,53**	**0,28**	**0,31**
Gemüseertrag Gesamt (t)	28,3	20,4	8,1	5,8
Fleischertrag pro Hektar Futterbaufläche (t/ha)			1,59	1,00
Fleischertrag Gesamt (t)			1,14	0,72
Futteranbaufläche Gesamt			0,72	0,72
Energiebedarf Futtermittelanbau (kWh/ha)			5.150	4.170
Energiebedarf Futtermittelanbau Gesamt (kWh)			3.682	2.982
Wirkungsgrad Power-to-Gas	60%	60%	60%	60%
Flächenbedarf LNF Gesamt	1,67	1,53	1,28	1,31
Kalorienertrag Gemüse	10.471.000	7.548.000	2.984.235	2.151.180
Kalorienertrag Fleisch	0	0	2.505.789	1.573.000
Kalorienertrag pro Hektar Grundfläche	6.261.659	4.932.491	4.275.969	2.841.860
Kalorienertrag im Vergleich	**146%**	**115%**	**100%**	**66%**
Energieaufwand in kWh pro kcal	0,002	0,002	0,002	0,002
Energieaufwand in kcal pro kcal	1,86	1,36	1,38	1,49
Ernährbare Personen pro Hektar Grundfläche	8,17	6,44	5,58	3,71
Verhältnis Gemüse zu Fleisch			7,1	8,1

Quelle: Eigene Berechnung nach diversen Quellen (vgl. Text)

Tabelle 466: Flächeneffizienz herkömmlicher Landwirtschaft, Teil 2

Kennwert	Konventioneller Landbau Gemüse & Fleisch (25% FF-Anteil)	Ökologischer Landbau Gemüse & Fleisch (25% FF-Anteil)
Brutto-Stromertrag PV-Anlage (kWh/ha)	484.620	484.620
Netto-Stromertrag PV-Anlage (kWh/ha)	450.004	450.004
Pflanzenöl-Ertrag (kWh/ha)	13.168	7.506
Energieaufwand Ölpflanzenanbau (kWh/ha)	5.282	2.209
Netto-Energieertrag Ölpflanzenanbau (kWh)	7.886	5.297
Grundfläche (ha)	1,00	1,00
Produktionsfläche (ha)	1,00	1,00
Gemüseanbaufläche (ha)	0,75	0,75
Fleischproduktionsfläche (ha)	0,25	0,25
Energie für Maschinen, Anlagen, Gebäude (kWh)	1.923	1.158
Dieselbedarf Gesamt (kWh)	2.904	1.638
Wärmebedarf Gesamt (kWh)	0	0
Betriebsstoffe Gesamt (kWh)	1.141	413
Betriebsmittel Gesamt (kWh)	5.239	3.335
Energiebedarf Gesamt (kWh)	11.206	6.816
Flächenbedarf Stromverbrauch (ha)	0,00	0,00
Flächenbedarf Dieselverbrauch (ha)	0,37	0,31
Flächenbedarf Wärmeverbrauch (ha)	0,00	0,00
Flächenbedarf Energiebedarf Betriebsstoffe (ha)	0,14	0,08
Flächenbedarf Energiebedarf Betriebsmittel (ha)	0,02	0,01
Flächenbedarf Energieverbrauch Gesamt (ha)	0,54	0,45
Gemüseertrag (t/ha)	21,2	15,3
Gemüseertrag Gesamt (t)	21,2	15,3
Fleischertrag pro Hektar Futterbaufläche (t/ha)	1,59	1,00
Fleischertrag Gesamt (t)	0,40	0,25
Futteranbaufläche Gesamt	0,25	0,25
Energiebedarf Futtermittelanbau (kWh/ha)	5.150	4.170
Energiebedarf Futtermittelanbau Gesamt (kWh)	1.288	1.043
Wirkungsgrad Power-to-Gas	60%	60%
Flächenbedarf LNF Gesamt (ha)	1,54	1,45
Kalorienertrag Gemüse	7.853.250	5.661.000
Kalorienertrag Fleisch	876.150	550.000
Kalorienertrag pro Hektar Grundfläche (kcal/ha)	5.681.483	4.429.825
Kalorienertrag im Vergleich	**133%**	**104%**
Energieaufwand in kWh pro kcal	0,002	0,001
Energieaufwand in kcal pro kcal	1,70	1,27
Ernährbare Personen pro Hektar Grundfläche	7,41	5,78
Verhältnis Gemüse zu Fleisch	53,00 : 1	61,2 : 1

Quelle: Eigene Berechnung nach diversen Quellen (vgl. Text)

Tabelle 467: Flächeneffizienzberechnung Urban Farming, Teil 1

Kennwert	Aquaponik konventionell mit Restfisch-mehl	Aquaponik ökologisch mit Restfisch-mehl	Aquaponik konventionell mit Fangfisch-mehl	Aquaponik ökologisch mit Fangfisch-mehl
Brutto-Stromertrag PV-Anlage (kWh/ha)	484.620	484.620	484.620	484.620
Netto-Stromertrag PV-Anlage (kWh/ha)	450.000	450.000	450.000	450.000
Pflanzenöl-Ertrag (kWh/ha)	13.168	7.506	13.168	8.020
Energieaufwand Ölpflanzenanbau (kWh/ha)	5.282	2.209	5.282	2.209
Netto-Energieertrag Ölpflanzenanbau (kWh)	7.886	5.297	7.886	5.811
Grundfläche (ha)	0,25	0,25	0,25	0,25
Produktionsfläche (ha)	1,00	1,00	1,00	1,00
Energie für Maschinen, Anlagen, Gebäude (kWh/ha)	641.838	641.838	641.838	641.838
Wärmebedarf pro Hektar (kWh)	2.441.177	2.441.177	2.441.177	2.441.177
Energiebedarf pro Hektar (kWh)	3.083.015	3.083.015	3.083.015	3.083.015
Strombedarf Gesamt (kWh)	641.838	641.838	641.838	641.838
Wärmebedarf Gesamt (kWh)	2.441.177	2.441.177	3.000.000	3.000.000
Energiebedarf Gesamt (kWh)	3.083.015	3.083.015	3.083.015	3.083.015
Flächenbedarf Stromverbrauch (ha)	1,43	1,43	1,43	1,43
Flächenbedarf Wärmeverbrauch (ha)	9,04	9,04	11,11	11,11
Flächenbedarf Energieverbrauch Gesamt (ha)	10,47	10,47	12,54	12,54
Gemüseertrag Gesamt (t)	209	209	209	209
Fischertrag t/ha	91	91	91	91
Fischfleischertrag (t/ha)	29,6	29,6	29,6	29,6
Fischfleischertrag Gesamt (t)	29,6	29,6	29,6	29,6
Futterbedarf pro kg Fischfleisch (kg/kg)	3,89	3,89	3,89	3,89
Futterbedarf gesamt (t)	115	115	115	115
Futteranbauflächenbedarf zusätzlich pro t Futter (ha)	0,145	0,227	0,145	0,227
Futteranbaufläche Gesamt (ha)	16,7	26,1	16,7	26,1
Energiebedarf Futtermittelproduktion (kWh/t)	2.214	2.288	11.094	11.168
Energiebedarf Futtermittelanbau Gesamt (kWh)	254.660	263.249	1.276.307	1.284.897
Wirkungsgrad Power-to-Gas	60%	60%	60%	60%
Flächenbedarf Energieverbr. Futterproduktion (ha)	0,94	0,97	4,73	4,76
Flächenbedarf LNF Gesamt (ha)	28,34	37,81	34,20	43,66
Kalorienertrag Gemüse (kcal)	77.330.000	77.330.000	77.848.000	77.700.000
Kalorienertrag Obst (kcal)	0	0	444.000	444.000
Kalorienertrag Fisch (kcal)	23.660.000	23.660.000	73.920.000	73.920.000
Kalorienertrag pro Hektar Grundfläche (kcal/ha)	3.532.038	2.653.567	4.418.846	3.462.946
Kalorienertrag pro Hektar im Vergleich (Prozent)	**83**	**62**	**103**	**81**
Energieaufwand in kWh pro kcal	0,873	1,162	0,698	0,890
Energieaufwand in kcal pro kcal	750,53	999,00	599,91	765,51
Ernährbare Personen pro Hektar Grundfläche	4,61	3,46	5,76	4,52
Verhältnis Gemüse zu Fischfleisch	7,1 : 1	7,1 : 1	7,1 : 1	7,1 : 1

Quelle: Eigene Berechnung nach diversen Quellen (vgl. Text)

Tabelle 468: Flächeneffizienzberechnung Urban Farming, Teil 2

Kennwert	Aquaponik konventionell mit Restfischmehl, Futterproduktion unter PVA	Aquaponik ökologisch mit Restfischmehl, Futterproduktion unter PVA	Aquaponik effizient, konventionell mit Restfischmehl, Futterproduktion unter PVA	Aquaponik effizient, ökologisch mit Restfischmehl, Futterproduktion unter PVA
Brutto-Stromertrag PV-Anlage (kWh/ha)	484.620	484.620	484.620	484.620
Netto-Stromertrag PV-Anlage (kWh/ha)	450.000	450.000	450.000	450.000
Pflanzenöl-Ertrag (kWh/ha)	13.168	7.506	13.168	7.506
Energieaufwand Ölpflanzenanbau (kWh/ha)	5.282	2.209	5.282	2.209
Netto-Energieertrag Ölpflanzenanbau (kWh)	7.886	5.297	7.886	5.297
Grundfläche (ha)	0,25	0,25	0,25	0,25
Produktionsfläche (ha)	1,00	1,00	1,00	1,00
Energie für Maschinen, Anlagen, Gebäude (kWh/ha)	641.838	641.838	420.000	420.000
Wärmebedarf Gesamt (kWh)	2.441.177	2.441.177	1.890.000	1.890.000
Energiebedarf Gesamt (kWh)	3.083.015	3.083.015	2.310.000	2.310.000
Flächenbedarf Stromverbrauch (ha)	1,43	1,43	0,93	0,93
Flächenbedarf Wärmeverbrauch (ha)	9,04	9,04	7,00	7,00
Flächenbedarf Energieverbrauch Gesamt (ha)	10,47	10,47	7,93	7,93
Gemüseertrag Gesamt (t)	209	209	209	209
Fischertrag (t)	91	91	91	91
Fischfleischertrag Gesamt (t)	29,6	29,6	29,6	29,6
Futterbedarf pro kg Fischfleisch (kg)	3,89	3,89	3,89	3,89
Futterbedarf gesamt (t)	115	115	115	115
Futteranbauflächenbedarf pro t Futter (ha)	0,145	0,227	0,145	0,227
Futteranbaufläche Gesamt (ha)	16,7	26,1	16,7	26,1
Energiebedarf Futtermittelproduktion (kWh/t)	2.214	2.288	2.214	2.288
Energiebedarf Futtermittelanbau Gesamt (kWh)	254.660	263.249	254.660	263.249
Wirkungsgrad Power-to-Gas (Prozent)	60	60	60	60
Flächenbedarf Energieverbr. d. Futterproduktion (ha)	0,94	0,97	0,94	0,97
Milchertrag pro Hektar PV-Anlage (kg/ha)	3.000	3.000	3.000	3.000
Flächenbedarf Gesamt (ha)	28,34	37,81	25,81	35,27
Kalorienertrag Gemüse (kcal)	77.330.000	77.330.000	77.330.000	77.330.000
Kalorienertrag Fisch (kcal)	23.660.000	23.660.000	23.660.000	23.660.000
Kalorienertrag Milch (kcal)	1.810.898	1.871.977	1.810.898	1.871.977
Kalorienertrag pro Hektar Grundfläche (kcal/ha)	3.595.373	2.702.754	3.945.048	2.895.574
Kalorienertrag pro Hektar im Vergleich (Prozent)	**84**	**63**	**92**	**68**
Energieaufwand in kWh pro kcal	0,857	1,141	0,586	0,798
Energieaufwand in kcal pro kcal	737,31	980,82	503,48	685,96
Ernährbare Personen pro Hektar Grundfläche	4,69	3,53	5,15	3,78
Verhältnis Gemüse zu Fischfleisch	7,1:1	7,1:1	7,1:1	7,1:1
Anteil der Ackerfläche an Gesamtfläche (Prozent)	59	69	65	74
Ackerfläche (ha)	16,68	26,12	16,68	26,12
Ackerfläche je 1.000 kcal (m²)	1,64	2,56	1,64	2,56

PVA = Photovoltaikanlage. Quelle: Eigene Berechnung nach diversen Quellen (vgl. Text)

Tabelle 469: Flächeneffizienzberechnung Urban Farming, Teil 3

Kennwert	Aquaponik effizient, PVF 14:1, konventionell mit Restfischmehl, Futterproduktion unter PVA	Aquaponik effizient, PVF 14:1, ökologisch mit Restfischmehl, Futterproduktion unter PVA	Aquaponik effizient, PVF 20:1, konventionell mit Restfischmehl, Futterproduktion unter PVA	Aquaponik effizient, PVF 20:1, ökologisch mit Restfischmehl, Futterproduktion unter PVA
Brutto-Stromertrag PV-Anlage (kWh/ha)	484.620	484.620	484.620	484.620
Netto-Stromertrag PV-Anlage (kWh/ha)	450.000	450.000	450.000	450.000
Grundfläche (ha)	0,25	0,25	0,25	0,25
Produktionsfläche (ha)	1	1	1	1
Energie für Maschinen, Anlagen, Gebäude (kWh)	420.000	420.000	420.000	420.000
Wärmebedarf Gesamt (kWh)	1.890.000	1.890.000	1.890.000	1.890.000
Energiebedarf Gesamt (kWh)	2.310.000	2.310.000	2.310.000	2.310.000
Flächenbedarf Stromverbrauch (ha)	0,93	0,93	0,93	0,93
Flächenbedarf Wärmeverbrauch (ha)	7,00	7,00	7,00	7,00
Flächenbedarf Energieverbrauch Gesamt (ha)	7,93	7,93	7,93	7,93
Gemüseertrag Gesamt (t)	245	245	260	260
Fischertrag (t/ha)	55	55	40	40
Fischfleischertrag Gesamt (t)	17,9	17,9	13,0	13,0
Futterbedarf pro kg Fischfleisch (kg)	3,89	3,89	3,89	3,89
Futterbedarf gesamt (t)	70	70	51	51
Futteranbauflächenbedarf zusätzlich pro t Futter (ha)	0,145	0,227	0,145	0,227
Futteranbaufläche Gesamt (ha)	10,1	15,8	7,3	11,5
Energiebedarf Futtermittelproduktion (kWh/t)	2.214	2.288	2.214	2.288
Energiebedarf Futtermittelanbau Gesamt (kWh)	153.915	159.107	111.938	115.714
Wirkungsgrad Power-to-Gas (Prozent)	60	60	60	60
Flächenbedarf Energieverbr. d. Futterproduktion (ha)	0,57	0,59	0,41	0,43
Milchertrag pro Hektar PV-Anlage (kg/ha)	3.000	3.000	3.000	3.000
Flächenbedarf Gesamt (ha)	18,84	25,05	15,93	20,09
Kalorienertrag Gemüse (ha)	90.650.000	90.650.000	96.200.000	96.200.000
Kalorienertrag Fisch (ha)	14.300.000	14.300.000	10.400.000	10.400.000
Kalorienertrag Milch (ha)	1.094.499	1.131.414	795.999	822.847
Kalorienertrag pro Hektar Grundfläche (kcal/ha)	5.556.227	4.192.997	6.637.376	5.281.044
Kalorienertrag pro Hektar im Vergleich (Prozent)	**130**	**98**	**155**	**124**
Energieaufwand in kWh pro kcal	0,416	0,604	0,348	0,437
Energieaufwand in kcal pro kcal	357,48	519,20	299,25	376,11
Ernährbare Personen pro Hektar Grundfläche	7,25	5,47	8,66	6,89
Verhältnis Gemüse zu Fleisch	13,7	13,7	20,0	20,0
Anteil der Ackerfläche an Gesamtfläche (Prozent)	54	63	46	57
Ackerfläche (ha)	10,1	15,8	7,3	11,5
Ackerfläche je 1.000 kcal (m²)	0,96	1,50	0,69	1,08

PVA = Photovoltaikanlage. Quelle: Eigene Berechnung nach diversen Quellen (vgl. Text)

Tabelle 470: Flächeneffizienzberechnung Urban Farming, Teil 4

Kennwert	Dachfarm, nur Gemüse-Produktion	Vertical Farming, konventionell	Vertical Farming, ökologisch
Brutto-Stromertrag PV-Anlage (kWh/ha)	484.620	484.620	484.620
Netto-Stromertrag PV-Anlage (kWh/ha)	450.004	450.004	450.004
Pflanzenöl-Ertrag (kWh/ha)	7.506	13.168	8.020
Energieaufwand Ölpflanzenanbau (kWh/ha)	5.282	5.282	2.209
Netto-Energieertrag Ölpflanzenanbau (kWh)	2.224	7.886	5.811
Grundfläche (ha)	0,25	0,03	0,03
Produktionsfläche (ha)	1,00	1,00	1,00
Energie für Maschinen, Anlagen, Gebäude (kWh/ha)	38.265	21.052.044	21.052.044
Wärmebedarf pro Hektar (kWh)	1.400.000	0	0
Energiebedarf pro Hektar (kWh)	1.438.265	21.052.044	21.052.044
Strombedarf Gesamt (kWh)	38.265	21.052.044	21.052.044
Wärmebedarf Gesamt (kWh)	1.400.000	0	0
Energiebedarf Gesamt (kWh)	1.438.265	21.052.044	21.052.044
Flächenbedarf Stromverbrauch (ha)	0,09	46,78	46,78
Flächenbedarf Wärmeverbrauch (ha)	5,19	0,00	0,00
Flächenbedarf Energieverbrauch Gesamt (ha)	5,27	46,78	46,78
Gemüseertrag Gesamt (t)	312	684	684
Fischertrag (t/ha)		43	43
Fischfleischertrag Gesamt (t)		14	14
Futterbedarf pro kg Fischfleisch (kg/kg)		3,89	3,89
Futterbedarf gesamt (t)		54,5	54,5
Futteranbauflächenbedarf zusätzlich pro t Futter (ha)	0,000	0,145	0,227
Futteranbaufläche Gesamt (ha)	0,25	7,9	12,4
Energiebedarf Futtermittelproduktion (kWh/t)		2.214	2.288
Energiebedarf Futtermittelanbau Gesamt (kWh)		120.665	124.735
Wirkungsgrad Power-to-Gas (Prozent)	60	60	60
Flächenbedarf Energieverbr. d. Futterproduktion (ha)		0,45	0,46
Flächenbedarf Gesamt (ha)	5,3	55,13	59,60
Kalorienertrag Gemüse (kcal)	115.440.000	253.080.000	253.080.000
Kalorienertrag Fisch (kcal)	0	11.168.505	11.168.505
Kalorienertrag pro Hektar Grundfläche (kcal/ha)	20.912.403	4.790.961	4.431.929
Kalorienertrag pro Hektar im Vergleich (Prozent)	**489**	**112**	**104**
Energieaufwand in kWh pro kcal	0,069	4,394	4,750
Energieaufwand in kcal pro kcal	59,14	3.778,26	4.084,34
Ernährbare Personen pro Hektar Grundfläche	27,28	6,25	5,78
Verhältnis Gemüse zu Fleisch	-	49 : 1	49 : 1
Anteil der Ackerfläche an Gesamtfläche (Prozent)	0	14	21
Ackerfläche (ha)	0,00	7,87	12,33
Ackerfläche je 1.000 kcal (m²)	0,00	0,30	0,47

Quelle: Eigene Berechnung nach diversen Quellen (vgl. Text)

14.20.3 Aufkommen an Gülle und Mist

Tabelle 471: Aufkommen an Gülle und Mist in der Viehhaltung

Tierart	Art der Biomasse	Einheit des Biomasseaufkommens	Mittleres Biomasseaufkommen	Biogasausbeute in Nm³/t FM [4)]
Kälber (Zucht/Mast) bis 6 Monate	Gülle	m³ FM/Tierplatz	[1)] 5,0	34,0
Männliche Rinder bis 6 Monate	Gülle	m³ FM/Tierplatz	[1)] 1,3	34,0
Männliche Rinder über 6 Mon. bis 1 J.	Gülle	m³ FM/Tierplatz	[1)] 7,8	34,0
Männliche Rinder über 1 J. bis 2 J.	Gülle	m³ FM/Tierplatz	[1)] 11,2	34,0
Milchkühe, Grünland m. Weidegang	Gülle	m³ FM/Tierplatz	[1)] 24,3	22,7
Mutterkuh, 0,9 Kalb, Stallhaltung	Gülle	m³ FM/Tierplatz	[1)] 20,0	22,7
Zuchtsauen	Gülle	m³ FM/Tierplatz	[1)] 6,5	20,4
Mastschweine	Gülle	m³ FM/Tierplatz	[1)] 2,9	20,4
Legehennen	Mist	t FM/100 Tiere	[2)] 2,2	56,3
Masthähnchen	Mist	t FM/100 Tiere	[2)] 1,5	56,3
Schafe	Mist	t FM/Tierplatz	[2) 3)] 1,4	108,0
Ziegen	Mist	t FM/Tierplatz	[2) 3)] 1,3	108,0
Pferde	Mist	t FM/Tierplatz	[2) 3)] 6,8	63,0

Quellen: (1) (LfL Bayern, 2019a) (2) (LfL Bayern, 2009 S. 9) (3) (LfULG Sachsen, 2019) (4) (LfL Bayern, 2019)

14.20.4 Durchschnittserträge von Energie- und Rohstoffpflanzen weltweit

Tabelle 472: Rohstoff- und Energiepotenziale weltweit und in Deutschland (Zusammenfassung)

Produktgruppe	Einheit	Welt	Deutschland [8)]	Welt/BRD [10)]
Rohstoffe				
Bauholz	m³/ha	[1) 2)] 3,2	4,9	65%
Dämmstoff	m³/ha	[6)] 85,9	141,0	61%
Fasern für Textilien	t/ha	[3)] 0,8	1,2	61%
Zellstoff für Papier aus Holz	t/ha	[5)] 1,5	2,3	65%
Zellstoff für Papier aus Gräsern/Hanf	t/ha	[3)] 3,6	5,6	65%
Kunststoffe	t/ha	[7)] 1,4	2,7	51%
Öl	t/ha	[6)] 0,8	1,1	77%
Ethanol	t/ha	[6)] 3,3	4,0	84%
Festbrennstoff Holz	m³/ha	[1) 2)] 3,2	4,9	65%
Festbrennstoff Miscanthus	t/ha	[4)] 8,8	[9)] 18,0	49%
Energieträger				
Öl	MWh/ha	[6)] 9	12	77%
Ethanol	MWh/ha	[6)] 23	28	84%
Biogas	MWh/ha	[6)] 26	46	58%
Festbrennstoff Holz	MWh/ha	[1) 2)] 13	20	65%
Festbrennstoff Miscanthus	MWh/ha	[4) 9)] 42	[9)] 85	49%

Quellen: (1) (FAO, 2018b S. 50); (2) (FSC Schweiz, 2018); (3) FAO, 2020, FAOSTAT; (4) (Shepherd, et al., 2020) (5) Eigene Berechnung nach: FAO, 2018, FSC, 2018; Paavilainen und Torgilsson, 1994 zit. n. Pahkala, Paavilainen & Mela, 1997 (6) Eigene Berechnung n. FAOSTAT (7) Eigene Berechnung n. FAOSTAT und IfBB Hannover, 2017; (8) Eigene Berechnung n. diversen Quellen wie zuvor dargestellt (9) KTBL, 2012; (10) Eigene Berechnung

Tabelle 473: Globale Durchschnittserträge von Energie- und Rohstoffpflanzen (t/ha)

Verwendung	Pflanze/Produkt	t/ha	Quelle
Biogas	Hirse	0,90	(1)
Biogas	Sorghum	1,47	(1)
Ethanol	Maniok-Knolle	11,39	(1)
Ethanol/Kunststoffe	Körnermais	5,69	(1)
Ethanol/Kunststoffe	Zuckerrohr	70,35	(1)
Ethanol/Kunststoffe	Zuckerrübe	60,23	(1)
Fasern	Agavenfasern Gesamt	0,72	(1)
Fasern	Bastfasern, andere	1,51	(1)
Fasern	Baumwollfasern	0,80	(2)
Fasern	Faser Pflanzen Gesamt	0,75	(1)
Fasern	Faser von Manila Hanf (Abaca)	0,63	(1)
Fasern	Flachsfaser und Werg	3,59	(1)
Fasern	Hanf Werg	1,55	(1)
Fasern	Jute	2,28	(1)
Fasern	Sisal	0,91	(1)
Kunststoffe/Stärke	Kartoffeln	20,60	(1)
Ölsaaten	Leinsamen	1,04	(1)
Ölsaaten	Ölpalmenfrucht	14,48	(1)
Ölsaaten	Ölsaaten Gesamt	2,47	(1)
Ölsaaten	Pflanzenöl Durchschnitt (Raps, Lein, Soja)	0,85	(4)
Ölsaaten	Rapssaat	2,08	(1)
Ölsaaten	Rizinusöl-Samen	1,29	(1)
Ölsaaten	Saflorsamen	0,79	(1)
Ölsaaten	Samen vom Chinesischen Talgbaum	2,46	(1)
Ölsaaten	Sojabohnen	2,72	(1)
Ölsaaten	Sonnenblumensamen	1,76	(1)
Zellstoff/Baustoffe/Brennstoff	Miscanthus	8,79	(3)

Quellen: (1) FAO, 2020, FAOSTAT (2) Statista (3) (Shepherd, et al., 2020) (4) Eigene Berechnung n. FAOSTAT

14.21 Rohstoffproduktion

14.21.1 Holzbau

Tabelle 474: Flächenkennwerte Buche

Kennwert	Nutzungspfad				
	Buche Bii	Buche BT	Buche BiM	Buche BiE	Buche BE
Holzaufkommen (t atro/ha)					
Konstruktionsholz	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
Bretter/Latten	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
Mehl Sägewerk	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
Verschnitt Sägewerk	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
Erntereste	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
DF-Holz	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Rinde Stammholz	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Rinde Astholz	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
Astholz stofflich	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28
Astholz energetisch	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
SUMME	**5,17**	**5,17**	**5,17**	**5,17**	**5,17**
Mögliche Produktpakete (t/ha)					
Konstruktionsholz (14% RF)	1,07	1,07	1,07	1,07	1,07
Bretter/Latten (14% RF)	0,44	0,44		0,44	0,44
OSB/Spanplatten (14% RF)	1,86	1,46	1,86	1,46	
Möbel (8% RF)			0,41		
Zellstoff					
Textilfasern (Viskose)		0,14			
Dämmstoff					
Essigsäure, Furfural, Xylose		0,04			
Brennstoff	2,22	2,40	2,22	2,57	3,85
SUMME	**5,58**	**5,53**	**5,56**	**5,53**	**5,35**
Heizwert des Brennstoffs	11.096	11.469	11.096	12.865	19.253
Flächengutschriften (m²)					
Möbel	0	0	1.711	0	0
Zellstoff	0	0	0	0	0
Textilfasern (Viskose)	0	427	0	0	0
Dämmstoff	0	0	0	0	0
Energie & Dämmstoff					
Heizwert der Brennstoffe (kWh)	1.423	1.470	1.423	1.649	2.468
Volumen des Dämmstoffs (m³)	0	0	0	0	0
Erträge Bauholz ohne Koppelprodukte (m³/ha)					
Konstruktionsholz	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7
Bretter/Latten	0,7	0,7	0,0	0,7	0,7
OSB/Spanplatten	2,9	2,3	2,9	2,3	0,0
SUMME	**5,3**	**4,7**	**4,6**	**4,7**	**2,4**
Flächeninanspruchnahme Bauholz je m³					
ohne Koppelprodukte (m²/m³)	1.892	2.150	2.174	2.150	4.236
inkl. Koppelprodukte (m²/m³)	1.623	1.742	1.492	1.795	3.190

B=Bauholz, Bi=Bauholz inkl. Verschnitt, Bii=Bauholz inkl. Verschnitt und Astholz, M=Möbel, T=Textilfasern, E=Energie
Quelle: Eigene Berechnung

Tabelle 475: Flächenkennwerte Fichte

Kennwert	Nutzungspfad					
	Fichte BiD	Fichte BTD	Fichte BiMD	Fichte BD	Fichte BED	Fichte BPD
Holzaufkommen (t atro/ha)						
Konstruktionsholz	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46
Bretter/Latten	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60
Mehl Sägewerk	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29
Verschnitt Sägewerk	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59
Erntereste	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
DF-Holz	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
Rinde Stammholz	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
Rinde Astholz	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Astholz stofflich	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Astholz energetisch	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84
SUMME	**5,19**	**5,19**	**5,19**	**5,19**	**5,19**	**5,19**
Mögliche Produktpakete (t/ha)						
Konstruktionsholz (14% RF)	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67
Bretter/Latten (14% RF)	0,68	0,68		0,68	0,68	0,68
OSB/Spanplatten (14% RF)	0,67	0,00	0,67	0,00		
Möbel (8% RF)			0,65			
Zellstoff						0,28
Textilfasern (Viskose)		0,23				
Dämmstoff	0,37	0,37	0,37	1,02	0,37	0,37
Essigsäure, Furfural, Xylose		0,06				
Brennstoff	2,21	2,50	2,21	2,21	2,79	2,52
SUMME	**5,59**	**5,51**	**5,56**	**5,58**	**5,51**	**5,51**
Energie & Dämmstoff						
Heizwert der Brennstoffe (kWh)	11.467	13.349	11.467	11.467	14.529	13.090
Volumen des Dämmstoffs (m³)	3,7	3,7	3,7	10,2	3,7	3,7
Flächengutschriften (m²)						
Möbel	0	0	2.678	0	0	0
Zellstoff	0	0	0	0	0	302
Textilfasern (Viskose)	0	711	0	0	0	0
Dämmstoff	134	134	134	373	134	134
Heizwert des Brennstoffs	1.470	1.711	1.470	1.470	1.863	1.678
SUMME	**1.604**	**2.557**	**4.283**	**1.843**	**1.997**	**2.115**
Bauholzertrag ohne Koppelprodukte (m³/ha)						
Konstruktionsholz	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9	3,9
Bretter/Latten	1,6	1,6	0,0	1,6	1,6	1,6
OSB/Spanplatten	1,6	0,0	1,6	0,0	0,0	0,0
SUMME	7,0	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4
Flächeninanspruchnahme Bauholz je m³						
ohne Koppelprodukte (m²/m³)	1.430	1.838	1.846	1.838	1.838	1.838
inkl. Koppelprodukte (m²/m³)	1.200	1.368	1.056	1.500	1.471	1.450

B=Bauholz, Bi=Bauholz inkl. Verschnitt, M=Möbel, T=Textilfasern, E=Energie, D=Dämmstoff, P=Papierzellstoff
Quelle: Eigene Berechnung

Tabelle 476: Flächenkennwerte Douglasie

Kennwert	Nutzungspfad			
	Douglasie BiD	Douglasie BiMD	Douglasie BD	Douglasie BED
Holzaufkommen (t atro/ha)				
Konstruktionsholz	1,93	1,93	1,93	1,93
Bretter/Latten	0,79	0,79	0,79	0,79
Mehl Sägewerk	0,39	0,39	0,39	0,39
Verschnitt Sägewerk	0,78	0,78	0,78	0,78
Erntereste	0,64	0,64	0,64	0,64
DF-Holz	0,68	0,68	0,68	0,68
Rinde Stammholz	0,52	0,52	0,52	0,52
Rinde Astholz	0,18	0,18	0,18	0,18
Astholz stofflich	0,00	0,00	0,00	0,00
Astholz energetisch	1,12	1,12	1,12	1,12
SUMME	**7,02**	**7,02**	**7,02**	**7,02**
Mögliche Produktpakete (t/ha)				
Konstruktionsholz (14 % RF)	2,20	2,20	2,20	2,20
Bretter/Latten (14 % RF)	0,90		0,90	0,90
OSB/Spanplatten (14 % RF)	0,88	0,88	0,00	
Möbel (8% RF)		0,85		
Zellstoff				
Textilfasern (Viskose)				
Dämmstoff	0,58	0,58	1,44	0,58
Essigsäure, Furfural, Xylose				
Brennstoff	3,01	3,01	3,01	3,78
SUMME	**7,57**	**7,52**	**7,54**	**7,46**
Energie & Dämmstoff				
Heizwert der Brennstoffe (kWh)	15.639	15.639	15.639	19.670
Volumen des Dämmstoffs (m³)	5,8	5,8	14,4	5,8
Flächengutschriften (m²)				
Möbel	0	3.526	0	0
Zellstoff	0	0	0	0
Textilfasern (Viskose)	0	0	0	0
Dämmstoff	212	212	526	212
Heizwert des Brennstoffs	2.005	2.005	2.005	2.522
SUMME	**2.217**	**5.743**	**2.531**	**2.734**
Bauholzertrag ohne Koppelprodukte (m³/ha)				
Konstruktionsholz	4,7	4,7	4,7	4,7
Bretter/Latten	1,9	0,0	1,9	1,9
OSB/Spanplatten	1,9	1,9	0,0	0,0
SUMME	8,5	6,6	6,6	6,6
Flächeninanspruchnahme Bauholz je m³				
ohne Koppelprodukte (m²/m³)	1.175	1.517	1.511	1.511
inkl. Koppelprodukte (m²/m³)	915	646	1.128	1.098

B=Bauholz, Bi=Bauholz inkl. Verschnitt, M=Möbel, T=Textilfasern, E=Energie, D=Dämmstoff, P=Papierzellstoff
Quelle: Eigene Berechnung

Tabelle 477: Flächenkennwerte Lärche

Kennwert	Nutzungspfad			
	Lärche BiD	Lärche BiMD	Lärche BD	Lärche BED
Holzaufkommen (t atro/ha)				
Konstruktionsholz	1,13	1,13	1,13	1,13
Bretter/Latten	0,46	0,46	0,46	0,46
Mehl Sägewerk	0,27	0,27	0,27	0,27
Verschnitt Sägewerk	0,54	0,54	0,54	0,54
Erntereste	0,37	0,37	0,37	0,37
DF-Holz	0,46	0,46	0,46	0,46
Rinde Stammholz	0,60	0,60	0,60	0,60
Rinde Astholz	0,22	0,22	0,22	0,22
Astholz stofflich	0,00	0,00	0,00	0,00
Astholz energetisch	0,68	0,68	0,68	0,68
SUMME	**4,73**	**4,73**	**4,73**	**4,73**
Mögliche Produktkombinationen (t)				
Konstruktionsholz (14% RF)	1,29	1,29	1,29	1,29
Bretter/Latten (14% RF)	0,53		0,53	0,53
OSB/Spanplatten (14% RF)	0,62	0,62	0,00	
Möbel (8% RF)		0,50		
Zellstoff				
Textilfasern (Viskose)				
Dämmstoff	0,67	0,67	1,27	0,67
Essigsäure, Furfural, Xylose				
Brennstoff	1,99	1,99	1,99	2,53
SUMME	**5,09**	**5,07**	**5,08**	**5,02**
Heizwert der Brennstoffe (kWh)	10.359	10.359	10.359	13.173
Volumen des Dämmstoffs (m³)	6,7	6,7	12,7	6,7
Flächengutschriften (m²)				
Möbel	0	2.070	0	0
Zellstoff	0	0	0	0
Textilfasern (Viskose)	0	0	0	0
Dämmstoff	244	244	463	244
Heizwert des Brennstoffs	1.328	1.328	1.328	1.689
SUMME	**1.572**	**3.642**	**1.791**	**1.933**
Bauholzertrag ohne Koppelprodukte (m³/ha)				
Konstruktionsholz	2,3	2,3	2,3	2,3
Bretter/Latten	0,9	0,0	0,9	0,9
OSB/Spanplatten	1,1	1,1	0,0	0,0
SUMME	**4,4**	**3,4**	**3,3**	**3,3**
Flächeninanspruchnahme (m²/m³ Bauholz)				
ohne Koppelprodukte (m²/m³)	2.295	2.930	3.075	3.075
inkl. Koppelprodukte (m²/m³)	1.935	1.863	2.524	2.481

B=Bauholz, Bi=Bauholz inkl. Verschnitt, M=Möbel, T=Textilfasern, E=Energie, D=Dämmstoff, P=Papierzellstoff
Quelle: Eigene Berechnung

Tabelle 478: Flächenbedarf der Buchenholzproduktion bei Modulbauweise - nach Wohnungsart

Modul	Nutzfläche (m²)	Holz-bedarf (m³)	Wald-flächen-bedarf (ha)	Jährlicher Wald-flächenbedarf Modul (m²/a)	Jährlicher Wald-flächenbedarf Insgesamt (m²/a)
Single-Wohnung					
Schlafzimmer	20	10,5	1,7	213,0	283,9
Wohnküche	20	10,5	1,7	213,0	283,9
Summe	40	21,0	3,4	426,0	567,9
Pro Person	**40**	**21,0**	**3,4**	**426,0**	**567,9**
Zwei-Personen-Wohnung					
Schlafzimmer	26	15,0	2,4	304,3	405,6
Wohnzimmer	26	15,0	2,4	304,3	405,6
Küche	20	10,5	1,7	213,0	283,9
Summe	**72**	**40,5**	**6,6**	**821,6**	**1.095,2**
Pro Person	**36**	**20,3**	**3,3**	**410,8**	**547,6**
Drei-Personen-Wohnung					
Schlafzimmer	26	15,0	2,4	304,3	405,6
Kinderzimmer	20	10,5	1,7	213,0	283,9
Wohnzimmer	26	15,0	2,4	304,3	405,6
Küche	20	10,5	1,7	213,0	283,9
Summe	**92**	**51**	**8,3**	**1.034,6**	**1.379,1**
Pro Person	**31**	**17,0**	**2,8**	**344,9**	**459,7**
Vier-Personen-Wohnung					
Schlafzimmer	26	15,0	2,4	304,3	405,6
Kinderzimmer	20	10,5	1,7	213,0	283,9
Kinderzimmer	20	10,5	1,7	213,0	283,9
Wohnzimmer	26	15,0	2,4	304,3	405,6
Küche	20	10,5	1,7	213,0	283,9
Summe	**112**	**61,5**	**10,0**	**1.247,6**	**1.663,1**
Pro Person	**28**	**15,4**	**2,5**	**311,9**	**415,8**
Wohnung für Fünfpersonen-Wohngemeinschaft					
Schlafzimmer 1	20	10,5	1,7	213,0	283,9
Schlafzimmer 2	20	10,5	1,7	213,0	283,9
Schlafzimmer 3	20	10,5	1,7	213,0	283,9
Schlafzimmer 4	20	10,5	1,7	213,0	283,9
Schlafzimmer 5	20	10,5	1,7	213,0	283,9
Wohnzimmer	26	15,0	2,4	304,3	405,6
Esszimmer	20	10,5	1,7	213,0	283,9
Küche	20	10,5	1,7	213,0	283,9
Summe	**166**	**88,5**	**14,4**	**1795,3**	**2.393,2**
Pro Person	**33,2**	**17,7**	**2,9**	**359,1**	**478,6**
Wohnung für Sechspersonen-Wohngemeinschaft					
6 Schlafzimmer	120	63,0	29,4	1278,0	1703,4
Wohnzimmer	26	15,0	2,4	304,3	405,6
Esszimmer	26	15,0	2,4	304,3	405,6
Küche	20	10,5	1,7	213,0	283,9
Summe	**192**	**103,5**	**16,8**	**2.100**	**2.798,8**
Pro Person	**32**	**17,3**	**2,8**	**349,9**	**466,5**

Quelle: Eigene Berechnungen nach UPARTMENTS RE, 2018; Kaufmann Bausysteme, 2016; VOL.AT, 2011

14.21.2 Dämmstoffe

Tabelle 479: Flächengutschriften für Koppelprodukte von Dämmstoffen, Teil 1

Koppelprodukt	Fichte, Schwach- & Restholz, (50kg/m³)	Kiefer, Schwach- & Restholz, (50kg/m³)	Hanf, Fasern und Schäben, (38kg/m³)	Hanf, KN, Körner und Stroh, (38kg/m³)	Hanf, KN, Körner und Fasern, (38kg/m³)	Hanf als Zwischenfrucht, Stroh, (38kg/m³)
	Quadratmeter pro Hektar					
Getreidekorn	0	0	0	0	0	7.313
Schnittholz	7.030	4.784	0	0	0	0
Textilfasern	0	0	0	0	0	0
Dämmstoff						2.190*
Öl	0	0	0	714	714	0
Expeller	0	0	0	1.353	1.353	0
Schäben	0	0	6.165	0	3.543	0
Festbrennstoff	295	201				
Biogassubstrat	0	0	0	0	0	0
SUMME	**7.325**	**4.985**	**6.165**	**2.068**	**5.611**	**9.503**

*Dämmstoff aus Getreidestroh
Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 480: Flächengutschriften für Koppelprodukte von Dämmstoffen, Teil 2

Koppelprodukt	Faserlein, Priorität Dämmstoff, 30kg/m³	Faserlein, Priorität Textilfasern, 30kg/m³,	Öllein, Priorität Öl, 30kg/m³,	Wiesengras, 3- bis 4-schürig, raumfüllend, 53kg/m³	Getreide, Korn und Dämmstroh, 100kg/m³
Produkt	Quadratmeter				
Getreidekorn	0	0	0	0	6127
Schnittholz	0	0	0	0	0
Textilfasern	0	3.300	0	0	0
Dämmstoff					
Öl	429	429	1.371	0	0
Expeller	252	252	808	0	0
Schäben	2.763	2.763	956	0	0
Festbrennstoff					
Biogassubstrat	0	0	0	1.736	0
SUMME	**3.444**	**6.744**	**3.136**	**1.736**	**6.127**

Quelle: Eigene Berechnungen

14.21.3 Möbel

Tabelle 481: Gewicht von Holzmöbeln, Beispiele

Möbel	Holzart	Gewicht (kg)
Tische		
Massivholztisch Bamaco	Eiche	175,5
Massiver Holztisch 'Tablein' - Landhaus-Stil, Astfichte hell	Fichte	41,0
Stühle		
Stuhl aus massiver Eiche - 'Sitwell Stackable'	Eiche	8,0
Edler Massivholzstuhl 'Throne'	Buche	8,0
Regale		
Holzregal Altholz mit 2 Fachböden und Tür - 'Earthy Stackle tall'	Zirbe	13,0
Altholzregal mit 2 Schubladen 40x40x40 - 'Earthy Stackle'	Fichte	15,0
Massives Regalelement - 'Care'	Fichte	27,0
Schränke		
Vollholzschrank 'Dream Lodge' - mit Drehtüren	Fichte	55,0
Exklusiver Massivholz-Schrank 'Dreamfield'	Buche	69,0
Klassischer Massivholzschrank 'Dream Base'	Fichte	72,0
Kommoden		
Elegante Kommode 'Timeless'	Buche	31,0
Hochwertige Kommode 'Silent'	Buche	31,0
Nachttische		
Nachttisch 'Silent' - in Zirbe, Buche, Nuss, Eiche und Kirsche	Buche	15,0
Betten		
Einzel-/Doppelbett 'Lazy'	Buche	62,0
Massivholzbett 'Elegant'	Buche	45,0
'Designerbett "Fine" - Massivholzbett'	Buche	68,0
Wohnzimmer-Möbel		
Massiver Couchtisch Monrovia 90x90 aus Palisander	Palisander	26,0
Couchtisch Cubus 110x60 honig gewachst	Palisander	45,2
Sideboard TV 'Classic' - aus massiver Buche	Buche	41,0

Quellen: Sunchairs GmbH & Co. KG (massivum.de); 4betterdays.com GmbH. Daten abgerufen am 04.09.2017

Tabelle 482: Flächengutschriften der Möbelproduktion nach Koppelprodukten: Eiche, Tanne (m²/ha)

Produkt	Nutzungspfad							
	Eiche			Tanne				
	Eiche MiBD	Eiche MBD	Eiche MED	Tanne MiBD	Tanne MBD	Tanne MED	Tanne MD	Tanne MPD
Spanplatten	711	1.012	0	450	1.154	0	0	0
Zellstoff	0	0	0	0	0	0	0	452
Textilfasern	0	0	0	0	0	0	0	0
Dämmstoff	88	88	88	178	178	178	535	178
Heizwert des Brennstoffs	1.685	1.685	2.309	1.844	1.844	1.844	1.844	2.068
SUMME	**2.483**	**2.784**	**2.397**	**2.472**	**3.177**	**2.023**	**2.380**	**2.698**

Quelle: Eigene Berechnung

Tabelle 483: Flächengutschriften der Möbelproduktion nach Koppelprodukten: Douglasie (m²/ha)

Produkt	Nutzungspfade			
	Douglasie MiBD	Douglasie MBD	Douglasie MED	Douglasie MD
Spanplatten	583	1.497	0	0
Zellstoff	0	0	0	0
Textilfasern	0	0	0	0
Dämmstoff	231	231	231	694
Heizwert des Brennstoffs	2.559	2.559	2.559	2.559
SUMME	**3.373**	**4.287**	**2.790**	**3.253**

Quelle: Eigene Berechnung

Tabelle 484: Flächengutschriften der Möbelproduktion nach Koppelprodukten: Kiefer, Lärche (m²/ha)

Produkt	Nutzungspfad								
	Kiefer					Lärche			
	Kiefer MiBD	Kiefer MBD	Kiefer MED	Kiefer MD	Kiefer MPD	Lärche MiBD	Lärche MBD	Lärche MED	Lärche MD
Spanplatten	277	708	0	0	0	368	977	0	0
Zellstoff	0	0	0	0	277	0	0	0	0
Textilfasern	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dämmstoff	90	90	90	309	90	256	256	256	565
Heizwert des Brennstoffs	1.343	1.343	1.343	1.343	1.479	1.655	1.655	1.655	1.655
SUMME	**1.710**	**2.141**	**1.433**	**1.651**	**1.846**	**2.279**	**2.888**	**1.911**	**2.220**

Quelle: Eigene Berechnung

14.21.4 Möbelnutzungsdauer

Telefonisches Interview mit Handelsverband Möbel und Küchen (BVDM).

Datum: 28. Mai 2018. Uhrzeit: 12:54

Frage: Sind die aus dem Jahr 2008 stammenden Angaben zur Nutzungsdauer von Möbeln noch aktuell, oder hat sich die Nutzungsdauer inzwischen verändert?

Kunz: Für Küchen, Betten und Holzmöbel im Allgemeinen sind diese Zahlen immer noch aktuell. Bei Polstermöbeln kann man eine geringe Verkürzung der Nutzungsdauer beobachten. Wir sprechen hier nicht mehr von acht bis zehn Jahren, sondern von sieben bis neun Jahren. Die Gründe dürften vor allem modischer Art sein.

Frage: Halten Sie eine Verlängerung der Nutzungsdauer der Möbel oder der darin enthaltenden Rohstoffe für möglich, beispielsweise durch eine Umstellung auf eine Produktion nach dem Prinzip von Cradle to Cradle.

Kunz: Wenn die Kunden danach fragen, sind Hersteller und Handel sicher gerne zu einer solchen Umstellung bereit. Für eine wirtschaftliche Umstellung würden jedoch einige Jahre benötigt. Mit Blick auf die Nachhaltigkeit wäre eine längere Nutzungsdauer auf jeden Fall wünschenswert. Bisher handelt es sich dabei aber noch um einen Nischenmarkt.

14.21.5 Faserproduktion

Tabelle 485: Berechnungsgrundlage der Szenarien – Fasererträge nach Pflanzenart und Nutzungsvariante

Nutzpflanze & Nutzungspfad	Ertrag ohne Koppelprodukte (t/ha)	Theoretischer Ertrag unter Berücksichtigung von Koppelprodukten (t/ha)	Netto-Flächeninanspruchnahme (m²/t)**
Faserhanf T+E	2,0	3,7	2.700
Faserhanf T+B	2,0	9,8	1.020
Hanf, Kombinationsnutzung (KN)	0,9	1,4	7.130
Hanf, Zwischenfrucht (ZF)	1,9*	10,2	980
Nessel	0,7	0,8	12.500
Faserlein T+E	1,0	1,8	5.560
Faserlein T+B	1,0	2,9	3.450
Öllein	0,4	0,6	16.670
Fichte Stammholz	1,2	1,4	7.140
Buche Stammholz	0,7	1,3	7.690

* Bei energetischer Nutzung von Schäben und Holzresten
**Eine Flächengutschrift erfolgte lediglich für den Kornertrag der Hauptfrucht Gerste. Die Koppelprodukte Gerstenstroh und Hanfschäben blieben unberücksichtigt.

Quelle: Eigene Berechnung

14.22 Energieverbrauch und Energieerzeugung

14.22.1 Treibstoffverbrauch von Kfz

Tabelle 486: Stromverbrauch sparsamer Elektrofahrzeuge

Fahrzeug	Stückzahl	Verbrauch in kWh/100km
Hyundai IONIQ (84)	84	14,0
Mitsubishi i-MiEV (15)	15	14,3
Peugeot iOn (15)	15	14,3
Volkswagen Golf (58)	58	15,0
Citroen C-Zero (20)	20	15,0
BMW i3 (69)	69	15,1
Nissan Leaf (70)	70	16,0
Smart Fortwo (46)	46	16,1
Opel Ampera (17)	17	16,2
Renault ZOE (162)	162	16,4
Kia Soul (17)	17	17,0
Tesla Motors Model 3 (22)	22	17,4
Hyundai Kona (18)	18	17,5
Tesla Motors Model S (81)	81	20,6
Insgesamt	**694**	**16,2**

Quelle: Fisch und Fischl GmbH, 2019: spritmonitor.de, 14.05.2019

Tabelle 487: Treibstoffverbrauch von Erdgas-Autos

Fahrzeuge	Stückzahl	Treibstoff	Verbrauch in kg/100 km	Verbrauch in kWh/100 km
Seat, alle Modelle	302	Erdgas (CNG)	3,93	52,3
Fiat, alle Modelle	396	Erdgas (CNG)	4,61	61,3
Citroen	15	Erdgas (CNG)	4,89	65,0
Volkswagen, alle Modelle	1.632	Erdgas (CNG)	5,15	68,5
Ford, alle Modelle	53	Erdgas (CNG)	5,43	72,2
Opel, alle Modelle	564	Erdgas (CNG)	5,48	72,9
Mercedes Benz, alle Modelle	97	Erdgas (CNG)	5,58	74,2
BMW, alle Modelle	13	Erdgas (CNG)	5,84	77,7
Insgesamt	**3.072**	**Erdgas (CNG)**	**5,04**	**67,0**

Quelle: Fisch und Fischl GmbH, 2019: spritmonitor.de, 14.05.2019

Tabelle 488: Treibstoffverbrauch von Lastkraftwagen (l/100km)

Fahrzeugtyp	Zul. Gesamtgewicht (t)	Treibstoff	Verbrauch (l/100km)
Mercedes-Benz Actros	18 – 41	Diesel	32,25
Iveco Stralis	18 – 26	Diesel	32,04
DAF CF 85	18 – 44	Diesel	29,74
Mercedes-Benz Atego	6,5 – 15	Diesel	20,45
DAF LF 45	6 – 18	Diesel	20,02
Iveco Eurocargo	7,5 – 18	Diesel	18,40

Quelle: Fisch und Fischl GmbH, 2019: spritmonitor.de, 14.05.2019

14.22.2 Wärmepumpen

Tabelle 489: Wärmepumpen - Geschätzte Bestandsentwicklung in den Landkreisen Bodenseekreis, Esslingen, Konstanz, Ravensburg und Sigmaringen 2012 – 2017

Kennwert	Wohnungen	Wärmepumpen	Anteil Wärmepumpen
Bodenseekreis			
Bestand 2012	[5] 102.431	[8] 1.127	[1] 1,1%
Neubau 2012-2017	[8] 5.340	[8] 1.655	[2] 31,0%
Bestand 2017	[5] 107.771	[8] 2.782	[8] 2,6%
Esslingen			
Bestand 2012	[5] 246.909	[8] 2.716	[6] 1,1 %
Neubau 2012-2017	[8] 7.037	[8] 2.181	[2] 31,0 %
Bestand 2017	[5] 253.946	[8] 4.897	[8] 1,9 %
Konstanz			
Bestand 2012	[5] 136.072	[8] 1.769	[3] 1,3 %
Neubau 2012-2017	[8] 5.610	[8] 1.739	[2] 31,0 %
Bestand 2017	[5] 141.682	[8] 3.508	[8] 2,5 %
Ravensburg			
Bestand 2012	[5] 123.755	[8] 248	[4] 0,2 %
Neubau 2012-2017	[8] 5.712	[8] 1.771	[2] 31,0 %
Bestand 2017	[5] 129.467	[8] 2.018	[8] 1,6 %
Sigmaringen			
Bestand 2012	[5] 58.599	[8] 117	[7] 0,2%
Neubau 2012-2017	[8] 1.734	[8] 538	[2] 31,0%
Bestand 2017	[5] 60.333	[8] 655	[8] 1,1%

Quellen: (1) (Energieagentur Ravensburg gGmbH, 2015 S. 65) (2) Statista, 2019c; (3) Simon & Szaguhn, 2017; (4) Energieagentur Ravensburg gGmbH, 2015a, S. 56; (5) (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2019c); (6) Schätzung nach Krentz, 2012, und Energieagentur Ravensburg gGmbH, 2015; (7) Schätzung nach Krentz, 2012, und Energieagentur Ravensburg gGmbH, 2015a; (8) Eigene Berechnung

14.22.3 Energiepflanzen und Wasserhaushalt

Tabelle 490: Angaben zu Transpirationskoeffizienten von Energie- und Rohstoffpflanzen in der Literatur (l H_2O/kg TM)

Nutzpflanze	Angaben zum Transpirationskoeffizienten in Literatur und Veröffentlichungen (l H2O/kg TM)							Mittelwert *
Ackergras- und Leguminosen	[11] 700							700
Dauergrünland	[11] 750							750
Durchwachsene Silphie								[1] 403 **
Faserlein	[7] 700							700
Fasernessel								
Hanf	[2] 300 - 500							400
Kartoffel	[4] 624	[7] 350 - 400	[11] 500	[12] 210 - 230				430
Mais	[4] 351	[5] 242	[6] 300 - 400	[7] 250	[8] 300 - 400	[10] 200	[11] 350	286
Miscanthus	[4] 200 - 250	[5] 171	[11] 250					204
Öllein	[7] 700							700
Pappel	[5] 302							302
Paulownia								k. A.
Roggen	[3] 400 - 500	[7] 220 - 320						413
Rutenhirse (Switchgrass)								k. A.
Sida								k. A.
Sonnenblume	[5] 686	[12] 300 - 400						602
Sorghum bicolor	[5] 231	[7] 200 - 300	[12] 200 - 300					244
Sudangras-Hybrid	[5] 128	[12] 200 - 300						189
Topinambur	[11] 400	[12] 600						500
Ungarisches Hirschgras								k. A.
Weide	[5] 301							301
Wiesengras	[11] 750							750
Wintergerste.	[3] 400 - 500	[4] 529	[7] 220 - 320					416
Winterraps	[7] 600 - 700	[12] 300 - 400	[4] 600 - 700	[5] 332				496
Winterweizen	[4] 488	[7] 350 - 400	[8] 250 - 550	[10] 500				441
Zuckerrübe	[4] 394	[8] 350 - 450	[9] 374	[10] 200	[11] 380	[12] 500		375

* Angaben des Landtags Baden-Württemberg wurden nach angegebener Quellenanzahl gewichtet
** nach Dauber et al. (2015) liegt der Wasserbedarf der Silphie um ca. 54 Prozent über dem von Mais
Quellen: (1) Dauber, et al., 2015; (2) Graf, et al., 2005; (3) Hofhansel, 2007; (4) Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg LTZ, 2010; (5) Landtag Baden-Württemberg, 2014; (6) Liebhard, 2012; (7) Loiskandl, o. J.; (8) Mauser, 2014; (9) MLUV Brandenburg , 2009; (10) Schaller & Weigel, 2007; (11) Stolzenburg, 2009; (12) Klimazwei, 2017

14.22.4 CO_2-Emissionsfaktoren nach Energieträgern

Für eine Kilowattstunde Stromverbrauch im Jahr 2017 sind, entsprechend dem deutschen Strommix, 533 g CO_2-Äquivalent anzurechnen (Umweltbundesamt, 2020 S. 9).

Die CO_2-Bilanzen des Statistischen Landesamtes Baden-Württemberg basieren auf Emissionsfaktoren des Umweltbundesamtes. Die ausführliche Liste ist auf den Internetseiten des Umweltbundesamtes abrufbar[131]. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Emissionsfaktoren, die durch das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle erstellt wurde (BAFA, 2019, S. 3), ist in Tabelle 491 dargestellt.

Tabelle 491: CO_2-Emissionsfaktoren nach Energieträgern

Energieträger	kg CO_2-Äq./kWh
Nah-/Fernwärme	0,280*
Heizöl leicht	0,266
Heizöl schwer	0,294
Flüssiggas	0,239
Erdgas	0,202
Steinkohle	0,337
Braunkohle	0,381
Rohbenzin	0,264
Diesel	0,266
Biomasse Holz	0,029
Pellets	0,023
Biodiesel	0,096
Biogas	0,148

* Real können die Emissionen im Nah- bzw. Fernwärmebereich in Abhängigkeit des Erzeugerparks deutlich nach oben und nach unten abweichen.
Quelle: (BAFA, 2019, S. 3)

[131] Umweltbundesamt (15.04.2020): CO_2-Emissionsfaktorenliste für Energie & Industrieprozesse (Tabellarische Aufstellung der abgeleiteten Emissionsfaktoren für CO_2). URL: https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen

14.23 Beschreibung der Szenarien

14.23.1 Szenarien mit der Priorität Ernährung

Tabelle 492: Definition der Szenarien N01 - N04

Szenario	N01 Zero Waste	N02 Zero Waste	N03 Zero Waste	N04 Zero Waste
Beschreibung	**Verzehr Stand 2017, Flächennutzung Stand 2017, keine Verschwendung mehr**	**Verzehr Stand 2017, keine Verschwendung, keine EP & NawaRo, 57% Futterpflanzen**	**Verzehr Stand 2017, keine Verschwendung, keine EP & NawaRo, 25% Futterpflanzen**	**Verzehr Stand 2017, keine Verschwendung, keine EP & NawaRo, 15% Futterpflanzen**
Ernährungsweise	Zero Waste	Zero Waste	Zero Waste	Zero Waste
Lebensmittelverluste	10 % d. Verzehrsmenge	10 % d. Verzehrsmenge	10 % d. Verzehrsmenge	10 % d. Verzehrsmenge
Viehhaltung auf Grünland	ja	ja	ja	ja
Hühnerhaltung	Hybrid	Hybrid	Hybrid	Hybrid
Energiepflanzen	1. Generation	-	1. Generation	-
Anteil Nahrungspflanzen	[1)] 35,0 %	43,2 %	56,0 %	85,0 %
Anteil Futterpflanzen	[1)] 46,3 %	56,8 %	25,0 %	15,0 %
Anteil Energiepflanzen	[1)] 18,5 %	0,0 %	18,5 %	0,0 %
Anteil Rohstoffpflanzen	[1)] 0,24 %	0,0 %	0,24 %	0,0 %
Freiflächen-PV-Nutzung	-	-		
Agro-PV	-	-		
Agroforst	-	-		
Agrothermie	-	-		
Urbane Dachfarm	-	-		
Aquaponik	-	-		

Quelle: Eigene Annahmen; (1) BMEL, 2018

Tabelle 493: Definition der Szenarien N05 - N08

Szenario	N05 AGES	N06 DGE	N07 VEGET	N08 VEGAN
Beschreibung	**Ernährung nach AGES, keine Verschwendung, konventionell, keine EP, keine NawaRo, 15% Futterpflanzen**	**Ernährung nach DGE, keine Verschwendung, konventionell, keine EP, keine NawaRo, 15% Futterpflanzen**	**Vegetarisch, keine Verschwendung, konventionell, keine EP, keine NawaRo, 5% Futterpflanzen**	**Vegan, keine Verschwendung, konventionell, keine EP, keine NawaRo, keine Futterpflanzen**
Ernährungsweise	AGES	DGE	Vegetarisch	Vegan
Lebensmittelverluste	10 % d. Verzehrsmenge	10 % d. Verzehrsmenge	10 % d. Verzehrsmenge	10 % d. Verzehrsmenge
Viehhaltung auf Grünland	ja	ja	ja	ja
Hühnerhaltung	Hybrid	Hybrid	Hybrid	Hybrid
Energiepflanzen	-	-	-	-
Anteil Nahrungspflanzen	85,0 %	85,0 %	95,0 %	100,0 %
Anteil Futterpflanzen	15,0 %	15,0 %	5,0 %	0,0 %
Anteil Energiepflanzen	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Anteil Rohstoffpflanzen	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Freiflächen-PV-Nutzung	-	-		
Agro-PV	-	-	-	-
Agroforst	-	-	-	-
Agrothermie	-	-	-	-
Urbane Dachfarm	-	-	-	-
Aquaponik	-	-	-	-

Quelle: Eigene Annahmen

Tabelle 494: Definition der Szenarien N09 - N12

Szenario	N09 VEGAN	N10 ECO-Mix	N11 ECO-Mix + ZNH	N12 ECO-Mix + AF
Beschreibung	**Vegan, keine Verschwendung, konventionell, keine EP, keine NawaRo, keine Futterpflanzen**	**Eco-Mix, keine Verschwendung, konventionell, keine EP, keine NawaRo, 8% Futterpflanzen**	**Eco-Mix, keine Verschwendung, konventionell, 2NH, keine EP, keine NawaRo, 8% Futterpflanzen**	**Eco-Mix, keine Verschwendung, AF, konventionell, keine EP, keine NawaRo, 8% Futterpflanzen**
Ernährungsweise	Vegan	Eco-Mix	Eco-Mix	Eco-Mix
Lebensmittelverluste	10 % d. Verzehrs	10 % d. Verzehrs	10 % d. Verzehrs	10 % d. Verzehrs
Viehhaltung auf Grünland	nein	ja	ja	ja
Hühnerhaltung	Hybrid	Hybrid	Zweinutzungshuhn	Hybrid
Energiepflanzen	-	-	-	-
Anteil Nahrungspflanzen	100,0 %	90,0 %	90,0 %	90,0 %
Anteil Futterpflanzen	0,0 %	10,0 %	10,0 %	10,0 %
Anteil Energiepflanzen	0,0 %	0,0%	0,0%	0,0 %
Anteil Rohstoffpflanzen	0,0 %	0,0 %	0,0%	0,0 %
Freiflächen-PV-Nutzung	-	-	-	-
Agro-PV	-	-	-	-
Agroforst	-	-	-	5 % der Ackerfläche
Urbane Dachfarm	-	-	-	-
Aquaponik	-	-	-	-

Quelle: Eigene Annahmen

Tabelle 495: Definition der Szenarien N13 - N17

Szenario	N13 ECO-MIX + UDF	N14 ECO-MIX + AqP	N15 ECO-Mix + APV	N16 ECO-Mix + FPV	N17 ECO-Mix + FPV + UDF
Beschreibung	**Eco-Mix, Urb. Dachfarmen (2m²/EW), keine EP, keine NawaRo, 10% Futterpflanzen**	**Eco-Mix, Aquaponik (2m²/EW), keine EP, keine NawaRo, 10% Futterpflanzen**	**Eco-Mix, Agrophotovoltaik, keine EP, keine NawaRo, 10% Futterpflanzen**	**Eco-Mix, Freiflächen-PV auf Grünland, keine EP, keine NawaRo, 10% Futterpflanzen**	**Eco-Mix, Freiflächen-PV auf Grünland, keine EP, keine NawaRo, 10% Futterpflanzen, Urb. Dachfarmen**
Ernährungsweise	Eco-Mix	Eco-Mix	Eco-Mix	Eco-Mix	Eco-Mix
Lebensmittelverluste	10 % d. Verzehrs	10 % d. Verzehrs	10 % d. Verzehrs	10 % d. Verzehrs	10 % d. Verzehrs
Viehhaltung auf Grünland	ja	ja	ja	ja	ja
Hühnerhaltung	Hybrid	Hybrid	Hybrid	Hybrid	Hybrid
Energiepflanzen	-	-	-	-	-
Anteil Nahrungspflanzen	90,0 %	90,0 %	90,0 %	90,0 %	90,0%
Anteil Futterpflanzen	10,0 %	10,0 %	10,0 %	10,0 %	10,0%
Anteil Energiepflanzen	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0%
Anteil Rohstoffpflanzen	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0%
Freiflächen-PV-Nutzung	-	-	-	8 % des Grünlandes	8 % des Grünlandes
Agro-PV			5 % der Ackerfläche	-	-
Agroforst	-	-	-	-	-
Urbane Dachfarm	2,0 m²/EW	-	-	-	2,0 m²/EW
Aquaponik	-	2,0 m²/EW	-	-	-

Quelle: Eigene Annahmen

Quellenverzeichnis

3N Kompetenzzentrum. 2017. Forscher entwickeln Elektrolyte für Redox-Flow-Batterien aus Lignin aus der Zellstoffherstellung. [Online] 18. 04 2017. [Zitat vom: 29. Mai 2018.] https://www.3-n.info/news-und-termine/aktuelle-meldungen/biooekonomie/forscher-entwickeln-elektrolyte-fuer-redox-flow-batterien-aus-lignin-aus-der-zellstoffherstellung.html.

ADAC. 2018. Elektroautos im Test: So hoch ist der Stromverbrauch. [Online] 12. Oktober 2018. [Zitat vom: 13. Mai 2019.] https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/tests/elektromobilitaet/stromverbrauch-elektroautos-adac-test/.

Advanco GmbH. 2019. Baum-Hasel, Haselnussbaum. [Online] 2019. [Zitat vom: 21. Juni 2019.] https://www.gartendialog.de/haselnussbaum-pflanzen/.

AGCO GmbH. 2018. Fendt gewinnt Goldmedaille auf der INTERVITIS INTERFRUCTA HORTITECHNICA 2018. [Online] 05.. November 2018. [Zitat vom: 11.. Mai 2020.] https://www.fendt.com/de/intervitis-2018.

Agentur für Erneuerbare Energien. 2017. *Energiewendeatlas Deutschland 2030.* [Hrsg.] Agentur für Erneuerbare Energien e.V. Berlin : s.n., 2017. S. 97.

—. 2019. Windenergie - Status quo, Entwicklung, Klimabilanz und ökonomische Effekte. [Online] 2019. [Zitat vom: 15. Mai 2019.] https://www.unendlich-viel-energie.de/erneuerbare-energie/wind/onshore/artikel1306.

Agentur für Erneuerbaren Energien. o. J.. Föderal Erneuerbar: Bundesländer-Übersicht zu Erneuerbaren Energien. [Online] o. J. https://www.foederal-erneuerbar.de.

AGES. 2018. Die Österreichische Ernährungspyramide. [Online] 2018. [Zitat vom: 20. Novemebr 2018.] https://www.ages.at/themen/ernaehrung/oesterreichische-ernaehrungspyramide/.

—. 2015. Ötztaler Faserlein. *SLK - Anbau Seltener Landwirtschaftlicher Kulturpflanzen.* [Online] 2015. [Zitat vom: 20. August 2018.] http://slk.ages.at/fileadmin/eventpages/slk2011/daten/Beschreibungen_PDF/%C3%96tztaler_2015.pdf.

Agraria. 2019. Chinesischer Blauglockenbaum. [Online] 2019. [Zitat vom: 13. Juni 2019.] http://www.agraria.org/coltivazioniforestali/paulownia-elongata.htm.

AgrarMarkt Austria. 2018. Daten und Fakten der AgrarMarkt Austria für den Bereich Vieh und Fleisch K-Ö: Lebend- und Schlachtgewichte, Schlachtausbeute, Schlachtungen sowie Fleischanfall. [Online] 30. April 2018. [Zitat vom: 29. Januar 2019.] https://www.ama.at/getattachment/c9170514-b892-46ff-9e27-f2fd74e0d9b9/220_schlachtgew_2004-2015.pdf.

Agrarnetz. o. J.. *Kälberaufzucht und Kälberfütterung.* o. J.

Alipour, Ali, et al. 2012. Study and determination of energy consumption to produce conventional rice of the Guilan province. *Journal of Agricultural Engineering Research.* 2012, S. 99–106.

Alnatura. 2018. Stuwa – Eine leuchtende Idee. [Online] 2018. [Zitat vom: 02. Oktober 2018.] https://www.alnatura.de/de-de/m%C3%A4rkte/erzeugerreportagen/stuwa.

Alpen Sepp Handels e.U. 2019. SIG / GSIG, eine außergewöhnliche Spezialität aus dem Bregenzerwald. [Online] 2019. [Zitat vom: 19. Februar 2019.] https://alpensepp.com/kaeseshop/sig-waelderschokolade-aelplerschokolade.

AM Online Projects. 2018. Klimadaten für Städte weltweit. [Online] 2018. [Zitat vom: 09. 04 2018.] https://de.climate-data.org/.

Andre, Kira. 2018. Das Fundament von Windenergieanlagen: Was passiert beim Rückbau? [Online] 26.. März 2018. [Zitat vom: 07.. Februar 2020.] https://www.energieagentur.nrw/blogs/erneuerbare/beitraege/das-fundament-von-windenergieanlagen-was-passiert-beim-rueckbau/#fn-1.

ANUAL. 2018. Projekt: Streuobst. [Online] 2018. [Zitat vom: 08. Januar 2019.] https://anual-ev.de/projekt/streuobst/.

Arapoglou, D., et al. 2010. Ethanol production from potato peel waste (PPW). *Waste management.* New York, N.Y. : s.n., 2010, Bd. 30, S. 1898–1902.

Arnhofer, Alois. 2018. Ango Bikes. Handmade Woodenbikes. [Online] Ango Bikes, 2018. [Zitat vom: 30. Mai 2018.] https://www.ango-bikes.de/meine-bikes/.

AustroCel Hallein. 2018a. AutroCel Produtke - Zellstoff. [Online] 2018a. [Zitat vom: 03. Juni 2018.] https://austrocel.com/produkte/zellstoff/.

—. 2018b. Zahlen und Fakten. [Online] 2018b. [Zitat vom: 03. Juli 2018.] https://austrocel.com/nachhaltigkeit/#zahlen_fakten.

Averbeck, Friedrich, et al. 2000. *Empfehlungen für die saisonale und ganzjährige Weidehaltung von Rindern.* [Hrsg.] Niedersächsisches Ministerium für Ernährung Landwirtschaft Verbraucherschutz und Landesentwicklung. Hannover : s.n., 2000. S. 64.

Avocado Store GmbH. 2018. GARTDA Sojawachskerze 200ml . [Online] 2018. [Zitat vom: 02. Oktober 2018.] https://www.avocadostore.de/products/49208-sojawachskerze-200ml-gartda.

Balko, Julia. 2011. Pflege und Bewirtschaftung von Streuobstwiesen - Landschaftspflege und Biomassenutzung. NABU-Tagung „Biologische Vielfalt in Mittelgebirgen“, Villingen 31. März 2011. [Online] 2011. [Zitat vom: 08. Januar 2019.] https://www.nabu.de/bergvielfalt/04_Streuobstwiesen%20Biomasse_Balko.pdf.

Bambooride OG. 2014. FAQs. *bambooride.* [Online] 2014. [Zitat vom: 30. Mai 2018.] http://www.bambooride.com/de/faq.

BASF. 2017. Agrar-Lexikon. Lein. [Online] 2017. [Zitat vom: 27. Februar 2017.] https://www.agrar.basf.de/agroportal/de/de/infothek_/infothek_lexikon/glossary_detail_22522.html.

BAuA. 2013/2018. Technische Regeln für Arbeitsstätten: Raumabmessungen und Bewegungsflächen. ASR A1.2. Ausgabe: September 2013 zuletzt geändert GMBl 2018. [Online] 2013/2018. [Zitat vom: 30. April 2019.] https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/ASR/pdf/ASR-A1-2.pdf?__blob=publicationFile.

Bäuerliche Erzeugergemeinschaft Schwäbisch Hall w. V.,. 2019. Schwäbisch-Hällisches Landschwein: Wissen. [Online] 2019. [Zitat vom: 02. März 2019.] https://haellisch.eu/wissen/.

Baufeld Delta. 2018. Bau-System. Das HoHo Wien als Vorzeigeprojekt im Hybridbau. [Online] Entwicklung Baufeld Delta GmbH, 2018. [Zitat vom: 24. 05 2018.] http://www.hoho-wien.at/Projekt/Bau-System.

—. 2017a. Daten & Fakten. Daten & Fakten des HoHo Wien. [Online] Entwicklung Baufeld Delta GmbH, 2017a. [Zitat vom: 03. 08 2017.] http://www.hoho-wien.at/Projekt/Daten-Fakten.

—. 2017b. Ökologische Kennzahlen. Die ökologischen Kennzahlen des HoHo Wien. [Online] Entwicklung Baufeld Delta GmbH, 2017b. [Zitat vom: 03. 08 2017.] http://www.hoho-wien.at/Projekt/Okologische-Kennzahlen.

bauforumstahl e.V. 2021. Koppelprodukt. [Online] 2021. [Zitat vom: 06.. September 2021.] https://bauforumstahl.de/wissen/nachhaltigkeit/nachhaltigkeit-glossar/koppelprodukt/.

Baum, Sebastian, et al. 2008. *Methanverluste bei der Biogasaufbereitung.* [Hrsg.] Bundesamt für Energie (BFE). Wädenswil : s.n., 2008.

Baumgartner. 2018. Restholz und Sägenebenprodukte. [Online] 2018. [Zitat vom: 09. Juli 2018.] http://saegewerk-baumgartner.de/hp428/Saegenebenprodukte.htm.

BauNetz Media GmbH. 2017. Wohnbaupreis Hamburg 2017 für Woodie. Holzmodulbau für 371 Studierende. [Online] 10. 11 2017. [Zitat vom: 08. 05 2018.] https://www.baunetz-architekten.de/sauerbruch-hutton/1091321/news/5240551.

BauStroh GmbH. 2016. Baustroh. Wärmedämmung vom Acker. Informationen für Landwirte. [Online] 2016. [Zitat vom: 14. Oktober 2016.] http://www.baustroh.de/pdf/WEB_Flyer_Landwirte_Baustroh_2016-06.pdf.

—. 2018. Flyer "Bauen mit Baustroh". [Online] 2018. [Zitat vom: 05. Juni 2018.] http://www.baustroh.de/pdf/Flyer_Baustroh_2018-01-17.pdf.

—. 2017. Hinweise zur Herstellung von Strohballen als Baustroh. [Online] 2017. [Zitat vom: 05. Juni 2018.] http://www.baustroh.de/pdf/Hinweise_&_Infos_fuer_Landwirte_zur_Herstellung_von_Baustroh_2017-06-21.pdf.

—. 2017. Technisches Datenblatt "Baustroh". Stand: Oktober 2017. [Online] 2017. [Zitat vom: 05. Juni 2018.] http://www.baustroh.de/pdf/Technisches_Datenblatt_Baustroh_2017-10-11%20.pdf.

Bayerisches Landesamt für Statistik. 2011. Gemüseernte in Bayern 2011. Pressemitteilung. [Online] 30.. Dezember 2011.

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie. 2020. Anergieatlas Bayern. Photovoltaik - Umweltaspekte. [Online] 2020. [Zitat vom: 05.. Februar 2020.] https://www.energieatlas.bayern.de/thema_sonne/photovoltaik/umweltaspekte.html.

BDBe. 2015. *Bioethanol – effiziente Bioökonomie.* [Hrsg.] Bundesverband der deutschen Bioethanolwirtschaft e. V. Berlin : s.n., 2015. S. 19.

—. 2018. Die deutsche Bioethanolwirtschaft in Zahlen. [Online] 2018. [Zitat vom: 19. Oktober 2018.] https://www.bdbe.de/daten/marktdaten-deutschland.

BDEW. 2020. Endenergieverbrauch der Haushalte 2018 nach Anwendungsarten. [Online] 18. März 2020. [Zitat vom: 15. April 2020.] https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/endenergieverbrauch-der-haushalte-anwendungsarten/.

—. 2010. *Energie-Info: Energieverbrauch im Haushalt. BDEW-Datenkatalog Ausgabe 2010.* [Hrsg.] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. Berlin : s.n., 2010.

Becker, Nadine, et al. 2014. BfN Grünland-Report: Alles im Grünen Bereich? [Online] 2014. [Zitat vom: 16. Januar 2019.] https://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/presse/2014/PK_Gruenlandpapier_30.06.2014_final_layout_barrierefrei.pdf.

Becker, Nicole und Pichlmeier, Franziska. 2014. *Kurzanalyse Nr. 7: Ressourceneffizienz der Dämmstoffe im Hochbau.* [Hrsg.] VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH. Berlin : s.n., 2014. Bd. 3. aktualisierte Auflage 2016.

BED. 2017. Düngungsplan Sonnenblume. *Effizient Düngen.* [Online] Beratungsservice effizient düngen, 2017. [Zitat vom: 15. Januar 2017.] http://www.effizientduengen.de/files/sonnenblume.php.

—. 2017b. Effizient düngen: Wintergerste. [Online] 2017b. [Zitat vom: 28. März 2017.] http://www.effizientduengen.de/files/wintergerste.php.

—. 2017a. Leindotter. [Online] 2017a. [Zitat vom: 15. Januar 2017.] http://p://www.effizientduengen.de/files/leindotter.php.

Benning, Jost. 2019. Baumportal: Baum Alter bestimmen. [Online] 2019. [Zitat vom: 09. Januar 2019.] https://www.baumportal.de/baum-alter-bestimmen.

Berendonk, Clara und Verhoeven, Anne. 2015. Berechnung der Weideleistung. [Online] 2015. [Zitat vom: 28. Januar 2019.] https://www.oekolandbau.nrw.de/fileadmin/redaktion/PDFs/Fachinfo/Tierhaltung/Milchk%C3%BChe/Berechnung-der-Weideleistung-Internet.pdf.

Berendonk, Clara. 2012. Zwischenfruchtblühmischungen als Bienenweide. [Online] 18. Juni 2012. [Zitat vom: 18. Juni 2019.] https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/zwischenfruechte/zf-bienenweide.htm.

Berliner Mieterverein. 2005. Pro-Kopf-Wohnfläche: Langsameres Wachstum. [Online] 28. 05. 2005. [Zitat vom: 25. Oktober 2018.] https://www.berliner-mieterverein.de/magazin/online/mm0905/090508b.htm.

beweka. 2018a. Das beweka-Rohstofflexikon. Kartoffelpülpe. [Online] 12. Juni 2018a. https://www.beweka.com/service/rohstoffe/eintrag/kartoffelpuelpe.html.

—. 2018b. Das beweka-Rohstofflexikon. Maiskleber. [Online] 2018b. [Zitat vom: 12. Juni 2018.] https://www.beweka.com/service/rohstoffe/eintrag/maiskleber.html.

—. 2018d. Das beweka-Rohstofflexikon: Roggentrockenschlempe. [Online] 2018d. [Zitat vom: 22. Oktober 2018.] https://www.beweka.com/service/rohstoffe/eintrag/Roggentrockenschlempe.html.

—. 2018c. Das beweka-Rohstofflexikon: Weizenkleie. [Online] 2018c. [Zitat vom: 19. Oktober 2018.] https://www.beweka.com/service/rohstoffe/eintrag/weizenkleie.html.

Biokompakt Heiztechnik. o. J.. Biokompakt Heiztechnik GmbH. [Online] o. J. [Zitat vom: 08. Juni 2019.] http://biosolar.de/images/Biokompakt-Enertec-09.pdf.

Bioland e. V. . 2013. Bioland-Masthühner. [Online] 2013. [Zitat vom: 01. April 2019.] https://www.bioland.de/infos-fuer-verbraucher/bioland-tiere/bioland-masthuehner.html.

BIOTEC. 2018. *Kunststoffe aus Kartoffelstärke und ihre Anwendungsmöglichkeiten. Auskunft der Firma Biotec durch Uwe Beythien per Telefonat am 21. September 2018.* Emmerich am Rhein : Biotec, 2018.

Biowert Industrie GmbH. 2018. Biowert Produkte. [Online] 2018. [Zitat vom: 13. September 2018.] https://biowert.com/products.

—. 2015. *Technisches Datenblatt Biowert Terrassendielen.* Brensbach : s.n., 2015.

BLE. 2019/2020. Der Selbstversorgungsgrad in Deutschland. [Online] 2019/2020. https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/BZL/Informationsgrafiken/Selbstversorgungsgrad.pdf?__blob=publicationFile&v=5.

—. 2018b. Milchwirtschaft auf einen Blick in Deutschland. [Online] 12. Dezember 2018b. [Zitat vom: 14. Februar 2019.] https://www.ble.de/DE/BZL/Daten-Berichte/Milch-Milcherzeugnisse/TabellenMilchDeutschland.html.

—. 2017b. Ökologischer Lupinenanbau. *Ökolandbau.de.* [Online] 2017b. [Zitat vom: 05. Dezember 2018.] https://www.oekolandbau.de/erzeuger/pflanzenbau/spezieller-pflanzenbau/koernerleguminosen/lupinen/.

—. 2017. Ökologischer Sonnenblumenanbau. *Ökolanbau.de.* [Online] 02. 05. 2017. [Zitat vom: 04. Oktober 2018.] https://www.oekolandbau.de/erzeuger/pflanzenbau/spezieller-pflanzenbau/oelfruechte/oekologischer-sonnenblumenanbau/.

—. 2017a. Presseinformation: Deutsche 8 kg weniger Fleisch als vor 20 Jahren. [Online] 30. März 2017a. [Zitat vom: 30. Oktober 2018.] https://www.ble.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2017/170330_Fleisch.html.

—. 2018c. Versorgung mit Milch in Vollmilchwert in Deutschland nach Kalenderjahren. [Online] 05. Dezember 2018c. [Zitat vom: 18. Februar 2019.] https://www.ble.de/DE/BZL/Daten-Berichte/Milch-Milcherzeugnisse/TabellenMilchDeutschland.html?nn=8906974.

—. 2020. Versorgungsbilanzen: Obst, Gemüse, Zitrusfrüchte, Schalen- und Trockenobst. [Online] 2020. [Zitat vom: 26.. August 2020.] https://www.bmel-statistik.de/ernaehrung-fischerei/versorgungsbilanzen/obst-gemuese-zitrusfruechte-schalen-und-trockenobst/.

—. 2019. Warum werden Schweine nur selten auf der Weide gehalten? *Bundesinformationszentrum Landwirtschaft.* [Online] 2019. [Zitat vom: 18. Januar 2019.] https://www.landwirtschaft.de/landwirtschaft-verstehen/haetten-sies-gewusst/tierhaltung/warum-werden-schweine-nur-selten-auf-der-weide-gehalten/.

—. 2018. Zahlen zum Ökolandbau in Deutschland. Letzte Aktualisierung: 02.07.2018. [Online] 2018. [Zitat vom: 14. Januar 2019.] https://www.oekolandbau.de/service/zahlen-daten-fakten/zahlen-zum-oekolandbau/.

BMEL. 2016a. *Ergebnisse der Bundeswaldinventur 2012.* [Hrsg.] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Berlin : s.n., 2016a. S. 277.

—. 2014. *Nationale Politikstrategie Bioökonomie.* Berlin : s.n., 2014.

—. 2017. Pro-Kopf-Verbrauch von Gemüse nach Arten 2016/2017. [Online] 2017. [Zitat vom: 02. September 2019.] https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/GBT-0070004-2017.pdf.

—. 2018. *Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 2017.* [Hrsg.] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. 2018. S. 375.

—. 2019. *Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 2018.* [Hrsg.] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. 2019.

—. 2016c. *Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland 2016.* [Hrsg.] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. s.l. : Landwirtschaftsverlag GmbH, 2016c.

—. 2016b. Wald und Rohholzpotenzial der nächsten 40 Jahre - Ausgewählte Ergebnisse der Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung 2013 bis 2052. [Online] 2016b. [Zitat vom: 05. Juli 2018.] https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Wald-Rohholzpotential-40Jahre.html;nn=310868.

—. 2018b. *Welternährung verstehen - Fakten und Hintergründe.* [Hrsg.] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. Berlin : s.n., 2018b.

BMELV Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. 2011. *Waldstrategie 2020. Nachhaltige Waldbewirtschaftung - eine gesellschaftliche Chance und Herausforderung.* [Hrsg.] Bundesministerium für Ernährung Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV). 2011.

BMG Engineering AG. o. J.. *Energie-Kennzahlen. Dammlung der BMG Engineering AG.* Schlieren ZH, Schweiz : BMG Engineering AG, o. J.

BMI. 2018. Prozess-Datensatz: Holzfaserdämmplatte (Nassverfahren). [Online] 2018. [Zitat vom: 06. Juni 2018.] http://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=393f494d-8738-4330-aa5e-1652bb29b574&stock=OBD_2017_I&lang=de.

BMU Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. 2016. Pressemitteilung Nr. 051/16 | Wohnungswirtschaft. Bundesregierung beschließt Wohnungsbau-Offensive. [Online] 09. 03 2016. https://www.bmu.de/pressemitteilung/bundesregierung-beschliesst-wohnungsbau-offensive/.

BMU. 2009. *Energieeffizienz - Die intelligente Energiequelle - Tipps fuer Industrie und Gewerbe.* Berlin : s.n., 2009. S. 32.

—. 2005. *Photovoltaik-Freiflächenanlagen - Aktuelle Erfahrungen und Konfliktlinien.* [Hrsg.] Naturschutz und Reaktorsicherheit Bundesministerium für Umwelt. Berlin : s.n., 2005.

BMUB. 2007. *Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt.* Berlin : s.n., 2007.

BMVBS & BBR. 2009. *Nutzung städtischer Freiflächen für erneuerbare Energien.* [Hrsg.] BMVBS und BBSR. Berlin/Bonn : s.n., 2009.

BMVBS. 2010. *Globale und regionale Verteilung von Biomassepotenzialen. Status-quo und Möglichkeiten der Präzisierung. BMVBS-Online-Publikation 27/2010. Bundesministerium für Verkehr. Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (Hg.).* Bonn : s.n., 2010.

BMVI. 2015. *Räumlich differenzierte Flächenpotentiale für erneuerbare Energien in Deutschland. BMVI-Online-Publikation, Nr. 08/2015.* Berlin : s.n., 2015.

BMW. 2018. Nachhaltigkeit komplett durchdacht. Materilaien mit Zukunft. [Online] 2018. [Zitat vom: 30. Mai 2018.] https://www.bmw.de/de/neufahrzeuge/bmw-i/i3/2017/nachhaltigkeit.html.

Boese, Lothar. 2013. Mehrjährige Energiepflanzen im Vergleich. Vortragsfolien zum Vortrag bei 22. Jahrestagung des Fachverband Biogas e.V., Workshop 5: Alternative Energiepflanzen Leipzig, 31.01.2013. [Online] 31. Januar 2013. [Zitat vom: 13. Januar 2017.] https://llg.sachsen-anhalt.de.

Bognar, Antal. 2006. Nährwert- und Vitamingehalte ausgewählterWinterkürbissorten. *Ernährungs-Umschau 53 (2006) Heft 8.* 2006, S. 305–308.

Böhm, Christian. 2018a. Ergebnisse aus der Forschung: Themen und Ergebnisse aus der Forschung rund um Agroforst. *Agroforst-Info.* [Online] 2018a. [Zitat vom: 16. April 2019.] https://agroforst-info.de/ergebnisse/.

—. 2018. Pro und Contra Agroforst. *Agroforst-Info.* [Online] 2018. [Zitat vom: 16. April 2019.] https://agroforst-info.de/chancen/.

Boopendranath, M R und Hameed, Majed. 2013. Gross Energy Requirement in Fishing Operations. *Fishery Technology.* 01. 01 2013, Bd. 50, S. 27-35.

Borchert, Anne. 2015. Landwirt im „Faserrausch“. *top agrar.* 2015, Bd. 5/2015, S. 68-71.

Boston Medical Center. 2018. Rooftop Farm. [Online] 2018. [Zitat vom: 09. 04 2018.] https://www.bmc.org/rooftop-farm.

Branchenradar. 2016. Dämmstoffe in Deutschland 2016. Enormer Preisdruck bei Dämmstoffen am deutschen Markt. *BRANCHENRADAR.* [Online] 2016. [Zitat vom: 10. Oktober 2016.] http://www.branchenradar.com/Artikel.aspx?id=195.

—. 2018. Dämmstoffe in Deutschland 2017. Saint Gobain und Knauf bauen Marktanteil aus. *BRANCHENRADAR.* [Online] 2018. [Zitat vom: 29. Mai 2018.] https://www.branchenradar.com/Artikel.aspx?id=195.

Brandenburger, C., von Ah, E. und Latscha, A. 2008. Herdentrennung am LBBZ Plantahof. Erfahrungen und Resultate aus dem Praxisversuch von 2003-2007. [Hrsg.] G. Rahmann und U. Schuhmacher. *Neues aus der Ökologischen Tierhaltung 2008.* 2008, S. 119-130.

Bräunig, Uwe. 2019. Eiermarkt: Jedes Zehnte ist ein Bioei. [Online] 14. März 2019. [Zitat vom: 30. März 2019.] https://www.agrarheute.com/tier/eiermarkt-zehnte-bioei-552420.

Bremer, Christine und Günther, Inga. 2016. *„Mastversuch auf Grundlage von fünf Herkünften in Bezug auf eine mögliche Zweinutzung als Vorarbeit für eine privatwirtschaftlich unabhängige Geflügelzüchtung für die ökologische Landwirtschaft" - Abschlussbericht.* [Hrsg.] Ökologische Tierzucht gGmbH. 2016. S. 16.

Brückler, Martin, Resl, Thomas und Reindl, Andreas. 2018. Comparison of organic and conventional crop yields in Austria. *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment.* 2018, Bd. Volume 68: Issue 4, S. 223-236.

Brückner, Torsten. 2014. Analyse der deutschen Naturfaserwirtschaft und Vorstellung eines Öllein Kooperationsprojektes von Rohstoffproduktion und industrieller Verarbeitung. Vortragsfolien. 09.10.2014, SMP Meerane. [Online] 2014. [Zitat vom: 09. März 2017.] http://www.biomasse-freiberg.de/fileadmin/downloads/PROJEKT_NAWARO/Verarbeitung_NAWARO_Industrie/FENAFA_Br%C3%BCckner.pdf.

Bühler, Rudolf und Postler, Günther. 2004. *Ökologischer Gesamtzuchtwert Schwäbisch-Hällisches Schwein.* [Hrsg.] Bundesprogramm Ökologischer Landbau (BÖL). Wolpertshausen : s.n., 2004.

BUND BKRH. o. J.. Schmetterlinge brauchen Nahrung. [Online] o. J. [Zitat vom: 24. August 2018.] http://region-hannover.bund.net/themen_und_projekte/schmetterlinge/schmetterlinge_brauchen_nahrung/.

BUND. 2018a. *BUND-Gewässerreport 2018.* [Hrsg.] Bund für Umwelt- und Naturschutz e.V. Berlin : s.n., 2018a.

—. 2020. FAQ: Unsere Positionen zum Thema Windenergie und Naturschutz. [Online] 2020. [Zitat vom: 07.. Februar 2020.] https://www.bund.net/themen/energiewende/erneuerbare-energien/windenergie/fragen-und-antworten/.

Bundesamt für Justiz. 2019. Käseverordnung § 6 Käsegruppen. [Online] 2019. [Zitat vom: 28.. Februar 2019.] http://www.gesetze-im-internet.de/k_sev/__6.html.

Bundesamt für Naturschutz. 2019. Aktuelle Daten zur natürlichen Waldentwicklung in Deutschland. Stand: 05. April 2019. [Online] 2019. [Zitat vom: 14.. Dezember 2019.] https://www.bfn.de/presse/pressemitteilung.html?tx_ttnews%5Btt_news%5D=6608.

Bundesministerium der Finanzen. 2000. AfA-Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagegüter (AfA-Tabelle "AV"). Fassung vom 15.12.2000. [Online] 2000. [Zitat vom: 02. Mai 2019.] https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere_Steuerthemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/Ergaenzende-AfA-Tabellen/AfA-Tabelle_AV.html.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. 2019. *Verkehr in Zahlen 2018/2019.* 2019.

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. 2018. Energiedaten: Tabellen 6 und 6a. Endenergieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren. [Online] 30. Juli 2018. [Zitat vom: 13. Mai 2019.] https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/Energiegewinnung-und-Energieverbrauch/energiedaten-energiegewinnung-verbrauch-4-xls.xlsx?__blob=publicationFile&v=20.

Bundesverband Boden e.V. o. J.. Boden und Windenergie. [Online] o. J. [Zitat vom: 07.. Februar 2020.] https://www.bodenwelten.de/content/boden-und-windenergie.

BUNDjugend. 2018. Kleidung. [Online] 2018. [Zitat vom: 29. Juni 2018.] https://www.weltbewusst.org/themen/kleidung/.

Burger, Frank, et al. 2012. Kurzumtriebsplantagen. [Hrsg.] Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF). *LWF-Wissen 70: Energieholzmarkt Bayern 2010.* 2012, S. 45-49.

Büringer, Helmut und Schmidtmeier, Dirk. 2015. Straßenverkehr in Baden-Württemberg: Fahrleistungen und Emissionen 2013. *Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg 4/2015.* April 2015, S. 21-26.

BVDF. 2018. Fleischverbrauch und Fleischverzehr je Kopf der Bevölkerung. [Online] 2018. [Zitat vom: 29. Oktober 2018.] https://www.bvdf.de/in_zahlen/tab_05/.

BZ. 2013. Die Welternährungsorganisation will den Hunger ganz ausrotten. [Online] 2013. [Zitat vom: 28. Mai 2019.] https://www.badische-zeitung.de/wirtschaft-3/die-welternaehrungsorganisation-will-den-hunger-ganz-ausrotten--68389812.html.

Cathaia International. 2017b. Eigenschaften Paulowniaholz. Das Aluminium unter den Holzarten. [Online] 2017b. [Zitat vom: 21. August 2018.] http://www.cathaia.com/de/paulownia/paulownia-holz/holzeigenschaften/6-eigenschaften-paulowniaholz.

—. 2017a. KUP Pappel und Weide vs. Paulownia. [Online] 2017a. [Zitat vom: 21. August 2018.] http://www.cathaia.com/de/paulownia/paulownia-holz/biomasse/57-kup-pappel-und-weide-vs-paulownia.

Cebra. 2016. IFH-Kennziffern: Zahl der Büroarbeitsplätze nimmt zu. [Online] 14. April 2016. [Zitat vom: 30. April 2019.] https://www.cebra.biz/news/markt/14-04-2016-zahl-der-bueroarbeitsplaetze-nimmt-zu/.

Chaichana, Tanate, et al. 2014. Energy consumption analysis for SANGYOD rice production. *Energy Procedia.* 31. 12 2014, Bd. 52, S. 126 - 130.

Chauffrey, Joseph. 2017. *Mein kleiner Permakultur-Garten. 300 kg Ernte auf 150 qm Fläche mitten in der Stadt.* Staufen bei Freiburg : ökobuch Verlag, 2017. ISBN 978-3936896947.

Chefs Resources Inc. 2017. Fish Fillet Butchering Yields. [Online] 01. 11 2017. [Zitat vom: 01. 11 2017.] http://www.chefs-resources.com/seafood/seafood-yields/.

Christian Münch GmbH. 2019. Solarthermie Ertrag. [Online] 2019. [Zitat vom: 16. Mai 2019.] https://www.solarthermie.net/wirtschaftlichkeit/ertrag.

Clairant. 2019. Clariant successfully concludes testing of energy crop miscanthus at Straubing plant for GRACE projec. [Online] 2019. [Zitat vom: 08.. Juli 2020.] https://www.clariant.com/en/Corporate/News/2019/09/Clariant-successfully-concludes-testing-of-energy-crop-miscanthus-at-Straubing-plant-for-GRACE-proje.

Clariant. 2017. Sustainability Report 2016: Remaining at the forefront of change - Embracing renewable raw materials. [Online] 20. 03. 2017. http://reports.clariant.com/2016/sustainability-report/planet/renewable-raw-materials.html.

Clauß, Sophie und Brombach, Christine. 2014. Kalorienzufuhr sinkt – Übergewicht steigt. Versuch der Erklärung eines Paradoxons. [Hrsg.] Lebensmittelchemisches Institut (LCI) des Bundesverbandes der Deutschen Süßwarenindustrie. *Moderne Ernährung heute.* 2014, S. 2-10.

co2online gemeinnützige GmbH. 2011/2014 b. Trendreport 2: „Sanierung des Wohngebäudebestands ist entscheidend". [Online] 2011/2014 b. [Zitat vom: 23. August 2019.] https://www.co2online.de/fileadmin/co2/research/Trendreport2_Sanierungswirkung.pdf.

—. 2011/2014 a. Trendreport Energie I „Heizenergieverbrauch: Stand und Entwicklung". Berlin, August 2011 (Aktualisiert: September 2014). [Online] 2011/2014 a. [Zitat vom: 23. August 2019.] https://www.co2online.de/fileadmin/co2/research/Trendreport1_Heizenergieverbrauch.pdf.

co2online gGmbH. 2011/2014. Trendreport 1. Heizenergieverbrauch Gebäude. Heizenergieverbrauch in Deutschland. Stand und Entwicklung. Berlin, August 2011 (Aktualisiert: September 2014). [Online] 2011/2014. [Zitat vom: 14. Mai 2019.] http://www.co2online.de/fileadmin/co2/research/Trendreport1_Heizenergieverbrauch.pdf.

Consultic. 2016. Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2015 - Kurzfassung -. [Online] 23. 09 2016. [Zitat vom: 11. September 2018.] https://www.bkv-gmbh.de/fileadmin/documents/Studien/Consultic_2015__23.09.2016__Kurzfassung.pdf.

Crane, E. E. 1951. Wieviel Honig bringt ein Hektar? *Der Imkerfreund.* 1951, Bd. 5, S. 150-151.

CREAPAPER GmbH. 2018. Creapaper. [Online] 2018. [Zitat vom: 07. September 2018.] https://www.creapaper.de/.

Cremer. 2018. Rohstofflexikon. Maiskleberfutter. [Online] 2018. [Zitat vom: 02. Mai 2018.] https://www.deutsche-tiernahrung.de/open/brand_id/8/action/glossary%3Blist/menu/19/letter/M/M/6ZYf-g#Mais.

CropEnergies. 2018. Bioethanol: Produktionsverfahren. [Online] 2018. [Zitat vom: 22. Oktober 2018.] http://www.cropenergies.com/de/Bioethanol/Produktionsverfahren/.

Cyclowood. 2013. Das Fahrrad. [Online] 2013. [Zitat vom: 30. Mai 2018.] http://www.cyclowood.com/de/das-ahrrad/.

Danner, Herbert. 2010. *Ökologische Wärmedämmstoffe im Vergleich 2.0.* [Hrsg.] Landeshauptstadt München Referat für Gesundheit und Umwelt Bauzentrum München. 2010.

Dauber, Jens, et al. 2015. *Agrarökologische Bewertung der Durchwachsenen Silphie als eine Biomassepflanze der Zukunft. Schlussbericht zum Vorhaben.* Braunschweig : s.n., 2015. S. 126.

Daudpota, Abdul Malik, et al. 2016. Comparison of Growth, Feed Conversion and Body. Composition of Juvenile Hybrid Red Tilapia (Oreochromis niloticus × O. mossambicus) and Nile Tilapia (O. niloticus). Reared in Concrete Tanks. [Hrsg.] ZSP. *Pakistan J. Zool.* 2016, Bd. 48 (3), S. 809-816.

de Schutter, Olivier. 2011. Agroecology and the Right to Food. [Online] 08. März 2011. [Zitat vom: 05. Juni 2019.] https://www.globalpolicy.org/world-hunger/49921-agroecology-and-the-right-to-food.html.

Debruck, Jürgen. o. J.. Zuckerrüben - Vinasse im Ökobetrieb. *vinasse.com.* [Online] o. J. [Zitat vom: 21. April 2017.] https://vinasse.com/Zuckerr%FCbenvinasse%20im%20%D6kobetrieb%20_1_.pdf.

DECHEMA. 2016. *Mikroalgen-Biotechnologie - Gegenwärtiger Stand, Herausforderungen, Ziele.* [Hrsg.] DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. Frankfurt am Main : s.n., 2016.

Deepgreen Development GmbH. 2018. Woodcube Hamburg. [Online] 2018. [Zitat vom: 22. 05 2018.] https://www.deepgreen-development.com/woodcube-hamburg.

Degenbeck, Martin. 2015. Nachhaltige Biogaserzeugung aus Wildpflanzen: Mehr Vielfalt im Energiepflanzenanbau durch artenreiche Wildpflanzenmischungen. [Hrsg.] Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau Abteilung Landespflege. *SUB.* 2015, Bd. 3/2015, S. 34-39.

—. 2013. Wirtschaftlichkeit des Bio-Streuobstbaus – Bio-Streuobst kann sich rechnen! [Online] 2013. [Zitat vom: 08. Januar 2019.] https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/iab/dateien/biostreuobst2013degenbeck.pdf.

Dehoust, G., et al. 2006. *Fortentwicklung der Kreislaufwirtschaft zu einer nachhaltigen Stoffstrom- und Ressourcenpolitik, Teilvorhaben „Ermittlung von relevanten Stoffen bzw. Materialien für eine stoffstromorientierte Ressourcen schonende Abfallwirtschaft“.* Darmstadt : Öko-Institut,, 2006. S. 27.

Del Gado, I., Six, J., Peressotti und A., Cotrufo, F. 2003. Assessing the impact of land-use change on soil C sequestration in agricultural soils by means of organic matter fractionation and stable C isotopes. *Global Change Biology.* 2003, 9, S. 1204-1213.

dena. 2016. *Auswertung von Verbrauchskennwerten.* [Hrsg.] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Deutsche Energie-Agentur GmbH : s.n., 2016.

—. 2019. Energieeffizienz in der Kommune. [Online] 2019. [Zitat vom: 27. August 2019.] https://www.dena.de/themen-projekte/energieeffizienz/oeffentliche-hand/.

—. 2012. *Verkehr auf einen Blick.* [Hrsg.] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). Berlin : s.n., 2012. S. 58.

Deter, Alfons. 2018. Bioenergie Emsland bietet 75 bis 95 Euro pro Tonne Rapsstroh. *topagrar ONLINE.* [Online] 06. Juli 2018. [Zitat vom: 06. Oktober 2018.] https://www.topagrar.com/news/Home-top-News-Bioenergie-Emsland-bietet-75-bis-95-Euro-t-Rapsstroh-9353865.html.

Dettmer, Jochen. 2011. Das Bunte Bentheimer Schwein. [Online] 2011. [Zitat vom: 27. Februar 2019.] http://www.neuland-fleisch.de/studienprojekte/.

Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie. 2019. EnergyMap. [Online] 2019. [Zitat vom: 26. August 2019.] http://www.energymap.info.

Deutscher Brauer-Bund e.V. 2016. Deutsche Brauwirtschaft in Zahlen. [Online] 02. Mai 2016. [Zitat vom: 19. Februar 2019.] https://www.brauer-bund.de/download/Archiv/PDF/statistiken/STATIST%202017.pdf.

Deutscher Bundestag. 2018. *Dokumentation WD 5 - 3000 - 008/18 - E-Fuels .* Berlin : s.n., 2018.

Deutscher Fleischer-Verband. 2019. *Jahrbuch 2018.* Frankfurt am Main : s.n., 2019.

Deutscher Tierschutzbund. 2019a. Ernte als Gefahr für Wildtiere. [Online] 2019a. [Zitat vom: 03. Juli 2019.] https://www.tierschutzbund.de/information/hintergrund/artenschutz/ernte-als-gefahr-fuer-wildtiere/.

DGE. 2018c. Ausgewählte Fragen und Antworten zur Energiezufuhr. [Online] 2018c. [Zitat vom: 20. November 2018.] https://www.dge.de/wissenschaft/weitere-publikationen/faqs/energie/#referenz.

—. 2018a. DGE-Ernährungskreis - Ein Beispiel für eine vollwertige Lebensmittelauswahl. [Online] 2018a. [Zitat vom: 20. November 2018.] https://www.dge.de/ernaehrungspraxis/vollwertige-ernaehrung/ernaehrungskreis/.

—. 2018b. Referenzwerte / Energie. [Online] 2018b. [Zitat vom: 09. November 2018.] https://www.dge.de/wissenschaft/referenzwerte/energie/.

—. 2017. So dick war Deutschland noch nie. Ergebnisse des 13. DGE-Ernährungsberichts zur Übergewichtsentwicklung. Presseinformation, DGE aktuell, 2017 03/2017 vom 01.02.2017. [Online] 2017. [Zitat vom: 11. Februar 2019.] https://www.dge.de/presse/pm/so-dick-war-deutschland-noch-nie/.

—. 2015. Wie viel Energie braucht der Mensch? DGE veröffentlicht neue Referenzwerte für die Energiezufuhr. Presseinformation DGE aktuell, 2015 01/2015 vom 19.02.2015. [Online] 19. Februar 2015. [Zitat vom: 20. November 2018.] https://www.dge.de/presse/pm/wie-viel-energie-braucht-der-mensch/.

DGfH. 2001. *Holz. Rohstoff der Zukunft, nachhaltig verfügbar und umweltgerecht.* [Hrsg.] Deutsche Gesellschaft für Holzforschung. München : s.n., 2001. S. 31.

DGHK Deutsche Gesellschaft für Hydrokultur. 2015. Landwirtschaft auf dem Dach der Forschung. (22.07.2011) Update: 07.09.2015. *dghk.net.* [Online] 07. 09 2015. [Zitat vom: 22. 03 2018.] http://www.dghk.net/index.php?artikel=1425.

Die Topinambur Manufaktur. 2019. Anbau von Topinambur. [Online] 2019. [Zitat vom: 02. Juli 2019.] https://www.topinambur-manufaktur.de/Anbau-von-Topinambur.

Diepenbrock, Wulf. 2014. *Nachwachsende Rohstoffe.* Stuttgart : Eugen Ulmer KG, 2014.

Diersing-Espenhorst, Maren und Culiuc, Nicoleta. 2018. Weidehaltung: Das sind die Vor- und Nachteile. *agrarheute.* [Online] 05. März 2018. [Zitat vom: 16. Januar 2019.] https://www.agrarheute.com/tier/rind/weidehaltung-nachteile-522922.

Dillschneider, Robert. 2014. *Diecœ Effizienz der Kultivierung von Mikroalgen zur Biodieselgewinnung - Prozessentwicklung auf der Grundlage von Energiebilanzierung, Simulation und Integration modellprädiktiver Regelungskonzepte.* 2014. S. 208.

DLF. 2012. Beifang erwünscht. Biologen plädieren für eine Kehrtwende in der Fischereipolitik. [Online] 02. 03 2012. [Zitat vom: 22. November 2018.] https://www.deutschlandfunk.de/beifang-erwuenscht.676.de.html?dram:article_id=29213.

DMH. o. J.. Zuckerruebenvinasse (Product code LQS U2G): Duenger - Futtermittel - Biogas. [Online] o. J. [Zitat vom: 19. Oktober 2018.] https://www.deutsche-melasse.de/wp/wp-content/uploads/3-Zuckerr%c3%bcbenvinasse-D%c3%bcnger-Futtermittel-Biogas-DE-DMH-U2G.pdf.

Dorfner, Gehard. 2012. Flächeneffizienz – die neue entscheidende Größe in der Milcherzeugung. [Hrsg.] Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft t (LfL). *Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft - Institut für Betriebswirtschaft und Agrarstruktur: Jahresbericht 2012.* Freising-Weihenstephan : s.n., 2012, S. 31-34.

Dorfner, Gerhard. 2013. Mehr Milch auf knappen Flächen. *top agrar.* 2013, 2, S. R6-R11.

dpa/gms. 2004. Nachwachsende Rohstoffe im Automobilbau. *Handelsblatt.* [Online] Handelsblatt Media Group GmbH & Co. KG, 12. 08 2004. [Zitat vom: 30. 05 2018.] https://www.handelsblatt.com/archiv/nachwachsende-rohstoffe-im-automobilbau/2382152.html?ticket=ST-4390091-O2U3e7tK1TrOLmIBdPfe-ap2.

DRK. 2018. Kleiderkammer. [Online] 2018. [Zitat vom: 16. Jnui 2018.]

Droege, Gisela. 1984. Das Imkerbuch. 1984.

DUH. 2016. *Naturdämmstoffe - Wider die falschen Mythen. Hintergrundpapier. Stand: 28.01.201.* [Hrsg.] Deutsche Umwelthilfe e. V. Radolfzell : s.n., 2016.

Durafloor Werner GmbH. o. J.. Bambus Massivparkett: Technische Daten. [Online] o. J. [Zitat vom: 09.. April 2020.] https://www.durafloor-werner.de/wp-content/uploads/Bambus-Massivparkett.pdf.

Dusseldorp, Marc und Sauter, Arnold. 2011. *Forschung zur Lösung des Welternährungsproblems – Ansatzpunkte, Strategien, Umsetzung. TAB Arbeitsbericht Nr. 142.* Berlin : Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag,, 2011.

Dziewiaty, Krista. 2011. Energiepflanzen und Vogelschutz – Maßnahmen zur Verbesserung der Artenvielfalt . [Online] 24. Juni 2011. [Zitat vom: 29. Juni 2019.] https://www.landwirtschaft.sachsen.de/download/Energiepflanzen_und_Vogelschutz_(2)_Endf_Dziewiaty.pdf.

ecco-jäger Früchte und Gemüse AG. 2018. *Aquaponik. Auskunft per E-Mail am 04.04.2018.* 2018.

—. 2017. Aquaponik. Auskunft per E-Mail am 31.01.2017. [E-Mail]. 2017.

—. 2018. *Fisch Flyer Rosé Barsch.* Bad Ragaz, Schweiz : ecco-jäger Früchte und Gemüse AG, 2018.

ECF Farmsystems. 2018. ECF Aquaponik-Farmsysteme. Ein kurzes Wort zum Thema Nachhaltigkeit. Futterfußabdruck. [Online] 2018. [Zitat vom: 10. 03 2018.] http://www.ecf-farmsystems.com/.

Ecoduna. 2018. Unternehmen: Geschäftsfeld. [Online] 2018. [Zitat vom: 17. Oktober 2018.] https://www.ecoduna.com/unternehmen.html.

EEM. 2019. Ecofys: Mehr als 2300 Quadratkilometer Gebäudefläche für Photovoltaik und Solarthermie nutzbar. Veröffentlicht am 03.08.2007. *SolarServer.* [Online] 03. August 2019. [Zitat vom: 16. Mai 2019.] https://www.solarserver.de/solar-magazin/nachrichten/archiv-2007/ecofys-mehr-als-2300-quadratkilometer-gebaeudeflaeche-fuer-photovoltaik-und-solarthermie-nutzbar.html.

Ehring, Andreas und Keller, Oswald. 2008. Nussbäume zur Wertholzproduktion. *LWF Wissen 60 - Beiträge zur Walnuss.* 2008, S. 30-36.

Eilers, Uwe. 2013. Wenig Kraftfutter, mehr Erfolg. *Der kritische Agrarbericht 2013.* s.l. : ABL Verlag,, 2013, S. 142-146.

—. 2016. Weniger Kraftfutter, mehr Erfolg – Entwicklung von Betrieben in Baden-Württemberg. Folien zum Vortrag am 15.02.2016. [Online] 2016. [Zitat vom: 20. Januar 2019.] https://www.landwirtschaft-bw.info/pb/site/lel/get/documents/MLR.LEL/PB5Documents/lazbw_rh/pdf/Weniger%20Kraftfutter%20mehr%20Erfolg_Entwicklung%20von%20Betrieben%20in%20BW.pdf?attachment=true.

Ellersiek, Hans-Heinrich. 2008. Trends in der Schweinehaltung. [Online] 2008. [Zitat vom: 22. März 2019.] https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/technik/haltungsverfahren/trends-schweinehaltung.htm.

Elsayed Mickdam, Seddek, A.S (South Valley University) Abdellah, A.M, Sayed A.N (Assiut University). 2012. Poultry-by Product as Feedstuff in Tilapia. Evaluation of Poultry-by Product as Feedstuff in the Diets of Nile Tilapia. 22. 03 2012.

Emmerling, Christoph. 2016. Bodenqualität beim Anbau von Dauerkulturen für die Biomasseproduktion am Beispiel der Durchwachsenen Silphie (Silphium perfoliatum L.) – ein innovatives Agrarsystem der Zukunft. *Journal für Kulturpflanzen.* 2016, Bd. 68, 12, S. 399–406.

2011. ENERCON erhält Zertifikat für Lebenszyklusanalyse. [Hrsg.] ENERCON GmbH. *WindBLAtt - ENERCON Magazin für Windenergie.* 2011, Bd. 04/11, S. 10-11.

Energieagentur NRW. 2019. Da geht noch was: Erster NRW-Solaratlas offenbart Potenziale für PV-Anlagen. [Online] 09. Februar 2019. [Zitat vom: 16. Mai 2019.] https://www.energieagentur.nrw/blogs/erneuerbare/da-geht-noch-was-erster-nrw-solaratlas-offenbart-potenziale-fuer-pv-anlagen/.

Energieagentur Ravensburg. 2015a. *Energie- und Klimaschutzkonzept des Landkreises Ravensburg.* 2015a.

—. 2015b. *Energie- und Klimaschutzkonzept für den Bodenseekreis.* Friedrichshafen : s.n., 2015b.

Energieagentur Ravensburg gGmbH. 2015a. *Energie- und Klimaschutzkonzept des Landkreises Ravensburg.* Ravensburg : s.n., 2015a.

—. 2015. *Energie- und Klimaschutzkonzept für den Bodenseekreis.* Friedrichshafen : s.n., 2015.

Energiepark Hahnennest GmbH & Co. KG. 2016. CO2-Bilanz Silphie. (Herausgabe des Dokuments erfolgte auf Anfrage am 21. November 2016). *www.energiepark-hahnennest.de.* [Online] 2016. https://www.energiepark-hahnennest.de/.

EuPD Resaerch. 2008. *Factsheets zu Photovoltaik in den Bundesländern.* Bonn : s.n., 2008.

European Bioplastics. 2018. Bioplastic. Facts and figures. [Online] 2018. [Zitat vom: 19. September 2018.] https://docs.european-bioplastics.org/publications/EUBP_Facts_and_figures.pdf.

factfish GmbH. 2018. Tomatoes, yield (hectogram per hectare) - for all countries. *factfish.com.* [Online] 2018. [Zitat vom: 23. 03 2018.] http://www.factfish.com/statistic/tomatoes%2C%20yield.

FAO. 2019e. FAOSTAT: Data - Production - Livestock Primary. [Online] 2019e. [Zitat vom: 04. Juni 2019.] http://www.fao.org/faostat/en/#data/QL.

—. 2019c. FAOSTAT: Data - Produktion - Crops. [Online] 2019c. [Zitat vom: 04. Juni 2019.] http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC.

—. 2019b. Food Loss and Food Waste. [Online] 2019b. [Zitat vom: 01. Juni 2019.] http://www.fao.org/food-loss-and-food-waste/en/.

—. 2009. How to feed the world in 2050. [Online] 2009. [Zitat vom: 03. Juni 2019.] http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf.

—. 2019a. Key facts on food loss and waste you should know! [Online] 2019a. [Zitat vom: 01. Juni 2019.] http://www.fao.org/save-food/resources/keyfindings/en/.

—. 2018. Land & Water. Crop Information. Tomato. [Online] 2018. [Zitat vom: 11. 04 2018.] http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/tomato/en/.

FAO Statistics Division. 2008. FAO Methodology for the measurement of food deprivation - Updating the minimum dietary energy requirements. [Online] Oktober 2008. [Zitat vom: 11. Februar 2019.] http://www.fao.org/fileadmin/templates/ess/documents/food_security_statistics/metadata/undernourishment_methodology.pdf.

FAO. 2018b. *The State of the World's Forests 2018 - Forest pathways to sustainable development.* Rom : s.n., 2018b. S. 118.

—. 2014. *The State of World Fisheries and Aquaculture 2014.* Rome, 223 pp. : s.n., 2014. S. 223. E-ISBN 978-92-5-108276-8.

—. 2016. *The State of World Fisheries and Aquaculture 2016. Contributing to food security and nutrition for all.* Rome. 200 pp. : s.n., 2016. S. 200. ISBN 978-92-5-109185-2.

—. 2003. *World Agriculture: Towards 2015/2030.* [Hrsg.] Food and Agriculture Organization of the United Nations. London : s.n., 2003. S. 432.

—. 2018a. *World Food and Agriculture Statistical Pocketbook 2018.* [Hrsg.] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rom : s.n., 2018a.

FAO, Fishery Industries Division. 1986. *The production of fish meal and oil. .* [Hrsg.] FAO. Rom : FAO, 1986. Bde. FAO Fish. Tech. Pap., (142) Rev. 1: 63p. ISBN 92-5-102464-2.

Fddb. 2018. FDDB Kalorientabelle. [Online] 2018. https://fddb.info.

—. 2019. Käse: Produktgruppen und Top-Hersteller. [Online] 2019. [Zitat vom: 28.. Februar 2019.] https://fddb.info/db/de/produktgruppen/kaese/index.html.

Feldwisch, Norbert. 2011. Umweltgerechter Anbau von Energiepflanzen. Verbundprojekt „Umweltaspekte“. Vortragsfolien zur Projektpräsentation am 06.09.2011 im LfULG Dresden. [Online] 06.. September 2011.

Feller. 2011. Energieeinsatz in der Schweinehaltung - Strom und Wärme effizient einsetzen. [Online] 24. Januar 2011. [Zitat vom: 24. März 2019.] https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/download/ferkelerzeugung/2011-01-feller.pdf.

Ferchau, Erik, et al. 2009. Qualitätssicherung dezentraler Ölmühlen. Umsetzung eines Qualitätssicherungssystems bei der Produktion, Herstellung und Anwendung von Rapsölkraftstoff. [Hrsg.] Freistaat Sachsen. *Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.* 2009, Bd. 33/2009.

Ferme biologique du Bec Hellouin. o. J.. Les rapports scientifiques. [Online] o. J. [Zitat vom: 09. 03 2018.] https://www.fermedubec.com/la-recherche/les-rapports-scientifiques/.

FiBL. 2015. DOK-Versuch: Weltweit bedeutendster Langzeit-Feldversuch zum Vergleich biologischer und konventioneller Anbausysteme (Stand 25.11.2015). [Online] 2015. [Zitat vom: 04. Juni 2018.] https://www.fibl.org/index.php?id=2018.

—. 2011. *Merkblatt Biolupinen. Ausgabe Schweiz. Letzte Aktualisierung 09.10.2012.* [Hrsg.] Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL). Frick : s.n., 2011.

Fisch und Fischl GmbH. 2019a. Spritmonitor: Die sparsamsten Autos. [Online] 2019a. [Zitat vom: 23. August 2019.] https://www.spritmonitor.de/de/die_sparsamsten_autos.html.

Fisch und Fischl GmbH, 2019: . 2019. Spritmonitor.de. [Online] 2019. [Zitat vom: 14. Mai 2019.] www.spritmonitor.de.

Fischer, Claudia. 2003. *Geographie Infothek - Infoblatt Sojabohne.* s.l. : Klett, 2003.

Fisch-Informationszentrum e. V. 2019. *Fischwirtschaft - Daten und Fakten 2019.* Hamburg : s.n., 2019.

FIZ Karlsruhe. 2016. Weltweit erste industrielle Power-to-Gas-Anlage. *forschung-energiespeicher.info.* [Online] 06. 10 2016. [Zitat vom: 28. 03 2018.] http://forschung-energiespeicher.info/projektschau/gesamtliste/projekt-einzelansicht/95/Weltweit_erste_industrielle_Power_to_Gas_Anlage/.

Fleschhut, Monika. 2016. Körnermaisstroh als Biogassubstrat. [Hrsg.] Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). *Körnermaisstroh als Biogassubstrat - LfL Information.* Freising : s.n., 2016, S. 57.

Florapower GmbH & Co. KG. 2018. Hanföl. [Online] 2018. [Zitat vom: 09. Oktober 2018.] http://www.florapower.de/infothek/hanf/.

FNR. 2019. *Anbau und Verwendung nachwachsender Rohstoffe in Deutschland.* Gülzow-Prüzen : s.n., 2019. S. 78.

—. 2018b. Basisdaten biobasierte Produkte 2018. [Online] 2018b. [Zitat vom: 29. Mai 2018.] https://mediathek.fnr.de/broschuren/nachwachsende-rohstoffe/biowerkstoffe/basisdaten-biobasierte-produkte.html.

—. 2015b. *Basisdaten Bioenergie Deutschland 2015.* Gülzow-Prüzen : s.n., 2015b. S. 51.

—. 2018e. Bauen und Wohnen. Dämmstoffe - Materialien - Hanf. [Online] 2018e. [Zitat vom: 04. Juni 2018.] https://baustoffe.fnr.de/daemmstoffe/materialien/hanf/.

—. 2015a. *Bienenfreundliche Energiepflanzen.* [Hrsg.] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR). Gülzow : s.n., 2015a. S. 32.

—. 2010. *Biogas Basisdaten Deutschland Stand: Juni 2010.* [Hrsg.] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. Gülzow : s.n., 2010.

—. 2018c. Biokunststoffe - Verwertung/Recycling. [Online] 2018c. [Zitat vom: 26. September 2018.] https://biowerkstoffe.fnr.de/biokunststoffe/verwertung/.

—. 2017. Daten und Fakten. Faustzahlen. [Online] 2017. [Zitat vom: 04. Mai 2017.] https://biogas.fnr.de/daten-und-fakten/faustzahlen/.

—. 2013a. *Energiepflanzen für Biogasanlagen - Regionalbroschüre Baden-Württemberg.* [Hrsg.] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR). Gülzow : s.n., 2013a.

—. 2013a. *Energiepflanzen für Biogasanlagen - Regionalbroschüre Baden-Württemberg.* Gülzow-Prüzen : s.n., 2013a.

—. 2018d. Energiepflanzen. Algen. [Online] 2018d. [Zitat vom: 21. Februar 2018.] https://energiepflanzen.fnr.de/energiepflanzen/algen/.

—. 2016. Energiepflanzen. Miscanthus. [Online] 2016. [Zitat vom: 10. Oktober 2016.] http://energiepflanzen.fnr.de/energiepflanzen/miscanthus/.

—. 2019. Energiepflanzen: Topinambur. [Online] 2019. [Zitat vom: 15. Juni 2019.] https://pflanzen.fnr.de/energiepflanzen/pflanzen/topinambur/.

—. 2019. FAQ Bioenergie: Wie sieht die Ökobilanz von Strom, Wärme oder Kraftstoffen aus Biomasse aus? [Online] 2019. [Zitat vom: 08. Juli 2019.] https://bioenergie.fnr.de/bioenergie/faq-bioenergie/#c16900.

—. 2013. Fasernessel: Neue Klone mit gut 25 Prozent mehr Fasergehalt. Pressemitteilung, 2013-12-13. *www.fnr.de.* [Online] 13. Dezember 2013. [Zitat vom: 10. März 2017.]

—. 2014. *Markanalyse Nachwachsende Rohstoffe. Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe.* [Hrsg.] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR). Gülzow-Prüzen : s.n., 2014. Bd. 34.

—. 2017. *Marktübersicht: Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen.* [Hrsg.] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). Gülzow-Prüzen : s.n., 2017. S. 80.

—. 2015. *Marktübersicht: Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen.* [Hrsg.] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR). Gülzow-Prüzen : s.n., 2015.

—. 2018f. Nachwachsende Rohstoffe - Natürliche Alternativen. [Online] 2018f. [Zitat vom: 25. Oktober 2018.] https://mediathek.fnr.de/nachwachsende-rohstoffe-natuerliche-alternativen.html.

—. 2018a. Nachwachsende Rohstoffe in Zahlen. [Online] 2018a. [Zitat vom: 30. 05 2018.] https://mediathek.fnr.de/nachwachsende-rohstoffe-in-zahlen.html.

—. 2018f. Pflanzenöl: Herstellung. [Online] 2018f. [Zitat vom: 04. Oktober 2018.] https://biokraftstoffe.fnr.de/kraftstoffe/pflanzenoel/herstellung/.

Follett, Ronald, et al. 2012. Soil Carbon Sequestration by Switchgrass and No-Till Maize Grown for Bioenergy. *BioEnergy Research.* 2012, Bd. 5, S. 866-875.

Follmer, Robert, et al. Februar 2010. *Mobilität in Deutschland 2008. Kurzbericht Struktur – Aufkommen – Emissionen – Trends.* Bonn und Berlin : s.n., Februar 2010.

Forschungszentrum Jülich. 2016. Energiepflanze Sida hermaphrodita: Alternative zu Raps und Mais. [Online] 01. März 2016. [Zitat vom: 14. Juni 2019.] https://www.fz-juelich.de/portal/DE/Service/Impressum/impressum_node.html;jsessionid=6A89013DD747E30FCF7930184FB6EA1A.

Forst BW. 2018. ForstBW - Die unteren Forstbehörden. Faltblattsammlung. [Online] 2018. [Zitat vom: 17. Juli 2018.] http://www.forstbw.de/produkte-angebote/infothek/publikationen/forstbw-die-unteren-forstbehoerden/.

Forum Waschen. 2017. Faktenpapier zur Verwendung von Palm(kern)ölen in Wasch- , Pflege- und Reinigungsmitteln in Deutschland. [Online] 18. 09 2017. [Zitat vom: 01. Oktober 2018.] https://www.forum-waschen.de/files/content/Materialien/Faktenpapiere/2017_09_18_Faktenpapier_Palmkernoel.pdf.

Frank, Helmut, Schmid, Harald und Hülsbergen, Kurt-Jürgen. 2015. Energie- und Treibhausgasbilanz der Milchviehhaltung – Untersuchungen im Netzwerk der Pilotbetriebe. [Hrsg.] Kurt-Jürgen Hülsbergen und Gerold Rahmann. *Klimawirkungen und Nachhaltigkeit ökologischer und konventioneller Betriebssysteme – Untersuchungen in einem Netzwerk von Pilotbetrieben : Forschungsergebnisse 2013-2014. Thünen Report 29.* Braunschweig : Johann Heinrich von Thünen-Institut, 2015, S. 25-48.

Fraunhofer ISE. 2019. Solaranlagen in der Praxis: Hofgemeinschaft Heggelbach. [Online] 2019. [Zitat vom: 29. Mai 2019.] http://www.ise.solar-monitoring.de/year.php?page=yearsys&system=apvh&untersystem=0&date=2018-06-15&lang=de&jahr=2018.

—. 2017. Sonne ernten auf zwei Etagen – Agrophotovoltaik steigert die Landnutzungseffizienz um über 60 Prozent. [Online] 2017. [Zitat vom: 29. Mai 2019.] https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2017/sonne-ernten-auf-zwei-etagen-agrophotovoltaik-steigert-landnutzungseffizienz-um-ueber-60-prozent.html.

Fraunhofer ISE/Elsner, Universität Hohenheim. 2018. Effizienz der Landnutzung um über 60 % gesteigert. *Rheinische Bauernzeitung.* 2018, 2, S. 18-19.

Fraunhofer ISE/Elsner; Universität Hohenheim. 2018. Agrofotovoltaik: Effizienz der Landnutzung um über 60 % gesteigert. *RBZ.* 13. Januar 2018, Bd. 2, S. 18-19.

Fraunhofer IWES/BWE. 2011. *Potenzial der Windenergienutzung an Land Kurzfassung.* [Hrsg.] ndesverband WindEnergie e.V. Berlin : s.n., 2011.

Fraunhofer UMSICHT. o. J.. *inFARMING: Landwirtschaft auf dem Dach der Forschung. Presseinformation.* Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT . o. J.

—. 2015. *Jahresbericht für Eilige 2014.* Oberhausen : Fraunhofer-Institut UMSICHT, 2015. S. 19.

Fraunhofer WKI. 2015. *Forschung Kompakt 01 | 2015 || Thema 4. Karosserie aus Baumwolle, Hanf und Holz.* [Hrsg.] Fraunhofer-Institut für Holzforschung Wilhelm-Klauditz-Institut WKI. 2015. S. 14.

Freibauer, Annette, Röder, Norbert und Tiemeyer, Bärbel. 2012. *Ansätze für die Definition von Gebietskulissen für den GLÖZ-Standard 7: "Schutz von Feuchtgebieten und kohlenstoffreichen Böden einschließlich eines Erstumbruchverbots".* Institut für Agrarrelevante Klimaforschung, Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI). Braunschweig : s.n., 2012. S. 15.

FSC Schweiz. 2018. Der Anteil von FSC in der globalen Holzproduktion. [Online] 2018. [Zitat vom: 16.. April 2020.] https://ch.fsc.org/de-ch/homepage/neuigkeiten/id/203.

Fuhrhop, Daniel. 2015. *Verbietet das Bauen! Eine Streitschrift.* München : oekom Verlag, 2015. S. 189.

Galitsky, Christina, Worrell, Ernst und Ruth , Michael. 2003. *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Corn Wet Milling Industry. An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers.* Environmental Energy Technologies Division, Lawrence Berkeley National Laboratory. Berkeley, CA 94720 : s.n., 2003. S. 83.

Ganz, Jonas . 2017a. *AW: Brennnesselfasern. Auskunft per E-Mail am 15. März 2017.* [Hrsg.] Mattes & Ammann GmbH & Co. KG. 2017a.

Ganz, Jonas. 2017b. AW: Brennnesselfasern. Auskunft per E-Mail am 17. März 2017. [Online] 2017b.

GBI-Genios. 2019. factfish: Geographie und Landwirtschaft - Ernte - Getreide, gesamt, Produktionsmenge (Tonnen) - für alle Länder. [Online] 2019. [Zitat vom: 05. Juni 2019.] http://www.factfish.com/de/katalog/ernte.

GD Holz. 2018. Welche Holzfeuchte am Verwendungsort. [Online] 2018. [Zitat vom: 30,. April 2018.] https://www.gdholz.net/fachwissen-holz/holzfeuchte-verwendungsort.html.

—. 2018a. Wildapfel/Apfelbaum – Beschreibung und Merkmale. [Online] 2018a. [Zitat vom: 09. Januar 2019.] https://www.holzvomfach.de/fachwissen-holz/holz-abc/wildapfel-apfelbaum/.

Gebel, Micha, et al. 2011. *Nachwachsende Rohstoffe: Wirkungen auf Wasserhaushalt und Gewässerschutz.* [Hrsg.] LfULG Sachsen. Dresden : s.n., 2011. S. 72. Bd. Schriftenreihe Heft 43/2011.

Geiger, Thomas. 2010. Soja und Oliven: So viel Bio steckt im Auto. [Online] 14. Dezember 2010. [Zitat vom: 30. Mai 2018.] https://www.tz.de/auto/soja-oliven-viel-steckt-auto-1046870.html.

Geißendörfer, Herbert. 2012. Energiepflanzen – Gibt es einen Weg aus den Mais- und Rapsmonokulturen? Vortrag vom 04. Dezember 2012, 7. Master Class Course Confernece „Renewable Energies“. Vortragsfolien. [Online] 04. Dezember 2012. [Zitat vom: 17. Juni 2019.] https://www.hnee.de/_obj/4ABA3CE2-D5D3-455C-B9AB-6A94FFC7DB5B/outline/VortragGeissendoerfer.pdf.

Gemüsebau Steiner GmbH & Co KG. 2017. *AW: Klimaneutrale Energieversorgung. Auskunft per E-Mail.* 17. 03 2017.

—. 2017a. Service & Info. [Online] 2017a. [Zitat vom: 07. 03 2017.] https://www.gemuesebau-steiner.de/service-info/faq/.

Genius GmbH. 2012. Kartoffelverarbeitung - Chips, Fritten, Stärke: Das Ende der traditionellen Speisekartoffel. [Online] 2012. [Zitat vom: 21. September 2018.] http://www.pflanzenforschung.de/biosicherheit/basisinfo/261.chips-fritten-staerke-traditionellen-speisekartoffel.html.

Gerbaulet. 2017. Rapspellets. [Online] 2017. [Zitat vom: 16. 01 2017.] http://www.rapspellets.de/index.php?article_id=8.

Gesamtverband Leinen. o. J.. Vom Flachsstroh zur Faser. [Online] o. J. [Zitat vom: 08. März 2017.] http://www.gesamtverband-leinen.de/home/index,id,51.html.

—. 2018. Vom Flachsstroh zur Faser . [Hrsg.] Gesamtverband Leinen e.V. 2018.

Gesamtverband textil+mode. 2017. Mit jeder Faser intelligent - Die deutsche Textil- und Modeindustrie in Zahlen 2017. [Online] 2017. [Zitat vom: 30. Juni 2018.] http://www.textil-bekleidung.de/uploads/media/zahlen2017_web.pdf.

GFEL Szarvas. o. J.. Verwendung des Energiegrases Szarvasi 1 aus energetischen Zwecken. [Online] o. J. [Zitat vom: 17. Juni 2019.] http://www.energiafu.hu/energia_de.html.

Giganteus. 2010. Heizen mit Miscanthus. [Online] 2010. [Zitat vom: 15. Juni 2019.] http://www.miscanthus-giganteus.at/termischeverwertung.htm.

Gisler, P., Graber, A. und Stucki, M. 2014. *Life Cycle Assessment of Urban Farming Production in Aquaponic. Poster presentation. The 5th International Zero Emission Building Symposium. Zero Emission Building - Integration Systainable Technologies and Infrastructure Systems. 21st - 22nd August 201.* ZHAW Campus Grüental, Wädenswil : s.n., 2014.

Gisler, Peter. 2018. *LCA-Studie zur Aquaponik. Auskunft per E-Mail am 05.04.2018.* 2018.

—. 2013. *Ökobilanz von Urban Farming Produktion in Aquaponic.* [PDF] [Hrsg.] ZHAW. Winterthur, Schweiz : s.n., 2013.

Gladysz, Christian, et al. 2014. *Sojabohnen erfolgreich anbauen.* [Hrsg.] I.G. Pflanzenzucht GmbH. München : s.n., 2014.

Größwein, Sebastian. 2018a. *AW: Ökologisch nachhaltige Holzentnahme und Ertragspotenziale. Information per E-Mail am 18.06.2018.* Freising : Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising, 2018a.

Graf, T., Biertümpfel, A. und Rudel, H. 2010. Hinweise zum Hanfanbau unter Thüringer Standortbedingungen. [Online] 2010. [Zitat vom: 10. März 2017.] http://www.tll.de/www/daten/pflanzenproduktion/nawaro/faserpflanzen/hanf0310.pdf.

Graf, Torsten , et al. 2005. *Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Öllein.* [Hrsg.] Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Jena : s.n., 2005.

Graf, Torsten, et al. 2005. *Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Faserhanf.* [Hrsg.] Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL). Jena : s.n., 2005.

Graf, Torsten, et al. 2005. *Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Öllein.* [Hrsg.] Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Jena : s.n., 2005.

Gräfe, E. 2010. *Betriebswirtschaftliche Richtwerte der Milchproduktion auf Grünlandstandorten mit Färsenzukauf.* [Hrsg.] Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Jena : s.n., 2010. S. 17.

—. 2013. *Betriebswirtschaftliche Richtwerte der Mutterkuhhaltung.* [Hrsg.] Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Jena : s.n., 2013.

Green City Energy AG & KlimaKom eG. 2013. *Integriertes Klimaschutzkonzept Große Kreisstadt Kirchheim unter Teck.* 2013.

Green City Growers. 2016. Fenway Farms. [Online] 2016. [Zitat vom: 09. 04 2018.] https://greencitygrowers.com/fenway-farms/.

Greenpeace. 2017. Konsumkollaps durch Fast Fashion. [Online] 2017. [Zitat vom: 29. Juni 2018.] https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/s01951_greenpeace_report_konsumkollaps_fast_fashion.pdf.

—. 2015. Wegwerfware Kleidung. Repräsentative Greenpeace-Umfrage zu Kaufverhalten, Tragedauer und der Entsorgung von Mode. [Online] 2015. [Zitat vom: 29. Juni 2018.] https://www.greenpeace.de/files/publications/20151123_greenpeace_modekonsum_flyer.pdf.

Griehl, Carola, Bieler, Simone und Posten, Clemens. 2012. Konzentrierte grüne Energie. Kraftstoffe aus Algen. [Hrsg.] Thomas Bührke und Roland Wengenmayr. *Erneuerbare Energie. Konzepte für die Energiewende.* Weinheim : WILEY-VCH Verlag GmbH,, 2012, Bd. 3. Auflage, S. 176.

Grigoriou, Athanasios und Passialis, C. 1994. Verwendung von Astholz der Obstbaumplantagen für die Herstellung von Spanplatten. *European Journal of Wood and Wood Products. Holz als Roh- und Werkstoff.* 1994, Bd. 52, S. 126–130.

Grocholl, Jürgen. 2018. Ohne Feldberegnung – Anpassungsmöglichkeiten an zunehmende Trockenheit im Ackerbau auf Geeststandorten. Vortragsfolien zur Tagung im Projekt Netzwerke Wasser Hannover, 14. November 2018. [Online] 14.. November 2018. [Zitat vom: 05. Juli 2019.] https://m.lwk-niedersachsen.de/?file=30994.

Groneweg, Merle und Weis, Laura. 2018. *Weniger Autos, mehr globale Gerechtigkeit Diesel, Benzin, Elektro: Die Antriebstechnik allein macht noch keine Verkehrswende.* Berlin : PowerShift e. V., 2018.

Grosser, Dietger. 2007. Das Holz der Kiefer - Eigenschaften und Verwendung. [Hrsg.] Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft LWF. *LWF Wissen 57. Beiträge zur Waldkiefer.* Freising : s.n., 2007, Bd. 57, S. 88.

Gruber, Harriet und Vogt-Kaute, Werner. 2007. Anbaubedeutung und Ökonomie von Ölsaaten im ökologischen Landbau. [Hrsg.] Hans Marten Paulsen und Martin Schochow. *Anbau von Mischkulturen mit Ölpflanzen zur Verbesserung der Flächenproduktivität im ökologischen Landbau.* 2007, S. 133.

Gruber, Sabine. 2018. *Re: Anbauversuch Linsen mit Hafer als Stützfrucht. Auskunft per E-Mail am 07.12.2018.* 2018.

Gruner + Jahr GmbH. 2020. Gewichte und Masseinheiten. [Online] 2020. [Zitat vom: 16.. November 2020.] https://www.chefkoch.de/magazin/artikel/500,0/Chefkoch/Ratgeber-Gewichte-und-Masseinheiten.html.

Guido, Reinhardt. 2013. *Klimafreundlichkeit von regionalen Produkten und Bio-Erzeugnissen auf dem Prüfstand. Vortragsfolien. Tagung „Klimafaktor Landwirtschaft – Wege zu einer klimafreundlicheren Ernährung“.* [PDF] [Hrsg.] IFEU. Bad Vilbel : IFEU Heidelberg, 06. 06 2013.

Gustavsson, Jenny, et al. 2011. *Global Food Losses and Food Waste.* [Hrsg.] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome : s.n., 2011. S. 29.

Haerlin, Benedikt. 2011. Genug statt mehr. *Le Monde diplomatique .* 09. Dezember 2011.

Hagemann, Eric. o. J.. Biomassenproduktion. Biomasse aus Paulownia. *paulownia.de.* [Online] Baumschule Hagemann, o. J. [Zitat vom: 26. Juli 2017.] http://www.paulownia.de/biomassenproduktion.html.

Haller, Julia und Fritz, Maendy. 2015. *TFZWissen #3: Bioenergie-Dauerkulturen.* [Hrsg.] Technologie- und Förderzentrum (TFZ). Straubing : s.n., 2015. S. 57.

Hammerl, Remigius, et al. 2012. Altholz. [Hrsg.] Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. *LWF Wissen 70 - Energieholzmarkt Bayern 2010.* 2012, S. 37-40.

Handler, Franz und Blumauer, Emil. 2011. *Miscanthus - Vom Feld bis zum Ofen - Abschlussbericht. Teil 1: Ernte von Miscanthus.* Wieselburg : s.n., 2011. S. 63.

HANFFASER Uckermark eG. o. J.. Landwirtschaft. Hanfanbau. [Online] o. J. [Zitat vom: 23. August 2018.] https://www.hanffaser.de/hanf/Allg_Landwirtschaft.php.

Hanf-Natur. 2018. Bio Hanfsamen. [Online] 2018. [Zitat vom: 11. Oktober 2018.] https://www.hanf-natur.com/page/shop/flypage/product_id/381.

Hansa Melasse. 2017. Die Herkunft der Melasse. [Online] 2017. http://www.melasse.de/index.php?id=melasse.

Hartmann, Anja. 2018. Erfahrungen und mehrjährige Ertragsergebnisse aus Feld-versuchen mit Switchgras. TFZ-Merkblatt 18PHm006. [Online] September 2018. [Zitat vom: 08. Juni 2019.] http://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/rohstoffpflanzen/dateien/18phm_006_mb_switchgras.pdf .

Hartmann, Anja und Haller, Julia. 2014. Silphie und Co als Biogassubstrat - Erste Ergebnisse aus dem Dauerkulturanbau. TFZ-Merkblatt 14PHm004. Stand August 2014. [Online] 2014.

Hartmann, Annette, Heimler, Franz und Fritz, Maendy. 2012. *TFZ-KOMPAKT 6: Leindotter.* [Hrsg.] Technologie- und Förderzentrum (TFZ). Straubing : s.n., 2012. S. 15.

Harz, Marika und Mühlen, Werner. 2019. die Honigmacher: Bienenweide, Herbarium. [Online] 2019. [Zitat vom: 18. Juni 2019.] https://www.die-honigmacher.de/kurs2/herbar.html.

Häusler, Johann. 2016. Otimierung in der Mutterkuhhaltung und Rindermast - Erhöhung der Flächeneffizienz. Präsentationsfolien zum Vortrag beim Landestag der Mutterkuhhaltung in Linz, 08.01.2016. [Online] 2016. [Zitat vom: 04. Februar 2019.] https://www.raumberg-gumpenstein.at/cm4/de/forschung/publikationen/downloadsveranstaltungen/finish/1595-2331-extensive-mutterkuhhaltung/28575-optimierung-in-der-mutterkuhhaltung-und-rindermast-flaecheneffizienz.html.

Häußler, Franz. 2017. *Viehhaltung und Hektarerträge. Auskunft per Telefonat.* [Befragte Person] S. Simon. 17. Januar 2017.

Hedinn. 2018. The HPP Process. Advantages of the HPP Process. *hedinn.com.* [Online] Hedinn Mechanical Engineering, Iceland, 2018. [Zitat vom: 22. 03 2018.] https://hedinn.com/fishmeal-processing/the-hpp-process/.

HeidelbergCement AG. 2013. Neue Zemente BCT-Technologie - ein alternatives Binderkonzept. [Online] 26. 03 2013. [Zitat vom: 25. Mai 2018.] https://www.heidelbergcement.com/de/node/990.

Hennig, Petra und Seintsch, Björn. 2015. Die Produktionsfunktion der Wälder. Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. Vortragsfolien. 67. DFV-Tagung am 18.06.2015. [Online] 2015. [Zitat vom: 23. 05 2018.] https://www.forstverein.de/fileadmin/pdf/Flensburg_15/1_3_Hennig_Seintsch_Seminar1_3.pdf.

Hermetia Futtermittel GbR. o. J.. *Endbericht zum Forschungsvorhaben. „Entwicklung eines Verfahrens zur industriellen Produktion von Präpuppen der Fliege Hermetia illucens zur Futterproteinproduktion.".* Baruth : Hermetia Futtermittel GbR, o. J. Gefördert durch das Ministerium für Wirtschaft des Landes Brandenburg und die EU.

HessenForst. 2018. Holz. Rohstoff und wichtiger Beitrag zum Klimaschutz. [Online] 2018. [Zitat vom: 09,. Juli 2018.] https://www.hessen-forst.de/holz-jagd-holz-stammholz-2268.html.

Heuer, Thorsten. 2018b. *Fleischverzehr: Abweichende Daten. Auskunft per E-Mail am 12.11.2018.* [Hrsg.] Max Rubner-Institut. 2018b.

—. 2018a. Zuckerkonsum in Deutschland. *Aktuelle Ernahrungsmedizin.* 2018a, Bd. 43(S 01), S. 8-11.

Hill, Jason, et al. 2006. Environmental, Economic, and Energetic Costs, and Benefits of Biodiesel and Ethanol Biofuels. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.* 2006, Bd. 103, S. 11206 –11210.

Hiller, Peter. 2018. Auf die Mischung kommt es an - Eigenmischungen für Geflügel glasklar formuliert. [Online] 03. Mai 2018. [Zitat vom: 12. Juni 2018.] https://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/1/nav/229/article/25369.html.

Hock GmbH. o. J.. *Thermo Hanf. Produktbroschüre.* o. J.

Hof, Christian, et al. 2018. Bioenergy cropland expansion may offset positive effects of climate change mitigation for global vertebrate diversity. *PNAS Proceedings of the National Academy of Sciences.* 26. Dezember 2018, Bd. 115, 52, S. 13294–13299.

Hof, Christian, et al. 2018. Bioenergy cropland expansion may offset positive effects of climate change mitigation for global vertebrate diversity. *PNAS.* Dezember 2018, Bd. 115, S. 13294–13299.

Hofhansel, Armin. 2007. Auswirkungen des Klimawandels auf die Bewirtschaftung von Sandböden in MV. [Online] 2007. [Zitat vom: 12. April 2017.] https://www.landwirtschaft-mv.de.

Hölscher, T., et al. 2007. Energieproduktion aus landwirtschaftlicher Biomasse am Oberrhein – Auswirkungen für Landwirtschaft und Umwelt. [Online] 2007.

Holzforschung München. 2010. *Bauen mit Holz = aktiver Klimaschutz.* [Hrsg.] Technische Universität München. München : s.n., 2010.

Horn Druck & Verlag. 2012-2015. Lebensmittellexikon - Weizenkeime. [Online] 2012-2015. [Zitat vom: 22. Oktober 2018.] https://my-slimcoach.de/lebensmittellexikon/Weizenkeime.

HUMANA. 2011. Kleidung für alle - im Jahr Rio+20 (2. Auflage, Februar 2012). [Online] 2. Auflage, 2011. [Zitat vom: 29. Juni 2018.] http://www.humana-second-hand.de/mode/downloads/HUMANA-kleidung-fuer-alle.pdf.

Hundt, Bärbel. 2010. *Energie- und Klimaeffizienz von Biogasanlagen mit Biogasaufbereitung und -einspeisung unter Nutzung von Silomais - Untersuchungen am Beispiel der Biogasanlage der HSE AG in Darmstadt-Wixhausen.* Gießen : s.n., 2010. S. 186.

Hybrimin. 2012. Rationsberechnung für Milchkühe. [Online] 2012. [Zitat vom: 15. März 2019.] http://www.futterberechnung.de/futterberechnung_kuh/deutsch/Index.html.

Hydro Agri Dülmen GmbH. 1993. *Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau.* Münster-Hiltrup : Landwirtschaftsverlag, 1993.

Idel, Anita. 2012. Die Kuh ist kein Klima-Killer! Vortragsfolien zur Tagung Nachhaltige Lebensstile - Fleischkonsum, Klima, Gerechtigkeit BfN / INAVilm Umweltethik EMA Universität Greifswald 15.-18. Oktober 2012. [Online] 2012. [Zitat vom: 15. Januar 2019.] https://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/ina/vortraege/2012/2012-Lebensstile-Idel.pdf.

IfBB Hannover. 2017. Facts and Statistics. Biopolymer output per ha (different feedstocks). Vergleichende Diagramme. [Online] 2017. [Zitat vom: 30. März 2017.] www.downloads.ifbb-hannover.de.

IFEU Heidelberg. 2019. *Integriertes Klimaschutzkonzept für den Landkreis Esslingen. Endbericht – Band I.* Heidelberg : s.n., 2019.

IFEU. 2019. *Integriertes Klimaschutzkonzept für den Landkreis Esslingen. Endbericht – Band I.* Heidelberg : s.n., 2019.

IG Dinkel. 2014. Anbauempfehlungen für Dinkel: Dinkel richtig angebaut – Ihr Erfolg! *UFA-Revue.* 2014, 09-2014, S. 43-46.

IG Pflanzenzucht GmbH. 2014. Soja erfolgreich anbauen. Ismaning : s.n., 2014, S. 35.

Institut für Ernährungsinformation. 2019a. DEBInet: Magermilchpulver. [Online] 2019a. [Zitat vom: 21. Februar 2019.] http://www.ernaehrung.de/lebensmittel/de/M884000/Magermilchpulver.php.

—. 2019b. DEBInet: Molkenpulver. [Online] 2019b. [Zitat vom: 21. Februar 2019.] http://www.ernaehrung.de/lebensmittel/de/M887000/Molkenpulver.php.

International Nut and Dried Fruit Council. 2013. *Global Statistical Review 2008-2013.* Reus : s.n., 2013.

—. 2018. *Statistical Yearbook 2017-2018.* Reus : s.n., 2018.

Ion, V., et al. 2011. Melliferous Characteristics of Sunflower with Importance for Pastoral Beekeeping. *Economics, Management, and Financial Markets 1.* 2011, S. 1167-1174.

IPCC. 2014. *Climate Change 2014, Synthesis Report, Summary for Policymakers.* 2014. S. 31.

—. 2006. *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Chapter 4: Forest Land.* 2006.

Iqbal, T. 2007. Energy input and output for production of Boro rice in Bangladesh. *Electronic Journal of Environmnetal, Agricultural and Food Chemistry.* 2007, Bd. 7, S. 2717–2722.

Isopp, Anne. 2012. "Die eigentliche Baumwolle machen ja wir.". *Zuschnitt. Zeitschrift über Holz als Werkstoff und Werke in Holz .* Dezember 2012, Bd. 48, S. 12-15.

Isselstein, J. und Michaelis, T. 2015. *Fachforum Grünland: Grünland innovativ nutzen und Ressourcen schützen. Forschungsstrategie der Deutschen Agrarforschungsallianz.* [Hrsg.] Deutschen Agrarforschungsallianz (dafa). Braunschweig : s.n., 2015.

IT NRW. 2015. *Bodenflächen in Nordrhein-Westfalen nach Art der tatsächlichen Nutzung, Ausgabe 2015.* [Hrsg.] Information und Technik Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf : s.n., 2015. S. 67.

IVA. 2014. Haselnussanbau: Erfolg mit Wissen, Erfahrung und Mechanisierung - Eine lohnende pflanzenbauliche und wirtschaftliche Alternative. [Online] 2014. [Zitat vom: 13. Dezember 2018.] https://www.iva.de/iva-magazin/umwelt-verbraucher/haselnussanbau-erfolg-mit-wissen-erfahrung-und-mechanisierung.

IWR. 2019. Agro-PV sorgt im Hitzesommer 2018 für verbesserte Erntebilanz. [Online] 2019. [Zitat vom: 29. Mai 2019.] https://www.solarbranche.de/news/nachrichten/artikel-35964-agro-pv-sorgt-im-hitzesommer-2018-fr-verbesserte-erntebilanz.

—. 2015. Power-to-Gas-Anlage übertrifft erwarteten Wirkungsgrad. *IWR Online.* [Online] Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien (IWR) / IWR.de GmbH, 12. 02 2015. [Zitat vom: 21. 03 2018.] http://www.iwr.de/news.php?id=28186.

Jablonowski, Nicolai David, et al. 2017. Valorization of Sida (Sida hermaphrodita) biomass for multiple energy purposes. *GCB Bioenergy: Special Issue: Perennial biomass crops for a resource constrained world.* 2017, Bd. 9, 1, S. 202–214.

Jedicke, Eckhard, Metzner, Jürgen und Unseld, Liselotte. 2012. *Extensiv beweiden Zukunftsfähiger Naturschutz auf Weide- Grünland in der EU, Bund und Ländern.* [Hrsg.] Deutscher Verband für Landschaftspflege e.V. 2012.

Jung, Susanne, et al. 2019. Lebenmittel-Warenkunde: Trockenmilchpulver aus Magermilch. [Online] 2019. [Zitat vom: 20. Februar 2019.] https://lebensmittel-warenkunde.de/lebensmittel/milch-milchprodukte/milchprodukte/trockenmilchpulver-aus-magermilch.html.

Jürgens, K., Poppinga, O. und Sperling, U. 2016. *Wirtschaftlichkeit einer Milchviehfütterung ohne bzw. mit wenig Kraftfutter - Langfassung.* [Hrsg.] O. Poppinga, K. Jürgens und U. Sperling. 2016. S. 86.

Jüttemann, Patrick. 2019. Wieviel Strom wird eine Kleinwindkraftanlage gegebener Leistung erzeugen? [Online] 2019. [Zitat vom: 15. Mai 2019.] https://www.klein-windkraftanlagen.com/impressum/.

Kain, Günther. 2013. *Dämmstoffe aus Baumrinden: Stoffliche Rindennutzung in Form von Dämmstoffen.* s.l. : AV Akademikerverlag,, 2013. S. 164.

Kain, Günther, et al. 2012. Stoffliche Rindennutzung in Form von Dämmstoffen. [Hrsg.] Steffen Tobisch und André Wagenführ. *holztechnologie.* 2012, Bd. 53 (2012) 4, S. 31-37.

Kaltschmitt, Martin und Streicher, Wolfgang. 2009. *Regenerative Energien in Österreich. Grundlagen, Systemtechnik, Umweltaspekte, Kostenanalysen, Potenziale, Nutzung.* Wiesbaden : Vieweg+Teubner, 2009. S. 652.

Kanton Basel-Stadt. 2017. Statistisches Jahrbuch des Kantons Basel-Stadt. Bodennutzung nach Gemeinde und Nutzungsart. [Online] 12.. Juli 2017. [Zitat vom: 02.. Februar 2018.] www.bs.ch.

Karg, Georg, Wagner, Kornelius und Gedrich, Kurt. 2008. *Lebensmittelkosten im Rahmen einer vollwertigen Ernährung.* [Hrsg.] Deutschen Gesellschaft für Ernährung e. V. 2008. S. 19.

Karwendel-Werke Huber GmbH & Co. KG. 2019. Unser höchstes Gut: Der Rohstoff Milch. [Online] 2019. [Zitat vom: 28. Februar 2019.] https://www.karwendel.de/herstellung/rohstoff-milch/?L=642.

Kästner, Bernd. 2016. Langmast von Hähnchen im Freiland. [Online] 01. März 2016. [Zitat vom: 30. März 2019.] http://www.tll.de/www/daten/nutztierhaltung/gefluegel/mast0216.pdf.

Kaufmann Bausysteme. 2016. *Modulbau 2016. Broschüre.* Reuthe, Österreich : Kaufmann Bausysteme GmbH, 2016.

Kaufmann Zimmerei und Tischlerei GmbH. 2018. Sozialzentrum Antoniushaus, Feldkirch. Auskunft per E-Mail am 15.05.2018. [Online] 2018. [Zitat vom: 08. 05 2018.] https://www.kaufmannzimmerei.at/projekt/sozialzentrum-antoniushaus-feldkirch.

Kay, Sonja, et al. 2019. Agroforestry creates carbon sinks whilst enhancing the environment in agricultural landscapes in Europe. *Land Use Policy.* 2019, Bd. 83, S. 581-593.

KEA. 2016. CO2-Emissionsfaktoren. [Online] 2016. [Zitat vom: 08. Juli 2019.] https://www.kea-bw.de/service/emissionsfaktoren/.

KEA-BW Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg. 2020. *Landkreis Konstanz: LUBW Kleinfeuer.* Karlsruhe : s.n., April 2020.

Kempkes, Frank und Janse, Jan. 2016. 2SaveEnergy-Gewächshaus - Produktion und Energieverbrauch. Bericht GTB-1404. [Online] 2016.

Kennzahlen Zellstoff- und Papierfabriken in Deutschland. **Verband Deutscher Papierfabriken e.V. 2017.** 2017.

Kern, Reinhard. 2006. *Bedeutung und Wirtschaftlichkeit des Streuobstbaus in Österreich.* Wien : s.n., 2006. S. 102.

Kersten, Mathias. 2012. *Power to Gas. Aktueller Begriff Nr. 10/12 (16. Mai 2012) aktualisierte Fassung vom 11. Dezember 2012.* WD 8, Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, Bildung und Forschung, Wissenschaftliche Dienste. Berlin : Deutscher Bundestag, 2012.

Keuter, Volkmar. 2017. *AW: InFarming. Auskunft per E-Mail am 14.02.2017.* 14. 02 2017.

Kindermann, Georg. 2014. Waldbewirtschaftung nachhaltig und dennoch suboptimal? [Online] 16. 10 2014. [Zitat vom: 16. 10 2016.] https://www.waldwissen.net/wald/klima/wandel_co2/bfw_kohlenstoffkreislauf/index_DE.

Kircher, Jürgen. 2017. Die Fichte im Wald der Stadt Augsburg. [Hrsg.] Bayerische Landesanstalt Bezugsadresse für Wald und Forstwirtschaft (LWF). *LWF Wissen. Berichte der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft.* 2017, Bd. 80, S. 73-80.

KIT. 2009. Presseinformation 073/2009. "Grüne“ Energie aus Algen. [Online] 10. 07 2009. [Zitat vom: 04. Oktober 2018.] https://www.kit.edu/kit/pi_2009_332.php.

Klimazwei. 2017. Steckbriefe Energiepflanzen. [Online] 2017. [Zitat vom: 10. April 2017.] http://www.klimafolgenmanagement.de.

Kloas, Werner. 2017. *RE: Futtermittel für Tilapia. E-Mail vom 29.10.2017.* [E-Mail] 29. 10 2017. Information per E-Mail.

Klock, Thorsten. 2019. Nussbaumschule Klocks: Veredelte Haselnussbaum-Sorten. [Online] 2019. [Zitat vom: 21. Juni 2019.] https://www.walnuss24.de/haselnussbaum/haselnussbaum-sorten.

Knoblauch, Steffi, et al. 2009. *Treibhausgas-Emissionen in der Landwirtschaft und Potenziale ihrer Minderung in Thüringen.* [Hrsg.] T Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Jena : s.n., 2009.

Köhl, Michael und Plugge, Daniel. 2016. Forstwirtschaftlich produzierte Biomasse. [Hrsg.] Martin Kaltschmitt, Hans Hartmann und Hermann Hofbauer. *Energie aus Biomasse.* Hamburg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg,, 2016, S. 125-166.

Kolb, Bernhard. 2004. *Nachhaltiges Bauen in der Praxis.* München : Blok Verlag, 2004. S. 256.

Kolbe, Hartmut. 2016. Boden. Humus 3: Möglichkeiten zur Einschätzung der Humusversorgung. [Online] 08.. Juli 2016. [Zitat vom: 04. Juli 2019.] https://www.bmel.de/DE/Landwirtschaft/Pflanzenbau/Boden/_Texte/Boden.html?docId=8072150.

—. 1995. Einflussfaktoren auf Ertrag und Inhaltsstoffe der Kartoffel. [Hrsg.] Landesamt für Umwelt Landwirtschaft und Geologie Sachsen. *Kartoffelbau.* 1995, Bd. Nr. 10/1995, S. 404-411.

Kolbe, Hartmut und Wellenberg, Katja. 2002. Anbauvergleich zwischen Winter- und Sommerweizen, Dinkel und Durum im ökologischen Landbau. *SÖL-Berater-Rundbrief 2/02.* 2002, S. 13-19.

Kolbe, Hartmut, et al. 2012. Kartoffeln im Ökolandbau. Informationen für Praxis und Beratung. [Online] 2012. [Zitat vom: 14. September 2018.] http://orgprints.org/15102/16/OekoKartoffeln_Broschuere12.pdf.

Kölling, Christian. 2008. Die Douglasie im Klimawandel - Gegenwärtige und zukünftige Anbaubedingungen in Bayern. [Hrsg.] Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. *LWF-Wissen 59: Die Douglasie - Perspektiven im Klimawandel.* Freising : s.n., 2008, S. 12-21.

Kölln. 2018. Haferkleie und Weizenkleie: Welcher Unterschied besteht zwischen Haferkleie und Weizenkleie? [Online] 2018. [Zitat vom: 22. Oktober 2018.] https://www.koelln.de/ernaehrungsberatung/cholesterin/haferkleie-und-weizenkleie/.

Kommer, Anne und Rau, Jörg. 2013. Molkenmischerzeugnis – eine Alternative zu Cola, Energy-Drinks und Co.? Ein Bericht aus unserem Laboralltag. [Online] 23. Mai 2013. [Zitat vom: 20. Februar 2019.] http://www.cvuas.de/pub/beitrag_printversion.asp?subid=1&Thema_ID=2&ID=1722&Pdf=No&lang=DE.

Kompetenzzentrum Energiewende Region Konstanz. 2017. *Monitor Energiewende 2017 - Region Konstanz.* Konstanz : s.n., 2017.

König, Klaus W. . 2017. Wärme aus dem Acker: Agrothermie und Kaltwärmenetz. *Transforming Cities.* 2017, Bd. 2|2017, S. 58-63.

Konradin Medien GmbH. 2008. Siebengeschossiges Wohnhaus als Holzkonstruktion. Sieben aus Holz. db deutsche bauzeitung 06|2008. *www.db-bauzeitung.de.* [Online] 2008. [Zitat vom: 19. 10 2016.] http://www.db-bauzeitung.de/db-themen/db-archiv/sieben-aus-holz/.

Kopf-Bolanz, Katrin, et al. 2015. Molke – auf den Teller statt in den Trog. *foodaktuell.ch - Fachpublikationen für die Lebensmittelwirtschaft.* [Online] 18. August 2015. [Zitat vom: 20. Februar 2019.] https://www.foodaktuell.ch/molke-auf-den-teller-statt-in-den-trog/.

Körber, Klaus. 2008. Gärtnerische Aspekte zur Walnuss. [Hrsg.] Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF). *LWF Wissen 60: Beiträge zur Walnuss.* 2008, S. 16-25.

Kötter, Engelbert, Walldürn-Rippberg und Planer, Jörg. o. J.. Spargel: Erzeugung. Wie wird Spargel angebaut? [Online] o. J. [Zitat vom: 11. Januar 2019.] https://www.bzfe.de/inhalt/spargel-erzeugung-5862.html.

Kraft, Gregor. 2017. *Pelleterung von Rapsstroh und Miscanthus. Auskunft per E-Mail am 06. April 2017.* [Hrsg.] BauerPower UG. 2017.

Kraftfahrt-Bundesamt. 2017a. *Fahrzeugzulassungen (FZ) Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Zulassungsbezirken 1. Januar 2017.* Flensburg : s.n., 2017a.

—. 2017. *Fahrzeugzulassungen (FZ): Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Zulassungsbezirken 1. Januar 2017.* Flensburg : s.n., 2017.

—. 2019. Neuzulassungen im Jahr 2017 nach Zulassungsbezirken. [Online] 2019. [Zitat vom: 19. August 2019.] https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Zulassungsbezirke/zulassungsbezirke_uebersicht.html.

Kramerbräu Saaten und Öle GmbH. 2018. Produkte: Leinsaatpresskuchen. [Online] 2018. [Zitat vom: 09. Oktober 2018.] http://kramerbraeu.de/produkte-2/presskuchen/lein-presskuchen/.

Kranert, M., et al. 2012. *Ermittlung der weggeworfenen Lebensmittelmengen und Vorschläge zur Verminderung der Wegwerfrate bei Lebensmitteln in Deutschland.* [Hrsg.] Universität Stuttgart ISWA. Stuttgart : s.n., 2012. S. 453.

Krapmeier, Helmut. 2014. *Wie viel Wald braucht ein Haus.* [Hrsg.] Energieinstitut Vorarlberg. Dornbirn, Österreich : s.n., 2014.

Krentz, Ariane. 2012. Wohnsituation in Baden-Württemberg. Ergebnisse der Mikrozensus-Zusatzerhebung 2010. *Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg 6/2012.* 2012, S. 11-17.

KTBL. 2019b. Arbeitsvorgang: Hackschnitzeltransport vom Feld zum Kunden (6 km). [Online] 2019b. [Zitat vom: 16. Juli 2019.] https://www.ktbl.de/webanwendungen/dieselbedarfsrechner/.

—. 2014. *Die Produktion in Niedrigenergiegewächshäusern ist pflanzenbaulich möglich und wirtschaftlich sinnvoll. Fachsymposium ZINEG, 24.09. - 25.09.2014, Berlin.* [Hrsg.] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. 2014. S. 180.

—. 2014a. *Energiebedarf in der Milchviehhaltung. KTBL-Heft 104.* 2014a.

—. 2012. *Energiepflanzen. Daten für die Planung des Energiepflanzenanbaus.* [Hrsg.] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL). Darmstadt : s.n., 2012.

—. 2015. *Faustzahlen für den Ökologischen Landbau.* [Hrsg.] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. Darmstadt : s.n., 2015.

—. 2009. *Faustzahlen für die Landwirtschaft.* [Hrsg.] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. Darmstadt : s.n., 2009.

—. 2009a. Freilandausläufe für Legehennen. [Online] 2009a. [Zitat vom: 19. Januar 2019.] https://www.ktbl.de/fileadmin/user_upload/artikel/Tierhaltung/Huhn/Legehennen_Freilandhaltung/Legehennen-Freilandhaltung.pdf.

—. 2011. Freilandschweinehaltung (KTBL Fachartikel) . [Online] 2011. [Zitat vom: 18. Januar 2019.] https://www.ktbl.de/fileadmin/user_upload/artikel/Oekolandbau/Freilandhaltung-Schwein/Freilandschweinehaltung.pdf.

—. 2018. Leistungs-Kostenrechnung Pflanzenbau. Online-Anwendung. [Online] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft, 2018. [Zitat vom: 22. 03 2018.] https://www.ktbl.de/.

—. 2019. Leistungs-Kostenrechnung Pflanzenbau. Online-Anwendung. [Online] 2019. https://www.ktbl.de/webanwendungen/leistungs-kostenrechnung-pflanzenbau/.

—. 2010. *Ökologischer Landbau. Daten für die Betriebsplanung.* [Hrsg.] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. Darmstadt : s.n., 2010. S. 824.

—. 2017. Pflanzenbau - Online-Anwendungen - Leistungs-Kostenrechnung Pflanzenbau. [Online] 2017. https://daten.ktbl.de/dslkrpflanze/postHv.html#Auswahl.

KTH The Royal Institute of Technology. 2016. Wood windows? Transparent wood material used for buildings, solar cells. *ScienceDaily.* [Online] 30. 03 2016. [Zitat vom: 28. 05 2018.] www.sciencedaily.com/releases/2016/03/160330085735.htm.

Kühnemann, Antje. 2016. Kartoffelsilage in Rundballen. *topagrar Online.* [Online] 20. 09 2016. [Zitat vom: 17. Oktober 2016.] https://www.topagrar.com/acker/news/kartoffelsilage-in-rundballen-9857710.html.

Kunz, André Frederick. 2018. *Nutzungsdauer von Möbeln. Auskunft per Telefon am 28. Mai 2018 um 11:54 Uhr.* s.l. : Handelsverband Möbel und Küchen (BVDM), Köln, 28. Mai 2018.

Kunz, Peter. 2013. Gesund und fruchtbar ohne Kraftfutter. [Hrsg.] LANDfreund AG. *LANDfreund.* 2013, 9, S. 38-41.

Küpfer, Christian und Balko, Julia. 2010. Streuobstwiesen in Baden-Württemberg – Wie viele Obstbäume wachsen im Land und in welchem Zustand sind sie? *horizonte.* 2010, Bd. 35, S. 38-42.

lambdaplus GmbH. 2018. lambdaplus. Dämmstoffe. [Online] 2018. [Zitat vom: 16. August 2018.] http://lambdaplus.de/daemmstoffe.html.

Landesforsten Niedersachsen. 2019. [Online] 2019. [Zitat vom: 26. August 2019.] https://www.landesforsten.de/2019/07/31/buchen-leiden-unter-wassermangel/.

Landesvereinigung Thüringer Milch e.V. 2019. Milchverarbeitung: Von der Milch zum Käse. [Online] 2019. [Zitat vom: 06. Februar 2019.] https://www.milch-thueringen.de/content/milchverarbeitung.

Landesvereinigung Thüringer Milch. 2017. Milchverarbeitung: Von der Milch zum Käse. [Online] 2017. [Zitat vom: 12. Oktober 2017.] https://www.milch-thueringen.de/content/milchverarbeitung.

Landtag Baden-Württemberg. 2014. Drucksache 15 5539 - Ökologische Bewertung von Energiepflanzen im Verhältnis zu Grünland. [Online] 23.. Juli 2014. [Zitat vom: 10.. April 2017.] https://www.landtag-bw.de/files/live/sites/LTBW/files/dokumente/WP15/Drucksachen/5000/15_5539_D.pdf.

Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg LTZ. 2010. Chinaschilf (Miscanthusxgiganteus) - Anbau, Verwertung und rechtliche Rahmenbedingungen. [Online] 2010. [Zitat vom: 10. April 2017.] http://www.ltz-bw.de/pb/site/pbs-bw-new/get/documents/MLR.LEL/PB5Documents/ltz_ka/Arbeitsfelder/Nachwachsende%20Rohstoffe/Kulturinformationen/Miscanthus_DL/Chinaschilf%20-%20Anbau%20Verwertung%20und%20rechtliche%20Rahmenbedingungen.pdf.

Landwirtschaftskammer Niedersachsen. 2010. *Energiepflanzen in Niedersachsen. Anbauhinweise und Wirtschaftlichkeit.* 2010. S. 75.

Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen. 2015. Definition der Bodenbearbeitungssysteme. [Online] 2015. [Zitat vom: 03. Juli 2019.] https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/boden/bodenbearbeitungssysteme-pdf.pdf.

—. 2012. Getreide-Ethanol. [Online] 24. 08. 2012. https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/nawaro/ethanol.htm.

—. 2013. Projekt „Zukunftsforum Urbane Landwirtschaft“. [Online] 02.. April 2013. [Zitat vom: 25.. Februar 2020.] https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/landentwicklung/urban/urbane-landwirtschaft.htm.

—. o. J.. Steckbriefe Energiepflanzen - Pflanzen für die Produktion von Biogas Riesen-Weizengras: 12. Riesen-Weizengras. [Online] o. J. [Zitat vom: 16. April 2017.] https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/pdf/steckbrief-riesenweizengras.pdf.

—. o. J. a. Steckbriefe Energiepflanzen - Pflanzen für die Produktion von Biogas: 5. Ackergräser und Mischungen. [Online] o. J. a. [Zitat vom: 18. Juni 2019.] https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/pdf/steckbrief-ackergras.pdf.

—. 2012. Tabellen: Zwischenfrüchte für die Bienenweide. [Online] 2012. [Zitat vom: 18. Juni 2019.] https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/ackerbau/pdf/tabellen-zf-bienenweide.pdf.

Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen; Deutscher Imkerbund; Apis. 2018. Bienenweide: Herbarium. *Die Honigmacher.* [Online] 2018. [Zitat vom: 09. Oktober 2018.] https://www.die-honigmacher.de/kurs2/herbar.html.

—. 2019. Honigtau. [Online] 2019. [Zitat vom: 01. Juli 2019.] https://www.die-honigmacher.de/kurs3/seite_12000.html.

LANUV. 2019. Klimaatlas NRW: Globalstrahlung - Beobachtungsdaten. [Online] 2019. [Zitat vom: 29. Mai 2019.] https://www.klimaatlas.nrw.de/Globalstrahlung-Artikel.

—. 2013. *LANUV Fachbericht 40: Potenzialstudie Erneuerbare Energien, Teil 2: Solarenergie.* Recklinghausen : s.n., 2013. S. 168.

LBV. 2014. Badisches Soja für badische Eier. [Hrsg.] Landesbauernverband in Baden-Württemberg e.V. *BWagrar.* 2014, Bd. 30.2014, S. 55.

LEDERZENTRUM GmbH. 2019. Das Lederlexikon: Rindsleder. [Online] 2019. [Zitat vom: 01. Fbruar 2019.] https://www.leder-info.de/index.php/Rindsleder.

Lehne, P., Schmidtke, Knut und Rauber, R. . 2001. Ertrag von Fasernesseln im ökologischen Landbau. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.* 2001, Bd. 13, S. 158-159.

Leisen, E. 2011. Milchleistung von ökologisch und konventionell wirtschaftenden Betrieben im Vergleich. [Online] 2011. [Zitat vom: 18. März 2019.] https://www.oekolandbau.nrw.de/fileadmin/redaktion/PDFs/Forschung/Ergebnisse/nach_Jahren/2011/06_04_Milchleistung____ko_Konv_TH_11.pdf.

Leisen, Edmund und Mersch, Ferdi. 2013. Flächenproduktivität in Öko-Milchviehbetrieben in unterschiedlichen Standorten und Regionen. [Hrsg.] D. Neuhoff, et al. *Ideal und Wirklichkeit - Perspektiven Ökologischer Landbewirtschaftung. Beiträge zur 12. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Bonn, 5. - 8. März 2013.* Berlin : Dr. Köster,, 2013, S. 466-469.

LeMahieu, P. J., Oplinger, E. S. und Putnam, D. H. 1991. Kenaf. [Hrsg.] University of Wisconsin & University of Minnesota. *Alternative Field Crops Manual.* 1991.

Lenzing. o. J.. Das Holzhemd - Kuschelige Fasern aus Buche. [Online] o. J. [Zitat vom: 14. November 2016.] http://www.kompetenznetz-holz.de/aktuelles/9_Viskose.pdf.

—. 2012. Focus Sustainability - Sustainability in the lenzing group. [Online] 2012.

Letalik, C. 2008. Möglichkeiten zur energetischen Nutzung von Landschaftspflegematerial. Vortragsfolien zum Vortrag auf dem C.A.R.M.E.N. Biokraftstoffkongress am 07.11.2008 in Rosenheim . [Online] 2008.

Lewandowski, Iris. 2016. Landwirtschaftlich produzierte Biomasse. [Hrsg.] Martin Kaltschmitt, Hans Hartmann und Hermann Hofbauer. *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren.* Berlin Heidelberg : Springer Vieweg,, 2016, S. 1867.

Leyens, Dirk, Haumann, David und Güner, Yusuf Emre. 2013. Integriertes Klimaschutzkonzept der großen Kreisstadt Leutkirch. [Online] 2013. [Zitat vom: 16. Mai 2019.] https://www.leutkirch.de/de/Leben/Bauen-Umwelt/Energie-Klimaschutz/Integriertes-Klimaschutzkonzept.

LfL Bayern. 2019a. Agrarökologie: Bodenschadstoffe. [Online] 2019a. [Zitat vom: 02. Juli 2019.] https://www.lfl.bayern.de/iab/boden/030439/.

—. 2019a. Basisdaten 20190131 Tabelle 4b - Gülle- und Jaucheanfall verschiedener Tierarten in m³ pro mittlerem Jahresbestand bei verschiedenen TM-Gehalten. [Online] 2019a. [Zitat vom: 11. Februar 2020.] https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/iab/dateien/basisdaten_20190131_4b.pdf.

—. 2017a. Biogasausbeuten verschiedener Substrate. Kartoffeln/Rüben. [Online] 2017a. [Zitat vom: 17. September 2018.] http://www.lfl.bayern.de/iba/energie/049711/?sel_list=22%2Cb&anker0=substratanker#substratanker.

—. 2018a. Biogasausbeuten verschiedener Substrate. Treber/Schleme/Pülpe. [Online] 2018a. [Zitat vom: 12. Juni 2018.] http://www.lfl.bayern.de/iba/energie/049711/?sel_list=26%2Cb&anker0=substratanker#substratanker.

—. 2019. Biogasausbeuten verschiedener Substrate: Gülle/Mist. [Online] 2019. [Zitat vom: 01. Februar 2019.] https://www.lfl.bayern.de/iba/energie/049711/?sel_list=51%2Cl&anker0=substratanker#substratanker.

—. 2019a. Biogasausbeuten verschiedener Substrate: Schrote/Kuchen. [Online] 2019a. [Zitat vom: 08. Juni 2019.] https://www.lfl.bayern.de/iba/energie/049711/?sel_list=27%2Cb&anker0=substratanker#substratanker.

—. 2012. Futtermittelblatt Rind. Sojakuchen (-expeller). [Online] April 2012. [Zitat vom: 10. 03 2018.] https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ite/dateien/sojakuchen_merkblatt.pdf.

—. 2017. Futtermittelblatt Sojakuchen. [Online] 2017. [Zitat vom: 08. Oktober 2018.] https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ite/dateien/sojakuchen_merkblatt_april-2017.pdf.

—. o. J.. Futterplanung - Durchführung in der Praxis. [Online] o. J. [Zitat vom: 30. Januar 2019.] https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ite/dateien/24444_futterplanung.pdf.

—. 2017b. *Gruber Tabelle zur Fuetterung der Milchkuehe Zuchtrinder Schafe Ziegen. Stand 2017. LfL-Information.* [Hrsg.] Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). Freising-Weihenstephan : s.n., 2017b.

—. 2018b. Leistungsprüfung von Zweinutzungshühnern. [Online] 2018b. [Zitat vom: 12. Juni 2019.] https://www.lfl.bayern.de/lvfz/kitzingen/107553/index.php.

—. o. J. a. Optimales Mastendgewicht bei Schweinen - Biologische Leistungen - . [Online] o. J. a. [Zitat vom: 18. Februar 2019.] https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ite/dateien/36201_optimale_mastendgewicht.pdf.

—. 2017a. *Wir bringen Landwirtschaft & Forschung zusammen. Jahresbericht 2016 Schwerpunktthema „Wasser“.* [Hrsg.] Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). Freising-Weihenstephan : s.n., 2017a.

—. 2009. *Wirtschaftsdünger und Gewässerschutz - Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern in der Landwirtschaft.* Freising-Weihenstephan : s.n., 2009.

LfU Brandenburg. 2018. CO2 - Emissionsfaktoren nach Energieträgern. [Online] 2018. [Zitat vom: 2019. Juli 2019.] https://lfu.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.523833.de.

LfULG. 2010. *Oelfruechte im oekologischen Anbau: Informationen für die Praxis.* [Hrsg.] Sächsisches Landesamt für Umwelt Landwirtschaft und Geologie. Dresden : s.n., 2010. S. 102.

LfULG Sachsen. 2019. Datensammlung Düngerecht - Tab 30 Richtwerte für den monatlichen Wirtschaftsduengeranfall von Schafen, Ziegen, Pferden sowie Schweinen - Stand 20190220. [Online] 2019. [Zitat vom: 12. Dezember 2019.] https://www.landwirtschaft.sachsen.de/download/_Tabellenverz_Datensammlung_Duengerecht_20191127.pdf.

Li, Yuanyuan, et al. 2018. Transparent wood for functional and structural applications. *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences.* 2018, Bd. 376(2112).

Liebetrau, Jan , et al. 2013. *Analyse von Emissionen klimarelevanter Gase durch Biogasanlagen im Hinblick auf die ökologische Bewertung der Biogasgewinnung aus Abfällen.* Leipzig : s.n., 2013.

Liebhard, P. 2012. Ökologische Ökologische Aspekte bei der Produktion ‚Nachwachsender Rohstoffe' auf landwirtschaftlich genutzten Flächen: Vergleich einjähriger und ausdauernder Kulturen in Österreich. Vortrag. 3. Umweltökologisches Symposium LFZ Raumberg – Gumpenstein. [Online] März 2012. [Zitat vom: 11. April 2017.] https://www.raumberg-gumpenstein.at/cm4/de/forschung/publikationen/downloadsveranstaltungen/finish/546-umweltoekologisches-symposium-2012/18534-2uv-2012-liebhard.html.

Life cycle assessment (LCA) and Techno-economic analysis (TEA) of tilapia-basil aquaponics. **Xie, Kun und Rosentrater, Kurt A. 2015.** 446 : s.n., 2015. Agricultural and Biosystems Engineering Conference Proceedings and Presentations.

Lignum. 2018. Holz – nachwachsender Rohstoff aus dem Wald. [Online] Lignum Holzwirtschaft Schweiz, 2018. [Zitat vom: 30. 04 2018.] https://www.lignum.ch/holz_a_z/holz/.

—. 2008. Sechsgeschossiges Mehrfamilienhaus ‹Holzhausen›, Steinhausen. *Holzbulletin 86/2008 – Mehrgeschossige Wohnbauten.* 2008, S. 34-39 (1698-1703).

Lindermayer, H., Preißinger, W. und Propstmeier, G. 2010. Versuchsbericht: „Einfache“ Phasenfütterung in der Ferkelaufzucht und in der Mast. [Online] 03. September 2010. [Zitat vom: 14. Februar 2019.] https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ite/dateien/26093_bericht_ferkel_mast.pdf.

Lindner, Renate. 2006. Qualitätsrindfleisch mit Färsen erzeugen. [Online] 13. April 2006. [Zitat vom: 29. Januar 2019.] http://www.lazbw.de/pb/site/lel/get/documents/MLR.LEL/PB5Documents/lazbw_rh/pdf/q/Qualit%C3%A4tsrindfleisch%20mit%20F%C3%A4rsen%20erzeugen.pdf?attachment=true.

Livos. 2017. Nachwachsende Rohstoffe. Auskunft von Waldemar Bothe (Freier LIVOS Mitarbeiter) per E-Mail am 22.02.2017. [Online] 2017.

LK Steiermark. 2016. Zahlen und Fakten: Steirisches Kürbiskernöl. [Online] 18. März 2016. [Zitat vom: 27. November 2018.] https://stmk.lko.at/steirisches-k%C3%BCrbiskern%C3%B6l-jahrgang-2016-mit-absoluten-top-qualit%C3%A4ten+2500+2408713.

Loiskandl, Willibald. o. J.. Bodenwasserwirtschaft. [Online] o. J. [Zitat vom: 10. April 2017.] https://boku.ac.at/wau/fileadmin/data/H03000/H81000/H81500/Skripten/Sonstige/SPAC.pdf.

Love, David C., Uhl, Michael S. und Genello, Laura. 2015. Energy and water use of small-scale raft aquaponic systems in Baltimore, Maryland, United States. *Aquacultural Engineering.* 2015, Bd. 68, S. 19–27.

LTZ Augustenberg. 2020. *Merkblätter für die Umweltgerechte Landbewirtschaftung. Nr. 19 (7., überarbeitete Auflage), April 2020: Der ökologische Landbau und seine Regeln.* [Hrsg.] Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg. Karlsruhe : s.n., 2020. S. 23.

LUBW. 2010. *Energetische Biomassenutzung und Landschaftsplanung. Studie im Auftrag der LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Hrsg.). Veröffentlicht im Oktober 2010.* 2010.

—. 2019a. Energieatlas Baden-Württemberg: Ermitteltes Solarpotenzial auf Dachflächen. [Online] 2019a. [Zitat vom: 27. Mai 2019.] https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/projekte/pages/selector/index.xhtml.

—. 2019b. Energieatlas Baden-Württemberg: PV-Freiflächenpotenzial (Konversionsflächen und Seitenrandstreifen) . [Online] 2019b. [Zitat vom: 28. Mai 2019.] https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/projekte/pages/selector/index.xhtml.

—. 2019. Klimafolgen und Anpassung: Grundwasser. [Online] 2019. [Zitat vom: 05.. Juli 2019.] https://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/klimawandel-und-anpassung/grundwasser.

—. 2013. *Zukünftige Klimaentwicklung in Baden-Württemberg.* [Hrsg.] LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg. Karlsruhe : s.n., 2013.

Ludwig, Alfred. 1956. *Haltung und Fütterung von Schweinen auf Dauerweiden.* Universität Stuttgart-Hohenheim : s.n., 1956.

Lugschitz, Barbara, Bruckner, Martin und Giljum, Stefan. 2011. *Europe's Global Land Demand. A study on the actual land embodied in European imports and exports of agricultural and forestry products.* [Hrsg.] Sustainable Europe Research Institute. Wien : s.n., 2011.

Lumitos. 2018. Stärke. [Online] 2018. [Zitat vom: 02. Mai 2018.] http://www.chemie.de/lexikon/St%C3%A4rke.html.

Lunenberg, Tatjana. 2017. Blühende Energiepflanzen - Bienenschutz und Bioenergie. Vortragsfolien. Vortrag bei der Tagung der Fachwarte und Bienensachverständigen der Imkerverbände am 02.02.2017 in München. [Online] 2017.

LV Hessen. 2016. Energiegräser auf Trockenstandorten - Szarvasi bei Anbauversuchen in Triesdorf ganz vorne. [Online] 2016. [Zitat vom: 17. Juni 2019.] https://www.lw-heute.de/energiegraeser-trockenstandorten.

LWF Bayern. 2005. *LWF Wissen 49. Die zweite Bundeswaldinventur 2002.* [Hrsg.] Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. 2005. S. 102.

LWG. 2015. 'Aprimira', die "Aprikosenmirabelle". [Online] 2015. [Zitat vom: 08. Januar 2018.] https://www.lwg.bayern.de/gartenbau/obstbau/113643/index.php.

LWK Niedersachsen. 2010. *Energiepflanzen in Niedersachsen - Anbauhinweise und Wirtschaftlichkeit.* 2010. S. 75.

—. 2005. Schleppertest: Dieselverbrauch ist ein wichtiges Kaufkriterium. [Online] 2005. [Zitat vom: 11.. Mai 2020.] https://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/6/nav/348/article/5879.html.

LWK NRW. 2011. Legehennen-Alleinfutter im Test. [Online] 2011. [Zitat vom: 10. April 2019.] https://www.landwirtschaftskammer.de/duesse/tierhaltung/gefluegel/versuche/legehennen/2011_legehennen_alleinfutter.pdf.

Maaß, Stephan. 2013. Die seltsame Liebe der Deutschen zu Ikea-Kerzen. *WELT.* [Online] 24. Dezember 2013. [Zitat vom: 02. Oktober 2018.] https://www.welt.de/wirtschaft/article123266038/Die-seltsame-Liebe-der-Deutschen-zu-Ikea-Kerzen.html.

Mantau, Udo. 2008. *Holz - Potenzial und Verfügbarkeit. Vortragsfolien. Vortrag anlässlich des 3. Internationalen BtL-Kongress am 15. und 16. Oktober 2008 in Berlin.* [Hrsg.] Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe FNR. Berlin : s.n., 2008.

Mantau, Udo, Glasenapp, Sebastian und Döring, Przemko. 2015. *Holzverwendung. AP3.* 11. 12 2015.

Manufactum GmbH. 2019. Bio-Schweinefleisch: Schmackhaft. Das Bunte Bentheimer Landschwein. [Online] 2019. [Zitat vom: 02. März 2019.] https://www.manufactum.de/bio-schweinefleisch-bunten-bentheimer-landschwein-p1546580/.

Massholder, Frank. 2015. Lebensmittellexikon: Entrahmte Milch, Magermilch. [Online] 18. März 2015. [Zitat vom: 20. Februar 2019.] https://www.lebensmittellexikon.de/m0000220.php.

Mattes & Ammann. o. J.. *Story of Nettle.* [Hrsg.] Mattes & Ammann. Messstetten - Tieringen : s.n., o. J. S. 23.

—. 2015a. Story of Nettle. Ernte und Ertrag. [Online] 2015a. [Zitat vom: 24. August 2018.] http://www.brennnessel-textil.de/2015/10/ernte-und-ertrag-2/.

—. 2015b. Story of Nettle. Fasernessel und Ökologie. [Online] 2015b. [Zitat vom: 24. August 2018.] http://www.brennnessel-textil.de/2015/10/oekologie/.

Mauser, Wolfram. 2014. Die Zukunft der Wasserressourcen - Wie entscheidend ist er Klimawandel. Vortragsfolien. [Online] 05. Februar 2014. [Zitat vom: 16. April 2017.] http://www.hez.wzw.tum.de/fileadmin/Hans_Eisenmann_Akademie/Praesentationen/Mauser_05_02_2014.pdf.

McKinsey & Company. 2016. Style that's sustainable: A new fast- fashion formula. Von Nathalie Remy, Eveline Speelman, and Steven Swartz, October 2016. [Online] 2016. [Zitat vom: 29. Juni 2018.] https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability-and-resource-productivity/our-insights/style-thats-sustainable-a-new-fast-fashion-formula.

Meierhöfer, J. 2017. Anbauratgeber Ölkürbisse Nordostdeutschland 2017: Der Ölkürbis - Eine Fruchtart für Gewinner. [Online] 2017. [Zitat vom: 12. Dezember 2018.] https://www.mw-agrar.de/assets/anbauinformation-%c3%b6lk%c3%bcrbisse.pdf.

Meili, Eric. 2018. Meilibeef - Weidemast von Mastremonten (Kreuzungen MilchrassenxMastrasssen) ohne Mais und Kraftfutter auf Grünland. [Online] Juni 2018. [Zitat vom: 01. Februar 2019.] http://www.meilibeef.ch/assets/Uploads/Artikel/Meilibeef-Weidetagung-Kiel-Text-zum-Vortrag-Juni-2018.pdf.

—. o. J.. Weidemast mit Remonten ohne Mais und Kraftfutter auf Grünland. [Online] o. J. [Zitat vom: 01. Februar 2019.] http://www.meilibeef.ch/assets/Uploads/Artikel/Meilibeef-mit-Remonten-kurz.pdf.

Meister, E., et al. 1999. *Prüfung des Anbaus und der Möglichkeiten einer Markteinführung von neuen Faserpflanzen (Hanf, Kenaf, Miscanthus).* [Hrsg.] Grenzüberschreitenden Instituts zur rentablen umweltgerechten Landbewirtschaftung ITADA. Colmar : s.n., 1999. S. 90.

Menke, Annette, Hünting, Klaus und Pries, Martin. 2004. Rübenprodukte in der Rinderfütterung. [Online] 14. 09 2004. [Zitat vom: 29. August 2017.] https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/tierproduktion/rinderhaltung/fuetterung/archiv/ruebenprodukte.htm.

Menke, Christoph, Christmann, Kristin und Hörning, Bernhard. 2016. *Weidehaltung von Schweinen.* [Hrsg.] Gesellschaft für Ökologische Tierhaltung e.V. (GÖT). Eberswalde : s.n., 2016.

Merkel, Elena. 2018. Klimatabelle Boston. *klimatabelle.info.* [Online] 2018. [Zitat vom: 09. 04 2018.] https://www.klimatabelle.info/nordamerika/usa/boston.

Meyer, Andrea und Vogt, Wolfgang. 2016. Schweine bis 140 kg mästen? [Online] 2016. [Zitat vom: 18. Oktober 2017.] https://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/1/nav/753/article/27762.html.

—. 2017. Schweinemast ohne Sojaschrot. [Online] 2017. [Zitat vom: 28. März 2019.] https://www.proteinmarkt.de/fileadmin/user_upload/190717FA_Schweinemast_ohne_Sojaschrot.pdf.

Meyer, H. 1978. Grundlagen der Schweinfütterung. [Hrsg.] G. Comberg. *Schweinezucht.* Stuttgart : Ulmer, 1978, S. 162-234.

Michel, Stefan. 2005. Zucker, Hackschnitzel, Melasse. [Online] 21. 09 2005. [Zitat vom: 2017. August 29.] https://www.deutschlandfunk.de/zucker-hackschnitzel-melasse.697.de.html?dram:article_id=74042.

Mickdam, Elsayed, et al. 2012. Poultry-by Product as Feedstuff in Tilapia Diets. Evaluation of Poultry-by Product as Feedstuff in the Diets of Nile Tilapia. *Engormix Aquaculture.* [Online] 22. 3 2012. [Zitat vom: 31. 10 2017.] https://en.engormix.com/aquaculture/articles/poultry-by-product-as-feedstuff-in-tilapia-diets-t35273.htm.

Microtec. 2018. CT Log / Microtec. [Online] 2018. [Zitat vom: 24. Mai 2018.] https://microtec.eu/de/catalogue/products/ctlog/.

Milchindustrie-Verband e. V. 2018. *Beilage zum Geschäftsbericht 2017/2018: Zahlen - Daten - Fakten.* 2018.

Milchindustrie-Verband e.V. 2017. Deutschland: Pro-Kopf-Verbrauch von Milchprodukten. [Online] 2017. [Zitat vom: 06. Februar 2019.] https://milchindustrie.de/wp-content/uploads/2017/10/ProkopfDeutschland_Mopro_2010-2016x_Homepage.pdf.

—. 2019. Milkipedia: Molke. [Online] 2019. [Zitat vom: 13. Februar 2019.] https://www.meine-milch.de/milkipedia/molke.

Miles, Richard D. und Chapman, Frank A. 2006. *The Benefits of Fish Meal in Aquaculture Diets.* 2006. Bde. Fisheries and Aquatic Sciences Department, UF/IFAS Extension. FA122.

Miller, Ulfried. 2014. Bioenergie aus Streuobst – Beispiele aus Oberschwaben. Vortragsfolien. Vortrag bei Energiebündel & Flowerpower in Mössingen am 7. Oktober 2014. [Online] 2014. [Zitat vom: 12. Oktober 2018.] http://www.energiebuendel-und-flowerpower.de/wp-content/uploads/Bioenergie%20aus%20Streuobst%20-%20Vortrag_Ulfried_Miller_BUND_Ravensburg%207-10-2014.pdf.

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. 2017. Themenheft Mode und Textil. Aktualisierter Nachdruck. [Online] 2017. [Zitat vom: 29. Juni 2018.] https://www.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Umwelt/Nachhaltigkeit/Themenheft_Textil.pdf.

MLR Baden-Württemberg. 2010. *Clusterstudie Forst und Holz Baden-Württemberg. Analyse der spezifischen Wettbewerbssituation des Clusters Forst und Holz und Ableitung von Handlungsempfehlungen.* Stuttgart : s.n., 2010.

—. o. J.. Der Wald in Baden-Württemberg - ausgewählte Ergebnisse der 3. Bundeswaldinventur -. [Online] o. J. [Zitat vom: 25. Mai 2018.] http://www.forstbw.de/schuetzen-bewahren/waldinventur/bundeswaldinventur/bwi3/#top.

—. 2019. Faltblattsammlung - die unteren Forstbehörden. [Online] 2019. [Zitat vom: 08. Februar 2019.] https://www.forstbw.de/produkte-angebote/infothek/publikationen/forstbw-die-unteren-forstbehoerden/.

MLUV Brandenburg . 2009. *Dauerfeldversuche für nachhaltige Landwirtschafte Bodennutzung. Beiträge für eine nachhaltige landwirtschaftliche Bodennutzung.* Potsdam : s.n., 2009.

Moejes, S. N. und van Boxtel, A.J.B. 2017. Energy saving potential of emerging technologies in milk powder production. *Trends in Food Science & Technology.* Februar 2017, 60, S. 31-42.

Möndel, Alexander. 2007. Bäume wachsen nicht in den Himmel. *DLZ Agrarmagazin.* 2007, Bd. 10/2007 , S. 20-23.

—. 2007. Bäume wachsen nicht in den Himmel. *Dlz Agrarmagazin.* 2007, 10, S. 20-23.

Moosbeckhofer, Rudolf, et al. 2012. *Erhebungen zum Nektarertragspotential von Sonnenblumenkulturen in Österreich - Abschlussbericht.* [Hrsg.] Pflanzenschutzdienst und Bienen Abteilung Bienenkunde und Bienenschutz AGES Institut für Saat- und Pflanzgut. Wien : s.n., 2012. S. 35.

Morrison, Liz. 2012. Soy-straw start-up. A Mankato company is turning soybean straw into particleboard. *Ag Innovation News .* 2012, Apr–Jun 2012, Vol. 21, No. 2, S. 4-5.

Mortice, Zach. 2019. [Online] 24.. Dezember 2019. [Zitat vom: 11.. April 2020.] https://www.autodesk.de/redshift/bauen-mit-bambus/.

Mosandl, Reinhard und Stimm, Bernd. 2014. Kurzportrait Blauglockenbaum (Paulownia tomentosa). [Online] 2014. [Zitat vom: 21. August 2018.] https://www.waldwissen.net/waldwirtschaft/waldbau/wuh_paulownia_tomentosa/index_DE.

Moser, Christian. 2016. *Holzbedarf Wohngebäude. Auskunft per E-Mail am 30.09.2016. Moser Holzbau GmbH.* Welsberg-Taisten, Italien : s.n., 2016.

Moser, David. 2012a. *Nektarertragspotential von Rapskulturen in Österreich.* [Hrsg.] Institut für Botanik der Universität für Bodenkultur. Wien : s.n., 2012a.

MOSO International B.V. o. J.. MOSO Bamboo X-treme Terrassendielen. Produktdatenblatt. [Online] o. J. [Zitat vom: 11.. April 2020.] https://bambus-produkte.net/produkt/moso-bamboo-x-treme-terrassendielen/.

MRI. 2008. *Nationale Verzehrsstudie II: Ergebnisbericht, Teil 2.* [Hrsg.] Max Rubner-Institut Bundesforschungsinstitut für Ernährung und Lebensmittel. Karlsruhe : s.n., 2008. S. 280.

Müller, Cora. 2005. Mechanisch-Enzymatischer Aufschluss von Kartoffelpülpe als Bindemittel zur Herstellung von Holzwerkstoffen. [Online] 2005.

Müller, Jörg. 2005a. *Waldstrukturen als Steuergröße für Artengemeinschaften in kollinen bis submontanen Buchenwäldern.pdf.* [Hrsg.] Technische Universität München. München : s.n., 2005a.

Müller-Sämann, Karl und Hölscher, Thomas. 2010. *Miscanthus und Kohlenstoffbindung in ehemaligen Ackerböden. 6. Internationale Miscanthus-Tagung, 24.-26. November 2010 in Ardagger, Österreich.* 2010.

MÜNCH. 2007. MÜNCH stellt Pelletpressen und komplette Linien für die Holzpelletierung inklusive eventuell notwendiger Vorzerkleinerung her. PM vom 16.02.2007. [Online] 16. Februar 2007. [Zitat vom: 13. Juni 2019.] https://www.pressebox.de/inaktiv/muench-edelstahl-gmbh/MUeNCH-stellt-Pelletpressen-und-komplette-Linien-fuer-die-Holzpelletierung-inklusive-eventuell-notwendiger-Vorzerkleinerung-her/boxid/93692.

N.L. Chrestensen. 2019. *Anbauanleitung für die Aussaat der Durchwachsenen Silphie.* [Hrsg.] N.L. Chrestensen Erfurter Samen- und Pflanzenzucht GmbH. Jena : s.n., 2019. S. 8.

NABU. 2017. *Miteinander statt übereinander reden. Diskussionsbeiträge aus dem Projekt „Dialogforum Landwirtschaft und Naturschutz" des NABU Baden-Württemberg.* [Hrsg.] Naturschutzbund Deutschland Landesverband Baden-Württemberg e. V. 2017.

NABU Nordrhein-Westfalen. 2016. Auffallend wenige Singvögel in Gärten und Parks: Ursachen des "Vogelmangels" sind vielschichtig und komplex. [Online] 2016. [Zitat vom: 17.. April 2020.] https://nrw.nabu.de/news/2016/21671.html.

NABU. 2015. Rund um Streuobst und Obstsorten. [Online] 2015. [Zitat vom: 17. Oktober 2018.] https://sachsen.nabu.de/imperia/md/content/sachsen/170310-nabu-rund-um-streuobst-und-obstsorten.pdf.

Nachfrage nach Albleisa wächst stetig. **Kircheis, Eileen. 2017.** s.l. : Schwäbischer Verlag, 02. Juni 2017, Schwäbische Zeitung.

Nachhaltige Ressourcennutzung in der Zellstoff- und Papierindustrie. Effizienter Rohstoffeinsatz in Deutschland. Vortragsfolien. **Drews, Martin. 2014.** Brilon : Verband Deutscher Papierfabriken,, 2014. Vortrag anlässlich des 3. Workshops der Verbände- und Dialogplattform Wald am 28. Mai 2014 in Brilon.

Nachhaltigkeit und Verfügbarkeit biobasierter Werkstoffe. **Endres, Hans-Josef. 2013.** 2013. Vortragsfolien. Festsymposium zum 20-jährigen Bestehen des Beirates für nachwachsende Rohstoffe am Niedersächsischen Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz am 24. Oktober 2013 in Hannover.

NahGEMACHT GmbH. 2020. Paraffinfreie Bio Kerzen. [Online] 2020. [Zitat vom: 14.. April 2020.] https://nahgemacht.de/kerzen/bio-kerzen/.

NCD Risk Factor Collaboration. 2016. Trends in adult body-mass index in 200 countries from 1975 to 2014: a pooled analysis of 1698 population-based measurement studies with 19·2 million participants. [Online] 2016. [Zitat vom: 04. Mai 2019.] https://www.thelancet.com/journals/lancet/article/PIIS0140-6736(16)30054-X/fulltext.

Neher, Jürgen. 2019b. Alles über Käse - Käse aus aller Welt von A bis Z: Harzer Käse - Kalorienarmer Sauermilchkäse aus dem Harz. [Online] 2019b. [Zitat vom: 20. Februar 2019.] https://www.kaesewelten.info/kasesorten/kuhmilch/harzer-kase/.

—. 2019a. Alles über Käse - Käse aus aller Welt von A bis Z: Ziger - Kalorienarmer Molkenfrischkäse aus der Schweiz. [Online] 2019a. [Zitat vom: 19. Februar 2019.] https://www.kaesewelten.info/kasesorten/ziger/.

Nemecek, T., Alig, M. und Sutter, M. 2014. Ökobilanz der graslandbasierten Milchproduktion: Stärken, Schwächen und Verbesserungspotenziale. [Hrsg.] B. Reidy, B. Gregis und P. Thomet. *Grasland- und weidebasierte Milchproduktion. Internationale Weidetagung vom 21. bis 22. August 2014 in Zollikofen, Schweiz.* 2014, S. 11-17.

Neufeldt, H. 2005. Carbon stocks and sequestration potentials of agricultural soils in the federal state of Baden-Württemberg, SW Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science.* 2005, 168 (2), S. 202-211.

Ng, Marie, et al. 2014. Global, regional, and national prevalence of overweight and obesity in children and adults during 1980–2013: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2013. *The Lancet.* 30. August 2014, 384 (9945), S. 715-828.

Nitsch, Joachim, et al. 2001. *Schlüsseltechnologie Regenerative EnergienTeilbericht im Rahmen des HGF-Projektes„Global zukunftsfähige Entwicklung – Perspektivenfür Deutschland“.* Stuttgart, Karlsruhe : s.n., 2001. S. 276.

NL Agency. 2013. Bamboo report: Analysing the potential of bamboo feedstock for the biobased economy. *Netherlands Enterprise Agency.* [Online] 2013. [Zitat vom: 25. 05 2018.] https://english.rvo.nl/file/bamboo-report-analysing-potential-bamboo-feedstock-biobased-economy.

Noleppa, Steffen. 2016a. *Auf der Ölspur – Berechnungen zu einer palmölfreieren Welt.* [Hrsg.] WWF Deutschland. 2016a. S. 91.

—. 2016. *Pflanzenschutz in Deutschland und Biodiversität. Auswirkungen von Strategien der konventionellen und ökologischen Landbewirtschaftung. HFFA Research Paper 01/2016.* [Hrsg.] HFFA Research GmbH. Berlin : s.n., 2016.

Norske-Skog Golbey. 2015. Rohstoffe und Herstellung des Papierbreis Vom Rohstoff bis zur Herstellung des Papierbreis. [Online] 2015. [Zitat vom: 27. August 2018.] http://norskeskog-golbey.com/accueil/processus-et-environnement/matieres-premieres-et-fabrication-de-la-pate/?lang=de.

nova-Institut. 2014. Direkte Bioproduktion von Propylen. Global Bioenergies erreicht einen dritten Erfolg auf dem Weg zu Olefinen aus nachwachsenden Rohstoffen. *Bio-based News.* [Online] 19. Dezember 2014. [Zitat vom: 13. September 2018.] http://news.bio-based.eu/global-bioenergies-erreicht-mit-der-direkten-bioproduktion-von-propylen-einen-dritten-erfolg-auf-dem-weg-zu-olefinen-aus-nachwachsenden-rohstoffen/.

Oechsner, Hans. 2013. Bioenergie aus der Landschaftspflege. Vortrgsfolien zum Vortrag beim Referenten-Workshop "Energiebündel und Flowerpower" am 12. November 2013 in Mössingen. [Online] 12. November 2013. [Zitat vom: 08. Januar 2019.] http://www.energiebuendel-und-flowerpower.de/wp-content/uploads/Vortrag_Dr._Oechsner_Uni_Hohenheim_Bioenergie_aus_Landschaftspflege_20131112.pdf.

Oehmichen, Katja, et al. 2011. *Inventarstudie 2008 und Treibhausgasinventar Wald.* [Hrsg.] Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei (vTI), Johann Heinrich von Thünen-Institut. Braunschweig : s.n., 2011. Bd. Landbauforschung Sonderheft 343.

Ökoinstitut e. V. 2016. *Policy Paper 3: Rohstoffspezifische Ziele Deutschland 2049 - Auf dem Weg zu einer nachhaltigen Rohstoffwirtschaft.* Darmstadt : s.n., 2016.

Ölerini/CF Media. 2018. Hanföl. [Online] 2018. [Zitat vom: 09. Oktober 2018.] https://oelerini.com/hanfoel.

Ölmühle Garting. 2018. *AW: Ölproduktion und Presskuchen. Auskunft per E-Mail am 26.03.2018.* s.l. : Ölmühle Garting GmbH&Co.KG, Schnaitsee. Geschäftsführer: Toni Lamprecht, 2018.

Ölmühle Scheibel. 2017. Walnussöl von Ihren eigenen Walnusskernen! [Online] 2017. [Zitat vom: 12. September 2017.] https://www.oelmuehle-scheibel.de/Lohnpressung.

Omlor, M. 2010. Fleischerhandwerk - Schlachtausbeute Schlachttiere. [Online] 2010. [Zitat vom: 29. Januar 2019.] https://www.oekolandbau.de/fileadmin/redaktion/oeko_lehrmittel/Ernaehrungswirtschaft/Fleischerhandwerk/fl_modul_b/fl_b_01/flmb01_04_2010.pdf.

OPW Ingredients GmbH. 2018. Wahlnussmehl: Besonderheiten. [Online] 2018. [Zitat vom: 12. Oktober 2018.] https://www.opw-ingredients.com/de/produkt/walnussmehl.

Otten, Albert. 2008. Mais und seine „Kunststoff“-Seite - Maisstärke als nachwachsender Rohstoff für innovative Biokunststoffe. [Hrsg.] Deutsches Maiskomitee e.V. (DMK). *Mais.* 2008, Bd. 3/2008 , S. 80-83.

P. Brändle GmbH. 2018. Produkte: vita-Rapskernöl kaltgepresst. [Online] 2018. [Zitat vom: 11. Dezember 2018.] https://www.braendle.de/produkte/rapskernoel_kaltgepresst_naehrwert.html.

Pacan, Benjamin und Dröge, Stefan. 2010. *Abschlussbericht zum Forschungsprojekt: Stoffliche und energetische Nutzung von Stroh.* [Hrsg.] PFI Prüf- und Forschungsinstitut Pirmasens. Pirmasens : s.n., 2010.

Pahkala, K. A., Paavilainen, L. und Mela, T. 1997. Grass species as raw material for pulp and paper. [Hrsg.] International Grasslands Congress (IGC). *Proceedings XVIII IGC 1997 Winnepeg, Manitoba.* 1997, S. 55-60.

Pahler, Andreas und Wegener, Gerd. 2011. Bauen mit Holz = aktiver Klimaschutz. [Hrsg.] Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. *LWF aktuell 84. Bergwaldwirtschaft .* 2011, S. 38-39.

Pahlke, Markus. 2015. Tipps zur Kälberfütterung: Längere Milchgabe plus Stroh. [Online] 20. Februar 2015. [Zitat vom: 12. März 2019.] https://www.agrarheute.com/tier/rind/tipps-kaelberfuetterung-laengere-milchgabe-plus-stroh-440755.

Palm. 2018. Palm Papierfabrik. [Online] 2018. [Zitat vom: 27. August 2018.] https://www.palm.de/.

Pankatz, Heike. o. J.. Haltung von Schweinen. [Online] o. J. [Zitat vom: 24. März 2019.] https://herz-fuer-tiere.de/ratgeber-tier/bauernhoftiere/schweine/haltung-von-schweinen.

Pathak, Pranav D., et al. 2017. Valorization of Potato Peel: a biorefinery approach. *Critical Reviews in Biotechnology.* 2017, Bd. 38(2).

Pelletier, Nathan und Tyedmers, Peter. 2007. Feeding farmed salmon: Is organic better? *Aquaculture.* 2007, Bd. 272, S. 399 - 416.

Pelz, Stefan, et al. 2007. *Operationale Biomassepotenziale im Landkreis Göppingen.* [Hrsg.] Landkreis Göppingen – Forstamt. 2007. S. 76.

Peterek, Gabriele. 2018. Hintergrundinformation Biokunststoffe. Auskunft per E-Mail am 19. September 2018. [Online] 2018.

Pfleiderer. 2018. Rohstoffe und Mögliche Koppelprodukte. Auskunft von Claus Seemann, Leiter Produkmanagement Träger, am 11. Juli 2018 per E-Mail. . [Online] 2018.

Pfützner, Enrico. 2018. Sonnenblumen Ertrag. [Online] 2018. [Zitat vom: 04. Oktober 2018.] https://www.pflanzenkunde.net/pflanzen/ernte/sonnenblumen-ertrag.html.

Pietruschka, Dirk, Pietzsch, Ursula und Monien, Dirk. 2016. *Vision 2020: Die Plusenergiegemeinde Wüstenrot.* Bonn : Fraunhofer IRB Verlag, 2016.

Pladerer , Christian , et al. 2016. *Lagebericht zu Lebensmittelabfällen und - verlusten in Österreich.* Wien : s.n., 2016. S. 33.

Plantahof. 2018. *Jahresbericht Landwirtschaftliches Bildungs- und Beratungszentrum Plantahof 2016/2017 und 2017/2018.* Landquart (CH) : s.n., 2018.

Plischke, Mirja. 2008. *Auswirkungen von Duroc-Kreuzungen auf Qualitätsmerkmale und ökonomische Kennwerte in der Mastschweineerzeugung.* s.l. : GRIN Verlag,, 2008. S. 89.

Pödör. 2018. Pödör Premium Öle: Kaltgepresste Öle. [Online] 2018. [Zitat vom: 12. Dezember 2018.] https://www.podoroele.de/produkte/kaltgepresste-oele.

Polley, H., et al. 2015. *uche und Fichte - beliebt und begehrt. Thünen à la carte 3.* Braunschweig : Johann Heinrich von Thünen-Institut,, 2015. S. 6.

Pollmeier. 2018. Über BauBuche. [Online] Pollmeier Massivholz GmbH & Co.KG, 2018. [Zitat vom: 16. 05 2018.] https://www.pollmeier.com/de/produkte/baubuche/ueber-baubuche.html.

Pollmer, Udo. 2009. Das unsinnige Geschäft mit der Molke. [Online] 11. Oktober 2009. [Zitat vom: 13. Februar 2019.]

Poppinga, Onno, Jürgens, Karin und Sperling, Urs. 2015. Milchviehhaltung mit wenig bzw ohne Kraftfutter. Päsentationsfolien. [Online] 2015. [Zitat vom: 22. Januar 2019.] https://www.agrarbuendnis.de/fileadmin/Daten-KAB/AB_Tagungen/Hofgeismar_Wachstum_2015-06-26ff/juergens-Poppinga_ohne_Kraftfutter_HOG_2015-06-27.pdf.

Posten, Clemens. 2018. Erntefaktoren der Energiegewinnung aus Algen. Auskunft per E-Mail am 04.03.2018. [Online] 2018.

Pott, Ariane. 2017. Lignin: der alternative Rohstoff im Visier der Forschung. *Bioökonomie BW.* [Online] 06. 03 2017. [Zitat vom: 10. Mai 2017.] https://www.biooekonomie-bw.de/de/fachbeitrag/aktuell/lignin-der-alternative-rohstoff-im-visier-der-forschung/.

Pretty, J., Morison, J. und Hine, R. 2002. Reducing food poverty by increasing agricultural sustainability in developing countries. *Agriculture, Ecosystems and Environment.* 2002, 95(1), S. 217-234.

Pritsch, G. 2007. *Bienenweide.* Stuttgart : Franckh-Kosmos Verlags-GmbH, 2007. S. 168.

proHolz Austria. 2018. Punkthäuser, Hamburg-Winterhude/D. [Online] 2018. [Zitat vom: 14. 05 2018.] http://www.proholz.at/haeuser/punkthaeuser-hamburg-winterhuded/.

Projektträger Jülich. o. J.. Verbundvorhaben: EnOB: HLDaemmputz: Dünnschichtiger Hochleistungswärmedämmputz aus nachhaltig angebauten Nachwachsenden Rohstoffen. Teilvorhaben: Charakterisierung der nachwachsenden Rohstoffe. [Online] o. J. [Zitat vom: 13. August 2018.] https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2&v=10&id=2816254&q=01164970/1.

Proplanta/FBN. 2016. Zweinutzungshuhn soll zukunftsfähig werden. [Online] 26. Juli 2016. [Zitat vom: 29. Oktober 2018.] https://www.proplanta.de/Agrar-Nachrichten/Wissenschaft/Zweinutzungshuhn-soll-zukunftsfaehig-werden_article1469517560.html.

Prüße, U., Hüther, L. und Hohgardt, K. 2002. *Mittlere Gewichte einzelner Obst- und Gemüseerzeugnisse.* [Hrsg.] Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit. 2002. S. 92.

Pude, Ralf. 2011. Verwertungsvielfalt von Miscanthus. (Stand: 27.04.2011). [Online] 2011. [Zitat vom: 13. August 2018.] http://miscanthus.de/verwertung.htm.

Pude, Ralf, et al. 2012. *Pflanzen für Industrie und Energie.* [Hrsg.] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). Gülzow-Prüzen : s.n., 2012. S. 89.

PwC. 2017. *Die deutsche Möbelbranche. Struktur, Trends und Herausforderungen.* Frankfurt am Main : PricewaterhouseCoopers GmbH, 2017. S. 34.

Quaschning, Volker. 2015. Statistiken: Energieaufwand zur Herstellung regenerativer Anlagen. [Online] 2015. [Zitat vom: 17. Juni 2019.] https://www.volker-quaschning.de/datserv/kev/index.php.

Raiffeisen. 2017. Ackermanager. [Online] 2017. [Zitat vom: 07. Juli 2017.] https://www.raiffeisen.com/pflanzen/ackermanager.

Rech, Bernd. o. J.. Perspektiven und Herausforderungen der Photovoltaik. Vortragsfolien. [Online] o. J.

Regionalverband Bodensee-Oberschwaben. 2012. *Energie- und Klimaschutz- konzept für die Region Bodensee-Oberschwaben. Info Heft 12.* Ravensburg : s.n., 2012.

Reiter, Wolfgang, Seebacher, Monika und Tiefenthaller, Franz. 2016. *Kälberfütterung.* [Hrsg.] LK Oberösterreich Beratungsstelle Rinderproduktion. 2016. S. 14.

Renew Sports Cars. 2018b. About Renew. Our mission: make carbin negative cars by 2025. *Renew Sports Cars.* [Online] 2018b. [Zitat vom: 30. Mai 2018.] http://www.renewsportscars.com/about-renew.html.

—. 2018a. Why is Hemp so important? *Renew Sports Cars.* [Online] 2018a. [Zitat vom: 30. Mai 2018.] http://www.renewsportscars.com/why-hemp-1.html.

Renggli AG. 2016. Holzsystembau – High-Tech in Holz. [Online] 2016. [Zitat vom: 01. 10 2016.] http://www.holzhausen.ch/holzsystembau.html.

Renovo Hardwood Bicycles. 2018. Sustainability. *Renovo Hardwood Bicycles.* [Online] 2018. [Zitat vom: 30. Mai 2018.] https://renovobikes.com/blogs/wood-technology/sustainability.

Resl, Thomas und Brückler, Martin. 2016. Erträge des österreichischen Biolandbaus im Vergleich zu konventioneller Produktion. Vortragsfolien. Präsentation zur Fachtagung "Mahlzeit - Gibt's auch morgen noch genug zu essen?" des Netzwerks Foodsecurity am 13. Oktober 2016. *AGES.* [Online] 2016. [Zitat vom: 04. Juni 2018.] 2016_10_13_Thomas_Resl_BIO_Mengenerträge_FOODSECURITY_Fachtagung_final. https://www.ages.at/download/0/0/1732eec689dc9e9c1114ade14a1d2d58a635d417/fileadmin/AGES2015/Service/AGES-Akademie/2016-10-13_Foodsecurity.at/2016_10_13_Thomas_Resl_BIO_Mengenertr%C3%A4ge_FOODSECURITY_Fachtagung_final.pdf.

Reuber, Mark. 2011. *Materialeffizienz in der Möbelindustrie. Vortragsfolien, 30. November 2011. Erscheinungsdatum: 10.01.2012.* [Hrsg.] Institut für Wirtschaft und Technik Detmold. 2011.

Richter, E. 2012. Baumhasel – Ein Baum für den Klimawandel?! (Online-Version). *AFZ Der Wald.* 2012, Bd. 8/2012, S. 8–9.

Richter, Eckhard. 2017. LWF Überblick: Baumhasel - Datensammlung Waldbau und Holzeigenschaften. [Online] August 2017. [Zitat vom: 21. Juni 2019.] https://www.waldwissen.net/waldwirtschaft/waldbau/umbau/lwf_baumhasel/lwf_ueberblick_baumhasel.pdf.

Riering, Burkhard. 2014. Hendricks: „Unsere Sanierungsquote ist zu schwach“. *handwerk-magazin.* [Online] Holzmann Medien GmbH & Co. KG, 18. 07 2014. [Zitat vom: 29. Mai 2018.] https://www.handwerk-magazin.de/steuerbonus-unsere-sanierungsquote-ist-zu-schwach/150/12/242802.

Rink. 2018. Mühlen Weizenkleber (Gluten). [Online] 2018. [Zitat vom: 12. Juni 2018.] https://www.rink-versand.de/backwaren/mehl-getreide-muehlenprodukte/149/muehlen-weizenkleber-gluten-1-kg.

Rockpaper PMG. 2018. Rockpaper - Das erste umweltfreundliche Papier. [Online] Rockpaper Print Media Group GmbH & Co. KG, 2018. [Zitat vom: 30. 04 2018.] https://www.rockpaper.de/produktion.php.

Rohstoff- und CO2-Einsparpotenziale. Welchen Beitag zur Ressourcenschonung und Einsparung von CO2 erzielt man durch eine drastische Reduzierung des Papierverbrauchs um 50 % in Deutschland. Vortragsfolien. **Detzel, Andreas und Kämper , Claudia . 2012.** s.l. : IFEU Heidelberg, 2012. Fachtagung Wald- und Ressourcenschutz durch Papiersparen.

Rössler, Günter. 2008. Rindenabzug richtig bemessen. (Online-Version vom 01.08.2013). *Forstzeitung 4, 10.* 2008.

Röther, Tobias. 2016. *Klimabilanz der Biogasanlage der Benning Agrar-Energie GmbH in Reken (Westfalen).* [Hrsg.] Benning Agrar-Energie GmbH. Reken : s.n., 2016.

Ruetz, Christian. 2018. Kälbermast – von Anfang an richtig füttern. [Online] 13. April 2018. [Zitat vom: 12. März 2019.] https://tirol.lko.at/k%C3%A4lbermast-von-anfang-an-richtig-f%C3%BCttern+2500+2722731.

Saathoff, Wiebke. 2009a. Bedeutung des Grünlandschutzes für den Klimaschutz. Ergebnisse aus dem vom BfN geförderten Sachverständigengutachten “Der Einfluss veränderter Landnutzungen auf Klimawandel und Biodiversität”. Vortragsfolien zum Vortrag vom 24.04.2009 in Vilm. [Online] 2009a. [Zitat vom: 16. Januar 2019.] https://www.bfn.de/fileadmin/MDB/documents/ina/vortraege/2009-Gruenland-Saathoff.pdf.

—. 2009b. Synergien und Konflikte zwischen landnutzungsbezogenen Klimaschutzmaßnahmen und Zielen des Naturschutzes. Vortragsfolien. [Online] 24. September 2009b. [Zitat vom: 16. Januar 2019b.]

Saathoff, Wiebke und Haaren, Christina von. 2011. Klimarelevanz der Landnutzungen und Konsequenzen für den Naturschutz. *Naturschutz und Landschaftsplanung.* 2011, 43 (5), S. 138-146.

Sack, Stefan. 2016. *Re: Öko-und Flächenbilanz. Auskunft per E-Mail am 30.09.2016. Team Kanadablockhaus GmbH. Stefan Sack (Geschäftsführer). Murrhardt, Deutschland.* s.l. : Team Kanadablockhaus GmbH, 2016.

Schachler, Bernd, Schmiechen, Ulrich und Sauermann, Wolfgang. 2002/2016. *Anbauratgeber Blaue Süßlupine.* Erstauflage 2002 • aktualisierte Auflage 2016. 2002/2016. S. 14.

Schaller, Michaela und Weigel, Hans-Joachim. 2007. *Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 316: Analyse des Sachstands zu Auswirkungen von Klimaverändeerungen auf die deutsche Landwirtschaft und Maßnahmen zur Anpassung.* Braunschweig : Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, 2007.

Schalow, Linda. 2012. Schafbeweidung in Solarparks. Groß Kreutzer Schaftag, 08.11.2012. Vortragsfolien. [Online] 2012. [Zitat vom: 03.. April 2018.] https://lelf.brandenburg.de/media_fast/4055/Schafbeweidung%20in%20Solarparks_Schalow.pdf.

Schardt, Markus. 2006. Das Problem mit der "Holzfeuchte" und dem "Wassergehalt". [Hrsg.] Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. *LWF aktuell 54.* 2006, S. 50-51.

Schätzl, Robert und Schägger, Martin. 2011. Wirtschaftlichkeit des Haselnussanbaues. Vortragsfolien, 4. Bayerischer Haselnusstag 24.02.2011 in Cadolzburg . [Online] 02. Februar 2011. [Zitat vom: 21. Juni 2019.] http://www.haselnussanbau-verein.de/mediapool/71/714618/data/Vortrag_4_Haselnusstag_Wirtschaftlichkeit_des_Haselnussanbaues.pdf.

Schiessl, Michaela. 2011. Urbane Bauern. *DER SPIEGEL 25/2011.* 2011, S. 80.

Schlupeck, Bernd. 2017. Textilindustrie - Stofffaser aus Brennnessel. [Online] 10. April 2017. [Zitat vom: 10. April 2017.] http://www.deutschlandfunk.de/textilindustrie-stofffaser-aus-brennnessel.676.de.html?dram:article_id=383529.

Schmehl, Meike, Hesse, Martina und Geldermann, Jutta. 2012. *Ökobilanzielle Bewertung von Biogasanlagen unter Berücksichtigung der niedersächsischen Verhältnisse.* Göttingen : s.n., 2012.

Schmid, Martin Alexander. 2013 . *Analyse und Optimierung innovativer Verfahrensketten zur Kaskadennutzung von Schnitt- und Rodungsholz aus Obstplantagen als biogener Festbrennstoff.* Bonn : s.n., 2013 .

Schmidt, E. und Damme, K. 2016. Zweinutzungshuhn – Testergebnisse aus Kitzingen und Weihenstephan. [Hrsg.] Universität Hohenheim. *Zweinutzungshuhn – Königsweg oder Sackgase. Tagungsband zur Fachtagung am 28. Juni 2016 in Hohenheim.* Hohenheim : s.n., 2016.

Schmidt, Thomas, et al. 2019. *Thünen Report 71. Lebensmittelabfälle in Deutschland – Baseline 2015 –.* [Hrsg.] Thünen-Institut. Braunschweig : s.n., 2019. S. 103.

Schmidtmeier, Dirk. 2017a. Fahrleistungen und Emissionen des Straßenverkehrs in Baden-Württemberg. *Statistisches Monatsheft Baden-Württemberg 9/2017.* September 2017a, S. 49-55.

Schmieder, Klaus und Küpfer, Christian. 2010. Landesweite Streuobsterhebung in Baden-Württemberg. *landinfo.* 2010, Bd. 2/2010, S. 7-12.

Schmitz, D. 2018. *Restholz und Sägenebenprodukte. Telefonat mit D. Schmitz, Sägewerk Schmitz, Wachtberg- Fritzdorf am 09. Juli 2018.* s.l. : Sägewerk Schmitz, 2018.

Schönthaler. 2017. *Hanfstein. Technisches Merkblatt 2017.* [Hrsg.] Schönthaler OHG. Eyrs, Italien : s.n., 2017.

Schönthaler, Werner . 2018a. Hanfanbau – Kosten-Erträge. [Online] 03. März 2018a.

Schönthaler, Werner. 2018. *Hanfstein. Auskunft per E-Mail am 11. August 2018.* 2018.

Schulte, Manfred. o. J.. miscanton Wandsysteme . [Online] o. J. [Zitat vom: 13. August 2018.] https://fonamis-gmbh.de/was-wir-machen/miscanton-wandsysteme/.

Schwarz, Kai-Uwe, Greef, Jörg Michael und Schnug, Ewald. 1993. Ertragsentwicklung, Energie- und CO2-Fixierung bei ein- bis dreijährigen Beständen von Miscanthus x giganteus. *Landbauforschung Völkenrode: wissenschaftliche Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft.* 1993, Bd. 43, S. 64-72.

Schweizer Tierschutz STS. 2014. *STS-Recherche - Leder und Tierschutz.* Basel : s.n., 2014. S. 12.

Schwinn, Vera. 2015. *Wiesengrasdämmstoffe von Biowert. Auskunft per Telefon am 16.09.2015.* 2015.

Searchinger, Tim, et al. 2008. Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land-Use Change. *Science.* 2008, Bd. 319.

Seintsch, B., et al. 2012. FFH-Impact: Teil 2: Auswirkung von FFH-Maßnahmenplanung auf Forstbetriebe. Arbeitsbericht des Instituts für Ökonomie der Forst- und Holzwirtschaft 2012/04. [Online] 2012. [Zitat vom: 25. Mai 2018.] https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/bitv/dn050975.pdf.

Senger, Marion. 2016. Von der Natur lernen: Zwischenfruchtmischungen zur Auflockerung der Fruchtfolge. [Online] 04.. August 2016. [Zitat vom: 04. Juli 2019.] https://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/2/nav/279/article/19644.html.

SermaX GmbH. 2018. Handgefertigtes Holzfahrrad aus Eschenholz. [Online] 2018. [Zitat vom: 30. Mai 2018.] https://www.dein-traumrad.de/holzfahrrad/.

SFM GmbH. 2015. Elektro-Lkw - Meyer Logistik zieht Bilanz. *Verkehrsrundschau.* [Online] 19.. Oktober 2015. [Zitat vom: 18.. Mai 2020.] https://www.verkehrsrundschau.de/nachrichten/elektro-lkw-meyer-logistik-zieht-bilanz-1709991.html.

Shepherd, Anita, et al. 2020. Projections of global and UK bioenergy potential from Miscanthus × giganteus—Feedstock yield, carbon cycling and electricity generation in the 21st century. *GCB Bioenergy.* 03.. März 2020, S. 287-305.

Šiaudinis, Gintaras, Liaudanskienė, Inga und Šlepetienė, Alvyra. 2017. Changes in soil carbon, nitrogen and sulphur content as influenced by liming and nitrogen fertilization of three energy crops. *Icelandic Agricultural Sciences.* 2017, Bd. 30, S. 43-50.

Siebler, Josef. 2013. Die Natur kehrt zurück. [Online] 2013. [Zitat vom: 28. Mai 2019.] www.bund-kreis-konstanz.de/fileadmin/bundgruppen/bcmskvkonstanz/Dokumente/Solarpark_Artikel_SW_Konstanz_4_2013.pdf.

Siemens. 2010. SIPAPER Reject Power. Produkt-Umweltdeklaration. [Online] 2010. [Zitat vom: 15. Februar 2017.] https://www.industry.siemens.com/datapool/industry/industrysolutions/paper/de/Produktumweltdeklaration-Reject-Power-de.pdf.

Simon, Ingrid. 2011. *Hähnchenmast im Blickpunkt.* [Hrsg.] Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen. 2011.

Simon, Sven. 2011. *Nachhaltige Stadt- und Regionalentwicklung - Nutzungspotenziale lokaler Energiequellen am Beispiel von zwei Gemeinden.* Konstanz : s.n., 2011. S. 188.

Simon, Sven und Szaguhn, Markus. 2017. *Monitor Energiewende Region Konstanz 2017.* Konstanz : s.n., 2017.

Simonis, Stefan. 2017. Earth Overshoot Day 2017. [Online] 2017. [Zitat vom: 21.. April 2020.] https://plattform-footprint.de/2017/08/earth-overshoot-day-2017/.

SNF Schweizerischer Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung. 2018. Ressource Holz. Nationales Forschungsprogramm NFP 66. Extraktion von Tanninen aus Rinden heimischer Nadelhölzer. [Online] 2018. [Zitat vom: 05. Juli 2018.] http://www.nfp66.ch/de/projekte/dialogfeld-3-neuwertige-materialien-und-verbundstoffe/projekt-pichelin.

So entsteht Qualitätspapier. **UPM. 2005.** s.l. : UPM-Kymmene, 2005. S. 64.

Sohmer, Vera. 2009. Molke: Weder Wundermittel noch Teufelswerk. [Online] 29. Januar 2009. [Zitat vom: 13. Februar 2019.] https://www.beobachter.ch/ernahrung-genuss/molke-weder-wundermittel-noch-teufelswerk.

solarcomplex. 2018. 2011: Solarpark Mooshof mit 4,5 MW Leistung die größte PV-Anlage am Bodensee. [Online] 2018. [Zitat vom: 07.. Februar 2020.] https://www.solarcomplex.de/energieanlagen/photovoltaik/pv-freiland/mooshof.html.

solarcomplex AG. 2018. Solarpark Bingen. [Online] 2018. [Zitat vom: 15. Mai 2019.] https://www.solarcomplex.de/energieanlagen/photovoltaik/pv-freiland/bingen.html.

—. 2018. Solarpark Mooshof. [Online] 2018. [Zitat vom: 28. Mai 2019.] https://www.solarcomplex.de/energieanlagen/photovoltaik/pv-freiland/mooshof.html.

Sommer, Wolfgang. 2006. Rapskuchen - ein hochwertiges Futtermittel. [Online] 10. 02. 2006. [Zitat vom: 09. März 2017.] https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/tierproduktion/schweinehaltung/fuetterung/rapskuchenfutter.htm.

Sperr, Reinhard. 2018a. Anbautrends Energiepflanzen: Miscanthus (Elefantengras) oder Sidapflanze? (Teil 2). [Online] 01. April 2018a. [Zitat vom: 12. Juni 2019.] https://www.energiepflanzen.com/anbautrends-energiepflanzen/.

—. o. J.. Broschüre Sidapflanze – Virginiamalve. [Online] o. J. [Zitat vom: 12. Januar 2017.] https://www.energiepflanzen.com/product/broschure-sidapflanze-virginiamalve/.

—. 2017. Sida im 9er Topf. [Online] 2017. [Zitat vom: 18. Juni 2019.] https://www.energiepflanzen.com/product/sida-im-9er-topf/.

—. 2018. Wissenswertes zu Paulownia. Paulownia, Blauglockenbaum, Kaiserbaum, Kiribaum. *energiepflanzen.com.* [Online] 20. Januar 2018. [Zitat vom: 21. August 2018.] https://www.energiepflanzen.com/encyclopedia/arten-und-namen-pauownia/.

SRU Sachverständigenrat für Umweltfragen. 2013. *Den Strommarkt der Zukunft gestalten. Eckpunktepapier Oktober 2013.* Berlin : s.n., 2013.

—. 2007. *Klimaschutz durch Biomasse. Sondergutachten Juli 2007.* Berlin : s.n., 2007.

SSB Holland. 2013. *Wie Hanftextilien hergestellt werden.* [Hrsg.] Sensi Seed Bank. Amsterdam : s.n., 18. Dezember 2013.

Staaks, Georg. 2018. *AW: Energiebedarf der IGB-Aquaponikanlage. Auskunft per E-Mail am 20.03.2018.* 20. 03 2018.

Stadt Wien. 2018. Weltweit höchstes Holzhaus nimmt Formen an. [Online] 2018. [Zitat vom: 24. 05 2018.] https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/projekte/aspern-seestadt/wohnen-arbeiten/holzhochhaus.html.

STARK Sustainable Products UG. 2018. Stark Bamboo Bike. FAQ. *Stark Bamboo Bike.* [Online] 2018. [Zitat vom: 01. Juni 2018.] http://www.starkbamboobike.com/faq.

Statista . 2019e. Produktion pflanzlicher Öle weltweit nach Art in den Jahren 2011/12 bis 2018/19 (in Millionen Tonnen). [Online] 2019e. [Zitat vom: 04. Juni 2019.] https://de.statista.com/statistik/daten/studie/28644/umfrage/erzeugung-pflanzlicher-oele-weltweit-seit-2000/.

Statista. 2019c. Anteil der Wärmepumpen im Neubau in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2017. [Online] 2019c. [Zitat vom: 22. August 2019.] https://de.statista.com/statistik/daten/studie/237364/umfrage/bedeutung-der-waermepumpen-im-neubau-in-deutschland/.

—. 2019d. Anteil von Bio-Lebensmitteln am Lebensmittelumsatz in Deutschland in den Jahren 2004 bis 2018. [Online] 2019d. [Zitat vom: 24. Oktober 2019.] https://de.statista.com/statistik/daten/studie/360581/umfrage/marktanteil-von-biolebensmitteln-in-deutschland/.

—. 2019h. Anzahl der unterernährten Menschen weltweit von 1990 bis 2017 (in Millionen). [Online] 2019h. [Zitat vom: 04. Juni 2019.] https://de.statista.com/statistik/daten/studie/38187/umfrage/anzahl-der-hungernden-weltweit/.

—. 2017b. Die beliebtesten Speisefische der Deutschen. [Online] 2017b. [Zitat vom: 16.. November 2020.] https://de.statista.com/infografik/10998/die-beliebtesten-speisefische-der-deutschen/.

—. 2019c. Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch der in Deutschland zugelassenen Pkw in den Jahren von 2007 bis 2017 (in Liter/100 Kilometer). [Online] 2019c. [Zitat vom: 13. Mai 2019.] https://de.statista.com/statistik/daten/studie/484054/umfrage/durchschnittsverbrauch-pkw-in-privaten-haushalten-in-deutschland/.

—. 2019g. Ertrag je Hektar Anbaufläche von Baumwolle weltweit nach ausgewählten Ländern in den Jahren 201/17 bis 2018/19. [Online] 29.. März 2019g. [Zitat vom: 17.. März 2020.] https://de.statista.com/statistik/daten/studie/444864/umfrage/ertrag-je-hektar-anbauflaeche-von-baumwolle-weltweit-nach-laendern/.

—. 2019a. Kennzahlen zum Spargelanbau in Deutschland mit vollständig ökologischer Bewirtschaftung in den Jahren 2016 und 2017. [Online] 2019a. [Zitat vom: 11. Januar 2019.] https://de.statista.com/statistik/daten/studie/545543/umfrage/spargelanbau-in-deutschland-mit-oekologischer-bewirtschaftung/.

—. 2019i. Ökologischer Fußabdruck: Anzahl der benötigten Erden, wenn die Weltbevölkerung wie die Bevölkerung der aufgeführten Länder leben würde (Stand 2019). [Online] 2019i. [Zitat vom: 27.. April 2020.] https://de.statista.com/statistik/daten/studie/588224/umfrage/oekologischer-fussabdruck-der-laender-mit-den-hoechsten-werten/.

—. 2019j. Pendler nach Entfernung zwischen Wohnung und Arbeitsstätte in den Jahren 1996 und 2012. [Online] 2019j. [Zitat vom: 15. Oktober 2019.] https://de.statista.com/statistik/daten/studie/70404/umfrage/pendler-nach-entfernung-zwischen-wohnung-und-arbeitsstaette/.

—. 2018b. Per capita consumption of plastic materials worldwide in 2015 by region (in kilograms). [Online] 2018b. [Zitat vom: 11. September 2018.] https://www.statista.com/statistics/270312/consumption-of-plastic-materials-per-capita-since-1980/.

—. 2018a. Produktion von Naturfasern weltweit nach Faserart im Jahr 2015* (in 1.000 Tonnen). [Online] 2018a. [Zitat vom: 30. Juni 2018.] https://de.statista.com/statistik/daten/studie/690177/umfrage/produktion-von-naturfasern-weltweit/.

—. 2018e. Produktionsgewicht von Körperpflegemitteln in Deutschland in den Jahren 2010 bis 2017 (in Tonnen). [Online] 2018e. [Zitat vom: 01. Oktober 2018.] https://de.statista.com/statistik/daten/studie/569749/umfrage/produktionsgewicht-von-koerperpflegemitteln-in-deutschland/.

—. 2020a. Pro-Kopf-Konsum von Nüssen und Schalenobst in Deutschland in den Jahren 2010/11 bis 2018/19*. [Online] 2020a. [Zitat vom: 16.. November 2020.] https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1090182/umfrage/pro-kopf-konsum-von-nuessen-und-schalenobst-in-deutschland/.

—. 2019k. Pro-Kopf-Konsum von Wein und Schaumwein in Deutschland in den Jahren 2008 bis 2018 (in Liter). [Online] 2019k. [Zitat vom: 13. August 2019.] https://de.statista.com/statistik/daten/studie/150008/umfrage/weinkonsum-pro-kopf-in-deutschland-seit-2003/.

—. 2019d. Selbstversorgungsgrad bei Gemüse in Deutschland in den Jahren 2002/03 bis 2017/18. [Online] 2019d. [Zitat vom: 29. April 2020.] https://de.statista.com/statistik/daten/studie/76634/umfrage/selbstversorgungsgrad-mit-gemuese-in-deutschland/.

—. 2019f. Sommer 2016 bis 2018 in Deutschland in Zahlen: Sonnenscheindauer, Niederschlagsmenge und Temperatur (und Vergleich zum Vorjahr). [Online] 2019f. [Zitat vom: 05. Juli 2019.] https://de.statista.com/statistik/daten/studie/208941/umfrage/sommer-in-deutschland-in-zahlen/.

—. 2018c. Verbrauch von Farben und Lacken in Deutschland in den Jahren 2001 bis 2016 (in 1.000 Tonnen). [Online] 2018c. [Zitat vom: 27. September 2018.] https://de.statista.com/statistik/daten/studie/245046/umfrage/verbrauch-von-farben-und-lacken-nach-produktgruppe-in-deutschland/.

—. 2018d. Verbrauch von Mineralöl nach Mineralölprodukten in Deutschland in den Jahren 2016 und 2017 (in Millionen Tonnen). [Online] 2018d. [Zitat vom: 27. September 2018.] https://de.statista.com/statistik/daten/studie/36559/umfrage/verbrauch-von-mineraloel-in-deutschland-seit-2008/.

—. 2019b. Verkaufsfläche im Einzelhandel in Deutschland in den Jahren 1970 bis 2017 (in Millionen Quadratmeter). [Online] 2019b. [Zitat vom: 30. April 2019.] https://de.statista.com/statistik/daten/studie/70202/umfrage/entwicklung-der-verkaufsflaeche-im-einzelhandel-in-deutschland-zeitreihe/.

—. 2017a. Zuckerertrag je Hektar Anbaufläche von Zuckerrüben in Deutschland in den Erntejahren 2009/10 bis 2015/16 (in Tonnen). [Online] 2017a. [Zitat vom: 29. August 2017.] https://de.statista.com/statistik/daten/studie/283528/umfrage/zuckerertrag-je-hektar-anbauflaeche-von-zuckerrueben-in-deutschland/.

Statistia. 2019d. Entwicklung des CO2-Emissionsfaktors für den Strommix in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2018 (in Gramm pro Kilowattstunde). [Online] 2019d. [Zitat vom: 08. Juli 2019.] https://de.statista.com/statistik/daten/studie/38897/umfrage/co2-emissionsfaktor-fuer-den-strommix-in-deutschland-seit-1990/.

Statistisches Bundesamt. 2017b. *Bauen und Wohnen. Baufertigstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden (Neubau) nach überwiegend verwendetem Baustoff. Lange Reihen ab 2000.* Wiesbaden : Statistisches Bundesamt (Destatis), 2017b. S. 101.

—. 2008. Erhebung über die Viehbestände. Qualitätsbericht. [Online] 2008. [Zitat vom: 30. Januar 2019.] https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Qualitaetsberichte/LandForstwirtschaft/Viehbestaende.pdf?__blob=publicationFile.

—. 2019. *Fachserie 3 - Reihe 3.2.1: Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Wachstum und Ernte - Baumobst 2018.* 2019.

—. 2011. *Fachserie 3 Reihe 3.2.1. Land- und Forstwirtschaft, Fischerei Wachstum und Ernte: Gemüse 2011.* [Hrsg.] Statistisches Bundesamt. Wiesbaden : s.n., 2011.

—. 2018. Feldfrüchte und Grünland: Ackerland nach Hauptfruchtgruppen und Fruchtarten. [Online] 2018. [Zitat vom: 06. Dezember 2018.] https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/FeldfruechteGruenland/Tabellen/AckerlandHauptfruchtgruppenFruchtarten.html#Fussnote5.

—. 2013. *Flächenbelegung von Ernährungsgütern.* Wiesbaden : s.n., 2013. S. 24.

—. 2019c. GENESIS-Datenbank: Ergebnis - 41331-0001. Geschlachtete Tiere, Schlachtmenge: Deutschland, Jahre, Tierarten, Schlachtungsart. [Online] 2019c. [Zitat vom: 01. Februar 2019.] https://www-genesis.destatis.de.

—. 2019b. GENESIS-Online Datenbank: Anbaufläche (Gemüse und Erdbeeren): Deutschland, Jahre, Gemüsearten auf dem Freiland. [Online] 2019b. [Zitat vom: 14. Januar 2019.] Anbaufläche (Gemüse und Erdbeeren): Deutschland, Jahre, Gemüsearten auf dem Freiland.

—. 2018a. GENESIS-Online Datenbank: Baufertigstellungen im Hochbau: Deutschland, Jahre, Bautätigkeiten, Gebäudeart/Bauherr. [Online] 2018a. [Zitat vom: 01. 06 2018.] www-genesis.destatis.de.

—. 2019e. GENESIS-Online Datenbank: Bevölkerung (ab 15 Jahren): Deutschland, Jahre, Geschlecht, Altersgruppen, Allgemeine Schulausbildung. Ergebnis - 12211-0040. [Online] 2019e. [Zitat vom: 11. Februar 2019.] https://www-genesis.destatis.de.

—. 2017a. GENESIS-Online Datenbank: Hektarerträge ausgewählter landwirtschaftlicher Feldfrüchte (Jahressumme) in den Regierungsbeziekren Freiburg, Tübingen und Stuttgart. *GENESIS-Online.* [Online] 20. Oktober 2017a. [Zitat vom: 20. Oktober 2017.] https://www-genesis.destatis.de.

—. 2017c. GENESIS-Online: Bodenfläche (tatsächliche Nutzung): Bundesländer, Stichtag 31.12.2015, Nutzungsarten. [Online] 2017c. [Zitat vom: 22.. Februar 2017.] https://www-genesis.destatis.de.

—. 2020. Haushalte und Haushaltsmitglieder für Deutschland, das frühere Bundesgebiet und die Neuen Länder einschließlich Berlin nach der Haushaltsgröße. [Online] 2020. [Zitat vom: 15. April 2020.] https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Haushalte-Familien/Tabellen/1-1-privathaushalte-haushaltsmitglieder.html.

—. 2018b. *Land- und Fachserie 3 Reihe 3.1.3: Land- und Forstwirtschaft, Fischerei - Gemüseerhebung - Anbau und Ernte von Gemüse und Erdbeeren 2017.* 2018b.

—. 2019a. Obst, Gemüse, Gartenbau. Ökologischer Landbau in Deutschland 2016 und 2017: Vollständig ökologisch bewirtschaftete Anbauflächen . [Online] 2019a. [Zitat vom: 11. Januar 2019.] https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFischerei/ObstGemueseGartenbau/Tabellen/OekologischesGemuese.html.

—. 2019d. Stromverbrauch. [Online] 2019d. [Zitat vom: 14. Mai 2019.] https://www-genesis.destatis.de.

—. 2019f. Stromverbrauch der privaten Haushalte nach Haushaltsgrößenklassen. [Online] 2019f. [Zitat vom: 27. August 2019.] https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Materialfluesse-Energiefluesse/Tabellen/stromverbrauch-haushalte.html.

—. 2019g. *Umweltökonomische Gesamtrechnungen. Flächenbelegung von Ernährungsgütern 2010 – 2017.* [Hrsg.] Statistisches Bundesamt (Destatis). Wiesbaden : s.n., 2019g. S. 29.

—. 2019h. Wohnungsbestand Ende 2018: 42,2 Millionen Wohnungen. Pressemitteilung Nr. 285 vom 29. Juli 2019. [Online] 2019h. [Zitat vom: 15.. April 2020.] https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2019/07/PD19_285_31231.html.

Statistisches Landesamt Baden-Württemberg. 2017b. Baumobstanbau in Baden-Württemberg seit 1977: Verkaufsanbau von Baumobst nach Anzahl der Betriebe, Bäume und Flächengröße. [Online] 2017b. [Zitat vom: 08. Januar 2019.] https://www.statistik-bw.de/Landwirtschaft/Bodennutzung/Baumobstanbau.jsp.

—. 2018a. Bautätigkeit. Wohnbau: Genehmigungen und Fertigstellungen. Baufertigstellungen im Wohnbau seit 1979. Land Baden-Württemberg. [Online] 2018a. [Zitat vom: 15. 05 2018.] https://www.statistik-bw.de/HandwBauwirtsch/Bautaetigkeit/07015111.tab?R=LA.

—. 2019a. Energiebilanz: Entwicklung des Endenergieverbrauchs (Stand: 22. Februar 2019). [Online] 2019a. [Zitat vom: 03. Juli 2019.] https://www.statistik-bw.de/Energie/Energiebilanz/LRt1004.jsp.

—. 2018f. Energieverbrauch der Industrie seit 2003. [Online] 2018f. [Zitat vom: 14. August 2019.] https://www.statistik-bw.de/Energie/ErzeugVerwend/EV-Industrie.jsp.

—. 2016. Ernteerträge in Baden-Württemberg 2016 - Vorläufige Ergebnisse. [Online] 2016. [Zitat vom: 10. Januar 2019.] https://www.statistik-bw.de/Service/Veroeff/Faltblatt/803816022.pdf#search=obstbau.

—. 2018d. Erträge im Baumobstbau: Erträge von Baumobst in Baden-Württemberg 2018. [Online] 2018d. [Zitat vom: 08. Januar 2019.] https://www.statistik-bw.de/Landwirtschaft/Ernte/Obsternte-M.jsp.

—. 2017a. Flächennutzung detailliert seit 2013 nach Nutzungsartenschlüssel. [Online] 2017a. [Zitat vom: 25. Mai 2018.] https://www.statistik-bw.de/BevoelkGebiet/GebietFlaeche/GB-FlNutzung-AdV.jsp.

—. 2018c. Hektarerträge der Feldfrüchte ab 2013: Land Baden-Württemberg. [Online] 2018c. [Zitat vom: 26. November 2018.] https://www.statistik-bw.de/Landwirtschaft/Ernte/0502301x.tab?R=LA.

—. 2018e. Obsternte im Baumobstbau: Entwicklung der Baumobsternte. Erntemengen von Baumobst in Baden-Württemberg seit 1991. [Online] 2018e. [Zitat vom: 08. Januar 2019.] https://www.statistik-bw.de/Landwirtschaft/Ernte/Obsternte-LR.jsp.

—. 2018b. Private Haushalte. Entwicklung und Struktur. Haushalteschätzung nach Haushaltsgröße. Private Wohnhaushalte nach Haushaltsgröße seit 2013. [Online] 2018b. [Zitat vom: 05. 15 2018.] https://www.statistik-bw.de/PrivHaushalte/EntwStruktur/99055010.tab?R=LA.

—. 2019d. Regionaldaten - Bevölkerung im Überblick. [Online] 2019d. https://www.statistik-bw.de/SRDB.

—. 2019c. Regionaldaten - Gebäude, Wohnungen und Belegungsdichte. [Online] 2019c. [Zitat vom: 22. August 2019.] https://www.statistik-bw.de/SRDB/.

—. 2019b. Regionaldaten - Jahresfahrleistungen im Straßenverkehr. [Online] 2019b. [Zitat vom: 29. August 2019.] https://www.statistik-bw.de/SRDB/.

STECF Scientific, Technical and Economic Committee for Fisheries. 2016. *The 2016 Annual Economic Report on the EU Fishing Fleet (STECF-16-11). 2016. Publications Office of the European Union, Luxembourg, EUR XXXX EN, JRC XXX, 470 pp.* 2016.

Steger, Jürgen. 2014. Kombinationsnutzung von Öllein - Innovative Vermarktungsmöglichkeiten Ölleinstroh und Leinfaser. [Online] 28. Januar 2014. [Zitat vom: 10. August 2018.] http://www.biomasse-freiberg.de/fileadmin/downloads/PROJEKT_NAWARO/%C3%96llein-Fachveranstaltung/06_2014_01_28_Steger_Innovative_Vermarktungsm%C3%B6glichkeiten.pdf.

Steinbeis Papier GmbH. 2017. Herstellung. Modernste Recyclingpapierfabrik Europas. Schont Umwelt und Ressourcen. [Online] 2017. [Zitat vom: 06. 05 2017.] http://www.steinbeis-papier.de/herstellung/.

Steinbuch, Yaron. 2016. This car is made out of cannabis hemp. *New York Post.* [Online] 06. Mai 2016. [Zitat vom: 30. Mai 2018.] https://nypost.com/2016/05/06/this-car-is-made-out-of-cannabis-hemp/.

Sticksel, Ewald, et al. 2018. *Wintergetreide - Ganzpflanzensilage als Biogassubstrat.* [Hrsg.] Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. Freising : s.n., 2018.

Stiftung Unternehmen Wald. 2018. Wie viel Kohlendioxid (CO2) speichert der Wald bzw. ein Baum. [Online] 2018. [Zitat vom: 23. 05 2018.] https://www.wald.de/wie-viel-kohlendioxid-co2-speichert-der-wald-bzw-ein-baum/.

Stimm, B., et al. 2013. Paulownia – Hoffnungsträger aus Fernost? Eine schnellwachsende Baumart aus China in Bayern auf dem Prüfstand. *LWF aktuell 96.* 2013, S. 18-21.

StMWi. 2019. Energie-Atlas Bayern - Daten und Fakten - Windenergie im Vergleich. [Online] 2019. [Zitat vom: 15. Mai 2019.] https://www.energieatlas.bayern.de/thema_wind/daten.html.

Stölken, Bodo, Michel, Volker und Pienz, Gabriele. 2007. Bioenergie aus der Landwirtschaft - eine neue Herausforderung an das regionale Sortenwesen. Teil III: Getreide für die Ethanolproduktion. [Hrsg.] Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern. *Beiträge zum Sorten- und Versuchswesen und zur Biostatistik.* Gülzow : s.n., 2007, S. 53-59.

Stolzenburg, K. 2009. Miscanthusforschung in Baden-Württemberg. [Online] 2009. [Zitat vom: 10. April 2017.] http://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/rohstoffpflanzen/dateien/stolzenburg_miscanthusforschung_bw.pdf.

Strahl, Janet. 2006. Das Schwäbisch-Hällische Schwein - Ein Star unter den Landschweinrassen. [Online] 2006. [Zitat vom: 12. Februar 2019.] https://provieh.de/node/10362.

Straub, Theo. 2012. Laubholz – Försterhobby oder wirtschaftliche Pflichtübung? *Clusterinitiative Forst und Holz Baden-Württemberg.* [Online] 10. 07 2012. [Zitat vom: 20. Juli 2018.] http://www.cluster-forstholz-bw.de/fileadmin/cluster/cluster_pdf/Sondersortimente/Straub%20-%20Pr%C3%A4sSondersortimente20120710.pdf.

STWGD. 2019b. Solarpark Deponie Gügling. [Online] 2019b. [Zitat vom: 15. Mai 2019.] https://www.stwgd.de/solarpark-deponie-guegling.html.

—. 2019. Solarstatistiken Mutlanger Heide. [Online] 2019. [Zitat vom: 16. Mai 2019.] https://www.stwgd.de/solarstatistik-mutlanger-heide.html.

Süd-Treber GmbH. 2018. Maiskleberfutter. [Online] 2018. [Zitat vom: 02. Mai 2018.] https://suedtreber.de/produkte/maiskleberfutter/.

Südzucker AG. 2017a. FAQ Rohstoff Rübe. [Online] 2017a. [Zitat vom: 29. August 2017.] http://www.suedzucker.de/de/FAQ/Rohstoff-Ruebe/?skin=Screen.

—. 2017b. FAQ Zuckerrübe/Zuckerrohr. [Online] 2017b. [Zitat vom: 29. August 2017.] http://www.suedzucker.de/de/FAQ/Zuckerruebe-Zuckerrohr/.

Sun Sirius GmbH. 2018. BMI- Rechner.net. [Online] 2018. https://www.bmi-rechner.net.

Sutor, Peter und Riester, Richard. 2013. Kartoffeln. Stand 27.05.2013. [Hrsg.] Landesanstalt für Entwicklung der Landwirtschaft und der Ländlichen Räume (LEL) und Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). *Agrarmärkte 2013.* 2013, S. 73-92.

Sutter, Michael, Nemecek, Thomas und Thomet, Peter. 2013. Vergleich der Ökobilanzen von stall- und weidebasierter Milchproduktion. *Agrarforschung Schweiz.* 2013, 4, S. 230-237.

Tecnaro. 2018a. ARBOBLEND, ARBOFILL, ARBOFORM. [Online] 2018a. [Zitat vom: 13. September 2018.] http://tecnaro.de/de/arboblendr-arbofillr-arboformr.html.

—. 2018b. Materialeigenschaften. [Online] 2018b. [Zitat vom: 13. September 2018.] http://tecnaro.de/de/arboblendr-arbofillr-arboformr/eigenschaften.html.

ter Veld, Frank. 2012. Beyond the Fossil Fuel Era: On the Feasibility of Sustainable Electricity Generation Using Biogas from Microalgae. [Hrsg.] American Chemical Society. *Energy Fuels.* 2012, Bd. 26 (6), S. 3882–3890.

—. o. J.. Forschungsergebnisse zur Herstellung von Biogas aus Algen. *BiomassMuse.* [Online] o. J. [Zitat vom: 19. Oktober 2018.] https://www.biomasse-nutzung.de/biogas-algen-forschung/.

Terlau, Wiltrud, Fuchshofen, Nicolas und Klement, Johannes. 2017. *Vergleichende Ökobilanz von holzbasiertem Zellstoff, Altpapierstoff und grasbasiertem Zellstoff in der deutschen Papierproduktion - Executive Summary -.* [Hrsg.] CREAPAPER GmbH. 2017.

Tetra Pak International S.A. 2019. Filtrationsverfahren für Milchprodukte. [Online] 2019. [Zitat vom: 13. Februar 2019.] https://www.tetrapak.com/de/processing/membrane-filtration/filtration-processes.

TFZ. 2007. Anbauhinweise Buchweizen. [Online] 2007. [Zitat vom: 04. Juli 2019.] http://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/rohstoffpflanzen/dateien/pfl_anbau_buchweizen.pdf.

TFZ Bayern. 2018. Durchschnittlicher Holzzuwachs in Bayern. [Online] Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, 2018. [Zitat vom: 20. 07 2018.] http://www.tfz.bayern.de/festbrennstoffe/brennstoffe/035110/index.php.

—. 2008. Heizwerttabellen für verschiedene Halmgutbrennstoffe. [Online] 2008. [Zitat vom: 30. November 2018.] http://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/festbrennstoffe/dateien/heizwerttabellen_halmgutbrennstoffe.pdf.

—. 2017. Sida: Anbautelegramm. [Online] 2017. [Zitat vom: 12. Januar 2017.] http://www.tfz.bayern.de.

The World Bank. 2018. Population, total. [Online] 2018. [Zitat vom: 30. 04 2018.] https://data.worldbank.org/indicator/SP.POP.TOTL.

—. 2013. *Turn down the heat - climate extremes, regional impacts, and the case for resilience.* Washington DC : s.n., 2013.

—. 2014. *Turn down the heat : confronting the new climate normal (Vol. 2): Main report.* Washington DC : s.n., 2014. S. 276.

Thobe, Petra. 2018. *Steckbriefe zurTierhaltung in Deutschland: Mastgeflüge.* [Hrsg.] Johann Heinrich von Thünen-Institut. Braunschweig : s.n., 2018. S. 15.

Thomet, P., Stettler, M. und Weiß, D. 2008. Methode zur Berechnung der Flächenleistung Milch. [Online] 2008. [Zitat vom: 29. Januar 2019.] https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/aggf_2008_thomet_et_al_2.pdf.

Thrän, Daniela, et al. 2016. Nebenprodukte, Rückstände und Abfälle. [Hrsg.] Martin Kaltschmitt, Hans Hartmann und Hermann Hofbauer. *Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren.* Berlin Heidelberg : Springer Vieweg, 2016, 6, S. 1867.

Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. 2009a. Anbautelegramm Faserlein (Linum usitatissimum L.). [Online] 2009a. [Zitat vom: 10. März 2017.] http://www.tll.de/www/daten/publikationen/anbautelegramm/lein0809.pdf.

—. 2009b. Anbautelegramm Fasernessel. [Online] 2009b. [Zitat vom: 10. März 2017.] http://www.tll.de/www/daten/publikationen/anbautelegramm/ness0809.pdf.

—. 2016b. *Anbautelegramm Hanf zur Fasernutzung (Cannabis sativa L.).* [Hrsg.] Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL). Jena : s.n., 2016b.

—. 2016a. Anbautelegramm Sommeröllein. [Online] 2016a.

—. 2008. Anbautelegramm Sorghum bicolor. [Online] 2008. [Zitat vom: 28. März 2017.] http://www.tll.de/www/daten/publikationen/anbautelegramm/at_hirse.pdf.

—. 2005. *Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Faserhanf.* Jena : s.n., 2005.

—. 2014. *Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Sojabohnen.* [Hrsg.] Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL). Jena : s.n., 2014.

—. 2010. *Regionale Biomassepotenziale zur energetischen Nutzung im Freistaat Thüringen.* Jena : s.n., 2010.

TK. 2017. Wie viele Kalorien brauchen wir? [Online] 30. 08. 2017. [Zitat vom: 30. Oktober 2018.] https://www.tk.de/techniker/gesund-leben/ernaehrung/uebergewicht-und-diaet/wie-viele-kalorien-pro-tag-2006758.

top agrar. 2009. 8.000 kg Milch - ohne Kraftfutter. [Online] 18. Februar 2009. [Zitat vom: 20. Januar 2019.] https://www.topagrar.com/rind/news/rind-news-8-000-kg-milch-ohne-kraftfutter-9360934.html.

top agrar online. 2015. Dinkel: Hohe Erträge mit intensivem Anbau. [Online] 2015. [Zitat vom: 26. November 2018.] https://www.topagrar.com/suedplus/aus-dem-heft/dinkel-hohe-ertraege-mit-intensivem-anbau-9655475.html.

Töpfer, Christoph. 2014. Bienenweidepflanzen. [Online] 2014. http://www.imkerpate.de/bienenweidepflanzen/.

Touraev, Alisher, Unterköfler, Herbert und Pachler, Roland. 2012. *ARGE PAULOWNIA. Paulownia in Mitteleuropa. Projektgebiet Burgenland.* 2012.

Trouw Nutrition Deutschland GmbH. o. J.. *Vollmilch vs. Milchaustauscher in der Kälberaufzucht: Eine lebhafte Debatte.* Burgheim : s.n., o. J. S. 27.

Tukker, Arnold, et al. 2014. *The Global Resource Footprint of Nations: Carbon, water, land and materials embodied in trade and final consumption.* 2014.

TVG. 2018. Kartoffelpülpe. [Online] 2018. [Zitat vom: 02. Mai 2018.] https://www.biertreber.de/produkte/kartoffelpuelpe/.

UM Baden-Württemberg. 2014. *Integiertes Energie- und Klimaschutzkonzept Baden-Württemberg (IEKK).* [Hrsg.] Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Ministerium für Umwelt. Stuttgart : s.n., 2014.

Umweltbundesamt. 2011. *Daten zur Umwelt 2011.* Dessau-Roßlau : s.n., 2011. S. 98.

—. 2017. *Daten zur Umwelt 2017 - Indikatorenbericht.* Dessau-Roßlau : s.n., 2017.

—. 2016. Endenergieverbrauch und Energieeffizienz des Verkehrs. *umweltbundesamt.de.* [Online] 2016. [Zitat vom: 20. 03 2018.] https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/4_abb_spezif-energieverbrauch-gv_2017-04-06.pdf.

—. 2012. *Energieeffizienzdaten für den Klimaschutz.* Dessau-Roßlau : s.n., 2012.

—. 2020. *Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid- Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2019.* Dessau-Roßlau : s.n., 2020.

—. 2018. Entwicklung des spezifischen Energieverbrauchs im Güterverkehr. [Online] 10. Oktober 2018. [Zitat vom: 14. Mai 2019.] https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/4_abb_spezif-energieverbrauch-gv_2018-10-10.pdf.

—. 2018b. Fakten zur Nitratbelastung in Grund- und Trinkwasser. [Online] 11. Mai 2018b. [Zitat vom: 02. Juli 2019.] https://www.umweltbundesamt.de/themen/fakten-zur-nitratbelastung-in-grund-trinkwasser.

—. 2011. Gefahren durch extreme Niederschläge werden ab 2040 deutlich zunehmen. Presseinformation Nr. 09/2011. Gemeinsame Presseinformation mit BBK, DWD und THW. [Online] 2011.

—. 2016a. Landwirtschaft: Bodenbelastungen › Erosion. [Online] 15.. März 2016a. [Zitat vom: 04. Juli 2019.] https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/bodenbelastungen/erosion#textpart-5.

Umweltbundesamt Österreich. 2012. *Ökobilanzen ausgewählter Biotreibstoffe. REP-0360.* Wien : s.n., 2012.

—. 2016a. Verkehr. Energieeffiziente Mobilität. [Online] 2016a. [Zitat vom: 25. September 2016.] www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/energie/effizienz/effizienzverkehr/.

Umweltbundesamt. 2018. Private Haushalte und Konsum › Wohnen › Wohnfläche. [Online] 27. 07. 2018. [Zitat vom: 25. Oktober 2018.] https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/wohnflaeche#textpart-1.

—. 2015. Wasch- und Reinigungsmittel. [Online] 22. 09 2015. [Zitat vom: 27. September 2018.] https://www.umweltbundesamt.de/themen/chemikalien/wasch-reinigungsmittel.

—. 2016. Wohnfläche. [Online] 01. 06 2016. [Zitat vom: 23. 05 2018.] https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/wohnflaeche#textpart-3.

UNEP. 2016. *GEO-6: Global Environment Outlook - Regional Assessment for Africa.* [Hrsg.] United Nations Environment Programme (UNEP). Nairobi : s.n., 2016. S. 206.

—. 2011. Land resources in Africa. [Hrsg.] Environmental Information Coalition und National Council for Science and the Environment. *Encyclopedia of Earth.* Washington D.C. : s.n., 2011.

Universität Hohenheim. 2016. Linsenforschung in Hohenheim: Doppelpack für sichere Erträge, leichtere Ernte, höhere Qualität. Pressemitteilung vom 30.06.2016. [Online] 30. Juni 2016. [Zitat vom: 28. November 2018.] https://www.uni-hohenheim.de/pressemitteilung?&tx_ttnews[tt_news]=32569&cHash=5d7df4cf2d.

Unseld, Rüdiger. 2013. *Anpassungsstrategie an die Folgen des Klimawandels. Fachgutachten Wald und Forstwirtschaft. Teil A:.* [Hrsg.] Ministerium für Umwelt Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. 2013.

UPARTMENTS RE. 2018. Woodie Hamburg. Woodie lebt auf kleinem Fuss - und schont unsere Umwelt. [Online] UPARTMENTS Real Estate GmbH, 2018. [Zitat vom: 08. 05 2018.] http://woodie.hamburg/de/holz/.

Urban Farmers AG. 2018b. UF de Schilde - The "Times Square of Urban Farming". *urbanfarmers.com.* [Online] UrbanFarmers AG, 2018b. [Zitat vom: 04. 04 2017.] https://urbanfarmers.com/projects/the-hague/.

—. o. J.. *UF Rooftop farm brochure.* Zürich : s.n., o. J.

—. 2018c. UF Rooftop Farms: Redefining ultra local, ultra fresh. [Online] 2018c. [Zitat vom: 08.. März 2018.] https://urbanfarmers.com/productsservices/farm/.

—. 2018a. UF001 LokDepot - The first commercial aquaponic rooftop farm worldwide. [Online] UrbanFarmers AG, 2018a. [Zitat vom: 04. 04 2018.] https://urbanfarmers.com/projects/basel/.

Urselmans, Stefanie, Damme, Klaus und Schmidt, Eggert. 2015. Leistungsprüfung von Zweinutzungshühnern. [Online] 2015. [Zitat vom: 12. Juni 2018.] https://www.lfl.bayern.de/lvfz/kitzingen/107553/index.php.

Ust'ak, Sergej. 2008. *Anbau und Verwertungsmöglichkeiten von Sida hermaphrodita in der Tschechischen Republik. Praxisempfehlungen. Veröffentlicht im März 2013.* 2008.

Utzenstorf Papier. 2013. Umweltbericht 2013. [Hrsg.] Unternehmensführung Utzenstorf Papier. 2013, S. 15.

Vattenfall GmbH. 2016. Fisch und Gemüse von digitalen Stadtfarmern. Von Nicolas Leschke, 10.08.2016. [Online] 2016. [Zitat vom: 17.. April 2018.] https://group.vattenfall.com/de/newsroom/blog-news-presse/blog/2016/august/aquaponik-digitale-stadtfarmer.

VBH. o. J.. Durchschnittliche Ertragsmenge nach Pflanzjahr (mit ca. 600 Bäume pro ha). [Online] o. J. [Zitat vom: 13. Dezember 2018.] http://www.haselnussanbau-verein.de/mediapool/71/714618/data/Ertragsmenge_nach_Pflanzjahr_1_.pdf.

—. o. J. a. Plantage-Arbeiten. [Online] o. J. a. [Zitat vom: 21. Juni 2019.] http://www.haselnussanbau-verein.de/plantage-arbeiten.html.

VCD. 2020. Wasserstoff, E-Auto oder E-Fuels: Warum das E-Auto die beste Alternative ist. [Online] 2020. [Zitat vom: 04.. Mai 2020.] https://www.vcd.org/service/presse/pressemitteilungen/wasserstoff-e-auto-oder-e-fuels-warum-das-e-auto-die-beste-alternative-ist/.

VDGS. 2017. Zahlen & Daten zur deutschen Stärkeindustrie. [Online] 2017. [Zitat vom: 12. April 2017.] http://www.staerkeverband.de/html/zahlen.html.

VDI. 2015. Algen entpuppen sich als hervorragender Straßenasphalt. [Online] 18. 05. 2015. [Zitat vom: 02. Oktober 2018.] https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/verfahrenstechnik/algen-entpuppen-hervorragender-strassenasphalt/.

VDM. 2008. Nutzungsdauer von Möbeln in Deutschland. [Online] 16. September 2008. [Zitat vom: 28. 05 2018.] http://www.moebelindustrie.de/presse/index.html?NID=237.

—. 2018. Trendtext des Verbandes der Deutschen Möbelindustrie. Das Zuhause wird behütet, gestaltet und geliebt. Digitalisierung findet im Kerzenschein statt. Naturverbundene Möbel kommen. [Online] 10. Januar 2018. [Zitat vom: 28. Mai 2018.] http://www.moebelindustrie.de/presse/index.html?NID=2216.

VDM Verband Deutscher Mühlen. 2014. *Position. EEG-Reform muss Stromkosten für alle Mühlen begrenzen – Abwanderung ganzer Prozessketten droht.* Berlin, 12. Februar 2014 : s.n., 2014.

VDM. 2003. Wie lange Möbel "leben". [Online] 15. Dezember 2003. http://www.moebelindustrie.de/presse/index.html?NID=93.

—. 2017. *Wirtschaft kompakt. Ausgabe 02/2017.* Bad Honnef : Verband der Deutschen Möbelindustrie e.V.,, 2017. S. 5.

VDP. 2015a. Papier ABC. [Online] November 2015, 2015a. [Zitat vom: 30. 04 2018.] https://www.vdp-online.de/fileadmin/Datensammlungen/Publikationen/Papier_ABC.pdf.

—. 2015b. Papiermachen. Vom Stoffauflauf zum Papier. Der Herstellungsprozess zum Aufklappen (Faltblatt). [Online] 2015b. [Zitat vom: 02. 05 2017.] https://www.vdp-online.de/fileadmin/Datensammlungen/Publikationen/Papiermachen.pdf.

—. 2016. *Statistik. Lange Reihe aus Papier 2015.* [Hrsg.] Verband Deutscher Papierfabriken e.V. 2016.

VEBU. 2017b. Vegane Ernährungspyramide. [Online] 2017b. [Zitat vom: 24.. November 2017.] https://vebu.de/fitness-gesundheit/ernaehrungspyramide/vegane-ernaehrungspyramide/.

—. 2017a. Vegetarische Ernährungspyramide. [Online] 2017a. [Zitat vom: 24.. November 2017.] https://vebu.de/fitness-gesundheit/ernaehrungspyramide/vegetarische-ernaehrungspyramide/.

Velik, Margit. 2010. Mutterkuhhaltung: Jungrinderproduktion am Beispiel Schule Hohenlehen. [Hrsg.] Landwirt.com GmbH. *Landwirt.* 2010, 16, S. 16-17.

Verband der Deutschen Lederindustrie e. V. . 2019. Informationen zur Lederbranche. [Online] 2019. [Zitat vom: 31. Januar 2019.] https://vdl-web.de/leder-infos/.

Verband Region Stuttgart. 2016/2018. *Sachstand Teilfortschreibung Windkraft:Landschaftsschutzgebiete. Anlage 1 zur Sitzungsvorlage Nr. 309/2018. Planungsausschuss am 07.11.2018.* Stuttgart : Verband Region Stuttgart, 2016/2018.

Verbraucherzentrale Bayern. 2015. Ausgangsmaterialien von Kerzen. [Online] 2015.

Verhoeven, Anne, Hoppe, Sebastian und Pries, Martin. 2018. Optimierung der Weide- und Tierleistung bei begrenzter Weidefläche. [Online] 18. Mai 2018. [Zitat vom: 28. Januar 2019.] https://www.oekolandbau.nrw.de/fachinfo/tierhaltung/rinder/2018/optimierung-der-weide-und-tierleistung-bei-begrenzter-weideflaeche/.

Verschnitt. 2018. Verschnitt. Die Idee. [Online] 2018. [Zitat vom: 06. Februar 2018.] http://www.verschnitt.com/about-us/.

Vetter, Armin, Heiermann, Monika und Toews, Thore, [Hrsg.]. 2009. *Anbausysteme für Energiepflanzen.* Frankfurt am Main : DLG-Verlags-GmbH, 2009.

VHD. 2018. Holzfaserdämmstoffe. Herstellung. [Online] 2018. [Zitat vom: 03. Juni 2018.] http://www.holzfaser.org/holzfaserdaemmstoffe/herstellung.php.

VIER PFOTEN Österreich. 2017. Lebenswewartung von Schweinen. [Online] 19. Oktober 2017. [Zitat vom: 22. März 2019.] https://www.vier-pfoten.at/kampagnen-themen/themen/nutztiere/lebenserwartung-bei-schweinen.

VOL.AT. 2011. Sozialzentrum ging auf große Fahrt. Artikel vom 20.10.2011. [Online] 2011. [Zitat vom: 08. 05 2018.] http://www.vol.at/sozialzentrum-ging-auf-grosse-fahrt/3060374.

Vollrath, Birgit und Kuhn, Werner. o. J.. Neu: Wildpflanzen geben Biogas. [Hrsg.] Fachverband Biogas e.V. *BIOGAS Journal | Sonderheft Energiepflanzen.* o. J., S. 30-33.

Vollrath, Birgit und Marzini, Kornelia. 2016. Mehr Vielfalt und rentable Biogasproduktion - mit den richtigen Blühmischungen ist beides möglich. *BIOGAS Journal | Sonderheft Energiepflanzen 2016.* April 2016, S. 6-10.

von Beesten, Fabian. o. J.. Soja in der Kulturlandschaft. [Online] o. J. [Zitat vom: 09. Oktober 2018.] https://www.sojafoerderring.de/links-mehr/soja-in-der-kulturlandschaft/.

von der Ohe, Werner und von der Ohe, Katharina. 1998. Rapshonig. [Online] 1998. [Zitat vom: 18. Juni 2019.] https://www.laves.niedersachsen.de/download/40994/Rapshonig.pdf.

von Gleich, Arnim. 1990. *Flachsanbau und Leinenverarbeitung, Neue Perspektiven für eine alte Kulturpflanze und Industrie im Rahmen einer Konzeption eigenständiger Regionalentwicklung für das Bergische Land.* Freiburg : s.n., 1990.

Wakamiya, Atsuko. 2011. Wie viel Fläche braucht ein Mensch um sich zu ernähren? *landinfo.* 2011, Bd. 7, S. 44-46.

Walker, Hans-Sepp. 2011. Beurteilungskriterien für Walnüsse. [Online] 24. 11 2011. [Zitat vom: 12. September 2017.] http://walwal.ch/wp-content/uploads/Beurteilungskriterien-f%C3%BCrN%C3%BCsse.pdf.

Walnussveredlung Biebelnheim. 2018a. *Walnussertrag ökologisch und konventionell. Auskunft durch Helga Lindemann per E-Mail am 11.12.2018.* 2018a.

—. 2018. Walnussveredlung: Anbauhinweise. [Online] 12. Oktober 2018. https://www.walnussveredlung.de/html/anbauhinweise.html.

Wangler, Anke, et al. 2009. Lebensleistung und Nutzungsdauer von Milchkühen aus der Sicht einer effizienten Milchproduktion. *Züchtungskunde.* 2009, Bd. 81 (5), S. 341–360.

WBI. o. J.. Steckbrief Echte Walnuss. *walnussbaum.info.* [Online] o. J. [Zitat vom: 13. September 2017.] www.walnussbaum.info.

Weimar, Holger. 2016. *Holzbilanzen 2013 bis 2015 für die Bundesrepublik Deutschland. Thünen Working Paper 57.* [Hrsg.] Thünen-Institut für Internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie. Hamburg : s.n., 2016. S. 25.

Weingut Weber. 2018a. Walnuss: Walnussanbau. [Online] 2018a. [Zitat vom: 24. Oktober 2018.] https://www.weingut-weber.com/walnuss.

—. 2018. Walnussmagazin. [Online] 16. 10. 2018. [Zitat vom: 24. Oktober 2018.] https://issuu.com/weingutundrestaurantweber/docs/walnussmagazin-web-einzelseiten.

Weiss, Annika. 2011. Energie- und Rohstofferzeugung mit Mikroalgen. Vortrag auf der Ökobilanz-Werkstatt 2011 - RWTH Aachen, 20.09. - 22.9.2011. Vortragsfolien. [Online] 2011. [Zitat vom: 04. Oktober 2018.] http://www.itas.kit.edu/pub/v/2011/weis11a.pdf.

Weiß, Jürgen. o. J.. Grundfutterleistung einheitlich berechnen. [Online] o. J. [Zitat vom: 22. Januar 2019.] https://www.dlg.org/fileadmin/downloads/fachinfos/futtermittel/grundfutter.pdf.

Weißmann, F., et al. 2006. *Mitteilungsblatt der Fleischforschung Kulmbach 45, Nr. 174.* 2006, S. 229-236.

Weißmann, F., et al. 2009. Alt oder Neu - Welche Rassen passen für die Ökologische Schweinefleischerzeugung. [Hrsg.] Gerold Rahmann. *Ressortforschung für den Ökologischen Landbau 2009.* Wulmenau/Braunschweig : s.n., 2009, S. 13-19.

Werner & Mertz. 2018a. Nachhaltige Ressource: Bio-Alkohol der zweiten Generation. [Online] 2018a. [Zitat vom: 19. Oktober 2018.] https://ganzheitlich-nachhaltig.de/Ressourcen-schonen/Bio-Alkohol-aus-Stroh/.

—. 2018. Ressourcen schonen - Tenside aus heimischen Pflanzen. [Online] 2018. [Zitat vom: 01. Oktober 2018.] https://ganzheitlich-nachhaltig.de/Ressourcen-schonen/Tenside-aus-heimischen-Pflanzen/.

Wichert, Frank. 2012. Mitgefangen, mitgehangen - Beifang und Rückwurf in der Fischerei. [Online] 2012. [Zitat vom: 22. November 2018.] https://reset.org/knowledge/mitgefangen-mitgehangen-beifang-und-rueckwurf-der-fischerei.

Willms, Matthias, et al. 2019. *Energiepflanzenanbau – Wirkungen auf Humusbilanz und Stickstoffhaushalt.* 2019.

Wind, G. und Heschl, C. 2008. Graue Energie - ein wesentlicher Faktor zur Energieoptimierung. [Online] 21. 11 2008. [Zitat vom: 25. Mai 2018.] http://www.ibwind.at/download/GraueEnergie081121.pdf.

WIS Wiley Information Services GmbH. o. J.. Aquaponik. Die Aquakultur - Zucht von Tilapien. *chemgapedia.de.* [Online] o. J. [Zitat vom: 21. 02 2018.] http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/26/igb/aquaponik/aquaponik.vlu/Page/vsc/de/ch/26/igb/aquaponik/aquaponik_tilapien.vscml.html.

Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik. 2007. *Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung - Empfehlungen an die Politik Gutachten des Beirats für Agrarpolitik, November 2007.* [Hrsg.] Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Bundesministerium für Ernährung. 2007. S. 242.

Woitowitz, Axel. 2007. *Auswirkungen einer Einschränkung des Verzehrs von Lebensmitteln tierischer Herkunft auf ausgewählte Nachhaltigkeitsindikatoren – dargestellt am Beispiel konventioneller und ökologischer Wirtschaftsweise. Dissertation, Technische Universität München.* 2007.

Woodbike 46. 2018. Woodbike 46. [Online] 2018. [Zitat vom: 06. Juni 2018.] http://www.woodbike46.de/qunda.html.

World Health Organisation. 2018. Global Health Observatory data repository: Prevalence of insufficient physical activity among adults Data by country. Last updated: 2018-11-05. [Online] 2018. [Zitat vom: 13.. November 2020.] https://apps.who.int/gho/data/view.main.2463?lang=en.

Wörther, Manuela. 2013. Herstellung von Parmesan. [Online] 17. 02. 2013. [Zitat vom: 12. Oktober 2017.] http://www.parmesan-parmigiano.de/herstellung-von-parmesan/.

Woschitz Group. 2018. HoHo Wien – Holzhochhaus. [Online] 2018. [Zitat vom: 24. 05 2018.] http://www.woschitzgroup.com/projekte/hoho-wien-holzhochhaus/.

WWF Deutschland. 2015. *Das große Wegschmeißen. Vom Acker bis zum Verbraucher: Ausmaß und Umwelteffekte der Lebensmittelverschwendung in Deutschland.* [Hrsg.] WWF Deutschland. 2015.

—. 2017. *Kleine Makel grosse Folgen - Nahrungsmittelverschwendung am Beispiel Kartoffel.* [Hrsg.] WWF Deutschland. 2017. S. 61.

WWF. 2020. Unser täglich Brot: Von überschüssigen Brotkanten und wachsenden Brotbergen. [Online] 2020. [Zitat vom: 13.. November 2020.] https://www.wwf.de/themen-projekte/landwirtschaft/ernaehrung-konsum/lebensmittelverschwendung/unser-taeglich-brot.

Yazio GmbH. 2017-2019. Kalorientabelle.net - Kalorientabelle und Nährwerttabelle für Lebensmittel. [Online] 2017-2019. http://www.kalorientabelle.net.

—. 2019. Kalorientabelle: Magermilchpulver . [Online] 2019. [Zitat vom: 21. Februar 2019.] https://www.yazio.com/de/kalorientabelle/magermilchpulver.html.

Zeidler, Conrad und Schubert, Daniel. 2014. Vertical Farming: Ein Lösungsansatz für die nachhaltige Stadt von Morgen? *Sonnenenergie.* 2014, 2|2014 April-Mai, S. 20-22.

ZFarm, Forschungsverbund. 2011. Berlin – für ZFarming bestens geeignet. [Online] 2011. [Zitat vom: 28. 02 2018.] http://www.zalf.de/htmlsites/zfarm/Seiten/projekt1_5.html.

Zhao, Chuang, et al. 2017. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *PNAS.* 29.. August 2017, Bd. 114, S. 9326-9331.

Zimmer, Bernhard. 2007. Holz als Energieträger zu Hause: Entscheidungswege und Erfahrungen (Vortragsfolien). [Online] 2007. [Zitat vom: 13. Juni 2019.] https://www.fh-salzburg.ac.at/fileadmin/fh/forschung/holz-biogene-tech/documents/Publikationen/2007-Vortrag_Zimmer.pdf.

Zimmermann, Lothar, et al. 2008. Wasserverbrauch von Wäldern. [Hrsg.] Olaf Schmidt und Joachim Hamberger. *LWF aktuell 66 - Wald und Wasser.* Freising : s.n., 2008, S. 16-20.

Zukunftsstiftung Landwirtschaft. 2020. Themen des Weltagrarberichts: Bäuerliche und industrielle Landwirtschaft. [Online] 2020. [Zitat vom: 13.. November 2020.] https://www.weltagrarbericht.de/themen-des-weltagrarberichts/baeuerliche-und-industrielle-landwirtschaft.html.