

Bestimmung und Verortung des Demand-Side-Integration-Potenzials von
Nichtwohngebäuden des tertiären Sektors unter Verwendung amtlicher
Liegenschaftskatasterinformationssysteme (ALKIS)

Vorgelegt im Promotionsausschuss der
HafenCity Universität Hamburg

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

Dissertation

von
Hans Schäfers

aus
Paderborn

“For every complex problem there is an answer
that is clear, simple
... and wrong.”

Henry Louis Mencken (1880–1956),
US-amerikanischer Schriftsteller und Satiriker

Dank

Für die Möglichkeit, die vorliegende Arbeit abschließen zu können, habe ich vielen Menschen zu danken. Es ist mir eine Freude, dies hier tun zu dürfen:

Mein erster Dank gebührt meiner Doktormutter, Prof. Irene Peters Ph. D., für ihre Inspiration, die kreativen Diskussionen, konstruktiven Hinweise und das beständige und selbstverständliche Vertrauen in meine Arbeit.

Prof. Dr.-Ing. habil. Ingo Stadler möchte ich für die Übernahme der Rolle des Zweitgutachters und das in diesem Zusammenhang ausgedrückte explizite Interesse an dem Thema meiner Arbeit danken.

Ferner gilt mein Dank allen Kollegen meiner Forschungsgruppe, dem Center for Demand Side Integration (C4DSI) an der HAW Hamburg, die mir in den letzten Monaten wesentliche Teile meiner Arbeit in unseren Forschungsprojekten mit einer phänomenalen Selbstverständlichkeit abgenommen haben. Damit haben sie maßgebliche Freiräume für die Erstellung dieser Arbeit geschaffen.

Prof. Dr.-Ing. Franz Schubert sei an dieser Stelle Dank ausgesprochen für die Unterstützung bei der Initialzündung zu dieser Arbeit, dem Forschungsprojekt „Insel“, und ebenso für die Unterstützung bei der Leitung der Arbeitsgruppe in der Phase der Fertigstellung dieser Arbeit.

Dieser Dank gebührt auch Prof. Dr. Wolfgang Renz, der mein Fehlen in der Leitung unserer aktuellen Forschungsprojekte mit Gelassenheit aufgefangen und mich zusätzlich immer als kreativer Diskussionspartner bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt hat.

Explizit gedankt sei an dieser Stelle auch den Helfern im Hintergrund, deren unterstützendes Wirken die vorliegende Arbeit maßgeblich getragen und am Ende massiv beschleunigt hat und deren Diskussionsbeiträge und kritische Überprüfungen der Ergebnisse für das Gelingen der Arbeit sehr hilfreich waren. Namentlich sind hier zu erwähnen Sabina Ackmann, Daniel Kulus, Matthias Kühl und Felix Stöckmann. Dank auch an Petrit Vuthi, der maßgeblich an dem für diese Arbeit initialen Forschungsprojekt „Insel“ beteiligt war.

Meinen Eltern sei Dank für ihre Liebe und Förderung, die mich bis hierher getragen hat.

Ganz besonderer Dank gilt meiner Familie: Meiner Frau für ihre verständnisvolle Geduld, Unterstützung und Liebe sowie meinen Kindern für ihren unverdrossenen Verzicht auf Papa bei so vielen Gelegenheiten.

Danke Euch allen!

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
Verzeichnis der Bilder.....	iv
Verzeichnis der Tabellen	ix
Abkürzungsverzeichnis.....	xii
Verzeichnis der Formelzeichen.....	xvi
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Aufbau der Arbeit.....	1
1.1.1 Motivation für diese Arbeit	1
1.1.2 Aufbau der Arbeit.....	3
1.2 Stadtplanung, energetische Stadt(teil)entwicklungskonzepte und GIS.....	4
2 Stromversorgung, Energiewende und Demand Side Integration.....	9
2.1 Organisation der Stromversorgung und des Strommarkts	9
2.2 Die europäischen Verbundnetze und die Netzfrequenz	10
2.3 Regelenergie zur Frequenzstabilisierung und Leistungsbalance	13
2.3.1 Primärregelung	14
2.3.2 Sekundärregelung	15
2.3.3 Minutenreserve	17
2.3.4 Ausschreibung, Kontrahierung und Aufruf von Regelleistung.....	18
2.3.5 Bilanzierung in Bilanzkreisen: Day Ahead, Intraday und Day After.....	21
2.4 Energiewende.....	24
2.4.1 Ausbau der Erzeugungskapazität erneuerbarer Energien im Stromsektor: Energiekonzept der Bundesregierung und Realität.....	24
2.4.2 Fluktuationsproblematik der Residuallast.....	25
2.5 Potenziale der Demand Side Integration	27
2.5.1 Stand der Forschung und Anwendung von DSI.....	27
2.5.2 Größenordnung des DSI-Potenzials.....	29
3 Untersuchung der DSI-Potenziale der Mittelspannungsliegenschaften der Freien und Hansestadt Hamburg: Das Forschungsprojekt „Insel“	33
3.1 Hintergründe der Untersuchung.....	33
3.1.1 Begründung des Fokus der Untersuchungen auf die Liegenschaften der FHH im Sektor „GHD“	33
3.1.2 Reduzierung der Netznutzungskosten durch Spitzenlastreduktion mittels Lastmanagementanlagen früher und heute	35
3.1.3 Zum Funktionsprinzip von Lastmanagementanlagen	38
3.1.4 Forschungsfragestellung und Liegenschaftsauswahl im FP „Insel“	39
3.2 Modellbildung und Simulation der Liegenschaften in „Insel“	42
3.2.1 Teilmodelle der Liegenschaften	43
3.2.2 Regelung zur Einhaltung der Lastgrenze: Die Lastmanagementanlage.....	47
3.3 Trendrechnung und Regelung im Gebäude.....	48
3.3.1 Trendrechnung	48
3.3.2 Regelung im Gebäude	50

3.4 Validierung des Modells.....	51
3.5 Simulation des Liegenschaftsverbunds.....	57
3.5.1 Prognose des Lastgangs und Fahrplanerstellung.....	57
3.5.2 Regelprinzip des Liegenschaftsverbunds: Kaskadenregelung.....	64
3.5.3 Simulation der vernetzten Regelung von LMA im Verbund	66
4 Methode zur DSI-Potenzialabschätzung im Rahmen einer automatisierten Voranalyse unter Verwendung von ALKIS und ArcMap	79
4.1 Datengrundlage in ALKIS.....	80
4.1.1 ALKIS.....	80
4.1.2 Die Objektart AX 31001 „Gebäude“	82
4.1.3 Die Objektart AX 31002 „Bauteile“	83
4.1.4 Die Objektart AX11001 „Flurstücke“ und die Gruppierung von Gebäuden zu „Liegenschaften“.....	85
4.1.5 Verwendete Software ArcMap in Kombination mit der Scriptsprache Python	85
4.2 Einteilung von Gebäuden nach ihrer Funktion	86
4.2.1 Gebäudefunktion in ALKIS.....	86
4.2.2 Der Hamburger Gebäudebestand nach Funktionen – ein Überblick.....	90
4.2.3 Gebäudefunktionen im Projekt „Insel“	94
4.2.4 Eingrenzung des Datenrahmens: Berücksichtigte Gebäudefunktionen aus ALKIS ..	97
4.2.5 Funktionsbezogene Kennwerte zur Abschätzung des Energiebedarfs von Nichtwohngebäuden.....	101
4.3 Qualitative Abschätzung der Wahrscheinlichkeit für ein DSI-Potenzial aus Lüftungs- und Kälteanlagen in den Gebäuden	103
4.3.1 Analyse der Größenverteilung der selektierten Gebäude.....	103
4.3.2 ABC-Analyse zur qualitativen Abschätzung der Wahrscheinlichkeit von DSI-Potenzialen	105
4.3.3 Spitzenleistung <i>Pel</i> , <i>max</i> , <i>Geb</i> als ABC-Indikator	110
4.4 Vorgehen zur Quantifizierung des DSI-Potenzials aus Lüftungs- und Kälteanlagen.....	126
4.4.1 Das Zonierungsproblem	127
4.4.2 Abschätzung des konditionierten Anteils der Nutzfläche	139
4.4.3 Abschätzung der Dynamik des Betriebsverhaltens der installierten Leistung für Lüftung und Kühlung.....	143
5 Validierung der DSI-Potenzialabschätzung.....	149
5.1 Validierung für Hochschulgebäude.....	150
5.1.1 Validierung für „Insel“ ID 01a: Ein großer geisteswissenschaftlicher Universitätscampus.....	150
5.1.2 Validierung für „Insel“ ID 01b: Ein großer naturwissenschaftlicher Universitätscampus.....	153
5.1.3 Validierung für „Insel“ ID 06: Ingenieurwissenschaftlicher Campus der Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW).....	156
5.1.4 Validierung für „Insel“ ID 10: Kleinerer naturwissenschaftlicher Campus der Universität	158
5.1.5 Validierung für „Insel“ ID 16: Ingenieurwissenschaftlicher Campus der Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW).....	160
5.1.6 Validierung für „Insel“ ID 23: Kleinerer naturwissenschaftlicher Campus der Universität	162

5.1.7 Validierung für „Insel“ ID 28: Naturwissenschaftliches Experimental-Institut der Universität	165
5.1.8 Validierung für „Insel“ ID 31: Kleinerer naturwissenschaftlicher Campus der Universität, Fachrichtung Informatik.....	168
5.1.9 Zusammenfassende Darstellung für alle Hochschulliegenschaften	170
5.2 Validierung der Ergebnisse für Bürogebäude.....	174
5.2.1 Validierung für „Insel“ ID 08: Ein großes Verwaltungsgebäude der Behörde für Inneres.....	174
5.2.2 Validierung für „Insel“ ID 14: Ein großes Verwaltungsgebäude einer Landesversicherung.....	176
5.2.3 Validierung für „Insel“ ID 22: Verwaltungsgebäude einer nautischen Behörde ..	178
5.2.4 Validierung für „Insel“ ID 43: Ein Verwaltungsgebäude einer Behörde für Stadtplanung.....	180
5.2.5 Zusammenfassende Darstellung für alle Liegenschaften büroähnlicher Nutzung	182
5.3 Zusammenfassung der Validierungsergebnisse und Zwischenfazit.....	185
6 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse	188
6.1 Ergebnisse der ABC-Analyse	190
6.2 Ergebnisse der Potenzialabschätzung für die einzelnen GFK	196
6.3 Ergebnisse für die Abschätzung der Dynamik des DSI-Potenzials	198
6.4 Ergebnisse für die Verortung des Potenzials/kartografische Darstellung.....	201
6.5 Zusammenfassung der Ergebnisse.....	205
6.6 Methodenkritik und Fazit	206
6.6.1 Fehlereinflüsse aus ALKIS	206
6.6.2 Methodenimmanente Fehlereinflüsse	208
6.6.3 Fazit	211
7 Zusammenfassung und Ausblick	212
7.1 Zusammenfassung	212
7.2 Ausblick	215
7.2.1 Erweiterung und Übertragung der Methode.....	215
7.2.2 Anwendung im Rahmen dynamischer Simulationen für (Quartiers-) Energiekonzepte.....	216
7.2.3 Methodische Verbesserungen	217
7.2.4 Abschließendes Fazit	218
8 Literatur	219
9 Anhänge.....	237
9.1 Daten zu den Gebäuden in „Insel“	239
9.2 Karten.....	272
9.2.1 Kartografische Übersicht über das theoretische Lastverlagerungspotenzial für Bürogebäude und Gebäude büroähnlicher Nutzung aus Lüftungsanlagen in Hamburg.....	272
9.2.2 Kartografische Übersicht über das theoretische Lastverlagerungspotenzial für Bürogebäude und Gebäude büroähnlicher Nutzung aus Kälteanlagen zur Klimatisierung in Hamburg	275

Verzeichnis der Bilder

<i>Bild 1-1: Verhältnis von informellem, regionalem Energiekonzept zu formeller Regionalplanung [BMVBS 2013, S. 4].....</i>	<i>5</i>
<i>Bild 2-1: Europäische Verbundnetze und Regelzonen [Walser & Wagner 2011, S. 36]</i>	<i>11</i>
<i>Bild 2-2: Regelzonen der deutschen Übertragungsnetzbetreiber [Berkel 2013]</i>	<i>12</i>
<i>Bild 2-3: Synchrone Verbundnetzabschnitte der ENTSO-E als Regionalgruppen verändert nach [ASUE 2010, S. 11].....</i>	<i>13</i>
<i>Bild 2-4: Kontrollschema zum Einsatz der Reserveleistungen [UCTE 2004c, S. 1 f.]</i>	<i>14</i>
<i>Bild 2-5: Schar von Trompetenkurven aus dem Operation Handbook der UCTE [UCTE 2004b, S. 21].....</i>	<i>16</i>
<i>Bild 2-6: Beispiel für Frequenzwiederherstellung nach PRL- und SRL-Einsatz aus dem Operation Handbook der UCTE [UCTE 2004b, S. 20]</i>	<i>17</i>
<i>Bild 2-7: Zusammenspiel der Regelleistungsarten zur Wiederherstellung der Netzfrequenz [Hey 2012, S. 8].....</i>	<i>18</i>
<i>Bild 2-8: Aufteilung der Kosten für die Vorhaltung und Nutzung von Regelenergie [Roon 2007] nach [Hey 2012, S. 10]</i>	<i>23</i>
<i>Bild 2-9: Entwicklung der installierten Leistung zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen – historisch und Prognose bis 2020, verändert und erweitert nach [BBE 2009, S. 7]</i>	<i>24</i>
<i>Bild 2-10: Residuallast für einen EE-Anteil von 40 % ohne Glättung durch Pumpspeicherkraftwerke (PSP), Last- und Erzeugungsmanagement [Nitsch et al. 2010, S. 102]</i>	<i>25</i>
<i>Bild 2-11: Residuallast für einen EE-Anteil von 40 % mit Glättung durch Pumpspeicherkraftwerke (PSP), Last- und Erzeugungsmanagement [Nitsch et al. 2010, S. 102]</i>	<i>26</i>
<i>Bild 2-12: Ausgewählter Zwei-Wochen-Verlauf des Lastmanagements von Klimaanlage, E-Kfz und Wärmepumpen für 2020 [Nitsch et al. 2010, S. 98]</i>	<i>26</i>
<i>Bild 2-13: Interdependenz der Potenzialbegriffe im DSI verändert nach [Roon & Gobmaier 2011, S. 10]</i>	<i>30</i>
<i>Bild 2-14: Theoretisches DSI-Potenzial aus Haushaltsanwendungen für Sommer (1) und Winter (2) nach [Stötzer 2012, S. 34]</i>	<i>31</i>
<i>Bild 2-15: Theoretisches DSI-Potenzial aus GHD für Sommer (1) und Winter (2) nach [Stötzer 2012, S. 36].....</i>	<i>32</i>
<i>Bild 3-1: Verteilung der MSP-Liegenschaften der FHH nach Vollnutzungsstunden in 2006.....</i>	<i>37</i>
<i>Bild 3-2: Zusammenfassende Darstellung der Systemstruktur und der Forschungsfragestellung im FP „Insel“ [Schäfers et al. 2010, S. 73].....</i>	<i>40</i>
<i>Bild 3-3: Anzahl städt. MSP-Liegenschaften nach Leistungsbereich (Stand 2006).....</i>	<i>41</i>
<i>Bild 3-4: Abgerechnete Leistung nach Leistungsbereichen (Stand 2006)</i>	<i>41</i>
<i>Bild 3-5: Übersicht Funktionsprinzip des Modells [Schäfers 2010].....</i>	<i>42</i>
<i>Bild 3-6: Screenshot der Black Box des Teilmodells einer Liegenschaft am Beispiel des Hochschulcampus der Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) am Campus „Berliner Tor“.....</i>	<i>44</i>
<i>Bild 3-7: Screenshot des inneren Aufbaus der Black Box „Liegenschaft“ mit den Teilmodellen Gebäude (Building) und Lastmanagementanlage [Schäfers et al. 2011, S. 62]</i>	<i>44</i>
<i>Bild 3-8: Screenshot der inneren Struktur des Teilmodells „Building“ mit den Unterstationen („Substation“) [Schäfers et al. 2011, S. 63]</i>	<i>45</i>
<i>Bild 3-9: Screenshot der inneren Struktur einer Unterstation („Substation“) mit hier vier Anlagen (in diesem Fall Kochkessel einer Großküche) [Schäfers et al. 2011, S. 63]</i>	<i>45</i>
<i>Bild 3-10: Screenshot der inneren Struktur der Black Box „Lastmanagementanlage“ [Schäfers et al. 2011, S. 67].....</i>	<i>46</i>
<i>Bild 3-11: Prinzip einfacher Regelkreis.....</i>	<i>47</i>

Bild 3-12: Grafische Darstellung des Trendrechnungsverfahrens – eigene Darstellung	50
Bild 3-13: Bildung der Schaltmatrizen in der Grundstation (verändert und erweitert nach [Schäfers et al. 2011, S. 64])	51
Bild 3-14: Geloggtes Verhalten der realen LMA am Campus Bergedorf der HAW während drei Viertelstunden am 9. Mai 2005 zwischen 11:37 Uhr und 12:15 Uhr [Schäfers 2005]	53
Bild 3-15: Vergleich Viertelstundenlastverläufe am 22.06 2005	55
Bild 3-16: Vergleich der realen und simulierten Trendleistungsberechnung	56
Bild 3-17: Vergleich der abgeschalteten Arbeit (kWh) der realen Lastmanagementanlage	57
Bild 3-18: Histogramm zur Verteilung der prozentualen Prognosefehler	60
Bild 3-19: Beispiel für systematisch zu hohe Prognose [Schäfers et al. 2011, S. 128]	61
Bild 3-20: Beispiel für systematisch zu niedrige Prognose [Schäfers et al. 2011, S. 131]	61
Bild 3-21: Beispiel für systematisch nach links verschobene Prognose [Schäfers et al. 2011, S. 132]	62
Bild 3-22: Beispiel für systematisch nach rechts verschobene Prognose [Schäfers et al. 2011, S. 142]	62
Bild 3-23: Beispiel für eine gute Übereinstimmung zwischen Prognose und tatsächlichem Lastverlauf [Schäfers et al. 2011, S. 148]	63
Bild 3-24: Blockschaltbild Prinzip Kaskadenregler (verändert nach Dittmar & Pfeiffer 2004, S. 8)	64
Bild 3-25: Blockschaltbild Prinzip Kaskadenregelung im FP „Insel“ verändert und ergänzt nach [Vuthi 2010, S. 31]	65
Bild 3-26: Blockschaltbild Kaskadenregelung im FP „Insel“ mit Modellelementen als Regler- und Streckenfunktionen – ergänzt und verändert nach [Vuthi 2010, S. 63]	66
Bild 3-27: Histogramm der Fahrplanabweichungen in 1 %-Schritten (neue Berechnung auf Basis von [Schäfers et al. 2011])	68
Bild 3-28: 20–80 % Dezile des Regelungserfolgs für unterschiedliche Toleranzbänder (eigene Darstellung).	69
Bild 3-29: Mittlere Fahrplanabweichung je Tag in Prozent (Betrag) [Schäfers et al. 2011, S. 170]	70
Bild 3-30: Prinzip Lastrauschen – eigene Darstellung mit realen Lastgangwerten aus „Insel“ nach [Haubrich 2008, S. 7]	71
Bild 3-31: Histogramm des Lastrauschens für das unregelmäßige System und den Regler mit 5 % Toleranz im Vergleich	72
Bild 3-32: Q/Q Diagramm zur Verteilung des Lastrauschens bei aktiviertem Regler	73
Bild 3-33: 20–80 % Dezile des Lastrauschens für unterschiedliche Toleranzbänder und FU-Regelung	74
Bild 3-34: Lieferung positiver Regelenergie aus dem Liegenschaftsverbund – Beispiel 02.07.2008 2,5 MW tagsüber, 1 MW abends/nachts (vgl. [Schäfers et al. 2011, S. 120])	75
Bild 3-35: Lieferung positiver Regelenergie aus dem Liegenschaftsverbund – Beispiel 02.07.2008 5 MW (bisher nicht veröffentlicht)	76
Bild 3-36: Maximale Lastreduktion am Beispiel 02.07.2008 (vgl. [Schäfers et al. 2011, S. 121])	77
Bild 3-37: Maximale Lasterhöhung am Beispiel 02.07.2008 (vgl. [Schäfers et al. 2011, S. 122])	77
Bild 4-1: Ausriss aus der AX 31001-Attributtabelle der GDB Hamburg 2010. Die Pfeile kennzeichnen die verwendeten Attribute	82
Bild 4-2: Prozentuale Aufteilung der nicht beheizten Gebäude der Freien und Hansestadt Hamburg	91
Bild 4-3: Verteilung beheizter und unbeheizter Gebäude nach Anzahl und BGF-Anteil	92
Bild 4-4: Anteile der beheizten Gebäude an den GfK-Schlüsselgruppen 1000 „Wohnen“, 2000 „Wirtschaft und Gewerbe“ und 3000 „Öffentliche Zwecke“	93
Bild 4-5: Relative Anteile der Gebäude pro GfK an der Gesamtmenge der selektierten Gebäude	100

<i>Bild 4-6: Relative Anteile der aufsummierten NGF pro GFK an der Gesamtmenge der NGF der selektierten Gebäude.....</i>	<i>101</i>
<i>Bild 4-7: Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung nach Gebäudegröße mit Bezug auf NGF.....</i>	<i>104</i>
<i>Bild 4-8: Log-log-Plot für die Wahrscheinlichkeitsdichte der aus ALKIS selektierten Gebäude</i>	<i>105</i>
<i>Bild 4-9: Summenverteilung der NGF der selektierten Gebäude.....</i>	<i>106</i>
<i>Bild 4-10: Größenverteilung von Bürogebäuden nach Ausstattungsstandard</i>	<i>107</i>
<i>Bild 4-11: Energieverbrauchskennzahlen $e_{V,S}$ (hier mit E_{EL} bezeichnet) für unterschiedlich konditionierte Bürogebäude (Jakob et al. 2008, S. 107).....</i>	<i>108</i>
<i>Bild 4-12: Summenverteilung der Liegenschafts-Maximalleistungen der Mittelspannungsliegenschaften in „Insel“.....</i>	<i>109</i>
<i>Bild 4-13: Vergleich von Verbrauch und Bedarf auf Basis der AGES-Kennwerte.....</i>	<i>112</i>
<i>Bild 4-14: Vergleich von Verbrauch und Bedarf auf Basis der BMVBS Kennwerte, mit Spreizung um +/-20 %.....</i>	<i>114</i>
<i>Bild 4-15: Auskragende/zurückspringende Geschosse [LGV 2011, S. 324].....</i>	<i>118</i>
<i>Bild 4-16: Vergleich tatsächlicher und theoretischer Jahresvollnutzungsstunden für die Mittelspannungsliegenschaften in „Insel“</i>	<i>121</i>
<i>Bild 4-17: Jahresdauerlinien und Jahresvollnutzungsstunden für Gebäude büroähnlicher Nutzung in „Insel“.....</i>	<i>122</i>
<i>Bild 4-18: Jahresdauerlinien und Jahresvollnutzungsstunden für Hochschulgebäude in „Insel“</i>	<i>122</i>
<i>Bild 4-19: Erreichen des Behaglichkeitsfeldes mit unterschiedlichen Klimatisierungsmaßnahmen [Keller 2005, S. 66].....</i>	<i>142</i>
<i>Bild 4-20: Energiebedarf für die Erbringung der notwendigen Kälteleistung in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur (eigene Darstellung, nach [Siemens 2013]).</i>	<i>146</i>
<i>Bild 5-1: Gebäude der Liegenschaft ID 01a – Einfärbung nach Leistungsklasse der installierten Leistung aus Lüftungsanlagen in der Bedarfsklasse „Mittel“ ($P_{vent, mittel}$)</i>	<i>150</i>
<i>Bild 5-2: Ergebnisse der Validierung für Liegenschaft ID 01a</i>	<i>152</i>
<i>Bild 5-3: Gebäude der Liegenschaft ID 01b – Einfärbung nach Leistungsklasse der installierten Leistung aus Lüftungsanlagen in der Bedarfsklasse „Mittel“ ($P_{vent, mittel}$)</i>	<i>153</i>
<i>Bild 5-4: Ergebnisse der Validierung für Liegenschaft ID 01b</i>	<i>155</i>
<i>Bild 5-5: Gebäude der Liegenschaft ID 06 – Einfärbung nach Leistungsklasse der installierten Leistung aus Lüftungsanlagen in der Bedarfsklasse „Mittel“ ($P_{vent, mittel}$)</i>	<i>156</i>
<i>Bild 5-6: Ergebnisse der Validierung für Liegenschaft ID 06</i>	<i>158</i>
<i>Bild 5-7: Gebäude der Liegenschaft ID 10 – Einfärbung nach Leistungsklasse der installierten Leistung aus Lüftungsanlagen in der Bedarfsklasse „Mittel“ ($P_{vent, mittel}$)</i>	<i>159</i>
<i>Bild 5-8: Ergebnisse der Validierung für Liegenschaft ID 10.....</i>	<i>160</i>
<i>Bild 5-9: Gebäude der Liegenschaft ID 16 – Einfärbung nach Leistungsklasse der installierten Leistung aus Lüftungsanlagen in der Bedarfsklasse „Mittel“ ($P_{vent, mittel}$)</i>	<i>161</i>
<i>Bild 5-10: Ergebnisse der Validierung für Liegenschaft ID 16.....</i>	<i>162</i>
<i>Bild 5-11: Gebäude der Liegenschaft ID 23 – Einfärbung nach Leistungsklasse der installierten Leistung aus Lüftungsanlagen in der Bedarfsklasse „Mittel“ ($P_{vent, mittel}$)</i>	<i>163</i>
<i>Bild 5-12: Ergebnisse der Validierung für Liegenschaft ID 23.....</i>	<i>164</i>
<i>Bild 5-13: Gebäude der Liegenschaft ID 28 – Einfärbung nach Leistungsklasse der installierten Leistung aus Lüftungsanlagen in der Bedarfsklasse „Mittel“ ($P_{vent, mittel}$)</i>	<i>165</i>
<i>Bild 5-14: Ergebnisse der Validierung für Liegenschaft ID 28.....</i>	<i>167</i>

Bild 5-15: Gebäude der Liegenschaft ID 31 – Einfärbung nach Leistungsklasse der installierten Leistung aus Lüftungsanlagen in der Bedarfsklasse „Mittel“ ($P_{vent, mittel}$).....	168
Bild 5-16: Ergebnisse der Validierung für Liegenschaft ID 31.....	170
Bild 5-17: Vergleich der absoluten Abweichungen für P_{vent} bei allen Hochschulliegenschaften.....	170
Bild 5-18: Vergleich der normierten Abweichungen für P_{vent} bei allen Hochschulliegenschaften.....	171
Bild 5-19: Vergleich der normierten Abweichungen für $P_{inst, kühl}$ bei allen Hochschulliegenschaften.....	172
Bild 5-20: Vergleich der aufsummierten normierten Abweichungen für P_{vent} und $P_{kühl}$ für die Hochschulliegenschaften der Validierungsgruppe.....	173
Bild 5-21: Gebäude der Liegenschaft ID 08 – Einfärbung nach Leistungsklasse der installierten Leistung aus Lüftungsanlagen in der Bedarfsklasse „Mittel“ ($P_{vent, mittel}$).....	174
Bild 5-22: Ergebnisse der Validierung für Liegenschaft ID 08.....	175
Bild 5-23: Gebäude der Liegenschaft ID 14 – Einfärbung nach Leistungsklasse der installierten Leistung aus Lüftungsanlagen in der Bedarfsklasse „Mittel“ ($P_{vent, mittel}$).....	176
Bild 5-24: Ergebnisse der Validierung für Liegenschaft ID 14.....	177
Bild 5-25: Gebäude der Liegenschaft ID 22 – Einfärbung nach Leistungsklasse der installierten Leistung aus Lüftungsanlagen in der Bedarfsklasse „Mittel“ ($P_{vent, mittel}$).....	178
Bild 5-26: Ergebnisse der Validierung für Liegenschaft ID 22.....	179
Bild 5-27: Gebäude der Liegenschaft ID 43 – Einfärbung nach Leistungsklasse der installierten Leistung aus Lüftungsanlagen in der Bedarfsklasse „Mittel“ ($P_{vent, mittel}$).....	180
Bild 5-28: Ergebnisse der Voranalyse und der Validierung für Liegenschaft ID 43.....	181
Bild 5-29: Ergebnisse der Validierung für Liegenschaft ID 22.....	181
Bild 5-30: Vergleich der absoluten Abweichungen für P_{vent} bei den Büroliegenschaften.....	182
Bild 5-31: Vergleich der relativen Abweichungen für P_{vent} bei den Büroliegenschaften.....	183
Bild 5-32: Vergleich der relativen Abweichungen für $P_{kühl}$ bei den Büroliegenschaften.....	184
Bild 5-33: Vergleich der aufsummierten normierten Abweichungen für P_{vent} und $P_{kühl}$ für die Bürogebäude der Validierungsgruppe.....	184
Bild 5-34: Überblick über die relativen Abweichungen bei der installierten Leistung für Lüftung – alle Gebäude der Validierungsgruppe im Vergleich.....	185
Bild 5-35: Überblick über die relativen Abweichungen bei der installierten Leistung für Kälte – alle Gebäude der Validierungsgruppe im Vergleich.....	186
Bild 5-36: Relationen der gewichteten Summenwerte zu den Werten der Bedarfsklasse „Mittel“ für Lüftung und Kälte.....	187
Bild 6-1: Summenverteilung der Anschlussleistung für P_{vent} und $P_{kühl}$ in den drei Bedarfsklassen (BK) – lineare Darstellung.....	189
Bild 6-2: Summenverteilung der Anschlussleistung für P_{vent} und $P_{kühl}$ in den drei Bedarfsklassen (BK) – doppelt logarithmische Darstellung.....	189
Bild 6-3: Darstellung der 50 % und 80 % Summenanteile für $P_{vent, mittel}$	190
Bild 6-4: Darstellung der Mengen- und Summenanteile der Kategorien A bis C an der Summenverteilung $P_{vent, mittel}$	191
Bild 6-5: Verteilung der Gebäude nach Leistungsklassen und Kategorien A bis C für P_{vent}	192
Bild 6-6: Verteilung der Gebäude nach Leistungsklassen und Kategorien A bis C für P_{vent}	193
Bild 6-7: Verteilung der Gebäude nach Leistungsklassen < 100 kW und Kategorien A bis C für P_{vent}	193
Bild 6-8: Verteilung der Gebäude nach Leistungsklassen < 100 kW und Kategorien A bis C für $P_{kühl}$	194

Verzeichnis der Bilder

<i>Bild 6-9: Verteilung der Anschlussleistung nach Leistungsklassen der Gebäude und Kategorien A bis C für P vent.....</i>	<i>195</i>
<i>Bild 6-10: Verteilung der Anschlussleistung nach Leistungsklassen und Kategorien A bis C für P kühl.....</i>	<i>195</i>
<i>Bild 6-11: Prozentuale Anteile der Gebäudegruppen an der installierten Leistung für Lüftung</i>	<i>196</i>
<i>Bild 6-12: Prozentuale Anteile der Gebäudegruppen an der installierten Leistung für Kälte</i>	<i>197</i>
<i>Bild 6-13: Relative Anteile der Kategorien A bis C an der Anzahl der Gebäude in den unterschiedlichen GFK-Gruppen.....</i>	<i>198</i>
<i>Bild 6-14: Relative Anteile der Kategorien A bis C an der installierten Leistung für Kälte in den unterschiedlichen GFK-Gruppen.....</i>	<i>198</i>
<i>Bild 6-15: Dynamik des ermittelten Kälteleistungspotenzials für das Wetterjahr 2012.....</i>	<i>199</i>
<i>Bild 6-16: Dynamik des ermittelten Lüftungspotenzials.....</i>	<i>200</i>
<i>Bild 6-17: Kartenausschnitt mit den Lastverlagerungspotenzialen (in kW) aus Lüftungsanlagen in Bürogebäuden in der Hamburger Innenstadt</i>	<i>202</i>
<i>Bild 6-18: Kartenausschnitt mit den Lastverlagerungspotenzialen (in kW) aus Lüftungsanlagen in Bürogebäuden in der City Süd.....</i>	<i>204</i>
<i>Bild 6-19: Hamburgs kleinstes Bürogebäude</i>	<i>207</i>
<i>Bild 6-20: Hamburgs größtes Bürogebäude.....</i>	<i>207</i>

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 2-1:	Übersicht der verschiedenen Regelernergiearten und deren Eigenschaften [Hey 2012, S. 8].....	18
Tabelle 2-2:	5-Stufen-Plan des VDN zur Beherrschung von Großstörungen mit Frequenzeinbruch [Berndt 2007, S. 65].....	20
Tabelle 2-3:	Gegenüberstellung des theoretischen und des technisch nutzbaren DSI-Potenzials in den Sektoren Industrie, GHD und Haushalte bis 2030 – verändert nach [Apel et al. 2012, S. 55].....	30
Tabelle 3-1:	Regelerfolg nach Wochentagen für unterschiedliche Toleranzen – Bezug zum jeweils gültigen Toleranzbereich	70
Tabelle 3-2:	Lastrauschen bei verschiedenen Reglereinstellungen	73
Tabelle 4-1:	Bauarten von Bauteilen und ihre Prävalenz in Hamburg	84
Tabelle 4-2:	Systematik der Einteilung der Gebäudefunktion in der Objektart AX Gebäude – editiert nach [Anhang 1 in LGV 2011, S. 1 ff.]	90
Tabelle 4-3:	Häufigkeit und Flächenanteile für ausgesuchte Nutzungen von NWG.....	94
Tabelle 4-4:	Hochschulliegenschaften in „Insel“ und ihre GFK in ALKIS	95
Tabelle 4-5:	Gebäude büroähnlicher Nutzung in „Insel“ und ihre GFK in ALKIS	96
Tabelle 4-6:	Theater, Museen, Konzerthäuser in „Insel“ und ihre GFK in ALKIS.....	97
Tabelle 4-7:	Allgemein- und berufsbildende Schulen in „Insel“ und ihre GFK in ALKIS.....	97
Tabelle 4-8:	Betrachtete GFK aus der Gruppe „Hochschulgebäude/Forschungsinstitute“ und ihre Häufigkeit im ALKIS und im FP „Insel“	98
Tabelle 4-9:	Betrachtete GFK aus der Gruppe „Gebäude büroähnlicher Nutzung“ und ihre Häufigkeit im ALKIS und im FP „Insel“	99
Tabelle 4-10:	Zuordnung der Energieverbrauchskennwerte $e_{B,S}$ des BMVBS zu den selektierten GFK-Kennziffern der Gruppe 3000 aus ALKIS	115
Tabelle 4-11:	Zuordnung der Energieverbrauchskennwerte $e_{B,S}$ des BMVBS zu den selektierten GFK-Kennziffern der Gruppe 2000 aus ALKIS	116
Tabelle 4-12:	Liste der vorkommenden Bauteile mit Kennung und Angabe als Abschlags- oder Zuschlagsfläche zur BGF	117
Tabelle 4-13:	Zuordnung der GFK-Kennziffern zum Umrechnungsfaktor BGF zu NGF des BMVBS zu den selektierten GFK-Kennziffern der Gruppe 3000 aus ALKIS.....	119
Tabelle 4-14:	Zuordnung der GFK-Kennziffern zum Umrechnungsfaktor BGF zu NGF des BMVBS zu den selektierten GFK-Kennziffern der Gruppe 2000 aus ALKIS.....	120
Tabelle 4-15:	ABC-Matrix zur relativen Anschlussleistung für Verwaltungsgebäude mit normaler technischer Ausstattung.....	123
Tabelle 4-16:	ABC-Matrix zur relativen Anschlussleistung für Parlamentsgebäude	124
Tabelle 4-17:	ABC-Matrix zur relativen Anschlussleistung für Gerichtsgebäude	124
Tabelle 4-18:	ABC-Matrix zur relativen Anschlussleistung für Polizeidienstgebäude	124
Tabelle 4-19:	ABC-Matrix zur relativen Anschlussleistung für Institutsgebäude für Lehre und Forschung.....	125
Tabelle 4-20:	ABC-Matrix zur relativen Anschlussleistung für Bürogebäude normale Ausstattung	125
Tabelle 4-21:	ABC-Matrix zur relativen Anschlussleistung für Bürogebäude höhere Ausstattung.....	125
Tabelle 4-22:	ABC-Matrix zur relativen Anschlussleistung für Institutsgebäude für Forschung und Untersuchung	126

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 4-23:	Absolute und relative Flächenanteile der Nutzungszonen nach [Neufert & Kister 2012, S. 476] und Zuweisung zu den Teilenergiekennwerten [VDI 3807-4: 2008]	133
Tabelle 4-24:	Installierte Leistung mit Flächenaufteilung nach Neufert und Kister für alle NZ und BK jeweils für Lüftung und Kälte	136
Tabelle 4-25:	Installierte Leistung mit abstrahierter Flächenaufteilung für alle NZ und BK jeweils Lüftung und Kälte.....	137
Tabelle 4-26:	Abweichungen in den Summen für die installierte Leistung zwischen abstrahierter Flächenaufteilung und Flächenaufteilung nach Neufert und Kister für alle BK und jeweils Lüftung und Kälte.....	137
Tabelle 4-27:	Konditionierter Flächenanteil an der NGF für Bürogebäude	140
Tabelle 4-28:	f_{vent} für Bürogebäude	141
Tabelle 4-29:	$f_{kühl}$ für Bürogebäude	143
Tabelle 4-30:	Konditionierter Flächenanteil in % NGF für Hochschulgebäude	143
Tabelle 4-31:	f_{vent} für Hochschulgebäude.....	143
Tabelle 4-32:	$f_{kühl}$ für Hochschulgebäude.....	143
Tabelle 4-33:	Betriebszeiten der Nutzungszonen nach [DIN V 18599-10: 2013].....	144
Tabelle 5-1:	Ergebnisse der Voranalyse und der Validierung für Liegenschaft ID 01a	151
Tabelle 5-2:	Ergebnisse der Voranalyse und der Validierung für Liegenschaft ID 01b.....	154
Tabelle 5-3:	Ergebnisse der Voranalyse und der Validierung für Liegenschaft ID 06.....	157
Tabelle 5-4:	Ergebnisse der Voranalyse und der Validierung für Liegenschaft ID 10.....	159
Tabelle 5-5:	Ergebnisse der Voranalyse und der Validierung für Liegenschaft ID 16.....	161
Tabelle 5-6:	Ergebnisse der Voranalyse und der Validierung für Liegenschaft ID 23.....	163
Tabelle 5-7:	Ergebnisse der Voranalyse und der Validierung für Liegenschaft ID 28.....	166
Tabelle 5-8:	Ergebnisse der Voranalyse und der Validierung für Liegenschaft ID 31.....	169
Tabelle 5-9:	Zusammenfassung der prozentualen Abweichungen der installierten Leistungen gegenüber den mittleren Bedarfsklassen für Hochschulgebäude	172
Tabelle 5-10:	Ergebnisse der Voranalyse und der Validierung für Liegenschaft ID 08.....	175
Tabelle 5-11:	Ergebnisse der Voranalyse und der Validierung für Liegenschaft ID 08	177
Tabelle 5-12:	Ergebnisse der Voranalyse und der Validierung für Liegenschaft ID 22	179
Tabelle 5-13:	Zusammenfassung der prozentualen Abweichungen der installierten Leistungen gegenüber den mittleren Bedarfsklassen für Bürogebäude.....	183
Tabelle 6-1:	Gesamtpotenzial für P_{vent} und $P_{kühl}$ bezogen auf die drei Bedarfsklassen „Niedrig“, „Mittel“ und „Hoch“.....	188
Tabelle 6-2:	Mengen- und Summenanteile der Kategorien A bis C an den Summenverteilungen.....	191
Tabelle 9-1:	Auflistung der in Insel erhobenen Daten eines geisteswissenschaftlichen Universitätscampus (ID 01a).....	242
Tabelle 9-2:	Auflistung der in Insel erhobenen Daten eines naturwissenschaftlichen Universitätscampus (ID 01b).....	244
Tabelle 9-3:	Auflistung der in Insel erhobenen Daten eines Ingenieurwissenschaftlichen Campus der Hochschule für angewandte Wissenschaften (HAW) (ID 06).	247
Tabelle 9-4:	Auflistung der in Insel erhobenen Daten eines kleinen naturwissenschaftlichen Universitätscampus (ID 10).....	249

<i>Tabelle 9-5:</i>	<i>Auflistung der in Insel erhobenen Daten eines Ingenieurwissenschaftlichen Campus der Hochschule für angewandte Wissenschaften (HAW) (ID 16). n.v.: nicht vergeben</i>	<i>252</i>
<i>Tabelle 9-6:</i>	<i>Auflistung der in Insel erhobenen Daten eines kleinen naturwissenschaftlichen Universitätscampus (ID 23).</i>	<i>253</i>
<i>Tabelle 9-7:</i>	<i>Auflistung der in Insel erhobenen Daten eines naturwissenschaftlichen Experimental-Institutes der Universität (ID 28).</i>	<i>256</i>
<i>Tabelle 9-8:</i>	<i>Auflistung der in Insel erhobenen Daten eines kleinen naturwissenschaftlichen Universitätscampus, der Fachrichtung Informatik (ID 31).</i>	<i>257</i>
<i>Tabelle 9-9:</i>	<i>Auflistung der in Insel erhobenen Daten eines Verwaltungsgebäudes der Behörde für Inneres (ID 08)</i>	<i>260</i>
<i>Tabelle 9-10:</i>	<i>Auflistung der in Insel erhobenen Daten eines großen Verwaltungsgebäudes einer Landesversicherung (ID 14).</i>	<i>264</i>
<i>Tabelle 9-11:</i>	<i>Auflistung der in Insel erhobenen Daten eines Verwaltungsgebäudes einer nautischen Behörde (ID 22).</i>	<i>266</i>
<i>Tabelle 9-12:</i>	<i>Auflistung der in Insel erhobenen Daten eines Verwaltungsgebäudes einer Behörde für Stadtplanung (ID 43).</i>	<i>269</i>

Abkürzungsverzeichnis

AdV	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen
AFIS	Amtliches Festpunktinformationssystem
ALB	Automatisiertes Liegenschaftsbuch
ALK	Automatisierte Liegenschaftskarte
ALKIS	Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem
Anz.	Anzahl
AOG	Anzahl der oberirdischen Geschosse
AUG	Anzahl der unterirdischen Geschosse
ATKIS	Amtliches Topografisch-Kartografisches Informationssystem
BAT	Bauart
BauGB	Baugesetzbuch
BdEW	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V.
BGF	Brutto-Grundfläche
BHKW	Blockheizkraftwerk
BJA	Baujahr
BK	Bedarfsklasse
BKI	Baukosteninformationszentrum der Deutschen Architektenkammern
BKV	Bilanzkreisverantwortlicher
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMU	Bundesumweltministerium
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BMWI	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BUS	Binary Unit System
BWZK	Bauwerkzuordnungskatalog
bzw.	beziehungsweise
CIGRE	Conseil International des Grands Réseaux Électriques (französisch für <i>Internationales Gremium für große elektrische Netze</i>)
Crisp	Creating Innovative Sustainability Pathways (EU-Forschungsprojekt im 7. Framework-Programm)
CSV	Comma-Separated Values
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DADRP	Day Ahead Demand Response Program

DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DINAR	Dezentrale regenerative Energieversorgungsanlagen: Technische und wirtschaftliche Integration in den Netzbetrieb und Anpassung von Rahmenbedingungen
DR	Demand Response
DSI	Demand Side Integration
DSM	Demand Side Management
ebd.	ebenda
EE	Erneuerbare Energien
EG	Europäische Gemeinschaft
EIB	Europäischer Installationsbus; Bus = Binary Unit System
E-KFZ	Elektro-Kraftfahrzeug
EnEV	Energieeinsparverordnung
En:Sys	Förderschwerpunkt „Systemanalyse“ im 6. Energieforschungsprogramm
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity
EnWG	Energiewirtschaftsgesetz
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
ExWoSt	Experimenteller Wohnungs- und Städtebau
FHH	Freie und Hansestadt Hamburg
FP	Forschungsprojekt
EU	Europäische Union
FuE	Forschung und Entwicklung
f.; ff.	folgende; fortfolgende
GDB	Geodatabase
GemEB	Gemeinde-Energiebilanzierung
GeoInfoDok	Gesamtdokumentation der Festlegungen zur Führung der Geoinformationen des amtlichen Vermessungswesens
GFK	Gebäudefunktion
ggf.	gegebenenfalls
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
GTA	Gebäudetechnische Anlage
GLT	Gebäudeleittechnik
GRF	Gebäude Grundfläche
GUI	Graphical User Interface (engl. für „grafische Benutzerschnittstelle“)
GW	Gigawatt

Abkürzungsverzeichnis

GWh	Gigawattstunde
HAW	Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
HSP	Hochspannung; Höchstspannung
Hz	Hertz
ID	Identifikationsnummer
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
Insel	Internetbasiertes System eines erweiterbaren Lastmanagement zur Integration in virtuelle Kraftwerke
i. S. d.	im Sinne des/der
IWU	Institut für Wohnen und Umwelt
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
kVA	Kilovoltampere
LGV	Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung
Lon	Local Operating Network
LMA	Lastmanagementanlage
m, m ² , m ³	Meter, Quadratmeter, Kubikmeter
LuK	Lüftungs- und Kälteanlagen
M-Bus	Meter-Bus, ein Bussystem; Bus = Binary Unit System
MEG	Methodik zur Erfassung, Beurteilung und Optimierung des Elektrizitätsbedarfs von Gebäuden
MLP	Multi Layer Perceptron Networks
MORO	Modellvorhaben der Raumordnung
MRL	Minutenreserveleistung
MSP	Mittelspannung
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde
NF	Nutzfläche
NEV	Netzentgeltverordnung
NGF	Netto-Grundfläche
NSP	Niederspannung
NTZ	Nutzung
NWG	Nichtwohngebäude

NYISO	New York Independent System Operator
PJM	Pennsylvania New Jersey Maryland Interconnection Limited Liability Company
PRL	Primärregelleistung
PSF	Python Software Foundation
PV	Photovoltaik
RLT	Raumluftechnik
SHP	Shape (Umriss)
SRL	Sekundärregelleistung
TEK	Teilenergiekennwerteverfahren
TF	Technische Funktionsfläche
u. a. m.	und anderes mehr
UCTE	Union for the Coordination of Transmission of Electricity
UML	Unified Modeling Language
UNIPED	International Union of Producers and Distributors of Electric Energy
u. U.	unter Umständen
UUID	Universally Unique Identifier (engl. für „allgemein eindeutiger Kennzeichner“)
VBA	Visual Basic for Applications
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDN	Verband der Netzbetreiber
VF	Verkehrsfläche
vgl.	vergleiche
VK	Virtuelles Kraftwerk
WGF	Weitere Gebäudefunktion

Verzeichnis der Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
A	m^2	Fläche
AOG_{UUID}	-	Anzahl der Obergeschosse des Gebäudes mit der UUID i
AUG_{UUID}	-	Anzahl der Untergeschosse des Gebäudes mit der UUID i
$A_{B,el,i}$	m^2	Energiebezugsfläche für Strom des Gebäudes i
$A_{NF,Geb}$	m^2	Nutzfläche (NF) des Gebäudes i
$A_{NF,kühl}$	m^2	Gekühlter Teil der NF
$A_{NF,NZ,ges}$	m^2	Gesamte Nutzfläche der Zone mit der Nutzung NZ in m^2 Nutzfläche (NF) bzw. Verkehrsfläche (VF) für Verkehrsflächen
$A_{NF,NZ,kühl}$	m^2	Gekühlte Nutzfläche der Zone mit der Nutzung (NZ) Nutzfläche (NF) bzw. Verkehrsfläche (VF) für Verkehrsflächen
$A_{NF,NZ,vent}$	m^2	Belüftete Nutzfläche der Zone mit der Nutzung (NZ) Nutzfläche (NF) bzw. Verkehrsfläche (VF) für Verkehrsflächen
$A_{NF,NZ,vent,BK}$	m^2	Für die Bedarfsklasse (BK) als belüftet anzusehender Anteil der Nutzfläche NF der Zone NZ
$A_{NF,vent}$	m^2	Belüfteter Teil der NF des Gebäudes
BK	-	Bedarfsklassen „Niedrig“, „Mittel“ oder „Hoch“
b	-	Steigung der logarithmierten Pareto-Verteilung
$d(t)$	-	Störgröße
E	kWh/a	Energieverbrauch
E_{ave}	%	Prognosefehler
$E_{B,S}$	kWh/a	Jahresenergiebedarf
E_C	-	Anteil der benötigten elektrischen Leistung zur Kühlung in %
e	kWh/($m^2_{NGF} \cdot a$)	Energiekennwert elektrischer Energie
$e_{B,S}$	kWh/($m^2_{NGF} \cdot a$)	Gesamtenergiebedarfskennwert
$e_e(t)$	-	Externe Regelabweichung
el	-	Elektrisch
$e_{V,S}$	kWh/($m^2_{NGF} \cdot a$)	Gesamtenergieverbrauchskennwert
$e(t)$	kW	Regelabweichung
$F_{amp,prop}(t)$	-	Proportionaler Verstärkungsfaktor
$f_{NF,entl.}^{BKI}$	-	Entlüfteter Flächenanteil der NF nach (BKI 2013)
$f_{NF,bel.+entl.}^{BKI}$	-	Be- und entlüfteter Flächenanteil der NF nach (BKI 2013)

$f_{NZ}^{BGF,abstr}$	-	Anteil der Nutzfläche einer Nutzungszone an der NGF des Gebäudes für die abstrahierte Flächenaufteilung
$f_{NZ}^{Neufert}$	-	Anteil der Nutzfläche einer Nutzungszone an der NGF des Gebäudes
f_C	-	Proportionalitätsfaktor für den Kühlleistungsanteil
$f_{EC,korr}$	-	Lineares Korrekturglied für die Leistungsanteilsbestimmung
$f_{kühl}$	-	Verhältnis des gekühlten Flächenanteils der NF zur gesamten NF
f_{NZ}	-	Verhältnis der Nutzfläche einer Nutzungszone (bzw. der Verkehrsfläche) an der NGF des Gebäudes
f_{vent}	-	Lufttechnisch behandelter (ventilierter) Flächenanteil der NF
$f_{vent,niedrig}$	-	Niedrigster zu erwartender lufttechnisch behandelter Flächenanteil
GRF_{UUID}	m ²	Grundfläche des Gebäudes mit der UUID i
$h_{voll,Geb}$	h/a	Jahresvollnutzungsstunden
$K_{Netznutzung}$	€	Netznutzungskosten
$KorrA_{BAT}$	m ²	Korrekturfäche
k	-	Konstante der Pareto-Verteilung
L_i	-	i -ter tatsächlicher Lastwert
L_{max}^i	W	Maximale Last an Tag i
$L_{max,hist}^i$	W	Maximale erwartete Last auf Basis der historischen Daten am Tag i
L_{min}^i	W	Minimale Last am Tag i
$L_{min,hist}^i$	W	Minimale erwartete Last auf Basis der historischen Daten am Tag i
$L_{nor}(i,j)$	-	Normalisierte Last zum Zeitpunkt j an Tag i
$L_{nor,hist}(i,j)$	-	Auf Basis der historischen Daten erwartete, normalisierte Last zum Zeitpunkt j an Tag i
$L_{prog}(i,j)$	W	Prognostizierte Last zum Zeitpunkt j an Tag i
$L_{prog,i}$	-	i -ter Vorhersagewert
$L(i,j)$	W	Tatsächliche Last zum Zeitpunkt j an Tag i
N	-	Anzahl der Vorhersagen in einem Vorhersageintervall
P	kW	Elektrische Leistung
\bar{P}	kW	Durchschnittliche elektrische Leistung

Verzeichnis der Formelzeichen

$p_{vent,NZ,BK}^{NGF,abstr}$	W/m ²	Installierte Leistung für Lüftung in der Nutzungszone NZ für die Bedarfsklasse BK in W/m ² NGF bei einer abstrahierten Flächenaufteilung
$p_{vent,NZ,BK}^{NGF,Neufert}$	W/m ²	Installierte Leistung für Lüftung in der Nutzungszone NZ für die Bedarfsklasse BK in W/m ² NGF bei einer Flächenaufteilung nach Neufert und Kister
$p_{kühl,NZ,BK}^{VDI}$	W/m ²	Nutzungsabhängiger (NZ) und bedarfsklassenabhängiger (BK) Teilenergiekennwert für Kälte. Bezugsfläche ist die Zone mit der Nutzung NZ aus (VDI 3807-4: 2008)
$p_{vent,NZ,BK}^{VDI}$	W/m ²	Nutzungsabhängiger (NZ) und bedarfsklassenabhängiger (BK) Teilenergiekennwert für Lüftung. Bezugsfläche ist die Zone mit der Nutzung NZ aus (VDI 3807-4: 2008)
$p_{vent,NZ,niedrig}^{VDI}$	W/m ²	Nutzungsabhängiger (NZ) Teilenergiekennwert für Lüftung in der Bedarfsklasse „Niedrig“ in W/m ² . Bezugsfläche ist die Zone mit der Nutzung NZ aus (VDI 3807-4: 2008)
$P_{el,max,Geb}$	kW	Jahresspitzenlast eines Gebäudes
$P_{kühl}$	kW	Installierte Gesamtleistung für Kälteanlagen
P_{vent}	kW	Installierte Gesamtleistung für Lüftungsanlagen
$P_{kühl,BK}$	kW	Installierte Gesamtleistung für Kälteanlagen in der jeweiligen Bedarfsklasse BK (BK = „Niedrig“, „Mittel“ oder „Hoch“)
$P_{vent,BK}$	kW	Installierte Gesamtleistung für Lüftungsanlagen in der jeweiligen Bedarfsklasse BK (BK = „Niedrig“, „Mittel“ oder „Hoch“)
$P_{vent,min}$	kW	Zu erwartender Mindestwert („min“) der installierten Leistung für Lüftungsanlagen. Entsprechend „mean“ (statt „min“) für mittlere erwartete Leistung und „max“ für maximal erwartete Leistung.
$P_{i,max,alt}$	kW	Alte Lastgrenze der Liegenschaft i
$P_{i,max,neu}$	kW	Neue Lastgrenze der Liegenschaft i
$P_{max,a}$	kW	Jahreshöchstlast
\bar{P}_{mess}	W	Abgerechnete Viertelstundenleistung
$P_{t,inten}$	W	Im Messintervall t intendierte Leistungsaufnahme
$P_{t,mess}$	W	Im Messintervall t gemessene Leistung
$P_{t,i,ab}$	W	Im Messintervall t abgeschaltete Leistung der einzelnen gebäudetechnischen Anlage
\bar{P}_{15}	kW	Durchschnittliche Leistung einer Viertelstunde
$P_{15,max}(t)$	kW	Durchschnittsleistung in einer Viertelstunde
$P_{15,Trend}(t)$	kW	Für eine Viertelstunde t errechnete Trendleistung
$\Delta P_{i,max}(t)$	kW	Von der Liegenschaft angebotene maximale Leistungsänderung
$T_{Vollnutzung}$	h/a	Vollnutzungsstunden

t_e	°C	Außentemperatur
th	-	Thermisch
t_i	°C oder h	Innentemperatur oder Zeitintervall i
$u(t)$	-	Stellgröße
W	kWh	Arbeit
W_a	kWh/a	Jahresarbeit
$w_e(t)$	-	Externe Führungsgröße
$w(t)$	-	Führungsgröße
W_{15}	kWh	Viertelstündliche elektrische Arbeit
$y_e(t)$	-	Externe Regelgröße
$y(t)$	-	Regelgröße

1 Einleitung

1.1 Motivation und Aufbau der Arbeit

1.1.1 Motivation für diese Arbeit

Vor dem Hintergrund der sich durch das anhaltende globale Bevölkerungswachstum selbst verstärkenden Energie- und Rohstoffkrise sind Lösungsansätze für eine nachhaltige Versorgung mit Wasser, Nahrung, Rohstoffen und Energie zum Erhalt unserer Zivilisation von entscheidender Bedeutung. Eine nachhaltige Energieversorgung basierend auf erneuerbaren und damit klimaneutralen Energieträgern ist ein unverzichtbarer Bestandteil hierfür. In Deutschland hat sich vor diesem Hintergrund ein breiter, überparteilicher, gesellschaftlicher Konsens für eine Energiewende ausgesprochen, deren Umsetzung erhebliche Umstrukturierungsmaßnahmen in der Energieversorgung mit sich bringt. Von besonderem Interesse ist in diesem Zusammenhang die Frage, wie bei einem Ersatz des bestehenden, durch fossile Großkraftwerke geprägten Energieerzeugungs- und Verteilungssystems durch dezentrale, erneuerbare Energien die entstehenden Fluktuationen bei der Stromerzeugung durch Speichernutzung und eine Flexibilisierung der Stromnachfrageseite (Demand Side) ausgeglichen werden können.

Die Enquete-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung“ des deutschen Bundestages formulierte dazu bereits 2002 in ihrem Endbericht:

„Nach Überzeugung der Kommission ist die Dezentralisierung der Versorgungsstrukturen ein zentraler Baustein für ein nachhaltig-zukunftsfähiges Energiesystem. Daher empfiehlt sie darauf hinzuwirken, die zentralisierten Angebotsstrukturen insbesondere des Stromangebotes sukzessive durch dezentrale Optionen zu ergänzen und in der Perspektive weitgehend durch dezentralere Angebots- und Netzkonfigurationen abzulösen. Mit Hilfe moderner IuK Technik lassen sich diese Optionen, zu denen insbesondere auch das gesamte Spektrum der Kraft-Wärme-/Kälte-Kopplung und regenerativer Stromerzeugung gehört, zu virtuellen Kraftwerken zusammenfassen und mit rationelleren Nachfragemustern in Einklang bringen. Dadurch entstehen effiziente, über den Energiemarkt im engen Sinne hinausgehende Gesamtsysteme für Energiedienstleistungen. Zur Unterstützung dieser Transformation betrachtet die Kommission es als wichtig, die regulatorischen Rahmenbedingungen für dezentrale Optionen zu verbessern. Weiter sind die technischen Voraussetzungen und der Aufbau der notwendigen Infrastruktur mit gezielten Markteinführungsprogrammen zu unterstützen und voranzutreiben“ (Deutscher Bundestag 2002, Kap. 7 Absatz 2053).

Die Enquete-Kommission propagiert die Bildung virtueller Kraftwerke (VK), in denen (Internet-basierte) Netzwerke dezentraler Erzeuger und regelbarer Verbraucher zentral gesteuert in der Lage sind, wie eine (oder mehrere) größere Kraftwerkseinheit(en) zu agieren.

In den zehn Jahren, die seit diesem Endbericht verstrichen sind, hat der Anteil der Stromproduktion aus Erneuerbaren stetig zugenommen und 2012 einen Anteil von knapp 23 % erreicht [BMU 2013, S. 4]. Die Geschwindigkeit dieser Entwicklung hat auch Brancheninsider überrascht und stellt erhebliche Anforderungen an die Betreiber der Stromübertragungs- und -verteilnetze. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass sich zum einen insbesondere Wind- und Sonnenenergie nicht nach dem Strombedarf richten, sondern von sich ggf. kurzfristig ändernden Wetterbedingungen abhängen. Zum anderen sind diese Anlagen dezentral verteilt und oft nicht in der Nähe der großen Lastzentren kumuliert (PV oft stark in ländlichen Regionen, Windkraft stark im eher verbrauchsarmen Norden Deutschlands).

Aus diesen Gründen ist in den letzten Jahren, wie von der Enquete-Kommission bereits angeregt, die Vernetzung von dezentralen Erzeugungseinheiten zu virtuellen Kraftwerken (VK) über schnelle (und sichere) Kommunikationstechnologien (TCP/IP u. a.) in immer mehr Forschungsprojekten untersucht

worden. Ziel all dieser Projekte ist es stets, kleinere Erzeugungseinheiten zu vernetzen, um größere Erzeugungsverbünde zu schaffen. Dabei steht die Entwicklung geeigneter und sicherer Kommunikationsmethoden und -standards bei der Vernetzung dezentraler Erzeugungseinheiten in vielen Projekten im Mittelpunkt des Interesses.

Bereits 2006 listeten Arndt et al. zehn größere VK-Forschungsprojekte mit deutscher Beteiligung auf.

2008 wurde durch den „E-Energy“-Wettbewerb des BMWI und des BMU die nächste Größenordnung für VK-Forschungsprojekte initiiert. Gefördert wurden sechs große neue Forschungsverbünde, die unterschiedliche Ansätze für VK in Modellregionen umsetzen und im Großmaßstab im realen Betrieb erforschen sollten. Damit hatte die VK-Forschung eindeutig den Labormaßstab verlassen und ging in eine Phase großangelegter Pilotprojekte. Zum Zeitpunkt der Drucklegung dieser Arbeit sind die Projekte abgeschlossen und drei von fünf Endberichten liegen vor.

In allen E-Energy-Projekten war die Schaffung *„rationellerer Nachfragemuster, die Stromerzeugung und -verbrauch in Einklang bringen“* (vgl. Zitat der Enquete-Kommission oben) ein (vom Mittelgeber geforderter) Projektbestandteil. „Rationellere Nachfragemuster“ zu schaffen bedeutet, die Stromverbrauchsseite bei der Konzeption von VK mit einzubeziehen, was treffend mit der englischen Bezeichnung „Demand Side Integration“ (DSI) in Apel et al. [2012, S. 8] definiert ist. DSI lässt sich sinnvoll unterteilen in Demand Response (DR), was die Reaktion des Verbrauchers auf Strompreissignale umschreibt, und Demand Side Management (DSM), was als automatisierte, ggf. zentral gesteuerte Anpassung von Lasten definiert ist (ebd.). In welchem Umfang DR einen wertvollen Beitrag zur Optimierung von Verteilnetzen liefern kann und in den stärker Preis-sensitiven Strommärkten (z. B. der USA) bereits eine größere Rolle spielt, beschrieben Neenan et al. schon 2003 für ein großangelegtes DR-Programm des New Yorker Verteilnetzbetreibers NYISO Neenan et al. [2003, S. 5-1 ff.]. Die möglichen Effekte von DSM beschrieben Kamphuis et al. schon 2004 anhand einer umfangreichen Studie im Rahmen des EU-Projekts „Distributed Intelligence in Critical Infrastructures for Sustainable Power (CRISP)“ [Kamphuis et al. 2004]. Dass auch in Deutschland der Aspekt der DSI langsam größere Beachtung findet, zeigt die Tatsache, dass DSI in allen E-Energy-Projekten eine wichtige Rolle spielte und in der Zwischenzeit auch erste Unternehmen auftreten, die versuchen, DSI-Potenziale zu bündeln und kommerziell nutzbar zu machen (Fa. Entelios, München) oder DSM-Potenziale gezielt aufzubauen (Power-to-Heat-Konzepte der Fa. Enerstorage München).

Will man nun DSI-Potenziale in den Markt bringen, muss man a) wissen, wie groß das Potenzial in welchen Wirtschaftssektoren ist, und b), wo konkret sich dieses befindet. Zur Untersuchung des ersten Aspekts hat es in jüngerer Vergangenheit zahlreiche Untersuchungen und Publikationen gegeben (z. B. Stadler [2006], Klobasa [2009], Schäfers & Schubert [2010], Focken et al. [2011], Stötzer [2012] sowie Apel et al. [2012]).

Die Frage nach der konkreten Verortung dieser Potenziale ist hingegen wenig untersucht. Das liegt vermutlich vor allem daran, dass die Verortung der großen industriellen Potenziale durch die Standorte der Unternehmen wenig Schwierigkeiten bereitet. Demgegenüber sind die Potenziale der privaten Haushalte so dispers und prinzipiell ähnlich niedrig, dass eine Konkretisierung der Verortungsfrage nur bedingt Sinn macht. Bei (zukünftig ggf. vorliegender) Marktreife der Einbindung der DSI-Potenziale privater Haushalte wird man von einem Massenmarkt ausgehen können. Anders stellt sich die Situation im tertiären Sektor „Gewerbe, Handel, Dienstleistung“ dar. Hier ist das individuelle Potenzial an einem Standort deutlich niedriger als an einem Industriestandort, aber erheblich höher als in einem Privathaushalt. Zudem verteilt es sich ungleichmäßig in einer Stadt. Will man es in DSI-Vermarktungskonzepte einbringen, müssen die lohnenden Standorte zunächst identifiziert werden. Um dieses Problem zu lösen, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Methode zur Quantifizierung und Verortung des DSI-Potenzials von Liegenschaften des tertiären Sektors entwickelt sowie am Beispiel von Lüftungs- und Kälteanlagen in Büro- und Hochschulgebäuden in Hamburg umgesetzt und validiert. Dabei macht die Methode Gebrauch von der Einigung der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Bundesländer, die Datenverwaltung der Katasterdaten der Liegenschaftsbücher zu harmonisieren und zu vereinheitlichen: dem „Amtlichen Liegenschaftskataster

Informationssystem (ALKIS)“ [Stedle & Witke 2012]. Die Verwendung des ALKIS für die hier beschriebene Methode ermöglicht wegen des normierten Datenformats die sofortige Übertragbarkeit der entwickelten Algorithmen auf die ALKIS-Datensätze anderer Städte.

Mit der im Folgenden beschriebenen Methode erfolgt dabei nicht nur die Identifizierung individueller Standorte mit DSI-Potenzial, sodass diese konkret von möglichen DSI-Aggregatoren akquiriert werden können, sondern darüber hinaus auch eine Verortung über die mit den Gebäudedaten im ALKIS verknüpften räumlichen Koordinaten. Diese Verortung ist hilfreich für folgende Aspekte:

- Verknüpft man die Information mit den geografischen Informationen zu den Verteilnetzen, so lässt sich leicht bestimmen, welche Potenziale für DSI konkret in welchen Netzabschnitten vorliegen. Zwar befinden sich die im Folgenden analysierten Potenziale auf der Mittelspannungsebene, die in städtischen Verteilnetzen i. d. R. gut ausgebaut ist und wenig bis keine Probleme mit Netzengpässen aufweist. Jedoch dürfte diese Information in vereinzelt vorkommenden überdurchschnittlich belasteten Netzabschnitten hilfreich sein. Dies können z. B. Nachverdichtungsquartiere mit neuen hohen Lasten und nicht nachgerüsteter Netzanbindung oder Neubauquartiere sein, in denen die in Anspruch genommenen Leistungen nach den Gebäuderealisationen deutlich höher ausfallen als die bei der Bauplanung angegebenen und zur Netzplanung zugrunde gelegten (Hafencity Hamburg).
- Darüber hinaus ermöglicht die Verortung und die damit verbundene Möglichkeit der Darstellung in Karten eine Fokussierung der Aufmerksamkeit von Planern, die mit der energetischen Leitplanung von Städten und Stadtteilen beschäftigt sind. Die Angaben zur Verortung helfen dann abzuschätzen, wo konkret DSI-Potenzial in welcher Höhe genutzt werden kann, um die Durchdringung mit erneuerbaren Energien im Quartier oder in der Stadt zu erhöhen (und dabei zeitgleich negative Effekte der resultierenden Fluktuation im Verteilnetz möglichst zu vermeiden). Ein solcher Anwendungsfall liegt derzeit z. B. in Hamburg-Wilhelmsburg vor. Er wird im folgenden Abschnitt 1.2 kurz erläutert.

Diese Arbeit beschreibt also eine Methodik zur DSI-Potenzialabschätzung im tertiären Sektor (am Beispiel von Lüftungs- und Kälteanlagen (LuK) in Gebäuden büroähnlicher Nutzung), mit der automatisch die konkrete Verortung des Potenzials im Stadtraum erfolgt. So steht – anders als bei klassischen Potenzialstudien – diese Zusatzinformation, die, wie oben angeführt, zur tatsächlichen Realisierung¹ des Potenzials von besonderer Bedeutung ist, zeitgleich mit der Ermittlung des theoretischen Gesamtpotenzials bereit. Sie kann für die ALKIS beliebiger Städte verwendet werden.²

1.1.2 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit teilt sich in drei Abschnitte:

Die einleitenden Kapitel 1 und 2 bilden den Basisabschnitt. Kapitel 1 enthält einen Überblick über derzeitige Ansätze mit Methoden von Gebäude- und Siedlungstypologien sowie der Verwendung von Geoinformationssystemen (GIS), um den Anteil erneuerbarer Energienutzung und die Energieeffizienz in Städten systematisch zu erhöhen. Dem schließen sich in Kapitel 2 grundlegende Darstellungen über den Aufbau und die Organisation der Stromversorgung an. Die sich aus der Energiewende ergebende

¹ Mit „Realisierung“ sei hier und im weiteren Verlauf der Arbeit die Integration des Potenzials in den Energiemarkt gemeint.

² Da die Städte bestimmte Datenattribute in ihren ALKIS unterschiedlich handhaben, sind bei der Übertragung ggf. kleinere Anpassungen vorzunehmen.

Notwendigkeit einer stärkeren Integration der Strombedarfsseite (Demand Side Integration (DSI)) wird darauf folgend diskutiert. Das Kapitel schließt mit einem Überblick über die Potenziale der DSI.

Der Kernabschnitt beginnt mit Kapitel 3, in dem zunächst der Aufbau und die Ergebnisse des Forschungsprojekts „Insel: Internetbasiertes System eines erweiterbaren Lastmanagements zur Integration in virtuelle Kraftwerke“ vorgestellt werden. Der Autor hat in diesem Forschungsprojekt, das von 2008 bis 2011 vom BMBF gefördert wurde, hauptverantwortlich das DSI-Potenzial öffentlicher Liegenschaften auf Mittelspannungsebene in Hamburg untersucht. Bei den untersuchten Gebäuden handelt es sich mehrheitlich um klassische Vertreter der Gebäudekategorie „Büro- und Verwaltungsgebäude“, sodass das Forschungsprojekt die Validierungsgrundlage für die entwickelte Methode zur DSI-Potenzialabschätzung liefert. Vorgehen im Projekt und daraus gewonnene Ergebnisse werden daher in Kapitel 3 zusammenfassend vorgestellt.

Im anschließenden Kapitel 4 erfolgt dann die Herleitung und Beschreibung der Methode zur Voranalyse und Verortung des DSI-Potenzials mithilfe von ALKIS. Dazu wird zunächst die Datengrundlage des ALKIS erläutert. Daran schließt sich eine Analyse der Gebäudestruktur in Hamburg und eine Eingrenzung des Datenrahmens auf 3.793 Gebäude büroähnlicher Nutzung und Hochschulgebäude der Stadt Hamburg an. Dem folgt eine Methodenbeschreibung zur zunächst qualitativen Abschätzung der Wahrscheinlichkeit (sicher bis unsicher), ob für ein gegebenes Gebäude büroähnlicher Nutzung mit einem DSI-Potenzial aus LuK gerechnet werden kann. Das Kapitel schließt mit der ausführlichen Darstellung des Vorgehens zur dann quantitativen Abschätzung des Potenzials. Dazu werden Teilmethoden zur Untergliederung der Gebäude in Zonen unterschiedlicher Nutzung, zur Abschätzung des konditionierten Flächenanteils und zur Abschätzung der dynamischen Inanspruchnahme der installierten Leistung für LuK beschrieben. In Kapitel 5 erfolgt eine Validierung der Methode auf Basis eines Vergleichs der mit der Methode errechneten theoretischen Potenziale mit den realen Daten der aus dem FP „Insel“ bekannten Gebäude.

Der Schlussabschnitt beginnt mit der Darstellung und Auswertung der gewonnenen Ergebnisse für die 7.389 betrachteten Gebäude in Kapitel 6. Das Kapitel schließt mit einer kritischen Betrachtung der Fehlereinflüsse (Methodenkritik). Kapitel 7 fasst die Ergebnisse der Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick zu weiteren Verbesserungs-, Anwendungs- und Entwicklungsmöglichkeiten dieser Methode. Der Anhang zu dieser Arbeit enthält neben den Erhebungsdaten der Gebäude aus dem FP „Insel“, die zur Validierung verwendet wurden, auch zwei Übersichtspläne der Stadt Hamburg, die das ermittelte theoretische DSI-Potenzial aus LuK für Flurstücke der betrachteten Gebäude kartografisch darstellen. Dabei sind die Flurstücke mit DSI-Potenzial nach Leistungskategorien eingefärbt abgebildet.

1.2 Stadtplanung, energetische Stadt(teil)entwicklungskonzepte und GIS

Mit der Verwendung des ALKIS wird in dieser Arbeit ein zentrales Werkzeug der Stadtplanung zur Datenbasis einer Methode, die keinen konkreten Bezug zu den formellen Instrumenten der Stadtplanung hat. Sehr wohl ergibt sich aber ein Nutzen der hier entwickelten Methode für die informellen Instrumente der Stadtplanung, insbesondere im Rahmen der Erstellung energetischer Stadtentwicklungskonzepte.

Die formellen Instrumente der Stadtplanung sind die Instrumente der Raumplanung und Bauleitplanung (Landesraumordnungsplan, Regionalplan, Flächennutzungsplan und Bebauungsplan sowie städtebauliche Verträge und Erschließungspläne). Der gesetzgeberische Auftrag zur Raumordnung und Bauleitplanung der Gemeinden und die Festlegung der formellen Instrumente ergeben sich aus § 1 des Baugesetzbuchs (BauGB). Dort heißt es auch in (5): „Die Bauleitpläne sollen eine nachhaltige Entwicklung (...) gewährleisten und dazu beitragen, (...) die natürlichen Lebensgrundlagen zu schützen und zu entwickeln. Bei der Aufstellung der Bauleitpläne sind insbesondere zu berücksichtigen: (...) 7. die Belange des Umweltschutzes, einschließlich des Naturschutzes und der Landschaftspflege, insbesondere (...) f) die Nutzung erneuerbarer Energien sowie die sparsame und effiziente Nutzung von Energie (...) 8. die Belange a) der Wirtschaft, (...) im Interesse

einer verbrauchernahen Versorgung der Bevölkerung, (...) e) der Versorgung, insbesondere mit Energie und Wasser, einschließlich der Versorgungssicherheit (...)“ [BauGB §1(5)].

Es ergibt sich also tatsächlich ein konkreter Auftrag an die Stadtplanung im Rahmen der formellen, durch den Gesetzgeber vorgesehenen Instrumente, die Nutzung erneuerbarer Energien und Maßnahmen zur Energieeffizienz zu gewährleisten. Dabei sind die Belange der verbrauchernahen Versorgung und der Versorgungssicherheit zu berücksichtigen. Eine gute Übersicht über die Möglichkeiten, die sich aus der Anwendung der formellen Instrumente für die Zielerreichung insbesondere der Belange des Klimaschutzes ergeben, findet sich in der Arbeit von Schwarz [2009].

Die Liste der zu berücksichtigenden Aspekte in § 1(5) BauGB ist lang und die dort angeführten Anforderungen sind grundsätzlicher Art und wenig konkret. Daher kommt den die Raumordnung und Bauleitplanung vorbereitenden konzeptionellen, aber dabei informellen Instrumenten der Stadtplanung besondere Bedeutung zu. Dies gilt insbesondere für die Erstellung energetischer Stadt- oder Stadtteilentwicklungskonzepte. Sie bilden die Basis für spätere konkretere und verbindliche Festlegungen durch formelle Instrumente. Libbe et al. [2010] bemerken dazu: „Stadtentwicklungskonzepte bieten die Chance unter Berücksichtigung von aktuellen Entwicklungen und Rahmenbedingungen, übergeordnete Zielvorstellungen für die künftige Entwicklung einer Stadt umfassend und perspektivisch aufzuzeigen. Sie sind informelle Instrumente, die im Gegensatz zu formellen Instrumenten (...) nicht gesetzlich vorgeschrieben sind. Stadtentwicklungskonzepte (...) geben einen Orientierungsrahmen für die längerfristige Entwicklung einer Stadt“ [Libbe et al. 2010, S. 94 f.].

Die folgende Grafik verdeutlicht diesen Gedanken. Sie stellt die Beziehung zwischen „informellem“ Konzept und „formellem“ Raumordnungsplan dar.

Verhältnis von Regionalem Energiekonzept und formeller Regionalplanung



Bild 1-1: Verhältnis von informellem, regionalem Energiekonzept zu formeller Regionalplanung [BMVBS 2013, S. 4]

Das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) hat diesen Gedanken aufgegriffen und fördert derzeit im Forschungsprogramm MORO (Modellvorhaben der Raumordnung) regionale Energiekonzepte [BMVBS 2013], nachdem zuvor die Sinnhaftigkeit solcher regionaler Energiekonzepte auch für die lokale Wertschöpfung in einem Forschungsprojekt bestätigt wurde [BMVBS 2011]. Im Rahmen des Förderprogramms ExWoSt (Experimenteller Wohn- und Städtebau) des BMVBS wurde die Studie „Anforderungen an energieeffiziente und klimaneutrale Quartiere (EQ)“ erstellt [Schlump & Malottki 2013], die in fünf deutschen Städten und Gemeinden energetische Quartierskonzepte untersucht und bewertet hat. Gegenstand dieser Quartierskonzepte sind dabei

zunächst der Raumwärmebedarf und, daran gekoppelt, Fragen der Wärmebedarfsdeckung über Kraftwärmekopplung (KWK) und (Nah-)Wärmenetze. Strom spielt darin meist eine nachrangige Rolle. Ziel der Studie von Schlump & Malotki [2013] war es außerdem, ein Werkzeug zur energetischen Analyse zu entwickeln, das für nachfolgende energetische Quartierskonzepte zur Datenerhebung verwendet werden kann (ebd., S. 3). In ihrer Darstellung der bereits für ähnliche Zwecke erstellten Werkzeuge erwähnen die Autoren die Erstellung des Softwaretools „GemEB“ (Gemeinde-Energiebilanzierung)³ von Hausladen et al. im Rahmen des „EnEff:Wärme-Pilotprojekt Ismaning – Energieleitplanung und Gebäudebilanzierungssoftware GemEB Version 1.3“ [Hausladen et al. 2011] und schreiben diesem Projekt die Prägung des Begriffes „Energieleitplanung“ zu, ein Begriff, der ausdrücken soll, dass hier Raum- und Fachplanung an der Schnittstelle zwischen Flächennutzungsplan und Projektplanung integral zusammenarbeiten, um Leitkonzepte bzw. energetische Quartierskonzepte zu erstellen und umzusetzen [Schlump & Malotki 2013, S. 37].

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) fördert gezielt solche Konzepte mit Bezug zur Steigerung der Energieeffizienz in Quartieren und Städten sowie entsprechende Pilotprojekte in den Programmen EnEff:Stadt und EnEff:Wärme [BMWi 2013a]. Auf der Internetseite der Forschungsinitiative finden sich Beispiele aus zahlreichen Städten für energetisch anspruchsvolle Quartierskonzepte aus allen vier stadtplanerisch relevanten Bereichen: Neubau, Sanierung, Nachverdichtung sowie Umnutzung/Konversion. Darüber hinaus fördert das BMWi auch die Erstellung und Erprobung neuer Planungswerkzeuge für die Energieleitplanung im Förderschwerpunkt Energiesystemanalyse (EnSys). Dabei ist festzustellen, dass in den Projekten die Auseinandersetzung mit Fragestellungen der Stromversorgung insbesondere vor dem Hintergrund der Eigenstromerzeugung und -verwendung von Strom aus KWK und/oder Erneuerbaren (insb. PV) in den letzten Jahren zugenommen hat.

In den drei Förderschwerpunkten werden derzeit mehrere aktuelle Projekte geführt, in denen die Verwendung geografischer Informationssysteme (GIS) eine zentrale Rolle spielt (ebd.). Ergebnisse und Einsichten der Begleitforschung der bisher durchgeführten Projekte fanden Eingang in das Buch „Energetische Quartiersplanung“ [Erhorn-Kluttig et al. 2011]. Die Autoren geben darin eine Übersicht über die zur energetischen Quartiersplanung verwendeten Planungshilfsmittel (Simulationsprogramme und Datenbanken) (ebd., S. 114). Sie erachten GIS als geeignete Planungshilfsmittel im Rahmen der strategischen Planung und der Vorplanung insbesondere zur Erfassung der räumlichen Zusammenhänge und zur Durchführung von Optimierungsrechnungen (ebd.).

Die Erfassung der räumlichen Zusammenhänge mithilfe GIS-basierter Planungstools ist insbesondere bei leitungsgebundenen Energien (Strom, Wärme aus Wärmenetzen, Gas) von besonderem Interesse, da so Entnahmestellen (Verbraucher) und Einspeisestellen (Versorger) in einen geografischen Zusammenhang gebracht werden und leitungsbedingte Einflüsse (Verluste, Leitungsengpässe etc.) in der Energieleitplanung mit berücksichtigt werden können.

Das ALKIS als Datenbank mit explizit räumlichem Bezug der enthaltenen Elemente/Informationen kann als ein solches GIS-basiertes Planungshilfsmittel für strategische Vorplanungen verstanden und genutzt werden. Das ist die Intention dieser Arbeit.

GIS und digitalisierte Stadtkarten sind als Werkzeuge in der Energieleitplanung/Energie-Quartiersplanung und energetischen Fachplanung schon länger im Einsatz. So bedienen sich die inzwischen für viele Städte vorliegenden Solaratlanten dieser Daten, um Aussagen über die Effektivität von Solaranlagen auf spezifischen Gebäudedächern zu erhalten und das PV- oder thermische Solarpotenzial von Städten in Gänze abzuschätzen. Als Beispiel sei hier auf den Hamburger Solaratlas verwiesen [Hamburg Energie 2013]. Aber auch zur Abschätzung des Potenzials anderer erneuerbarer Energien für Städte und Regionen sind GIS-Datenbanken inzwischen zu einem unverzichtbaren

³ GemEB ist ein GIS-Plug-in für das Programm „Quantum GIS“, ebenso wie die im Rahmen dieser Arbeit mit Python erstellten Algorithmen ein Plug-in für „Arc-GIS“ darstellen.

Werkzeug weltweit geworden, wie z. B. Aydin et al. [2013] für Windenergie in der Türkei, Tiba et al. [2010] für das Potenzial erneuerbarer Energien in Brasilien oder van Hoesen & Letendre [2010] in Vermont, USA. Im Bereich der strategischen Planung von Fernwärmesystemen sind GIS-basierte Methoden ebenfalls nicht nur in Deutschland ein wichtiges Werkzeug. Neben den Fernwärmeprojekten in Förderprogrammen EnEff:Stadt und EnEff:Wärme [BMWi 2013a] zeigen dies Nielsen & Möller [2013] für Dänemark und Gils et al. [2013] für die USA. Für Stromnetze werden GIS-basierte „Netzinformationssysteme (NIS)“ standardmäßig schon seit Jahren von den Netzbetreibern eingesetzt. Quinonez-Varela et al. [2007] untersuchen die Frage nach der Aufnahmefähigkeit von Netzabschnitten für Strom aus Erneuerbaren mithilfe von GIS. Bonder & Bernsdorf [2013] betrachten den Nutzen der Berücksichtigung des Raumbezugs allgemein bei der Integration erneuerbarer Energien in die Energienetze. Sie zeigen auf, dass nicht nur GIS die Planung beeinflussen, sondern dass sich auch aus den Planungsprozessen neue Anforderungen an die GIS ergeben, allen voran die Befähigung zur Verwaltung dynamischer ereignisorientierter Prozesse (ebd., S. 83).

Dass GIS auch für die strategische Stadtplanung in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewinnt, zeigen Yu et al. [2012], die mithilfe von GIS-Daten den Einfluss der urbanen Form auf den Energieverbrauch analysieren, ebenso wie Yeo et al. [2013], die GIS verwenden, um Vorhersagen des städtischen Energiebedarfs zu simulieren. Beide Paper entstammen dem in diesen Fragen gerade sehr dynamischen asiatischen Raum (China und Korea). Nga et al. (Malaysia) untersuchen die Möglichkeiten, mit GIS die Visualisierung statischer und dynamischer Informationen in Smart Grids zu verbessern [Nga et al. 2012, S. 180 f.].

Eine strategische Energieleitplanung unter Verwendung der ALKIS-Daten fand in Hamburg aktuell in größerem Maßstab im Rahmen der internationalen Bauausstellung (IBA) in Hamburg-Wilhelmsburg statt. Ein Teilprojekt war die Potenzialabschätzung für die Nutzung erneuerbarer Energie im Stadtteil Wilhelmsburg und die daraus folgende Energieleitplanung für das Konzept „Erneuerbares Wilhelmsburg“ [IBA 2010]. Die Ergebnisse des Projekts zeigten, dass es relativ zeitnah (2025) theoretisch möglich ist, den Strombedarf dieses Stadtteils aus erneuerbaren Energien zu decken (ebd., S. 9). Die Berechnung vergleicht dabei aber – wie so oft in der Diskussion um mögliche hundertprozentige Versorgungskonzepte aus erneuerbaren Energien – die sich ergebende energetische Jahresbilanz und berücksichtigt nicht die dynamischen Fluktuationen bei der Produktion von Strom aus Sonne und Wind. Nach entsprechender Kritik gab die IBA daher eine Studie in Auftrag, die diese Problematik näher untersuchen sollte [Peter & Lutzenberger 2013]. Sie wurde vom Verteilnetzbetreiber mitfinanziert, da es sich beim Stadtteil Wilhelmsburg um eine Inselanlage (Elbinsel) handelt und ein dortiger massiver Ausbau der dezentralen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien eine erhebliche Belastung des lokalen Verteilnetzes darstellt und ggf. einen Netzausbau notwendig macht.

Die Studie wurde kürzlich fertiggestellt und kommt zu folgendem Schluss: *„Es zeigt sich, dass die im Energieatlas im Exzellenzscenario berechnete Annahme einer 100% Versorgung für Wilhelmsburg durch erneuerbare Energien zwar in Jahressummen erreichbar ist, aber eine lokale Autarkie nicht gegeben ist. Die stark fluktuierende Stromerzeugung führt in der dynamischen Betrachtung sowohl zu hohen Stromüberschüssen als auch zu Defiziten in der Bereitstellung. Das bedeutet, dass Stromimporte bis 25 MW zur Versorgungssicherheit nach Wilhelmsburg eingebracht werden müssen. Demgegenüber stehen Stromüberschüsse bis zu 158 MW, welche aus dem Untersuchungsraum in benachbarte Netze abgeführt bzw. unter Umständen abgeregelt werden müssen. Der Einsatz von Stromspeichern verringert diese Überschüsse auf ca. 132 MW. Die Konsequenzen daraus sind Notwendigkeiten zur Optimierung. Zum einen ergeben sich Konsequenzen für das Lastmanagement, womit eine Anpassung von Stromnachfrage und -angebot erfolgen kann. Zum anderen ist die Entwicklung und der Einsatz von Kurz-, Mittel-, und Langfristspeichern notwendig, um den zeitlichen Abgleich von Erzeugung und Verbrauch zu realisieren“* (ebd., S. K1-1).

Die in dieser Arbeit in Kapitel 3 hergeleitete Methode zur DSI-Potenzialabschätzung unter Verwendung des ALKIS liefert nun (u. a.) genau die benötigten komplementären Informationen für das

Lastmanagementpotenzial (= Demand-Side-Integration-Potenzial) in Wilhelmsburg. Dabei wird genau ermittelt, wo, in welchem Gebäude konkret, mit welchem theoretischen Lastverlagerungspotenzial zu rechnen ist. Die Aussagen dieser Arbeit sind derzeit noch begrenzt auf das DSI-Potenzial aus LuK in Bürogebäuden, allerdings sind sie leicht erweiterbar. Damit ergibt sich bereits heute ein interessantes Anwendungsbeispiel für die hier erstellte Methode zur Verwendung in der Energieleitplanung bzw. energetischen Quartiersplanung.

Die Nutzung von DSI-Potenzialen im Stromsystem erfolgt stets vor dem Hintergrund, dass Strom im Stromnetz (anders als Wärme und Gas) nicht zwischengespeichert werden kann. Es muss stets genauso viel Strom erzeugt werden, wie Nachfrage durch die Verbraucher des Stromnetzes (in Summe) besteht. Das Ab- bzw. Zuschalten von Verbrauchern im Rahmen der Nutzung von DSI-Potenzialen hilft als Systemdienstleistung, ein ggf. entstandenes Ungleichgewicht zwischen Produktion und Erzeugung wieder auszugleichen. DSI kann in diesem Zusammenhang z. B. für den Einsatz als Regelenergie oder zum Bilanzkreisausgleich Verwendung finden.

Die Organisation des Betriebs der Stromnetze, die Schwierigkeiten, die die Energiewende für deren Betrieb mit sich bringt, ebenso wie die Frage nach den vorhandenen DSI-Potenzialen und wie diese unterstützend eingebracht werden können, stellen einen komplexeren Sachzusammenhang dar. Dessen Verständnis ist für die weiteren Darstellungen der Arbeit aber grundlegend. Daher werden die entsprechenden Zusammenhänge im folgenden Abschnitt erläutert – der einschlägig informierte Leser möge ihn überspringen.

2 Stromversorgung, Energiewende und Demand Side Integration

2.1 Organisation der Stromversorgung und des Strommarkts

Die flächendeckende, zuverlässige Versorgung mit elektrischer Energie (Strom) ist eine Grundlage industrialisierter Gesellschaften, die von allen gesellschaftlichen Akteuren im täglichen Leben mit großem Selbstverständlichkeitsanspruch postuliert wird. Tatsächlich aber ist diese Selbstverständlichkeit in ihrer heutigen Form gesellschaftlich relativ jung. Sie entwickelte sich langsam ab den 90er Jahren des 19. Jahrhunderts und besteht als flächendeckende Versorgung mit elektrischer Energie erst seit der Zeit nach dem zweiten Weltkrieg. Auch ist die Sicherstellung der allzeitigen Verfügbarkeit von Strom mit einem erheblichen organisatorischen Aufwand verbunden.

Aus diesem Grund sei im Folgenden auf die Organisation der europäischen Verbundnetze, insbesondere des kontinental-europäischen Netzes (des früheren sog. UCTE-Netzes), und die damit verbundene marktbezogene Organisation der Bilanzierung von Strommengen und Bilanzabweichungen eingegangen.

Die Sicherstellung der Versorgung mit elektrischer Energie hat dabei immer zwei Aspekte:

- a) den rein physikalischen Aspekt, die Leistungsflüsse und die Stabilisierung des Stromnetzes zu organisieren, und
- b) den ökonomischen Aspekt, die finanziellen Aufwendungen zur Stabilisierung der Stromversorgung abrechnen zu können.

Der erste Aspekt erfordert die Festlegung technischer Regeln, die bei der Organisation großer transnationaler Verbundnetze in allen beteiligten Ländern Beachtung finden müssen.

Der zweite Aspekt betrifft die Gestaltung eines Rechtsrahmens für Märkte und Marktregeln. In einem solchen Rechtsrahmen erhält die Umsetzung der technischen Erfordernisse eines sicheren Netzbetriebs monetäre Abrechnungsregeln. Da der erste Aspekt aber an ein natürliches Monopol gekoppelt ist (die vorhandenen Netze), ist es erforderlich, die Organisation des zweiten Aspekts diskriminierungsfrei zu regulieren. Die Schaffung entsprechender Marktregeln ist ein wichtiges Anliegen des Europäischen Parlaments und der Kommission. Eine Folge ist das dritte Legislativpaket zur Schaffung eines europäischen Energiebinnenmarktes und die EU-Verordnung Nr. 1228/2003 vom 26. Juni 2003 über die „Netzzugangsbedingungen für den grenzüberschreitenden Stromhandel“ (Artikel 1 [1228/2003/EU 2006], [Kerebel 2013]).

Betreiber von Übertragungsnetzen als Teile eines Verbundnetzes finden sich in der Situation, mit anderen verbundenen Übertragungsnetzbetreibern gemeinsame verbindliche technische Regeln über den Netzbetrieb vereinbaren zu müssen. Für das kontinentaleuropäische Verbundnetz sind diese Regeln seit den 1950er Jahren durch die UCTE festgelegt. Die letzte verbindliche Version liegt in Form des achtteiligen „Operation Handbook“ von 2004 vor [UCTE 2004a, S. I-1 f.]. Sie wurde für die deutschen Übertragungsnetzbetreiber adaptiert im TransmissionCode 2007 des Verbands der Netzbetreiber (VDN e. V.) [Berndt 2007, S. 7].

Die rechtliche Grundlage für die Anwendung der Regeln des „Operation Handbook“ bzw. des TransmissionCode 2007 bilden die EU-Verordnung Nr. 1228/2003 vom 26. Juni 2003 über die „Netzzugangsbedingungen für den grenzüberschreitenden Stromhandel“ und – in der nationalen Umsetzung für Deutschland – das aktuelle Energiewirtschaftsgesetz (EnWG). Beide geben den Stromnetzbetreibern explizit auf, sich Regeln für den sicheren Betrieb ihrer Netze aufzuerlegen und diese zu veröffentlichen ([1228/2003/EU 2006, Artikel 5 (2)] und [EnWG: 2013, 19]). Diese Festlegungs- und Veröffentlichungspflichten sind mit dem „Operation Handbook“ der UCTE und in der nationalen Umsetzung mit dem „TransmissionCode 2007“ erfolgt [Berndt 2007, 1.1 (3) u. (4)].

Es bleibt aber festzuhalten, dass es die Schaffung der Verbundnetze mit der daraus erfolgenden Notwendigkeit für gemeinsame Betriebsregeln waren, die schon viel früher zu solchen gemeinsamen Regeln des Netzbetriebs führten, und deren Einhaltung dann in multilateralen Verträgen der beteiligten Unternehmen festgelegt wurde [Walser & Wagner 2011].

Die Ausführungen im Abschnitt 2.3 über den Einsatz von Regelenergie zur Frequenzstabilisierung beziehen sich auf die entsprechenden im „Operation Handbook“ und im „TransmissionCode 2007“ dargestellten Regeln und Verfahren. Im Folgenden seien zunächst noch einige Ausführungen zur Organisation der Verbundnetze und zur Rolle der Netzfrequenz als Führungsgröße gemacht.

2.2 Die europäischen Verbundnetze und die Netzfrequenz

Bei der Stromversorgung hat sich in der historischen Entwicklung Wechselstrom durchgesetzt. Der Vorteil im Vergleich zu einer Versorgung mit Gleichstrom ist, dass er leicht in unterschiedliche Spannungsebenen transformiert werden kann, sodass auf sehr hohen Spannungsebenen (110 bis 380 kV) ein Stromtransport über längere Distanzen mit geringen Verlusten möglich wird. In mittleren Spannungsebenen (10 bis 20 kV) wird der Strom regional verteilt, um in niedrigeren Spannungsebenen (230 V bis 380 V) lokal eingesetzt zu werden.

Der Einsatz von Wechselspannung bedingt aber, dass alle Kraftwerke in einem Verbundnetz ihre Generatoren synchron betreiben. Dabei bedingt die Drehzahl (Geschwindigkeit) der Generatoren die Frequenz der Wechselspannung. Diese Frequenz ist eine der wichtigsten Kenngrößen eines Verbundnetzes und es gilt, sie in engem Rahmen stabil zu halten. Sie ist in den europäischen Verbundnetzen auf 50 Hz festgelegt⁴ [Swissgrid 2013]. Bei höherem Strombedarf laufen die Generatoren gegen eine größere Last. Das bremst sie und die Frequenz sinkt unter die Sollgröße. Bei geringer werdender Last ist auch das Gegenmoment der Last geringer und die Generatoren drehen leichter und damit schneller: Die Netzfrequenz steigt über die Sollgröße (ebd.).

Da das Stromverbundnetz keine Speicherfunktion hat, muss in der Folge in jedem Augenblick so viel elektrische Leistung erzeugt werden, wie die angeschlossenen Verbraucher entnehmen. Zur Ausregelung dieses Gleichgewichts setzen die Übertragungsnetzbetreiber sog. „Regelenergie“ ein, die sie bei dafür präqualifizierten und kontrahierten Parteien/Handelspartnern einkaufen (vgl. 2.3).

Zur Stabilisierung hat sich darüber hinaus historisch die Bildung großer Stromverbundnetze bewährt, da in großen Netzverbänden kleine Änderungen der Erzeugungs- oder Verbrauchsseite nicht so stark ins Gewicht fallen wie in kleinen (separierten) Stromnetzen: Die Frequenz wird stabilisiert, da große Netzverbände träge(r) auf Lastschwankungen reagieren. Eine auf diese Weise stabilisierte Versorgung ist sowohl für die jeweiligen Betreiber von Teilbereichen (= Regelzonen) solcher Netzverbände als auch für die angeschlossenen Verbraucher von Vorteil.

Historisch betrachtet entstanden in den 1920er Jahren erste transnationale Stromtrassen, die längste mit 700 km von Frankreich über die Schweiz bis nach Italien, was die Schaffung einer ersten internationalen Koordinierungsstelle notwendig machte. Es entstand die Union of Producers and Distributors of Electrical Energy (UNIPED) [Walser & Wagner 2011, S. 8]. Mit dem zweiten Weltkrieg wurde diese Entwicklung wieder zurückgeworfen. In der Folge entstand erst 1951 in Kontinentaleuropa aus dem Zusammenschluss der Stromnetze Frankreichs, Italiens, Luxemburgs, Belgiens, der Schweiz, Österreichs, der Niederlande und der Bundesrepublik Deutschland die UCTPE, die „*Union pour la*

⁴ Da ständig Abweichungen von diesem Sollwert auftreten, aber manche Anwendungen (Uhren) die Netzfrequenz als Taktgeber verwenden, muss mindestens die durchschnittliche Netzfrequenz immer bei 50 Hz liegen. Dazu wird die Sollfrequenz ggf. um 10 mHz erhöht oder gesenkt. Dies geschieht zur Anpassung der Netzzeit an die durch die Atomuhren gemessene Zeit, wenn die Netzzeit von der gemessenen Zeit um mehr als 20 Sekunden abweicht (Swissgrid [2013]; Swissgrid [2013]).

coordination de la production et du transport de l'électricité“ (frz. für „Union für die Koordination der Produktion und des Transports von Elektrizität“) [Walser & Wagner 2011, S. 11].

Nach und nach traten weitere europäische Länder bei, sodass der 1999 mit der Liberalisierung des Strommarkts in „Union for the Coordination of Production and Transmission of Electricity (UCTE)“ umbenannte Zusammenschluss nun ein Verbundnetz mit 29 Übertragungsnetzbetreibern aus 24 Ländern und damit eines der größten Verbundnetze weltweit darstellt [ENTSO-E 2013].

Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über die Topologie des UCTE-Verbundnetzes.

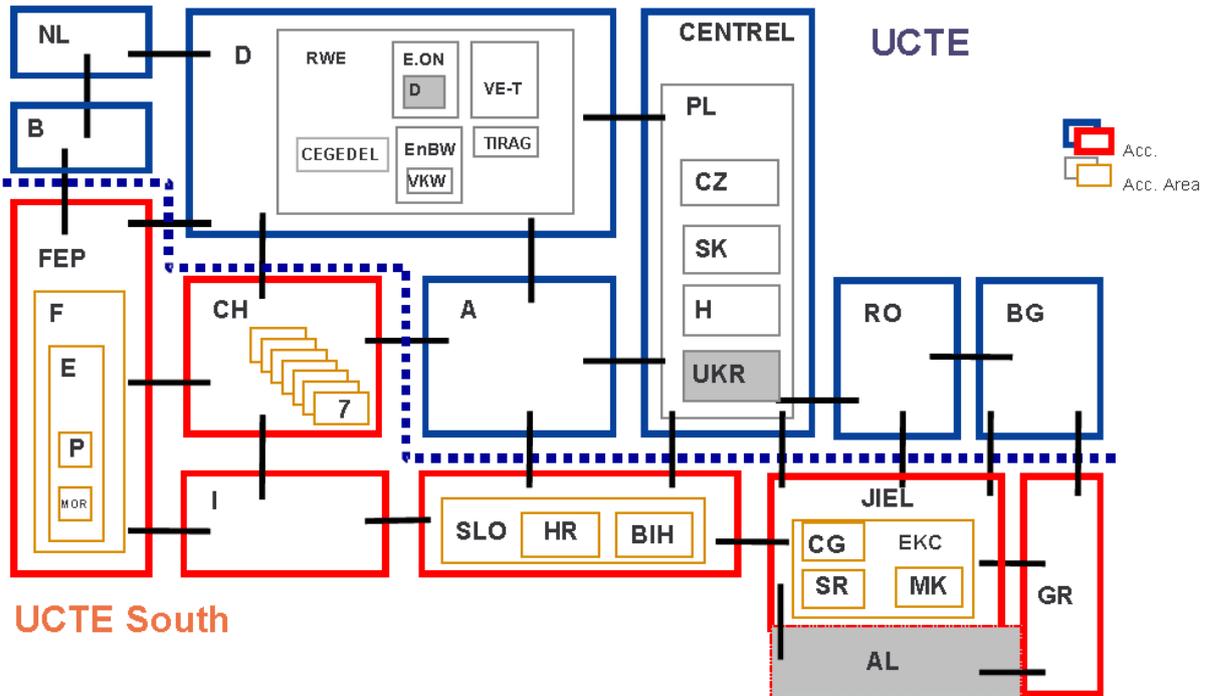


Bild 2-1: Europäische Verbundnetze und Regelzonen [Walser & Wagner 2011, S. 36]

Betrachtet man den deutschen Teil des UCTE-Netzes, so ist festzustellen, dass dieser sich in vier Regelzonen unterteilt (vgl. Bild 2-2): Die Netzbereiche der Amprion GmbH Netz (vormals RWE), der TenneT TSO GmbH (vormals E.On), der elia/50 Hz Transmission GmbH (vormals Vattenfall Europe (VE) Transmission) und der EnBW/Transnet BW (vgl. Bild 2-1).

Die RWE übernahm früher gegenüber der UCTE die Regelführung der vier deutschen Regelzonen. Sie ist daher in Bild 2-1 als ein die anderen Regelzonen umgebendes Rechteck dargestellt.

Regelzonen der vier großen Übertragungsnetzbetreiber in Deutschland



Bild 2-2: Regelzonen der deutschen Übertragungsnetzbetreiber [Berkel 2013]

Infolge der oben erwähnten Schaffung des EU-Energiebinnenmarkts haben sich die Übertragungsnetzbetreiber der Europäischen Staaten in der ENTSO-E zusammengefunden. Diese führt seit 1999 die Aufgaben der Organisation und Administration der Europäischen Netzverbände zusammen und vertritt die gebündelten Interessen der Übertragungsnetzbetreiber gegenüber dem europäischen Gesetzgeber. Nach einer Übergangsphase ist die UCTE nun seit Juli 2009 als Organisation nicht mehr existent. Ihre Aufgaben wurden komplett von der ENTSO-E übernommen. Für den Netzbetrieb des UCTE-Netzes gilt jedoch weiterhin das „Operation Handbook“ in der Fassung von 2005 [ENTSO-E 2013]. Es verbleibt eine Regionalgruppe „Continental Europe“ im System Operations Committee der ENTSO-E, die das UCTE-Netz vertritt [ENTSO-E 2012].

Die in der ENTSO-E zusammengeschlossenen Netzverbände umfassen fünf für sich eigenständig synchronisierte Regionalgruppen, die nicht über Wechselspannung, sondern über Gleichspannung miteinander verbunden sind und für die jeweils eigene Betriebsregeln gelten (eine davon ist die Regionalgruppe „Continental Europe“ mit dem alten UCTE-Netz). Die folgende Grafik verdeutlicht dies.

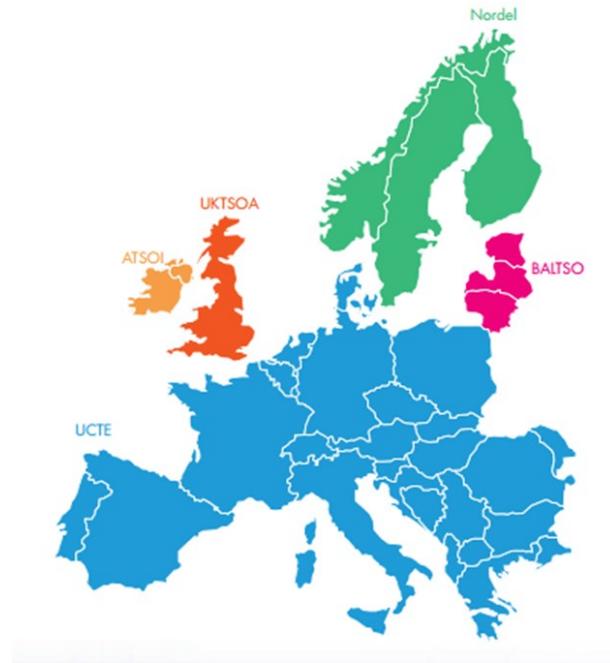


Bild 2-3: Synchrone Verbundnetzabschnitte der ENTSO-E als Regionalgruppen verändert nach [ASUE 2010, S. 11]

2.3 Regelenergie zur Frequenzstabilisierung und Leistungsbalance

Wie oben erwähnt, wird zur Frequenzstabilisierung durch die ÜNB Regelenergie eingesetzt. Abweichungen von der Sollfrequenz kommen dabei stets in einer von zwei möglichen Richtungen vor: positiv oder negativ, also zu hohe oder zu niedrige Frequenz. Entsprechend definiert sich

- positive Regelenergie als die Regelenergie, die zur Ausregelung negativer Abweichungen der Frequenz verwendet wird, und entsprechend
- negative Regelenergie als die Regelenergie, die zur Ausregelung positiver Abweichungen der Frequenz verwendet wird.

Ein Eingriff zur Wiederherstellung des Gleichgewichts kann dabei auf beiden Seiten (Erzeugung und Verbrauch) erfolgen. So kann positive Regelenergie entweder bereitgestellt werden durch eine Erhöhung der Einspeiseleistung der Generatoren oder aber durch eine Reduzierung der Abnahmeleistung der angeschlossenen Verbraucher. Entsprechend kann negative Regelleistung bereitgestellt werden durch eine Drosselung der Einspeiseleistung der Erzeuger oder eine Erhöhung der Stromabnahme durch Verbraucher. In der Realität finden beide Konzepte Anwendung, jedoch ist traditionell die Anpassung der Einspeiseleistung der Generatoren stärker ausgeprägt.

Der Einsatz von Regelenergie erfolgt in einer Abfolge von drei Schritten, wobei der letzte Schritt oft nicht mehr benötigt wird und die Sollfrequenz nach zwei Schritten als wiederhergestellt gilt. Die drei Schritte werden mit den Begriffen Primärregelung, Sekundärregelung und Minutenreserve (Tertiärregelung) bezeichnet. Der Ablauf ihres Einsatzes wird in der folgenden Grafik des „Operation Handbook“ der UCTE verdeutlicht.

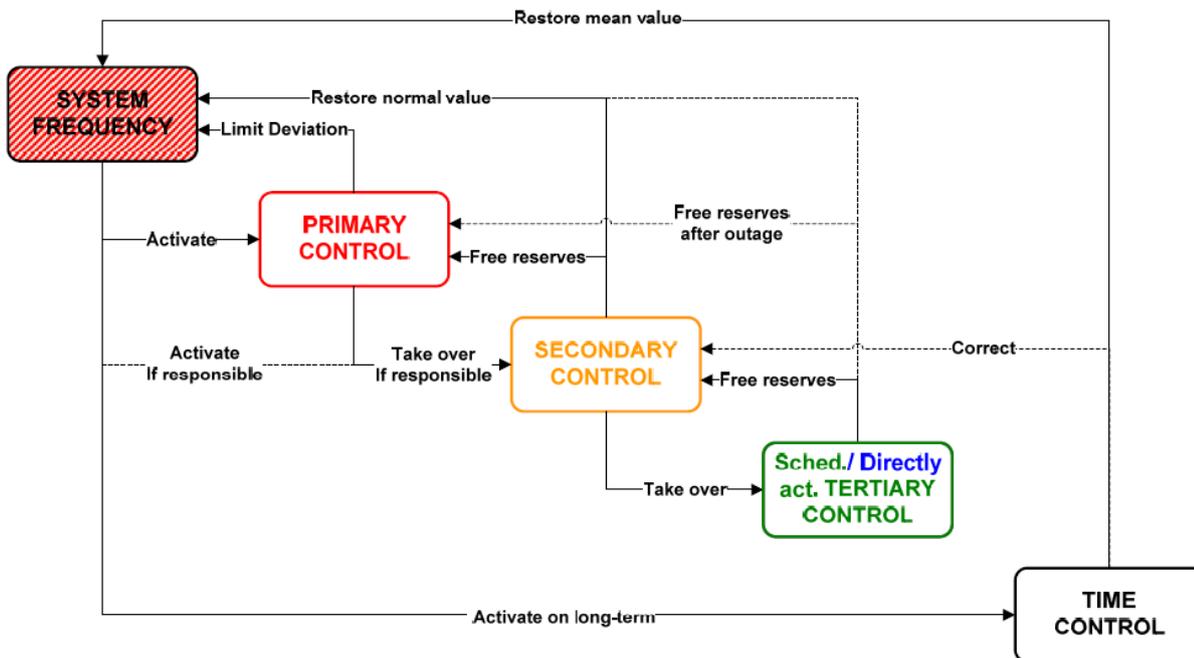


Bild 2-4: Kontrollschema zum Einsatz der Reserveleistungen [UCTE 2004c, S. 1 f.]

Ist die entstandene Frequenzabweichung durch diese drei Reserven nicht auszugleichen, erfolgen Notfallmaßnahmen, die bis hin zur Abschaltung/Netztrennung von Generatoren und Verbrauchern sowie zur Abtrennung von Teilen des Verbundnetzes reichen.

Die folgenden Abschnitte erläutern den Einsatzablauf und die marktseitige Bereitstellung der Reserven (sowie den Einsatz von Notfallmaßnahmen). Dies geschieht insbesondere vor dem Hintergrund, dass DSI eine geeignete Quelle für diese Reserven darstellt.

2.3.1 Primärregelung

Die Primärregelung startet automatisch bei Auftreten einer Frequenzabweichung, die größer ± 20 mHz als die Sollfrequenz ist [UCTE 2004b, A-D2.1]. Sie wird von allen Kraftwerken des UCTE-Verbundnetzes geleistet, da bei Auftreten der Abweichung der Netzbereich, der die Abweichung ausgelöst hat, nicht ermittelt ist. Durch die Primärregelung wird die Frequenzabweichung zunächst nur stabilisiert. Sie wird noch nicht auf ihren Sollwert zurückgeführt [UCTE 2004c, 1–4] (vgl. Bild 2-4). Unterstützend wirken dabei alle rotierenden Massen des Stromsystems (Generatoren, Motoren, Pumpen, Ventilatoren etc.), die durch ihre kinetische Energie in Verbindung mit der resultierenden Massenträgheit eine Vergrößerung der Frequenzabweichung dämpfen (Selbstregelleffekt der Momentanreserve, vgl. [Berndt 2007, S. 82]).

Die Aktivierung der Primärregelleistung (PRL) erfolgt vollautomatisch mithilfe geeichter Frequenzmesser an den an der PRL beteiligten Einheiten. Die Menge der aktivierten Regelenergie ist dabei proportional zur Höhe der aufgetretenen Frequenzabweichung und wird über die individuellen Netzleistungszahlen und Beteiligungsquotienten der Regelzonen festgelegt [Berndt 2007, S. 81]. Dabei ist die Aktivierungsgeschwindigkeit festgelegt als 3,33 % der maximalen Primärregelleistung pro Sekunde, sodass nach 15 Sekunden die halbe und nach 30 Sekunden die volle Primärregelleistung aktiviert ist. Zusätzlich dürfen aus Gründen der Systemsicherheit (Dezentralisierung zur Reduzierung des Ausfallrisikos) an einem Netzknoten nur maximal 6 % der maximal im UCTE-Netz vorzuhaltenden PRL angeschlossen sein, von einer einzelnen Anlage dürfen maximal 3 % erbracht werden [Berndt 2007, S. 51].

Bei vollständiger Aktivierung der Primärregelleistung darf eine resultierende Frequenzabweichung nicht größer als ± 200 mHz sein. Dies soll dadurch sichergestellt werden, dass die Gesamtmenge der

durch die Übertragungsnetzbetreiber des UCTE-Netzes zu kontrahierenden PRL sich rechnerisch an der Frequenzabweichung orientiert, die sich ergeben würde, wenn eine Erzeugungsleistung in Höhe von 3 GW ungeplant ausfiele. Dies entspräche dem Ausfall zweier großer Kraftwerke [UCTE 2004c, S. 1 f.]. Diese Gesamtmenge wird auf die verschiedenen Netzbetreiber des UCTE-Netzes gemäß ihrem Anteil an der Erzeugung jährlich neu verteilt. So stellten die deutschen ÜNB 2011 einen Anteil von 612 MW an PRL [Beschlusskammer 6 der Bundesnetzagentur 2011, S. 6] bereit. Dabei sieht der TransmissionCode vor, dass sich im Regelfall alle Erzeugungseinheiten mit mehr als 100 MW Erzeugungskapazität an der PRL beteiligen [Berndt 2007, S. 51]. PRL kann aber auch über regelbare Lasten erbracht werden (ebd.). Zum Beispiel beteiligen sich die Hamburger Aluminiumwerke über eine Regelung ihrer Schmelzflusselektrolyse an der PRL.

2.3.2 Sekundärregelung

Die Sekundärregelung löst die Primärregelung ab. Sie hat die Aufgabe, die Sollfrequenz wieder herzustellen. Zum Einsatz von Sekundärreserveleistung (SRL) sind diejenigen Übertragungsnetzbereiche des UCTE-Netzes verpflichtet, in denen die Leistungsabweichungen stattgefunden haben, die zur entstandenen Frequenzabweichung beigetragen haben. Die ÜNB haben für ihre Regelzonen die Verantwortung zur Stabilisierung der angemeldeten Lastflüsse. Abweichungen in seiner Regelzone muss der verantwortliche ÜNB selbstständig ausgleichen können. Dazu wird kontinuierlich die Lastflussmessung an den Netzkoppelstellen ausgewertet. Die angemeldeten Fahrpläne werden mit den Ist-Lastflüssen verglichen. Dies geschieht kontinuierlich und aktiviert ggf. vollautomatisch die SRL. Dies geschieht nach den 30 Sekunden, in denen überall im UCTE-Netz die PRL aktiviert wurde. Jeder ÜNB verwendet dazu einen Leistungs-Frequenzregler für seine Regelzone, der über ein proportional-integrales Verhalten die zu aktivierende Menge an SRL bestimmt (PI-Regler, [Berndt 2007, S. 83]):

$$P_{di} = -\beta_i * G_i - \frac{1}{T_i} \int G_i dt \quad \text{Formel 2-1}$$

mit

ΔP_{di} = Stellgröße des Reglers (angeforderte SRL-Leistung in der Regelzone i),

β_i = Verstärkungsfaktor des SRL-Reglers für die Regelzone i (Proportionalanteil),

G_i = Regelabweichung der Regelzone i,

T_i = Integrationszeitkonstante des SRL-Reglers in der Regelzone i.

Die Sekundärregelung muss innerhalb von fünf Minuten vollständig aktiviert werden können und soll nach spätestens 15 Minuten die Primärregelung wieder vollständig abgelöst haben. Dabei kann sie ggf. von der Minutenreserve (s. u.) unterstützt werden.

Die Rückführung geschieht innerhalb eines Korridors, der sich direkt aus dem Regelverhalten der Frequenz-Leistungsregler ergibt. Dieser Korridor wird als Trompetenkurve bezeichnet und ist in der UCTE wie folgt definiert [UCTE 2004b, S. 21]:

$$H(t) = f_0 \pm A * e^{-t/T} \quad \text{Formel 2-2}$$

mit

$H(t)$ = maximal tolerierte Frequenzabweichung nach Auslösung der PRL (Verlauf der Trompetenkurve). Werden diese Werte nicht über- bzw. unterschritten, erfolgt keine weitere PRL/SRL-Aktivierung.

f_0 = Sollwert der Netzfrequenz vor der Auslösung der PRL (50 Hz, bei Korrektur der Netzzeit ggf. angepasst (s. o. Fußnote 4))

A = Verstärkungsfaktor (Proportionalfaktor) = $1,2 * \Delta f_2$, mit Δf_2 = die PRL auslösende Frequenzabweichung (f_1 bezeichnet die Ist-Frequenz unmittelbar vor dem Auftreten der die PRL auslösenden Frequenzabweichung)

t = Zeit in Sekunden nach Auslösung der PRL

T = Zeitkonstante = $\frac{900}{\ln(\frac{A}{d})}$, mit A = s. o., d = erlaubte bleibende Frequenzabweichung (± 20 mHz) und 900, da Rückführung auf Sollfrequenz innerhalb 15 Minuten (= 900 Sekunden)

Die folgende Grafik zeigt eine Schar Trompetenkurven für verschiedene Frequenzabweichungen und resultierend eingesetzte SRL-Mengen.

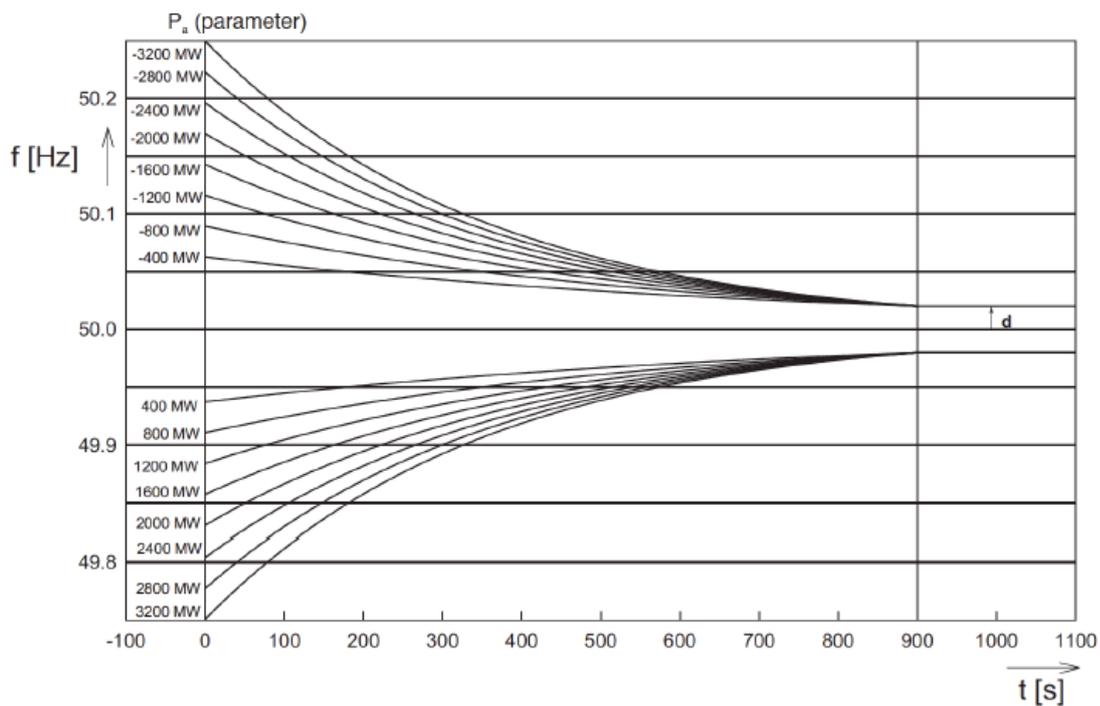


Bild 2-5: Schar von Trompetenkurven aus dem Operation Handbook der UCTE [UCTE 2004b, S. 21]

Die folgende Grafik zeigt beispielhaft den Frequenzverlauf nach dem Einsatz von PRL und SRL innerhalb der nach der aufgetretenen Abweichung gültigen Trompetenkurve. Die Sollfrequenz ist in diesem Beispiel zwecks Netzzeitkorrektur [UCTE 2004c, S. 1 f.] auf 50,01 Hz gesetzt.

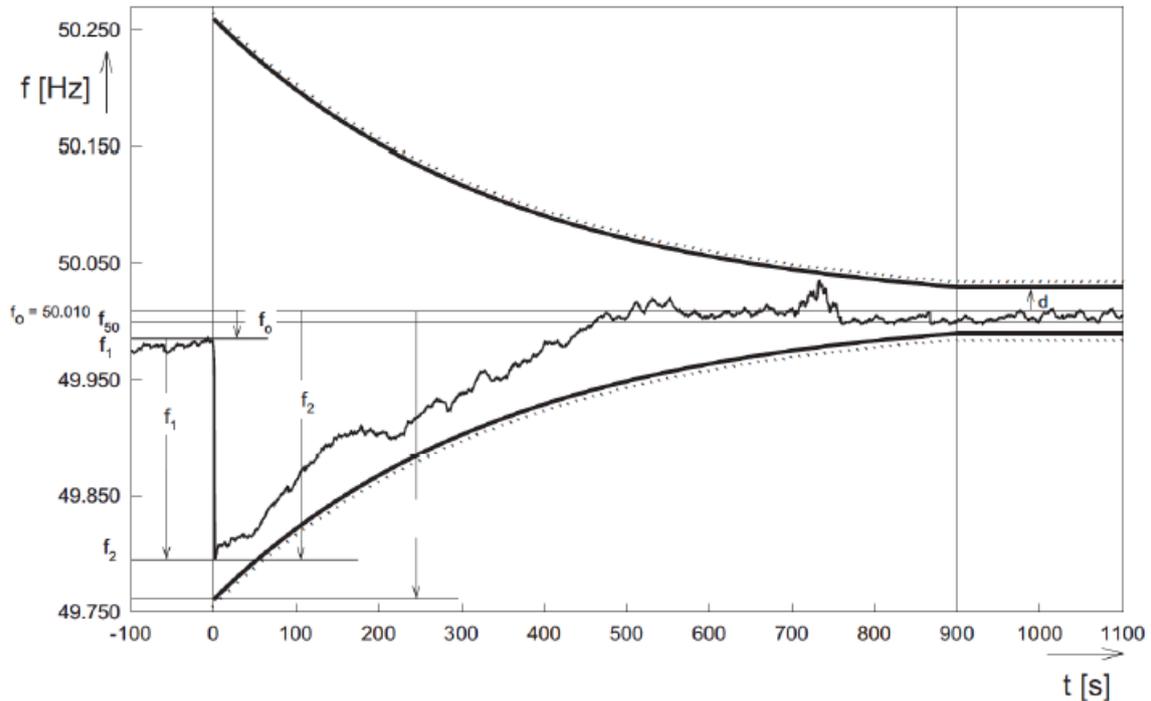


Bild 2-6: Beispiel für Frequenzwiederherstellung nach PRL- und SRL-Einsatz aus dem Operation Handbook der UCTE [UCTE 2004b, S. 20]

2.3.3 Minutenreserve

Minutenreserveleistung (MRL) wird eingesetzt, um bei länger andauernder Frequenzabweichung die schneller einsetzbare SRL abzulösen, sodass diese wieder verfügbar wird (Wiederherstellung des Sekundärregelleistungsbandes [Berndt 2007, S. 83]). Bei großen Leistungsungleichgewichten kann sie auch zeitgleich mit der SRL durch den ÜNB aktiviert werden.

Da für die Minutenreservelieferung eher langsamere technische Einheiten Verwendung finden, ist die MRL als Fahrplanprodukt organisiert. Es gilt eine Vorlaufzeit von mindestens einer halben Viertelstunde (7,5 Minuten) zur nächsten Viertelstunde [Berndt 2007, S. 52].

Während PRL und SRL in praktisch jeder Viertelstunde zur Frequenzstabilisierung aktiviert werden (oft sogar in einer Viertelstunde nacheinander in beide möglichen Abweichungsrichtungen), wird MRL eher selten eingesetzt.

Die folgende Grafik gibt eine Übersicht über den Ablauf des aufeinanderfolgenden Einsatzes der drei Regelleistungsarten.

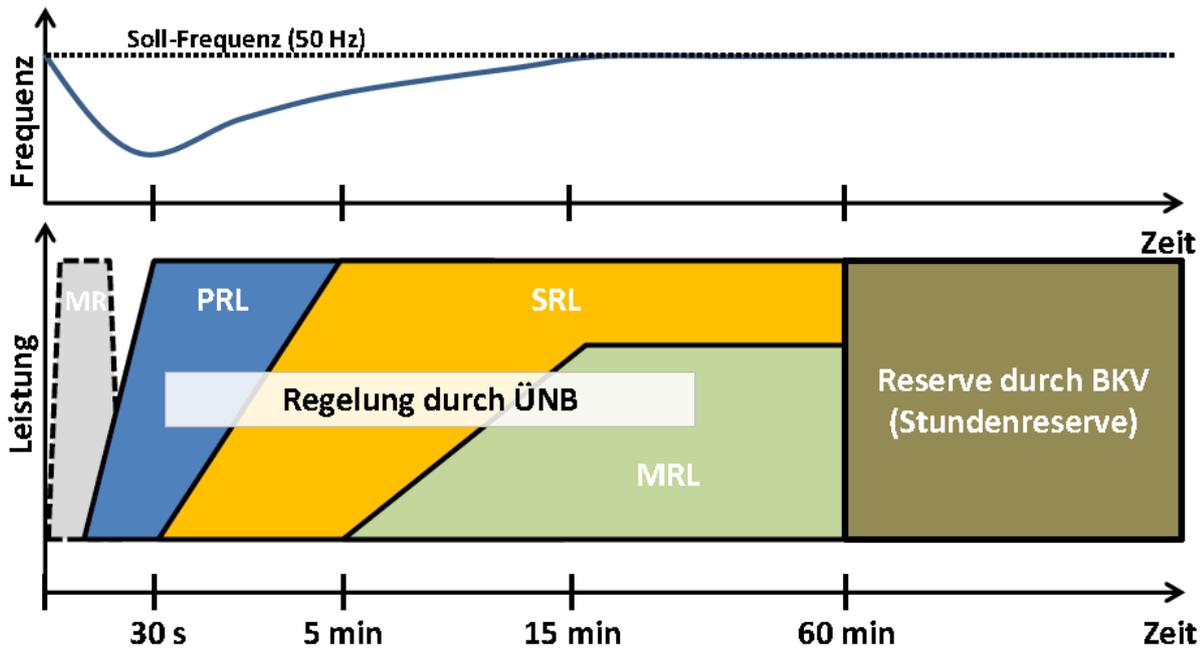


Bild 2-7: Zusammenspiel der Regelleistungsarten zur Wiederherstellung der Netzfrequenz [Hey 2012, S. 8]

2.3.4 Ausschreibung, Kontrahierung und Aufruf von Regelleistung

Regelleistung wird von den deutschen ÜNB über eine gemeinsam betriebene Internetplattform ausgeschrieben (www.regelleistung.net). Beteiligen können sich alle technischen Einheiten, die erfolgreich ein Präqualifikationsverfahren gemäß den Anforderungen des Anhangs D1 des TransmissionCode 2007 für die jeweils zu liefernde Regelleistungsart durchlaufen haben ([Berndt 2007] Anhang D1). Anbieter beteiligen sich an den wiederkehrenden Ausschreibungen mit persönlichen Geboten und erhalten bei Erfolg einen Zuschlag, d. h., ihre Anlagen sind für den Ausschreibungszeitraum für den optionalen Einsatz zur Regelleistungslieferung bereitzuhalten. Die Betreiber erhalten hierfür eine Vergütung und im Falle eines Aufrufs der Anlagen durch den ÜNB bei SRL- und MRL-Geboten ggf. auch eine Vergütung für die gelieferte Arbeit (MWh).

Dabei gelten verschiedene Anforderungen für die verschiedenen Regelleistungsarten, deren Einhaltung gegenüber dem ÜNB, in dessen Regelzone sich die technische Einheit befindet, nachzuweisen ist.

[Hey 2012] fasst diese Anforderungen sehr übersichtlich in einer Tabelle zusammen, die hier zitiert werden soll:

	Primärregelung	Sekundärregelung	Minutenreserve
Leistungsblock minimal	1 MW	5 MW (Pooling möglich)	5 MW (Pooling möglich)
Aktivierungszeit bis P_{\max}	30 s	5 min	15 min
Zuzusichernde Abgabezeit	15 min	4 h	4 h
Ausschreibungszeitraum	1 Woche	1 Woche	1 Tag
Häufigkeit der Ausschreibung	wöchentlich	wöchentlich	täglich
Vergütung	Leistung	Leistung + Arbeit	Leistung + Arbeit

Tabelle 2-1: Übersicht der verschiedenen Regelenenergiearten und deren Eigenschaften [Hey 2012, S. 8]

- **Primärregelung:**

Die Mindestleistung von Einheiten, die PRL anbieten, ist 1 MW. Die gesamte angebotene Leistung ist innerhalb von 30 Sekunden zu aktivieren und ggf. wieder zu deaktivieren. PRL wird als Leistungsband angeboten, d. h., sie muss in beide Richtungen (positiv und negativ) erbracht werden können. Die Leistung muss garantiert für mindestens 15 Minuten aufrechterhalten werden können. Ausschreibungen finden wöchentlich statt und decken entsprechend auch den Zeitraum einer Woche ab.

Eine Vergütung erfolgt nach Aufruf durch den ÜNB nur für die vorgehaltene Leistung. Es wird davon ausgegangen, dass sich positive und negative Abweichungen im Mittel ausgleichen.
- **Sekundärregelung:**

Die Mindestleistung von Einheiten, die SRL anbieten, ist 5 MW. Dabei können mehrere kleinere Anlagen zu einem Anlagenverbund zusammengeschlossen werden (Pooling). Die gesamte angebotene Leistung muss in fünf Minuten aktiviert werden können und in derselben Zeit wieder deaktivierbar sein. Die Leistung muss mindestens vier Stunden aufrechterhalten werden können. SRL wird getrennt nach negativer und positiver SRL ausgeschrieben und kontrahiert. Ausschreibungen finden wöchentlich statt und decken entsprechend auch den Zeitraum einer Woche ab. Die Ausschreibungen erfolgen zudem getrennt nach Hauptzeit (werktäglich von 8:00 Uhr bis 20:00 Uhr) und Nebenzeit (werktäglich von 20.00 Uhr bis 8:00 Uhr, Wochenenden, bundeseinheitliche Feiertage).

Eine Vergütung erfolgt bei der Kontrahierung (Zuschlag für abgegebenes Angebot) für den angebotenen Leistungspreis. Daher sortieren die ÜNB alle eingegangenen Angebote zunächst aufsteigend nach dem angebotenen Leistungspreis (zum Erhalt einer Merit-Order-Liste)⁵. Darüber hinaus wird bei Aufruf der angebotenen Leistung (oder Teilen davon) ein Arbeitspreis für die gelieferte oder dem Netz entnommene Energiemenge fällig. Die Zahlungsrichtung ist dabei i. d. R. analog dem Energiefluss: bei Lieferung positiver SRL vom ÜNB an den Lieferanten, da der Lieferant dem System Energie liefert. Im Falle negativer SRL vom Lieferanten an den ÜNB, da der Lieferant dem System Energie entnimmt (bzw. seine Energiezufuhr drosselt und so ggf. Brennstoffkosten spart). In beiden Fällen kann sich die Zahlungsrichtung auch umkehren. Der Anbieter negativer SRL erhält dann vom ÜNB Geld für die Abnahme der Energie (negativer Arbeitspreis) oder der Anbieter positiver Regelenergie zahlt an den ÜNB für die Abnahme seiner Energie. Der letzte Fall kommt so gut wie nicht vor, der erste allerdings regelmäßig.

Die ÜNB sortieren daher die Angebote in aufsteigender Richtung der angebotenen Arbeitspreise in einer zweiten Merit-Order-Liste und rufen bei Bedarf entsprechend zunächst die Angebote auf, die bei den Arbeitspreisen möglichst hohe Erlöse bringen bzw. möglichst niedrige Kosten verursachen.
- **Minutenreserve:**

Die Mindestleistung von Einheiten, die MRL anbieten, ist 15 MW. Auch für MRL können mehrere kleinere Anlagen zu einem Anlagenverbund zusammengeschlossen werden. Die gesamte angebotene Leistung muss innerhalb von 15 Minuten aktiviert und deaktiviert werden können. Die Leistung muss wie bei der SRL mindestens vier Stunden aufrechterhalten werden können und wird ebenso getrennt nach negativer und positiver Leistung ausgeschrieben und kontrahiert. Ausschreibungen finden hier allerdings täglich statt und

⁵ Engl. Merit Order: „Reihenfolge der Leistung/des Verdienstes“. Eine Merit-Order-Liste bezeichnet die Einsatzreihenfolge der Kraftwerke.

decken entsprechend nur den Zeitraum eines Tages ab. Die Ausschreibungen erfolgen getrennt für die sechs mal vier Stunden eines Tages (0:00 Uhr bis 4:00 Uhr, 4:00 Uhr bis 8:00 Uhr etc.).

Die Vergütung erfolgt bei der Kontrahierung (Zuschlag für abgegebenes Angebot) für den angebotenen Leistungspreis und darüber hinaus bei Aufruf der angebotenen Leistung (oder Teilen davon) für den angebotenen Arbeitspreis. Dafür gilt das bei der SRL beschriebene Verfahren der Merit-Order-Listen (s. o.).

Infolge der weiter stark zunehmenden Einbindung fluktuierender Erzeuger im Rahmen der Energiewende (s. im folgenden Abschnitt) rechnen Paulus & Borggreffe [2011] mit stetig wachsendem Bedarf an Regelenergie im deutschen Verteilnetz [Paulus & Borggreffe 2011, S. 438].

Für den Fall, dass eine Wiederherstellung der Soll-Netzfrequenz durch den Einsatz von Regelenergie scheitert und die Netzfrequenz länger als 60 Sekunden unter 49,8 Hz fällt, ist die automatische Abschaltung von Last durch im Netz eingebaute Unterfrequenzrelais nach dem VDN-5-Stufenplan vorgesehen [Berndt 2007, S. 78]. Dieser ist übersichtlich in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Stufe 1:	49,8 Hz	Alarmierung des Personals und Einsatz der noch nicht mobilisierten Erzeugungsleistung auf Anweisung des ÜNB, Abwurf von Pumpen.
Stufe 2:	49,0 Hz	Unverzögerter Lastabwurf von 10 - 15 % der Netzlast.
Stufe 3:	48,7 Hz	Unverzögerter Lastabwurf von weiteren 10 - 15 % der Netzlast.
Stufe 4:	48,4 Hz	Unverzögerter Lastabwurf von weiteren 15 - 20 % der Netzlast.
Stufe 5:	47,5 Hz	Abtrennen aller Erzeugungsanlagen vom Netz.

Tabelle 2-2: 5-Stufen-Plan des VDN zur Beherrschung von Großstörungen mit Frequenzeinbruch [Berndt 2007, S. 65]

In Stufe 1 werden zunächst alle noch verfügbaren schnellen Erzeugungseinheiten (Pumpspeicherkraftwerke, Gaskraftwerke) aktiviert. Gegebenenfalls angeschaltete Pumpen von Pumpspeichern werden abgeworfen. Gleichzeitig werden Großverbraucher informiert, die von einem nun möglicherweise bevorstehenden Lastabwurf der Stufen zwei bis vier betroffen wären.

Sinkt die Frequenz weiter ab, werden ab einer Frequenz von 49 Hz Verbraucher vom Netz genommen. Das bedeutet konkret, dass mittels der bei den Verteilnetzbetreibern installierten Unterfrequenzrelais Teile der Verteilnetze vom Übertragungsnetz abgetrennt werden, was faktisch deren Abschaltung zur Folge hat.

Resultiert aus der Störung eine Unterfrequenz von 47,5 Hz, werden schließlich die Erzeugungsanlagen vom Netz getrennt, um sie vor Schäden durch Überlastung zu schützen. Eine solche Abtrennung führt auch zur Auftrennung des UCTE-Verbundnetzes mit der Notwendigkeit, dieses nach Beseitigung der Störung wieder neu zu synchronisieren.

Im Falle anhaltend zu hoher Frequenzen (über 50,2 Hz) müssen Erzeugungsanlagen vom Netz genommen oder zusätzliche Großverbraucher aktiviert werden. Vor diesem Hintergrund galt lange die 50,2-Hz-Regelung des Verbands der Netzbetreiber (VdN), die Betreiber von PV-Anlagen verpflichtete, ihre Anlagen bei Erreichen einer Netzfrequenz von 50,2 Hz vom Netz zu trennen. Mit dem massiven Zubau von PV-Anlagen (aktuelle installierte Leistung > 32 GW) wurde diese Regel systemdestabilisierend: Wenn an einem sonnigen Tag bei einer Überfrequenz von 200 mHz schlagartig

30 GW Erzeugung wegfallen, entspräche das dem Zehnfachen des durch die Primärregelleistung handhabbaren Erzeugungsausfalls. Im September 2012 trat daher die Systemstabilitätsverordnung in Kraft, die PV-Anlagenbetreiber eine Nachrüstpflicht ihrer Anlagen zur geregelten Anpassung der Leistungseinspeisung bei Überfrequenz auferlegt [SysStabV 2012].

2.3.5 Bilanzierung in Bilanzkreisen: Day Ahead, Intraday und Day After

Im vorangegangenen Abschnitt wurde beschrieben, wie die technischen Regeln ausgestaltet sind, um mithilfe von Regelenergie einer Abweichung vom Leistungsgleichgewicht zwischen Erzeugungsleistung und Verbraucherleistung entgegenzuwirken.

Im folgenden Abschnitt wird nun erläutert, wie die Regeln für die Abrechnung dieser Aufwendungen aussehen. Dazu wird zunächst beschrieben, auf welcher planerischen Grundlage am Vortag ein Gleichgewicht zwischen Erzeugung und Verbrauch für den nächsten Tag erzielt wird. Danach wird erläutert, wie die dann bei Auftreten von Leistungsungleichgewichten eingesetzte Regelenergie abgerechnet wird.

2.3.5.1 Bilanzkreise und Day-Ahead-Planung

Bei der Planung eines ausgeglichenen Systems aus Stromerzeugung und -verbrauch ist die Rolle von Bilanzkreisen zentral. Ihr Wesen wird detailliert beschrieben in der Stromnetzzugangsverordnung (StromNZV), da kein Stromnetzzugang ohne Zugehörigkeit zu einem Bilanzkreis gewährt wird: Jede Erzeugungs- bzw. Entnahmestelle ist genau einem Bilanzkreis zuzuordnen [StromNZV §4]. Dabei gehören Bilanzkreise immer genau zu einer Regelzone, sind also genau einem ÜBN als Systemverantwortlichem zuzuordnen.

Ein Bilanzkreis lässt sich definieren als virtuelles Strombilanzkonto, mit dem der Bilanzkreisverantwortliche die Ausgewogenheit zwischen dem Strombedarf seiner Kunden und dem dafür notwendigen Strombezug zu jeder Viertelstunde eines Tages belegt. Jeder Bilanzkreis hat also einen Bilanzkreisverantwortlichen (BKV)⁶. Dieser ist verantwortlich für die „(...) ausgeglichene Bilanz zwischen Einspeisungen und Entnahmen in einem Bilanzkreis in jeder Viertelstunde und übernimmt als Schnittstelle zwischen Netznutzern und Betreibern von Übertragungsnetzen die wirtschaftliche Verantwortung für Abweichungen zwischen Einspeisungen und Entnahmen eines Bilanzkreises“ [StromNZV §4(2)]. Dazu prognostiziert ein BKV den Strombedarf seiner Entnahmestellen für jede Viertelstunde eines Tages und deckt diesen entweder durch Einspeisungen eigener Erzeugungsanlagen oder kontrahierte Stromerzeugung Dritter (deren Lieferung in diesen Bilanzkreis dann als Entnahme im eigenen Bilanzkreis erscheint).

Dieser § 4(2) legt dabei auch die viertelstündliche Rasterung des Fahrplanwesens fest. Ein Tagesfahrplan besteht demnach aus 96 Viertelstundenwerten (= 24h*4 Viertelstunden/h).

Diese Tagesplanungen auf Basis viertelstündlicher Einspeisungs- und Bezugsmengen ist dem ÜNB bis spätestens 14.30 Uhr des Vortages mitzuteilen (bzw. bei Sonn- und Feiertagen bis 14.30 Uhr des vorangehenden Werktages). Diese Mitteilung ist damit der für den Folgetag (bzw. die Folgetage) für diesen Bilanzkreis gültige Fahrplan [StromNZV §5(1)].

Da die Fahrpläne ausgeglichen sein müssen (ebd.), ist mit ihrer Saldierung (= Aufsummierung aller Fahrpläne in einem Übertragungsnetzbereich) eine Planung für ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen Erzeugung und Verbrauch für die jeweilige Regelzone gegeben. Diese basiert jedoch auf einer Prognose: Es kommt zu Abweichungen, die den Einsatz von Regelenergie notwendig machen (s. o.). Um deutlich von der Vortagesprognose abweichende Entwicklungen korrigieren zu können, ist es den

⁶ BKV sind i. d. R. juristische und nicht natürliche Personen. Für den Stromkunden ist dies dann i. d. R. sein Stromversorger.

BKV erlaubt, ihre abgegebenen Fahrpläne untertägig zu korrigieren. Dies kann mit mindestens einer Viertelstunde Vorlauf zu jeder Viertelstunde eines Tages geschehen [Strom §5(2)].

Zur Risiko- und Kostenminimierung werden erste Prognosen für die Bilanzkreise bereits lange im Voraus erstellt. Dadurch kann der Versorger Stromprodukte als Termingeschäfte mit großem Vorlauf (Long Term Forward = heute für nächstes Jahr oder länger) erwerben, was i. d. R. deutlich günstigere Konditionen bedeutet und gegenüber den Preisfluktuationen des Tagesgeschäfts Planungssicherheit bringt. Da langfristige Prognosen immer mit großen Unsicherheiten belegt sind, werden mittelfristig (Vorlauf einige Monate und/oder Wochen) Anpassungen vorgenommen. Die Day-Ahead-Planung ist dann der Optimierungsschritt einer Prognoseentstehung, in der erst sehr kurzfristig gut prognostizierbare erzeugungs- und verbrauchsrelevante Daten Berücksichtigung finden können, wie z. B. Wetterdaten (Temperatur, Sonne, Windverhältnisse). Ein guter Überblick über die unterschiedlichen zu diesen Zwecken an der Strombörse gehandelten Produkte findet sich in Hey [2012, S. 13].

2.3.5.2 Abrechnung von Regelenergieeinsatz als Ausgleichsenergie und Day-After-Handel

Wie oben erwähnt kommt es durch die Unsicherheit der Prognosen quasi in jeder Viertelstunde zu Abweichungen zwischen Einspeisung und Entnahme. Im Saldo über alle Bilanzkreise einer Regelzone gleichen sich diese Abweichungen z. T. gegenseitig aus. Es verbleibt aber letztlich immer eine Restabweichung. Ist diese Restabweichung gleichgerichtet zur sich ergebenden Gesamtabweichung des gesamten UCTE-Netzes und entsteht durch die Gesamtabweichung eine Frequenzdifferenz von $> \pm 20$ mHz, wird in der Regelzone automatisch die Lieferung von Sekundärregelleistung und ggf. Minutenreserve ausgelöst.

Die Kosten, die dem ÜNB nun durch den Aufruf der Reserven entstehen (Zahlung der Arbeitspreise), legt dieser auf die Bilanzkreise um, die ursächlich zur Entstehung der Abweichung beigetragen haben. Die dabei in den BKV in Rechnung gestellte Energiemenge wird „Ausgleichsenergie“ genannt. Sie ist physikalisch der eingesetzten Regelenergie gleich. Da sie nun zum rechnerischen Ausgleich der Bilanzen der BKV verwendet wird, erfolgt die Umbenennung. Bilanzkreise, deren Abweichung gegenläufig zur Gesamtabweichung war, haben dazu beigetragen, dass weniger Regelenergie eingesetzt werden musste. Sie erhalten eine Vergütung für ihre Abweichung, da diese wie Ausgleichsenergie wirkt. Die relative Höhe der Zahlung (€/MWh) entspricht der Höhe der Kosten, die die BKV zu zahlen haben, deren Abweichung zur Gesamtabweichung beigetragen hat.

Dem ÜNB entstehen allerdings schon Kosten nur für die Vorhaltung von Regelenergie, durch die an die Anbieter zu zahlenden Leistungspreise. Diese werden als Systemdienstleistung (= Versicherung für ein funktionierendes Stromnetz) in die Netznutzungskosten eingerechnet und über diesen Mechanismus von allen (Netznutzungsgebühr zahlenden) Netznutzern gemeinschaftlich übernommen.

Da in den meisten Bilanzkreisen die Daten des tatsächlichen Verbrauchs nicht in Echtzeit vorhanden sind,⁷ sondern erst am nächsten Tag oder noch später vorliegen, können die BKV i. d. R. in einer Viertelstunde nicht auf Abweichungen reagieren. Da die BKV aber verpflichtet sind, ihre Bilanzkreise ausgeglichen zu bewirtschaften, kommt es für sie zu Abweichungen, die mal Kosten verursachen und mal Erlöse bringen. Allerdings ergibt sich das Problem, dass es in zahlreichen Viertelstunden zum Einsatz beider Richtungen von Regelenergie (positiv und negativ) kommt. Da die Abweichungen aber über ganze Viertelstunden saldiert werden und dem ÜNB in beide Richtungen Kosten entstanden sind, resultieren in einem solchen Fall Kosten für alle Bilanzkreise. Aus dieser Problematik heraus macht es

⁷ Eine Ausnahme stellen hier große industrielle Verbraucher dar, die als eigene Bilanzkreise fungieren, und einige Anbieter, die sich auf die Versorgung gepoolter großer Verbraucher spezialisiert haben. Beide verfügen u. U. über eine Echtzeitmessung und kennen dann ihre jeweilige Abweichung in der Viertelstunde. Jedoch kennen sie weder die Gesamtabweichung ihrer Regelzone noch die des UCTE-Netzes.

für BKV Sinn, wo immer möglich Abweichungen grundsätzlich zu vermeiden. Dabei kann der Einsatz von Demand Side Management unterstützend wirken (s. Kapitel 3).

Möglich ist ein Ausgleich aber auch über einen nachträglichen Handel am nächsten Tag („Day-After-Handel“). Sind dem BKV die Abweichungen seines Bilanzkreises bekannt, so darf er diese nachträglich bis 16:00 Uhr des folgenden Werktags ausgleichen. Er muss dazu Handelspartner (aus derselben Regelzone) finden, deren Abweichungen in die entgegengesetzte Richtung gingen. Dieser „Day-After-Handel“ ist geregelt in [StromNZV §5(3)]. Er kann insbesondere dann sinnvoll sein, wenn ersichtlich wird, dass der ÜNB am Vortag für die Viertelstunde Regelenergie in beide Richtungen eingesetzt hat und man über den Day-After-Handel Partner findet, die so ihre jeweiligen Abweichungen (die ja auf jeden Fall Kosten verursachen werden) reduzieren können.

Die folgende Grafik verdeutlicht den Mechanismus der Abrechnung der Ausgleichsenergie.

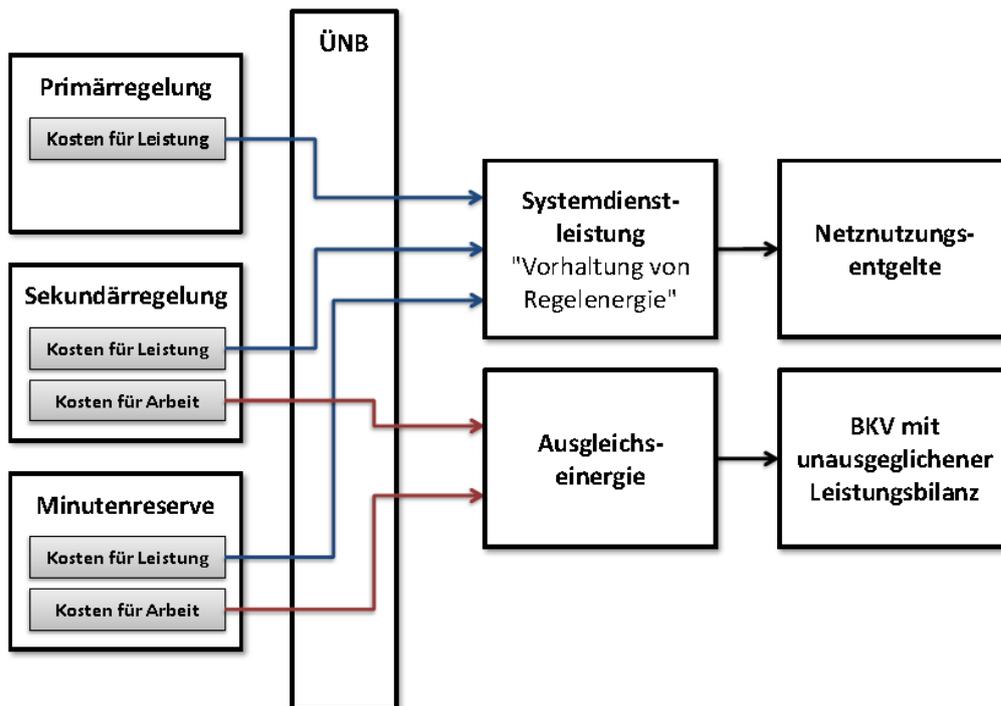


Bild 2-8: Aufteilung der Kosten für die Vorhaltung und Nutzung von Regelenergie
[Roon 2007] nach [Hey 2012, S. 10]

Die obigen Ausführungen haben gezeigt, dass für ein funktionierendes Stromsystem das kontinuierliche Streben zu einem Ausgleich zwischen Erzeugung und Verbrauch notwendig ist und dazu detaillierte technische und rechtliche Regelungen bestehen. DSI kann zu diesem Ausgleich beitragen. So lassen sich DSI-Potenziale sowohl am Regelleistungsmarkt als Regelenergie reserven als auch bei der Führung von Bilanzkreisen zum vorsorgenden Bilanzkreisausgleich einsetzen.

Der Gesetzgeber hat auf Basis der Erkenntnis, dass über DSI besonders effiziente Potenziale zum Leistungsausgleich bereitgestellt werden können, am 28. Dezember 2012 die „Verordnung über Vereinbarungen zu abschaltbaren Lasten [AbLaV 2012]“ erlassen, die die Übertragungsnetzbetreiber zu Ausschreibungen zur Kontrahierung von Abschaltleistung aus schaltbaren Lasten bis zu einer Gesamtleistung von 3 GW verpflichtet [AbLaV 2012].

2.4 Energiewende

2.4.1 Ausbau der Erzeugungskapazität erneuerbarer Energien im Stromsektor: Energiekonzept der Bundesregierung und Realität

Der Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energiequellen schreitet in Deutschland derzeit zügig voran. Ziel des derzeit gültigen Energiekonzepts der Bundesregierung ist es, bis 2020 18 % und bis 2050 60 % der gesamten Bruttoendenergienutzung in Deutschland auf regenerative Energien umgestellt zu haben [Bundesregierung 2010, S. 4]. Da die Stromnutzung mit einem Anteil von rund 23 % am Gesamtenergiebedarf daran einen erheblichen Anteil hat [BMWi 2013b, S. 5] und Strom in Deutschland traditionell zu einem hohen Anteil in thermischen Kraftwerken aus Kohle und Kernenergie erzeugt wird, für die Kernenergie aber der Ausstiegsbeschluss gilt [AtomG 2013, 7], sind für diesen Sektor noch höhere Zielwerte im Energiekonzept festgelegt: So sollen bis 2020 35 % des Stroms aus erneuerbaren Quellen stammen, bis 2030 50 % und bis 2050 80 % [BMU 2013] [Bundesregierung 2010, S. 4 ff.].

Diese Zielmarken würden aber bei Anhalten des derzeitigen Ausbautrends von der Realität überholt. Laut der letzten Mittelfristprognose der vier ÜNB vom 15.11.2012 könnte der Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung bereits mit Ablauf des Jahres 2015 bei 38 % liegen, also etwa fünf Jahre vor der Zielmarke der Bundesregierung [BDEW 2013, S. 60]. Die Zahlen werden flankiert von den statistischen Daten des BMU, das mit Ablauf des Jahres 2012 30 GW installierter Leistung aus Windenergie und 32 GW aus Photovoltaik notierte und den Anteil der Erneuerbaren an der Stromproduktion bei rund 23 % sah [BMU 2013].

Hält diese Entwicklung an, wird der Jahresanteil an der Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen im Jahr 2020 vermutlich eher in der Größenordnung von 47 % liegen, was dann einer installierten Erzeugungsleistung von rund 115 GW entspräche. Die folgende Grafik verdeutlicht diese Entwicklung, die der Bundesverband Erneuerbare Energien (BEE) schon 2009 prognostizierte.

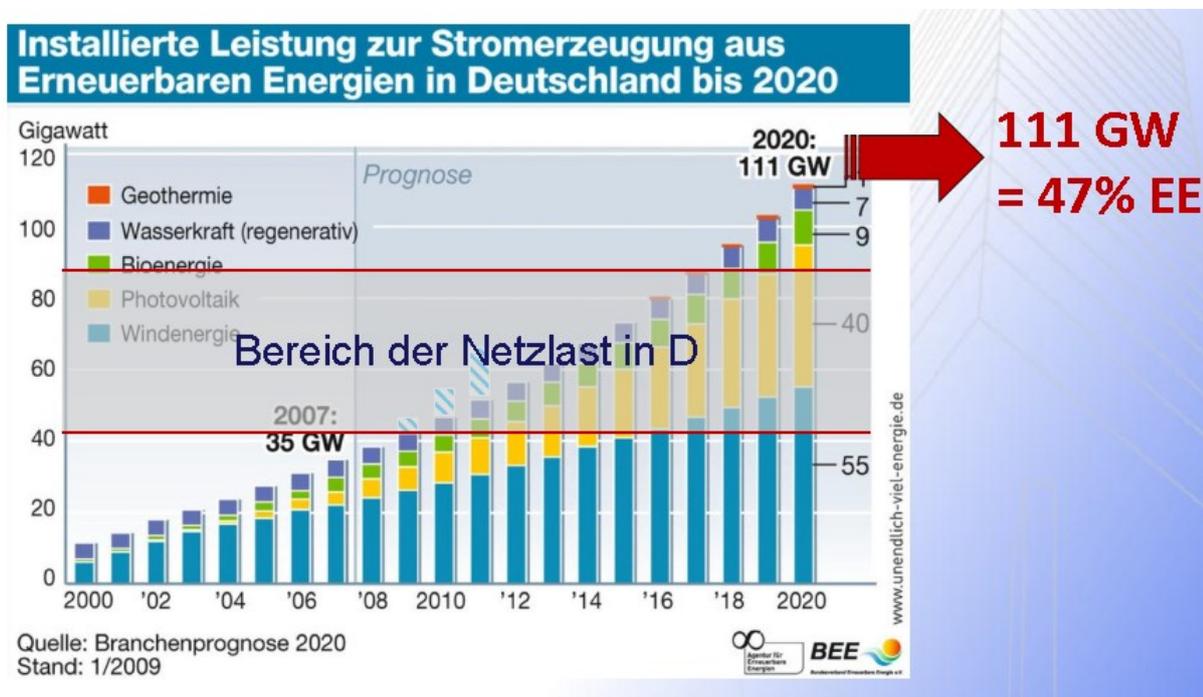


Bild 2-9: Entwicklung der installierten Leistung zur Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen – historisch und Prognose bis 2020, verändert und erweitert nach [BBE 2009, S. 7]

Diese Entwicklung ist insbesondere vor dem Hintergrund bemerkenswert, dass sich in nur fünf Jahren die Stromerzeugungskapazität aus erneuerbarer Energie verdoppelt haben wird: Sie stand 2009 noch

bei knapp über 40 GW, was dem Grundlastbedarf im deutschen Stromnetz entspricht, und wird bis Ende 2014 dann auf über 90 GW angestiegen sein, was dann dem gesamten Spitzenlastbedarf des Netzes entspricht. Das bedeutet insbesondere auch, dass es in den kommenden Jahren vermehrt Stunden geben wird, in denen der gesamte deutsche Strombedarf aus erneuerbaren Energien gedeckt werden wird. Daraus ergeben sich erhebliche Konsequenzen für den Betrieb konventioneller Kraftwerke. Dies soll im Folgenden erläutert werden.

2.4.2 Fluktuationsproblematik der Residuallast

Da die Stromerzeugung aus Windkraftanlagen und Photovoltaiksystemen stark abhängig von den herrschenden Wetterbedingungen ist (schwankendes Primärenergieangebot), ergibt sich eine nicht an den Strombedarf angepasste, fluktuierende Stromerzeugung. Im Rahmen der Regelungen des EEG besteht aber eine Vorrangregelung für Strom aus erneuerbaren Energiequellen (vgl. EEG §2). Dadurch verbleibt für die konventionelle Stromerzeugung nur noch die Deckung der sogenannten Residuallast. Als Residuallast (P_{Res}) bezeichnet man den Strombedarf (P_{Last}) zu einem gegebenen Zeitpunkt (t) abzüglich der zu diesem Zeitpunkt anliegenden Leistungserzeugung ($P_{Erz,reg}$) aus erneuerbaren Quellen.

$$P_{Res}(t) = P_{Last}(t) - P_{Erz,reg}(t) \quad \text{Formel 2-3}$$

Für die Studie „Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global“ (Leitstudie 2010) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) haben die Autoren die zu erwartenden Residuallasten für jede Stunde eines Jahres simuliert [Nitsch et al. 2010, S. 102]. Dazu wurden Wetterdaten von 2006 verwendet und für 2020 im Basisszenario A ein EE-Anteil von 40 % an der Stromproduktion unterstellt (ebd., S. 5). Es ergibt sich ein sehr zerklüftetes Gesamtbild für die Residuallast mit nur sehr wenigen Zeitabschnitten, in denen thermische Grundlastkraftwerke in nennenswerte Auslastung kommen. Diese stellen aber (nach wie vor) den wesentlichen Bestandteil des deutschen Kraftwerksparks dar. Die folgende Grafik bildet die Simulationsergebnisse ab.

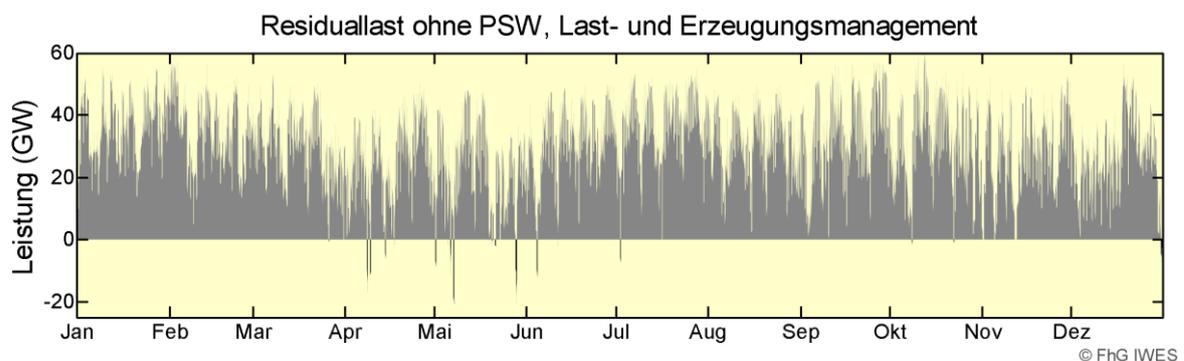


Bild 2-10: Residuallast für einen EE-Anteil von 40 % ohne Glättung durch Pumpspeicherkraftwerke (PSP), Last- und Erzeugungsmanagement [Nitsch et al. 2010, S. 102]

Die Grafik zeigt deutlich, wie stark die fortschreitende Energiewende die Wettbewerbsfähigkeit der thermischen Grundlastkraftwerke gefährdet: Die Laufzeit der Anlagen wird insgesamt stark verkürzt, zudem treten vermehrt Situationen mit starken schnellen Lastwechseln auf, für die diese Kraftwerke nicht konzipiert wurden. Sie sollten vielmehr einen konstanten Grundlastanteil decken. Eine Nach- bzw. Umrüstung des bestehenden Kraftwerksparks zugunsten einer verbesserten Flexibilität ist in gewissem Umfang möglich, aber kostenintensiv, was die Wettbewerbsfähigkeit weiter verschlechtert.

Eine einfache Abschaltung der fossilen Kraftwerke ist aber auch nicht möglich. Dafür ist die Energiewende auch bei einem 50 %-Anteil erneuerbarer Energie an der Stromversorgung noch nicht weit genug vorangeschritten. Zwar gibt es einzelne Stunden mit negativer Residuallast, in denen also die Stromerzeugung aus Erneuerbaren größer ist als der zu diesen Zeitpunkten bestehende

Strombedarf. Dies betrifft aber nur wenige Stunden im Jahr. Es verbleibt ein relativ großer Restleistungsbedarf, der aber stark fluktuiert.

Diese Fluktuation lässt sich aber systemverträglicher gestalten, wenn man

- bestehende Pumpspeicherkraftwerke zum Ausgleich verwendet,
- KWK-Anlagen (insb. Biogas-KWK) stromgeführt und nicht (wie bisher) wärmegeführt betreibt sowie
- bestehende Möglichkeiten zu Demand Side Integration (DSI) zum Lastausgleich ausschöpft.

Die folgende Grafik verdeutlicht den sich einstellenden Fluktuationsausgleich.

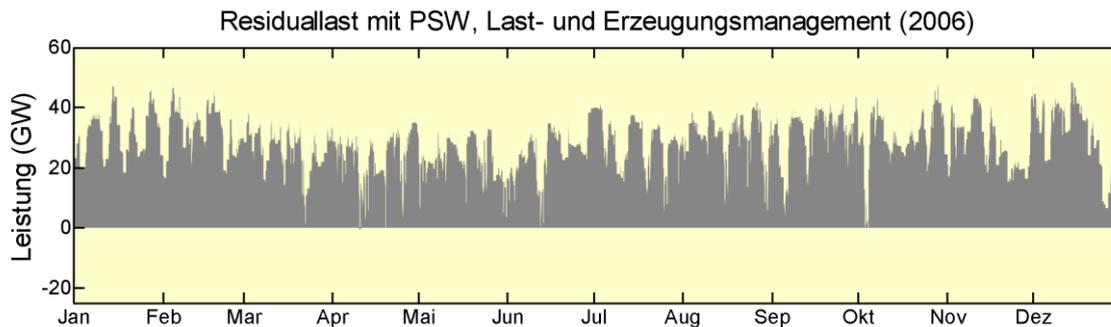


Bild 2-11: Residuallast für einen EE-Anteil von 40 % mit Glättung durch Pumpspeicherkraftwerke (PSP), Last- und Erzeugungsmanagement [Nitsch et al. 2010, S. 102]

Bei einem solchen Fluktuationsmanagement ergeben sich deutlich ruhigere Lastverläufe, in denen auch längere Zeitabschnitte mit relativ konstantem Lastverlauf (Grund und Mittellast) möglich sind.

Die folgende Grafik zeigt beispielhaft einen Zwei-Wochen-Verlauf der Residuallast und dem zum Fluktuationsausgleich notwendigen Einsatz des Demand-Side-Integration-Potenzials aus Klimatisierung (und Lüftung), gesteuertem Laden von elektrisch betriebenen Fahrzeugen (E-Kfz) und Wärmepumpen zur Beheizung von Gebäuden. Durch die mittägliche Einspeisung der PV-Anlagen ergibt sich (bereits bei 40 % EE(!)) eine Umkehr des gewohnten Bildes: Die Lastspitzen (graue Peaks in der Grafik) liegen nun in der Nacht, wenn die PV-Anlagen keinen Strom produzieren. Das DSI-Potenzial wird in diesen Wochen nach Möglichkeit in die Mitte des Tages gelegt, um die PV-Produktion maximal aufnehmen zu können.

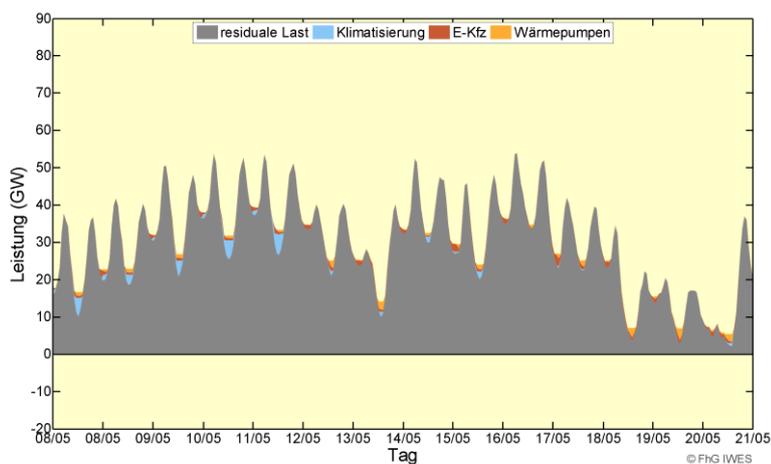


Bild 2-12: Ausgewählter Zwei-Wochen-Verlauf des Lastmanagements von Klimaanlagen, E-Kfz und Wärmepumpen für 2020 [Nitsch et al. 2010, S. 98]

2.5 Potenziale der Demand Side Integration

2.5.1 Stand der Forschung und Anwendung von DSI

Wie oben gezeigt, ist das Ziel der Einbindung der Verbrauchsseite in eine nachhaltige Stromversorgung der Ausgleich von Fluktuationen der Stromerzeugung durch erneuerbare Energien. Die Effekte, die sich dadurch für das Stromsystem erreichen lassen, sind neben der oben zitierten Studie in einigen anderen Untersuchungen beschrieben worden. So beschreiben [Müller et al. 2012], wie sich die Fluktuationen der Residuallast mithilfe des DSI-Potenzials aus stromgeführten Wärmepumpen und KWK-Anlagen glätten lassen (ohne allerdings quantitativ explizit zu werden). Gute Studienobjekte für die Frage des Fluktuationsausgleichs sind oft kleinere Stromsysteme auf Inseln, die über kein großes, Last ausgleichendes Verbundnetz verfügen, wie z. B. die Studie von [Pina et al. 2012] für die Insel Flores (Azoren) zeigt. Foosnaes et al. listen neben dem reinen physikalischen Effekt des Lastausgleichs über die Bereitstellung von Regelenergie hinaus noch zwei weitere positive Effekte auf, die aus DSI-Potenzialen erwachsen können [Foosnaes et al.]:

- Die Reduktion von Lastspitzen führt im Verteilnetz zu einer Verringerung der Leitungsverluste,
- Investitionen, die für Verstärkungen und Ausbau des Verteilnetzes anstehen, lassen sich unter Nutzung von DSI-Potenzialen verschieben und/oder ggf. ganz vermeiden.

Shaw et al. [2009] und Rotering & Moser [2013] bestätigen diese Aussagen. Rotering & Moser [2013] zeigen zudem, dass sich die Gesamtkosten für Verteilnetze unter Nutzung von DSI-Potenzialen deutlich reduzieren lassen [Rotering & Moser 2013]. Brunner et al. [2013] zeigen beispielhaft, dass die Nutzung von DSI zur Spannungsregelung in Verteilnetzen bei einer hohen Durchdringung von PV-Anlagen verwendet werden kann. Die beiden letztgenannten Studien beziehen sich in ihren Aussagen auf das DSI-Potenzial aus Wärmepumpen. Rotering & Moser beziehen sich auf Effekte im Mittelspannungsnetz, während Brunner et al. die Aussagen auf untersuchte Niederspannungsnetze beziehen. Kamper [2009] untersucht in seiner Dissertation die Nutzung dezentraler, selbstorganisierender Regelalgorithmen zur Steuerung des DSI-Potenzials in einem virtuellen Stadtteil mit 1001 Haushalten und kommt zu dem Schluss, dass sich erhebliche Vorteile für einen ausgeglichenen Verteilnetzbetrieb ergeben und der Bedarf an Regelleistung gesenkt werden kann [Kamper 2009, S. 169].

Diese positiven Aspekte für Verteilnetze werden inzwischen von einer Arbeitsgruppe der CIGRE aufgenommen. Die CIGRE ist die internationale Organisation für den Informationsaustausch im Bereich elektrischer Energieübertragungs- und -verteilnetze. Ihre Arbeit ist organisiert in 16 Komitees, die aus jeweils mehreren Arbeitsgruppen (Working Groups) bestehen. Die Arbeit der Working Groups geht in Veröffentlichungen ein, die üblicherweise Richtlinien-Charakter haben. Im Komitee „Distribution Systems and Dispersed Generation“ gibt es seit kurzem die Working Group 6.19, die die „Notwendigkeit und den Nutzen der Integration von DSI bei der Planung von Verteilnetzen“ aufbereitet [Silvestro et al. 2013].

Die Berücksichtigung der Auswirkungen eines erhöhten Anteils von EE in Verteilnetzen und mögliche Ausgleichseffekte unter Einsatz von DSI findet inzwischen auch Eingang in Planungswerkzeuge zur Erstellung von Energiekonzepten/Energieleitplanungen für Quartiere und (kleinere) Städte, wie das Beispiel des Projekts „Modellstadt 25+“ zeigt [Krengel et al. 2013].

In den USA hat DSI seit den späten 1990er Jahren eine kontinuierlich wachsende Integration in die bestehenden Energiemärkte erfahren, wie [Walawalkar et al. 2010] am Beispiel der DSI-Programme der US-Verteilnetzbetreiber PJM und NYISO belegen. Demgegenüber sind die Bemühungen, DSI stringenter in die Energiemärkte zu integrieren, in den einzelnen Ländern der Europäischen Gemeinschaft deutlich unterschiedlich, wie [Torriti et al. 2010] in einer guten Übersicht zeigen. Einen

wichtigen Stimulus für eine Verbesserung dürfte hier die 2013 in Kraft getretene EU-Novelle der Energieeffizienzrichtlinie geben [2012/27/EU 2012]. Sie legt z. B. fest, dass die Mitgliedstaaten die Netznutzungsentgelte so zu gestalten haben, dass DSI-Programme nicht verhindert werden (ebd., Artikel 15 (4)), und dass die Regulierungsbehörden sich dafür einzusetzen haben, dass DSI-Potenziale Zugang zu den Energiemärkten erhalten (ebd., Artikel 15 (8)). Die konkreten nationalen Umsetzungen der Richtlinie werden zeigen, ob der von der EU intendierte Effekt einer stärkeren Anwendung des DSI eintritt. Zurzeit sind eher noch die DSI-Nutzung hemmende Randbedingungen in Kraft, wie z. B. die Regelung aus § 19(2) der Stromnetzentgeltverordnung, nach der Unternehmen mit einem Jahresstrombedarf von über 10 GWh sich von den Netznutzungskosten befreien lassen können, wenn ihr Lastprofil sehr gleichmäßig ist. Als Maß dafür wird eine Jahresvollnutzungsstundenzahl (= Jahresstromverbrauch in MWh/Spitzenlast in MW) von mindestens 7.000 Stunden erreicht [StromNEV § 19(2)]. Vor dem Hintergrund der eigentlich im Rahmen der Energiewende dringend benötigten Flexibilität im Strombezug (s. o.) sind solche Regelungen kontraproduktiv und geben Anreize, vorhandenes DSI-Potenzial gesamtstrategisch falsch einzusetzen.

Für Deutschland lässt sich festhalten, dass die Integration von DSI-Potenzialen in die Energiemärkte, insbesondere die Regelenergiemärkte, derzeit noch schwierig bis unmöglich ist, wenn es sich um DSI aus vielen (dezentralen) Einheiten handelt. Daran ändert bisher auch die neue „Verordnung über Vereinbarungen zu abschaltbaren Lasten“ [AbLaV 2012] wenig, die die Übertragungsnetzbetreiber verpflichtet, Abschaltpotenzial aus DSI gesondert zu kontrahieren. Insbesondere die Präqualifikationsbedingungen für die Zulassung von DSI zu den Regelenergiemärkten sind auch für Aggregatoren, die das Potenzial vieler Anlagen bündeln und Ausfallrisiken durch Poolbildung reduzieren, ein großes Hemmnis. Inzwischen treten auf dem deutschen Markt aber trotzdem erste Aggregatoren auf, die gezielt den Weg der Bündelung solcher dezentraler Potenziale aus DSI gehen wollen. Das derzeit prominenteste Beispiel dürfte die Firma Entelios sein, deren Konzept in Neubarth & Henle [2012] beschrieben ist, aber schon vor zehn Jahren war die Fa. EVONIK ein Aggregator von Minutenreserve aus industriellen DSI-Potenzialen [Strese 2003].

Während Entelios (wie andere Anbieter auch) als unabhängiger Aggregator versucht, große DSI-Potenziale vornehmlich aus industriellen Standorten zu bündeln, findet eine Marktintegration von DSI-Potenzialen aus Haushalten derzeit nur in Pilotprojekten statt. Langhammer et al. [2012] beschreiben ein solches für das E-Energy-Projekt „E-DeMa“ und Buchholz et al. [2012] für das EU-Projekt „Web2Energy“. Dies sind aber nur zwei Beispiele stellvertretend für inzwischen eine ganze Reihe solcher Pilotprojekte. Insbesondere muss in diesem Zusammenhang auf die „E-Energy“-Initiative des BMWi und des BMU hingewiesen werden, in der sechs Modellprojekte vier Jahre lang mit 140 Mio. € gefördert wurden, um Konzepte für Smart Grids und virtuelle Kraftwerke in Modellversuchen real zu erproben [B.A.U.M. 2012]. Die Projekte sind inzwischen abgeschlossen und zu fast allen liegen die Endberichte mittlerweile vor. In allen Projekten wurde DSI berücksichtigt, wenn auch in unterschiedlicher Tiefe und Fokussierung. Das Projekt E-DeMa wurde oben bereits erwähnt. Dort wurden 1.500 Haushalte und Gewerbebetriebe einbezogen. Ähnliche Ansätze zur Integration der DSI-Potenziale aus Haushalten wurden in den Projekten Meregio (1.000 Haushalte), Modellstadt Mannheim (MoMa, 200 Haushalte) und Smart Watts (250 Haushalte) verfolgt (ebd., S. 6 ff.). Das Projekt e-Telligence (Cuxhaven) fokussierte auf DSI-Potenziale aus dem gewerblichen Sektor: zwei Tiefkühlager und eine Kläranlage (ebd., S. 7). In den E-Energy-Projekten standen jeweils unterschiedliche Aspekte der Nutzung der DSI-Potenziale sowie das jeweilige konkrete Vorgehen zu deren Anbindung, Steuerung und Abrechnung im Vordergrund. Für eine detaillierte Darstellung der Beiträge und Ergebnisse der einzelnen Projekte sei auf die Internetseite der Förderinitiative verwiesen (www.e-energy.de).

Möglichkeiten, intelligente Regelungsalgorithmen zum DSI in Nichtwohngebäuden zu implementieren, die oft über eine Gebäudeleittechnik (GLT) mit unterschiedlichen Möglichkeiten zur Gerätesteuerung und -regelung verfügen, stellte Stadler bereits 2001 vor [Stadler 2001]. Aktualisierte Ansätze finden

sich bei Jungwirth et al. [2012] und bei Stadler et al. [2009] gezielt für Kälteanlagen bzw. bei Atabay et al. [2013] für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen.

DSI-Potenziale ergeben sich prinzipiell immer in Anwendungen von elektrischer Energie, die speichernden Charakter haben. Dazu zählen Anwendungen von Strom zur Bereitstellung von mechanischer Energie, wenn die Ergebnisse der Anwendung speicherbar sind. Ein klassisches Beispiel dafür sind Mühlen und Steinbrecher in Zementwerken, die in Vorlagen (Silos) arbeiten. Wird ihre Arbeit unterbrochen, kann der Prozess der Zementherstellung aus dem Vorrat des/der Silos weiter bedient werden. Ein weiterer wichtiger Bereich ist die Verwendung von Strom zum Antrieb von Pumpen und Motoren/Kompressoren, die thermische Dienstleistungen erfüllen (Luftförderung, Heizungspumpen, Wärmepumpen, Kompressoren von Kältemaschinen). Hier kann die thermische Speicherfähigkeit des Empfängers der Dienstleistung (Kühltruhe oder ein Gebäude) als Speicher verwendet werden. Die thermischen Dienstleistungen lassen sich für eine stromgeführte Betriebsweise vorziehen (Vorheizen, Vorkühlen, Vorlüften) oder der Speicher geht gezielt in eine Unterdeckung (im Rahmen erlaubter, zuvor definierter Grenzen) und die thermische Dienstleistung wird nachgeholt (Nachheizen, Nachkühlen, Nachlüften).

Je mehr elektrische Leistung nun für die Erbringung der jeweiligen Dienstleistung benötigt wird, desto höher ist naturgemäß auch das Lastverlagerungspotenzial. In diesem Zusammenhang ist die Frage berechtigt, ob DSI und Energieeffizienz (also mit weniger elektrischer Leistung dieselbe Dienstleistung zu erzielen) einander entgegenwirken, da ja der Anwender von DSI eher ein Interesse an hohen Leistungen hat. Hier zeigen Günther et al. [2013] für die Anwendung von Wärmepumpen in Niederspannungsnetzen, dass in der Tat von einem leicht erhöhten Strombedarf beim Einsatz von DSI auszugehen ist. Dieser bewegt sich aber in der Größenordnung von 4 %. Die Autoren konstatieren aber auch, dass für eine optimierte Anwendbarkeit des DSI-Potenzials aus Wärmepumpen ggf. zusätzliche Kosten für eine leichte Überdimensionierung der Wärmepumpe (höhere Leistung) und des Warmwasserspeichers (höhere Speicherfähigkeit) anfallen (ebd.). Roon et al. untersuchen den Einfluss von Energieeffizienzmaßnahmen auf das Lastflexibilisierungspotenzial in der Industrie [Roon et al. 2013]. Sie kommen zu dem Schluss, dass die Reduktionen des DSI-Potenzials, die sich aus Effizienzmaßnahmen ergeben, überkompensiert werden durch zwei gegenläufige Trends: den größer werdenden Anteil von Strom am Produktionsprozess insgesamt sowie die stetig zunehmende Produktionsmenge der Industrie (ebd.). Scheven & Prella [2012] entwickeln auf der Grundlage der industriellen DSI-Potenziale ein Modell zur optimierten lokalen Stromerzeugung (am Industriestandort selbst) aus Erneuerbaren (Eigenstromnutzung).

Dieser kurze Abriss zeigt, dass die Nutzungsmöglichkeiten für DSI vielfältig sind und es derzeit eine aktive Gruppe von Wissenschaftlern und Vertretern von Energieversorgern und Netzbetreibern gibt, die unterschiedlichste Aspekte der DSI-Nutzung in verschiedenen Projekten untersuchen. Der Autor selbst ist mit seiner Arbeitsgruppe, dem Center for Demand Side Integration (C4DSI) der HAW Hamburg, an derzeit drei unterschiedlichen DSI-Projekten mit Vertretern der EnBW, Vattenfall und Hamburg Energie aktiv beteiligt.

2.5.2 Größenordnung des DSI-Potenzials

Die intensive Auseinandersetzung mit Möglichkeiten und Nutzung von DSI-Potenzialen hat einen berechtigten Hintergrund: Die für die unterschiedlichen Sektoren analysierten Potenziale haben eine durchaus erhebliche Größenordnung. Dies soll im Folgenden kurz für die drei Sektoren Industrie, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und Haushalte dargestellt werden. Untersucht wurde die Höhe des DSI-Potenzials für Deutschland (u. a. Stadler [2006], Klobasa [2009], dena [2010] Focken et al. [2011], Stötzer [2012] sowie Apel et al. [2012]).

Apel et al. [2012] liefern die aktuell wohl umfassendste Analyse, zu der Stötzer [2012] für die Sektoren Haushalte und GHD durch seine Dissertation massiv beigetragen hat. Die zentralen Ergebnisse

hinsichtlich der Größe der Potenziale in den Sektoren Industrie, GHD und Haushalte fasst die folgende Tabelle zusammen. Dabei wird zwischen dem theoretischen Potenzial und dem technischen Potenzial unterschieden. Ersteres entspricht der Anschlussleistung der Geräte, Letzteres berücksichtigt Einflüsse wie die Anlagenverfügbarkeit und auch den Gesamtnutzungsgrad. So laufen z. B. Lüftungsmotoren i. d. R. nicht mit ihrer Nennleistung, sondern in einem Bereich von 85 bis 90 % der Nennleistung. Entsprechend reduziert sich das theoretische Potenzial. Das wirtschaftliche Potenzial ist demgegenüber noch einmal um die Leistung reduziert, die sich nicht wirtschaftlich anschließen lässt, z. B. weil der Standort nur mit erheblichem IKT-Aufwand zu erschließen wäre. Die letzte Stufe stellt dann das praktische oder realisierbare Potenzial dar. Es entspricht dem wirtschaftlichen Potenzial, ist aber reduziert um denjenigen Anteil, der aufgrund anderer als der oben angeführten Gründe nicht angeschlossen werden kann. Dazu gehören nicht technische und nicht monetär bedingte Hemmnisse wie Informationsdefizite oder Sicherheitsbedenken der Liegenschaftsbetreiber sowie alle anderen als Transaktionshemmnis zu bezeichnenden Faktoren. Grein et al. [2009] schätzen das praktische, realisierbare DSI-Potenzial auf 10 % des theoretischen Potenzials. Die folgende Grafik stellt die Abhängigkeiten dar.

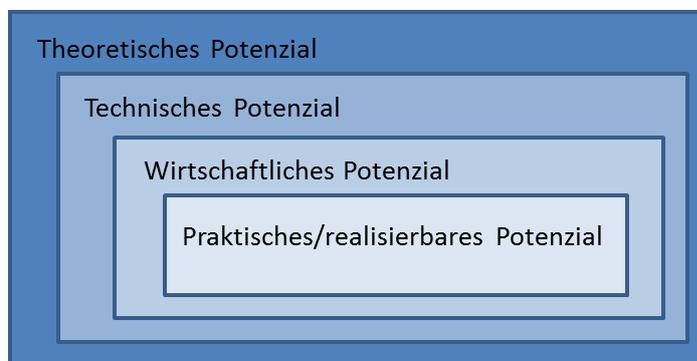


Bild 2-13: Interdependenz der Potenzialbegriffe im DSI verändert nach [Roon & Gobmaier 2011, S. 10]

In Apel et al. [2012] wird das technische Potenzial für GHD und Haushalte aus Simulationsergebnissen der Dissertation von Stötzer [2012] hergeleitet [Apel et al. 2012, S. 35]. Für den Sektor Industrie erfolgt diese Einschränkung leider nicht. Zusätzlich werden Abschätzungen für die Entwicklungen der DSI-Potenziale bis 2030 angegeben.

Sektor	2010		2020		2030	
	Theor. Potenzial in GW	Techn. Potenzial in GW	Theor. Potenzial in GW	Techn. Potenzial in GW	Theor. Potenzial in GW	Techn. Potenzial in GW
Industrie	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
GHD	7	1,4	11	1,7	11	1,8
Haushalte	13	2,6	18	3,8	35	6,0
	24,5	8,5	33,5	10	50,5	12,3

Tabelle 2-3: Gegenüberstellung des theoretischen und des technisch nutzbaren DSI-Potenzials in den Sektoren Industrie, GHD und Haushalte bis 2030 – verändert nach [Apel et al. 2012, S. 55]

Es zeigt sich (in Einklang mit anderen Abschätzungen), dass für den Sektor Haushalte das größte theoretische Potenzial angenommen wird. Das technische Potenzial liegt nach dieser Einschätzung bei etwa 20 % des theoretischen Potenzials. Für den Bereich GHD wird eine ähnlich starke Reduktion angenommen.

Die erhebliche Zunahme des DSI-Potenzials im Sektor Haushalte wird vor allem auf eine starke erwartete Zunahme der Durchdringung mit Klimaanlage (Sommer) und Wärmepumpen (Winter) zurückgeführt, wie die folgende Grafik verdeutlicht.

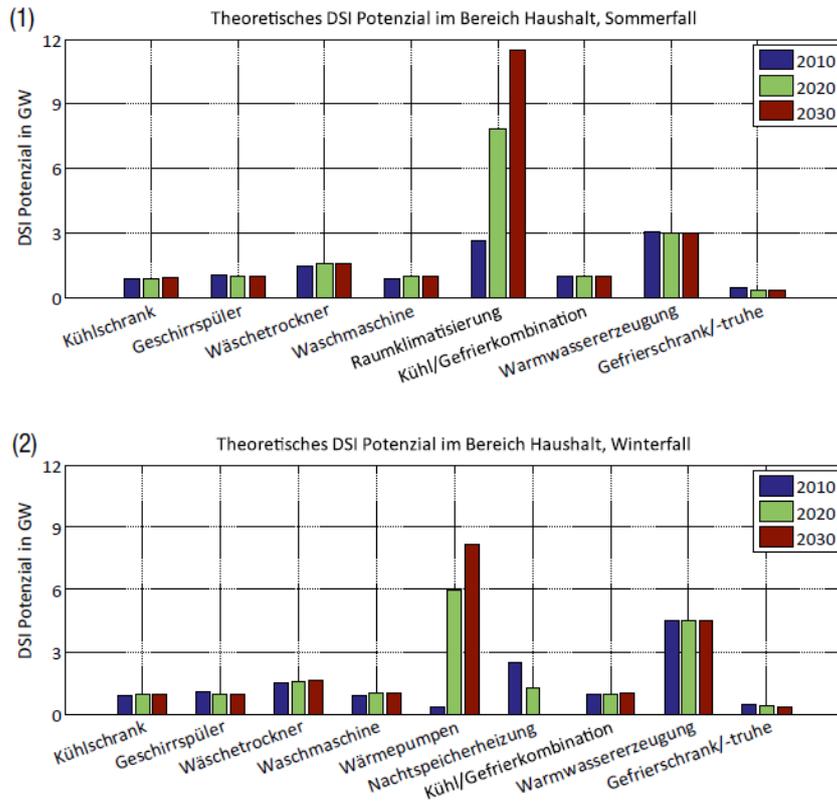


Bild 2-14: Theoretisches DSI-Potenzial aus Haushaltsanwendungen für Sommer (1) und Winter (2) nach [Stötzer 2012, S. 34]

Für den Bereich GHD zeigt sich, dass ein Großteil der angenommenen Leistung in den Bereichen Büronutzung, Gastgewerbe und Handel vermutet wird (warum Bürogebäude mit Textilbetrieben in eine Kategorie gebracht werden, wird leider nicht erläutert und ist nicht einsichtig). Zudem wird die Durchdringung mit Kälteanlagen vermutlich deutlich zu tief angesetzt (ebd., S. 35).

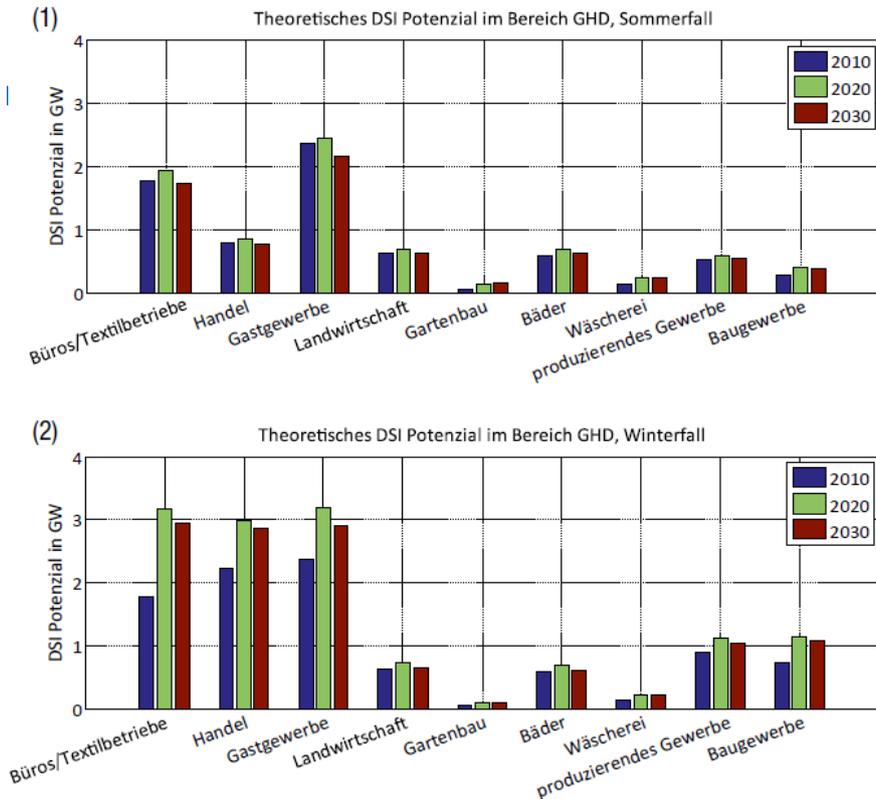


Bild 2-15: Theoretisches DSI-Potenzial aus GHD für Sommer (1) und Winter (2) nach [Stötzer 2012, S. 36]

Die folgenden Ausführungen werden zeigen, dass das theoretische DSI-Potenzial aus Lüftungs- und Kälteanlagen für Gebäude büroähnlicher Nutzung in Hamburg ziemlich sicher in einem Bereich von 180 MW liegt. Das entspräche etwa 10 % des bei Stötzer in Büro (und Textilbetrieben) vermuteten DSI-Potenzials. Da vermutlich nicht 10 % der Bürogebäude Deutschlands in Hamburg zu finden sind, ist anzunehmen, dass das DSI-Potenzial in diesem Bereich etwas zu niedrig angesetzt wurde. Die Ergebnisse dieser Arbeit legen zudem nahe, dass das DSI-Potenzial in den untersuchten Gebäuden nicht gleichmäßig verteilt ist, sondern sich überproportional (Pareto-verteilt) den großen Gebäuden zuordnen lässt. Dies wiederum dürfte die praktische Nutzung eines größeren Anteils als der angesetzten 20 % des theoretischen Potenzials zumindest wahrscheinlich erscheinen lassen. Dazu bedarf es verbesserter regulatorischer und marktspezifischer Rahmenbedingungen, wie auch Apel et al. [2012] mit Bezug auf die Nutzung des DSI-Potenzials in der Industrie und in den Haushalten anmerken (ebd., S. 57 f.).

3 Untersuchung der DSI-Potenziale der Mittelspannungsliegenschaften der Freien und Hansestadt Hamburg: Das Forschungsprojekt „Insel“

Die lastganggemessenen Liegenschaften der Freien und Hansestadt Hamburg sind Bestandteil des tertiären Wirtschaftssektors „Gewerbe, Handel, Dienstleistungen“ (GHD). Ihr DSI-Potenzial wurde ausführlich im Rahmen des Forschungsprojekts „Insel“ untersucht. Das Projekt wurde vom Autor akquiriert und von November 2006 bis März 2010 an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) Hamburg unter seiner Leitung durchgeführt. Das Akronym „Insel“ steht für „Internetbasiertes System eines erweiterbaren Lastmanagements zur Integration in virtuelle Kraftwerke“. „Insel“ wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert (FKZ 1702X06F).

Gegenstand der Untersuchungen im Projekt „Insel“ war das DSI-Potenzial der 20 besonders lastintensiven lastganggemessenen Liegenschaften der Freien und Hansestadt Hamburg (FHH). Von diesen Liegenschaften wurden Modelle der Gebäude mit ihren DSI-relevanten gebäudetechnischen Anlagen in Matlab/Simulink erstellt. Die einzelnen Teilmodelle wurden in ein Gesamtmodell integriert, in dem die gebäudetechnischen Anlagen (GTA) einer zentralen DSI-Anforderung zur Verfügung stehen. Die Hintergründe und Ergebnisse dieses Projekts werden in diesem Kapitel dargestellt. Die Ergebnisse des Projekts „Insel“ schaffen eine Datenlage, die zur Validierung der Methodik zur DSI-Potenzialabschätzung und -verortung mithilfe von ALKIS dient, die im nächsten Kapitel hergeleitet wird.

Im Folgenden wird daher zunächst kurz auf die Hintergründe der Untersuchungen im FP „Insel“ eingegangen. Dies begründet die Auswahl des Untersuchungsgegenstands und die Vorgehensweise im FP „Insel“. Dann wird das im Rahmen des Projekts erstellte Modell beschrieben. Im Anschluss daran wird die Validierung des Modells anhand der gemessenen Felddaten dargestellt und abschließend werden die erhaltenen Simulationsergebnisse diskutiert.

3.1 Hintergründe der Untersuchung

3.1.1 Begründung des Fokus der Untersuchungen auf die Liegenschaften der FHH im Sektor „GHD“

Zu Beginn des FP „Insel“ gab es nur sehr wenige Erhebungen bezüglich des DSI-Potenzials des tertiären Wirtschaftssektors „GHD“. Die Habilitation von Stadler war gerade erschienen [Stadler 2006], die eine umfassende Potenzialanalyse der Nutzung nicht-elektrischer Speicher als Kurzfrist- (und auch Langfrist-) Speicher für die Nivellierung der Leistungsschwankungen der Stromerzeugung aus fluktuierenden erneuerbaren Quellen darstellt. Der Bereich „GHD“ findet darin insbesondere bei der Untersuchung der Nutzung von Lüftungsgeräten (in Versammlungsräumen) und Kühllälte im Bereich Lebensmittellagerung im Einzelhandel Berücksichtigung. Generell waren (und sind) die DSI-Potenziale des GHD-Bereichs aber eher wenig untersucht, während sich Untersuchungen und Diskussionen zu den DSI-Potenzialen für die Sektoren „Industrie“ und auch „Haushalte“ zu diesem Zeitpunkt in breiterem Feld fanden (vgl. dazu auch dena 2010, Kap 20.2). Im Bereich „Industrie“ spielte eine wichtige Rolle das VK der Evonik Energy AG [Strese 2003]. Die Evonik Energy AG konzentrierte sich darauf, Regelenergie (Minutenreserve) im liberalisierten deutschen Strommarkt zu verkaufen. Das VK der Evonik Energy AG verbindet via Internet größere Erzeugungsreserven in Industrie und Kommunen mit dem Lastabwurfspotenzial großer industrieller Verbraucher. Für Verteilnetzbetreiber war das „Vom-Netz-Nehmen“ großer (industrieller) Lasten seit mehr als 20 Jahren eine etablierte Form der Nutzung von Demand Side Management [Auer 2006, S. 50; Roon & Gobmaier 2011, S. 57]. Bei Erreichen kritischer Lastzustände im Verteilnetz werden (bzw. wurden) größere Lasten für eine relativ kurze Zeit (und in

Absprache mit den jeweiligen Kunden) vom Netz genommen. Dafür geeignete hohe Lasten finden sich vor allem in der Grundstoffindustrie: z. B. in der Aluminium- oder Eisen- und Stahlproduktion und beim Einsatz großer elektrisch angetriebener Motoren (für Pumpen etc.) sowie im Bereich der Elektrolyse in der chemischen Industrie (s. u. a. [Stadler 2006], [dena 2010], [Roon & Gobmaier 2011]).

Der Fall „DSI-Potenzial in Haushalten“ war (neben Stadler, s. o.) ebenfalls bereits gut untersucht in Projekten wie z. B. DINAR oder Crisp. Projekte wie die amerikanischen „Gridwise“ oder „DADRP“ (day ahead demand response program) liefern zudem gute Aussagen zur Bereitschaft von Haushaltskunden, sich im Rahmen von Demand-Response-Programmen an solchen Projekten zu beteiligen.

Bei der Untersuchung der Potenziale des DSI für VK zeigte sich also zu Beginn des Projekts „Insel“ eine interessante Lücke: Entweder es wurden (industrielle) Verbraucher im MW-Bereich integriert oder man fokussierte Haushalte. Der leistungsmäßig dazwischen liegende Bereich des tertiären Sektors, der ebenso wie der Bereich der Haushalte mit etwa 27 % am Strombedarf der Bundesrepublik beteiligt ist [VIK 2004], wurde nur am Rande betrachtet.

Dabei ergeben sich gerade im tertiären Sektor für den Aufbau von Netzwerken zur zentralen Nutzung von DSI-Potenzialen einige interessante Aspekte und insbesondere gegenüber Haushalten eindeutige Vorteile:

- Viele Liegenschaften im tertiären Sektor verfügen bereits über Gebäudeleittechniken und/oder Lastmanagementanlagen (LMA), die sich mit geeigneter IuK-Technik leicht in übergeordnete Strukturen (z. B. VK) integrieren lassen.
- Bei der Integration von Liegenschaften aus dem tertiären Sektor fallen zudem üblicherweise disponible Lasten in einer Größenordnung von mehreren Hundert kW an. Bei Haushaltskunden sind dies jeweils nur wenige kW.
- Im Sektor GHD lassen sich relativ leicht „Bündelkunden“ definieren. Bündelkunden sind Firmen oder Liegenschaftsbetreiber, die nicht nur eine, sondern viele Liegenschaften betreiben. Die Integration solcher DSI-Potenziale ist mit erheblich geringeren Transaktionskosten behaftet, da sich durch die Bündelung die Anzahl der Vertragspartner stark reduziert.

Alle drei Punkte treffen auch auf die Liegenschaften der FHH zu: Die besonders lastintensiven, lastganggemessenen Liegenschaften der FHH verfügen (z. T.) über LMA, ihr DSI-Potenzial liegt bei jeweils einigen Hundert kW und die FHH ist ein solcher Bündelkunde, der die Stromversorgung seiner Liegenschaften gemeinschaftlich üblicherweise im Turnus von zwei Jahren neu ausschreibt.

Der Autor war als Projektingenieur des Ingenieurbüros „sumbi Ingenieure“ an diversen Wirtschaftlichkeitsprüfungen und Vorplanungen sowie Ausschreibungen für LMA in den Liegenschaften der FHH verantwortlich beteiligt. LMA dienen zur Reduzierung der bezogenen Spitzenlast einer Liegenschaft. Als Spitzenlast $P_{max}(t)$ bezeichnet man die höchste durch eine Liegenschaft bezogene durchschnittliche elektrische Leistung \bar{P} einer Viertelstunde im Abrechnungszeitraum t . Die prinzipielle Funktionsweise von LMA wird zunächst kurz im Abschnitt 3.1.3 beschrieben. Die detaillierte Funktionsweise wird mit dem Abschnitt 3.2.2 verdeutlicht, der die Umsetzung der LMA-Funktionen im Modell behandelt.

Die Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von LMA ist eng gekoppelt an die durch ihren Einsatz vermiedenen Kosten für den Leistungsbezug einer Liegenschaft. Die Tatsache, dass überhaupt Kosten für den Leistungsbezug anfallen, begründet sich formal aus den Kosten, die dem Betreiber des Stromnetzes für dessen Betrieb, Ausbau und Instandhaltung entstehen. Der Leistungspreis spiegelt also die Gebühr für die Benutzung des Stromnetzes, die Netznutzungskosten, wider.

Vor dem Inkrafttreten der Novelle des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG) im Jahr 2005 waren die Netznutzungskosten unreguliert. Ihre vertraglich festgesetzte Höhe war frei verhandelbar

(verhandelter Netzzugang, s. u.). Die Kosten pro kW Spitzenlast waren vergleichsweise hoch, sodass sich eine Installation von LMA in lastintensiven Liegenschaften für die FHH oft rechnete. Nach und nach wurden etwa ein Dutzend der öffentlichen Liegenschaften auf Mittelspannungsebene mit Lastmanagementanlagen unterschiedlicher Bauart, aber ähnlicher Funktionsweise ausgestattet.

Im Zuge der EnWG-Novelle und des damit verbundenen Inkrafttretens der Netzentgeltverordnung Strom (Strom NEV) sanken die Netznutzungsentgelte für die FHH erheblich. Dadurch verloren die LMA der öffentlichen Liegenschaften weitestgehend ihre wirtschaftliche Berechtigung. Das Programm zur Installation weiterer LMA in Liegenschaften der FHH wurde eingestellt. Dieser Zusammenhang wird wegen seiner Bedeutung im folgenden Abschnitt 3.1.2 erläutert.

Da aber bereits ca. ein Dutzend LMA beschafft worden waren, bot es sich an, im Rahmen des Projekts „Insel“ zu untersuchen, ob sich durch eine Vernetzung und anschließende übergeordnete Steuerung der vorhandenen (und ggf. auch zusätzlicher neu zu installierender) LMA für die FHH ein neuer (!) weitreichender wirtschaftlicher Nutzen erreichen ließe. Der Einsatz der LMA ist ja zunächst auf die Optimierung des lokalen Lastgangs einer einzelnen Liegenschaft ausgerichtet. Eine Vernetzung der DSI-Potenziale über ein Netzwerk aus LMA könnte jedoch andere und zusätzliche Erlöspotenziale bieten. Untersucht wurde in diesem Zusammenhang die Systemeignung für den Einsatz

- zur Regelenergieerbringung und
- zum Bilanzkreisausgleich.

Dazu war zu analysieren, welches Potenzial in Summe sich durch eine Vernetzung der LMA für das gesamte Kollektiv der lastganggemessenen Liegenschaften der FHH ergeben könnte. Die sich aus dieser Überlegung heraus für das FP „Insel“ ergebenden Fragestellungen werden im Abschnitt 3.1.4 dargestellt.

3.1.2 Reduzierung der Netznutzungskosten durch Spitzenlastreduktion mittels Lastmanagementanlagen früher und heute

Die gesetzliche Grundlage für den Markt mit leitungsgebundenen Energieträgern (Strom und Gas) stellt das Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) dar. Da Energienetze natürliche Monopole darstellen, ist eine unregelmäßige freie wettbewerbliche Entwicklung in diesen Bereichen schwer möglich. Es bedarf kontrollierender Instanzen. In Deutschland wurde das EnWG daher 2005 neu gefasst. Die Neufassung sollte insbesondere die EU-rechtlichen Vorgaben der EU-Stromrichtlinie (2003/54/EG) und der EU-Gasrichtlinie (2003/55/EG) in nationales Recht umsetzen (vgl. S. 1 Drucksache 15/3917 des Deutschen Bundestages vom 14.10.2004). Damit wurde auch die gesetzliche Grundlage zum sogenannten „Unbundling“ geschaffen, zur Entflechtung der bis dahin vertikal integrierten Strom- und Gaskonzerne⁸. Seither müssen Netzbetreiber mit mehr als 100 000 angeschlossenen Kunden ihren Netzbetrieb von anderen Teilen des Unternehmens trennen (vgl. § 7 EnWG).

Eine weitere zentrale Neuerung (in Deutschland) war die Einführung des regulierten Netzzugangs gegenüber dem zuvor gültigen Prinzip des verhandelten Netzzugangs (§ 6 EnWG von 1998). Für die Berechnung der durch die Netznutzung entstehenden Kosten wurden dafür nach § 24 EnWG eigene Verordnungen erlassen: die Netzentgeltverordnungen Strom bzw. Gas (StromNEV bzw. GasNEV), beide ebenfalls von 2005. Dies war insofern grundlegend, als vorher im Rahmen des verhandelten Netzzugangs durch die Verbändevereinbarungen zwar „best practice“-Regeln für die Abrechnung von Netznutzungskosten gegeben waren, diese aber nicht verbindlich für die Netzbetreiber waren und oft

⁸ Vertikal integriert meint hier die gleichzeitige wirtschaftliche Abwicklung Kraftwerksbetrieb zur Stromherstellung, Energieverteilung über Übertragungs- und Verteilungsnetze und Stromhandel zur Endkundenbelieferung in einer Unternehmenseinheit. Analog bei Gas zu verstehen. Horizontal integriert ist dann ein Energieunternehmen, das sowohl Strom als auch Gas über eine oder mehrere Wertschöpfungsstufen bewegt/handelt.

nicht eingehalten wurden. Vor der EnWG-Novelle von 2005 waren die Kosten der Netznutzung individueller Bestandteil der Versorgungsverträge im Rahmen des verhandelten Netzzugangs (§ 6, ENWG von 1998, s. o.). Dabei wurde im einfachsten Fall je nach individueller Vertragsgestaltung entweder monatlich, quartalsweise, halbjährlich oder auch nur jährlich der höchste gemessene Viertelstundenmittelwert der bezogenen Leistung in Anrechnung gebracht und ggf. nach zeitlichem Auftreten bewertet. Diese sehr „individualisierten“ Abrechnungen der Stromversorger führten zu relativ hohen und untereinander (zwischen konkurrierenden Versorgern) schwer vergleichbaren Kosten für die jeweiligen Netznutzungskosten bzw. Preise für die Spitzenlast. Entsprechend war der Verdacht der Überteuerung der abgerechneten Netznutzungskosten Gegenstand juristischer Gutachten sowie kartellrechtlicher Beschwerden und Klagen. Beispielhaft sei hier die Pressemeldung des Bundes der Energieverbraucher vom 13.03.2003 angeführt, in der auf drei Urteile sofortiger Vollziehbarkeit kartellrechtlicher Verfügungen zur Korrektur nicht gerechtfertigter Abrechnungen hingewiesen wird, sowie das seinerzeit gern zitierte Gutachten der Kanzlei Becker, Büttner, Heldt und BET zur überteuerten Abrechnung von Regelenergie durch die RWE gegenüber den Stadtwerken Lippstadt vom März 2003, das diese für die Begründung einer (erfolgreichen) Beschwerde beim Bundeskartellamt nutzten [Theobald et al. 2003].

Zum Start des Forschungsprojekts „Insel“ war die Übergangsfrist für die Abrechnung der Netznutzungskosten nach der EnWG-Novelle gerade verstrichen. Die damit einhergehende generelle Reduktion des Leistungspreises war auch für die durch die FHH getragenen öffentlichen Liegenschaften deutlich, was aber die Wirtschaftlichkeit des Weiterbetriebs der LMA in den öffentlichen Liegenschaften infrage stellte. So lag der Preis für ein kW vor der Umstellung bei etwa 5,03 € pro Monat und damit etwa 60 €/a. Nach der Umstellung waren die Kosten abhängig von den jährlichen Vollnutzungsstunden, die sich ergeben aus

$$T_{\text{Vollnutzung}} = \frac{W_a}{P_{\text{max},a}} \text{ in (h/a)} \quad \text{Formel 3-1}$$

mit W_a = Jahresarbeit in kWh/a und $P_{\text{max},a}$ = Jahreshöchstlast in kW.

Die Netznutzungskosten, $K_{\text{Netznutzung}}$, berechneten sich dann als Geradengleichungen der Form

$$\frac{K_{\text{Netznutzung}}}{P_{\text{max},a}} = 11,89 \frac{\text{€}}{\text{kW}} + 0,0168 \frac{\text{€}}{\text{kW} * \text{h}} * T_{\text{Vollnutzung}} \quad \text{Formel 3-2}$$

für $T_{\text{Vollnutzung}} < 2\,500 \text{ h}$ und

$$\frac{K_{\text{Netznutzung}}}{P_{\text{max},a}} = 34,24 \frac{\text{€}}{\text{kW}} + 0,0079 \frac{\text{€}}{\text{kW} * \text{h}} T_{\text{Vollnutzung}} \quad \text{Formel 3-3}$$

für $T_{\text{Vollnutzung}} > 2\,500 \text{ h}$.

Da aber eine Reduzierung der Lastspitze $P_{max,a}$ die Folge hat, dass sich die Vollnutzungsstunden erhöhen, ergab sich durch den Betrieb einer LMA immer auch ein die Einsparung dämpfender Anteil.⁹

Seit 2008 ist diese Regelung wieder aufgehoben. Die Netznutzungskosten berechnen sich seither nach der benötigten Spannungsebene und der Höhe der Vollnutzungsstunden. Wobei bei den Vollnutzungsstunden nur noch zwei Preisbereiche (< oder > 2.500 h/a) unterschieden werden [Stromnetz HH 2013].

Die folgende Grafik zeigt die Aufteilung der öffentlichen Liegenschaften mit Mittelspannungsanschluss nach den Vollnutzungsstunden für das Jahr 2006. In etwa der Hälfte der Fälle liegen die Vollnutzungsstunden unter 2.500 h/a.

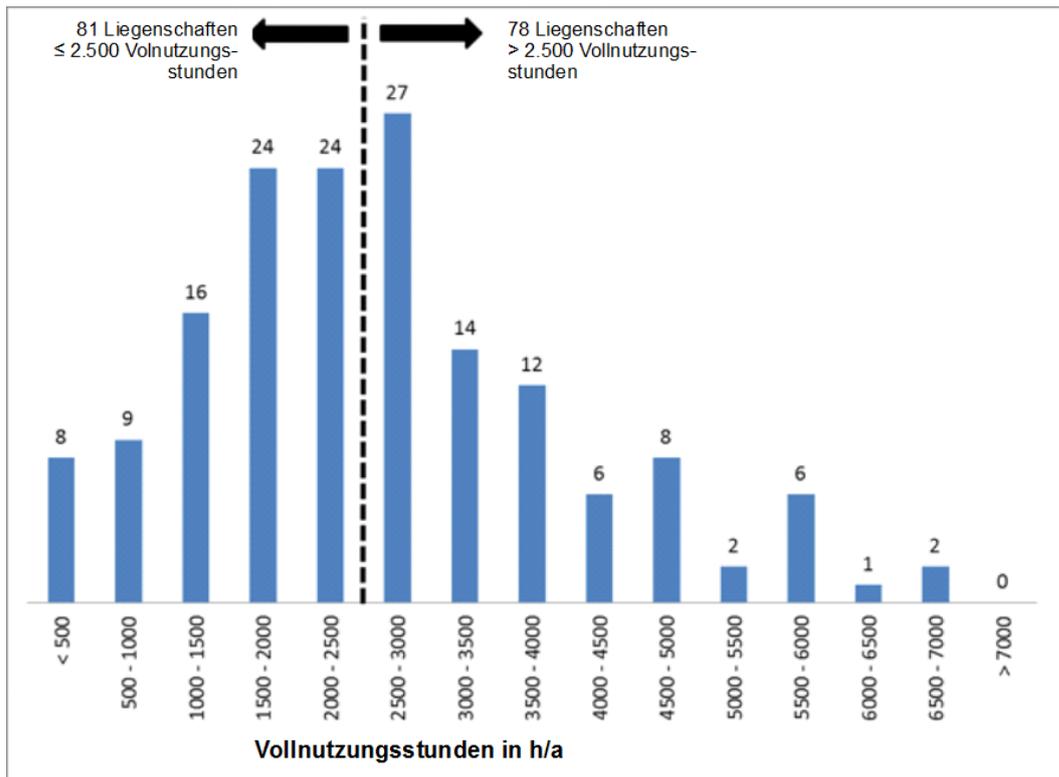


Bild 3-1: Verteilung der MSP-Liegenschaften der FHH nach Vollnutzungsstunden in 2006

Insgesamt stellte sich zu Beginn des FP „Insel“ durch die Umstellung die Situation für den Regelfall der öffentlichen Hamburger Liegenschaften so dar, dass Investitionen in neue LMA ohne zusätzlichen Nutzen nicht mehr sinnvoll erschienen. Das Förderprogramm zur Finanzierung von LMA in öffentlichen Liegenschaften wurde eingestellt.¹⁰ Das FP „Insel“ sollte nun untersuchen, ob sich aus einem vernetzten, gebündelten Betrieb der LMA solch ein Zusatznutzen ergeben könnte.

⁹ Theoretisch wächst der relative Leistungspreis (€/kW) durch eine Lastreduktion sogar, wenn

$$0,0168 * |T_{Vollnutzung}| > 11,89 \text{ bzw. die Zunahme von } T_{Vollnutzung} > 707 \text{ h ist und}$$

$$0,0079 * |T_{Vollnutzung}| > 34,24 \text{ bzw. die Zunahme von } T_{Vollnutzung} > 4\,334 \text{ h ist.}$$

Dabei ist der erste Fall möglich, der zweite jedoch nicht wahrscheinlich.

¹⁰ In der Zwischenzeit haben die Netznutzungsentgelte angezogen und die Preise für IKT-Komponenten deutlich abgenommen, sodass eine erneute Überprüfung der Situation angebracht erscheint.

3.1.3 Zum Funktionsprinzip von Lastmanagementanlagen

Der Einsatzzweck von Lastmanagementanlagen ist es, analog der obigen Darstellung die Höhe der maximal bezogenen Leistung eines Stromkunden sinnvoll zu begrenzen, um leistungsbezogene Kosten des Strombezugs zu reduzieren. LMA werden daher auch als E-max-Anlagen bezeichnet. Um dieses Ziel zu erreichen, erfasst eine zentrale Regeleinheit der LMA die SO-Impulse des Hauptstromzählers und errechnet daraus eine Prognose über die in der aktuellen Viertelstunde zu erwartende durchschnittlich bezogene Leistung \bar{P} (kW). Die Hochrechnung wird in kurzen Zeitabständen aktualisiert (z. B. alle 15 Sekunden). Dies wird als „Trendrechnung“ bezeichnet (und algorithmisch in 3.3.1 näher erläutert).

Droht \bar{P} einen vorher festgelegten Grenzwert P_{max} zu überschreiten, werden Stromverbraucher, z. B. gebäudetechnische Anlagen (GTA), wie Lüftungs- und Kälteanlagen (LuK), von der LMA für vorher definierte maximale Zeitdauern abgeschaltet. Dies geschieht in einer durch die Festlegung von Prioritäten definierten Reihenfolge in genau der für die Grenzeinhaltung benötigten Menge. Dazu werden die einzelnen GTA mit sog. „Unterstationen“ verbunden. Dies sind dezentrale Recheneinheiten in den Schaltschränken der GTA, die über ein BUS-System (Lon, EIB, M-Bus, o. Ä.) mit der zentralen Steuereinheit der LMA (Grundstation) verbunden sind. Statt einer vollständigen Abschaltung kann auch eine Lastreduktion durch die Auswahl einer geringeren Leistungsstufe oder durch eine Leistungs-Frequenzregelung erfolgen, wenn diese technischen Möglichkeiten bestehen und die jeweilige LMA diese unterstützt.

Die Abschaltdauer wird definiert durch einige für jede an die LMA angeschlossene Anlage zu definierende Zeitabschnitte:

- Die maximale Abschaltdauer bezeichnet die maximale Zeitspanne, die eine Anlage abgeschaltet werden darf, bevor sie wieder in Betrieb genommen werden muss. Sinn dieser Einstellung ist es, dass die Abschaltung für den Anlagennutzer unbemerkt bleibt. Dies kann nur erreicht werden, wenn der von der Anlage bereitgestellte Nutzen (z. B. der Luftwechsel einer Lüftungsanlage) ein speicherndes Verhalten aufweist und der Speicherinhalt stets auf einem für den Nutzer akzeptablen Niveau bleibt. Die Abschaltzeit muss daher begrenzt werden.
- Die minimale Abschaltdauer soll ein zu schnelles Takten (zu schneller Wechsel zwischen Betriebs- und Stillstandphasen) der geschalteten Anlagen vermeiden.
- Die minimale Betriebszeit soll sicherstellen, dass nach erneuter Inbetriebnahme zunächst eine hinreichend große Menge Nutzenergie den durch die Anlage versorgten Prozessen wieder zugeführt wird, bevor die nächste Abschaltung erfolgt.

Die Festlegung dieser Zeiten geschieht immer nach einer Analyse der Liegenschaft hinsichtlich der dazu geeigneten Verbraucher und wird in der Steuerung der LMA hinterlegt. Geeignete Verbraucher sind insbesondere Prozesse, die Speicher bedienen. Der Begriff „Speicher“ ist in diesem Zusammenhang auf die Fähigkeit der Speicherung der durch den schaltbaren Prozess bereitgestellten Nutzenergie zu beziehen. Im Falle von Heizungspumpen wäre es Wärme, im Falle von Zuluftanlagen Wärme bzw. Kälte und Frischluft, bei Abluftanlagen nur Frischluft. So werden in jeder Liegenschaft durch die in ihr betriebenen GTA unterschiedliche mit Speichermöglichkeiten behaftete Prozesse betrieben, die sich für LMA-Anwendungen nutzen lassen. Diese Speicher detailliert und individuell präzise zu analysieren, würde einen nicht finanzierbaren Aufwand bedeuten. In der Praxis wird daher für die Einstellung der Zeiten mit Erfahrungswerten gearbeitet. Eine solche typische Einstellung für Lüftungsanlagen in LMA ist z. B.:

- maximale Abschaltzeit in einer Viertelstunde: 5 Minuten
- minimale anschließende Laufzeit vor einer erneuten Abschaltung: 10 Minuten

Es zeigt sich, dass LMA-Installateure bei der Konfiguration der Anlagenparameter aufgrund des nicht vollständig bekannten Anlagensystemverhaltens eher konservativ sind. Detaillierte Berechnungen auf Basis exemplarischer Messwerte über die Speicherfähigkeit von Frischluft in vollbesetzten Versammlungsräumen und die damit verbundenen Dauern zur Leistungsreduktion von Lüftungsanlagen finden sich sehr ausführlich analysiert bei Stadler [Stadler 2006, S. 79 ff.]. Er findet z. B. für einen mit 100 Personen belegten und für 400 Personen ausgelegten Vorlesungssaal eine „Entladedauer“ bezogen auf CO₂-Konzentration von mindestens 45 Minuten (ebd., S. 83). Ähnliche Schaltdauern wurden im Projekt „Synchrones Lastmanagement“ der Stadtwerke Hannover in unterschiedlichen Liegenschaften ohne Beanstandung durch die Nutzer durchgeführt ([Enercity 2000, S. 29; Enercity 2000, S. 29] sowie [Röhrig & Klein 1999, S. 26]).

Typische GTA-Prozesse in LMA-Konfigurationen sind u. a.:

- Lüftungsanlagen
- Klimaanlage
- Pumpen (Heizungs-, Kalt- und Kühlwasserpumpen)
- Kompressoren
- Großküchengeräte (großvolumige Kochkessel, Kippbratpfannen etc.)

Für unterschiedliche GTA werden unterschiedliche Schaltzeiten und -prioritäten verwendet, damit eine möglichst gleichmäßige Lastreduktion erreicht werden kann.

Fällt der Leistungswert nach dem Abschalten einiger GTA wieder unter den Grenzwert, so werden die GTA vom zentralen Leitreechner (im Folgenden auch Grundstation genannt) wieder analog den eingestellten Prioritäten zugeschaltet, sofern in der Prognose eine Zuschaltung nicht zum erneuten Erreichen der eingestellten Lastgrenze führt.

LMA sind seit vielen Jahren verfügbarer Stand der Technik. Sie werden von zahlreichen Herstellern angeboten (vgl. Kreienberg 2008). Es finden sich Unterschiede in technischen Details (s. ebd.) – das grundsätzliche Funktionsprinzip entspricht aber dem hier dargestellten.

3.1.4 Forschungsfragestellung und Liegenschaftsauswahl im FP „Insel“

Das Forschungsprojekt „Insel“ diene vornehmlich der Untersuchung folgender zweier Fragestellungen:

- a) Kann ein prinzipiell einfach zu errichtendes Netzwerk aus 20 LMA Abweichungen von einem Lastfahrplan für insgesamt 150 öffentliche Liegenschaften ausregeln, der auf einer Day-Ahead-Prognose des Lastverlaufs basiert (smart balancing)?
- b) In welcher Größenordnung könnte ein solches Netzwerk zu welcher Tageszeit Regelenergie als Systemdienstleistung zur Verfügung stellen?

Die Ergebnisse zeigen, dass das untersuchte System Minuten- oder auch Sekundärreserve in der Größenordnung von 1 bis 3 MW (positiv) bzw. bis zu 7 MW (negativ) bereitstellen kann (vgl. 3.5.3.4). Die dafür zur Verfügung stehende Last stammt hauptsächlich aus gebäudetechnischen Anlagen (Heizung, Lüftung und Kühlung). Die zur Verfügung stehende Menge an Regelenergie ist dabei abhängig von Jahreszeit, Wochentag, Tageszeit und benötigter Regelenergieart (positiv oder negativ). Weitere Ausführungen dazu finden sich im Abschnitt 3.5.3.4.

Soll das System zur Absicherung eines Lastfahrplans eines Bilanzkreises genutzt werden (Vermeidung von Ausgleichsenergie), ist eine möglichst genaue Lastprognose für den folgenden Tag notwendig, da die Bandbreite der zur Verfügung stehenden Regelenergie begrenzt ist. Ist der Prognosefehler größer

3 Untersuchung der DSI-Potenziale der Mittelspannungsliegenschaften der Freien und Hansestadt Hamburg: Das Forschungsprojekt „Insel“

als die zur Verfügung stehende Regelenergiemenge, so ist die Einregelung des prognostizierten Lastgangs nicht mehr möglich. Ergebnisse hierzu finden sich in Abschnitt 3.5.3.2.

Die Gesamtheit der im Forschungsprojekt „Insel“ berücksichtigten Liegenschaften beschränkte sich auf die Summe der öffentlichen Liegenschaften mit Mittelspannungsanschluss im Poolvertrag zwischen 2003 und 2006, zu denen ein vollständiger Verbrauchsdatenbestand vorlag. Die folgende Grafik gibt die Struktur des Projekts wieder.

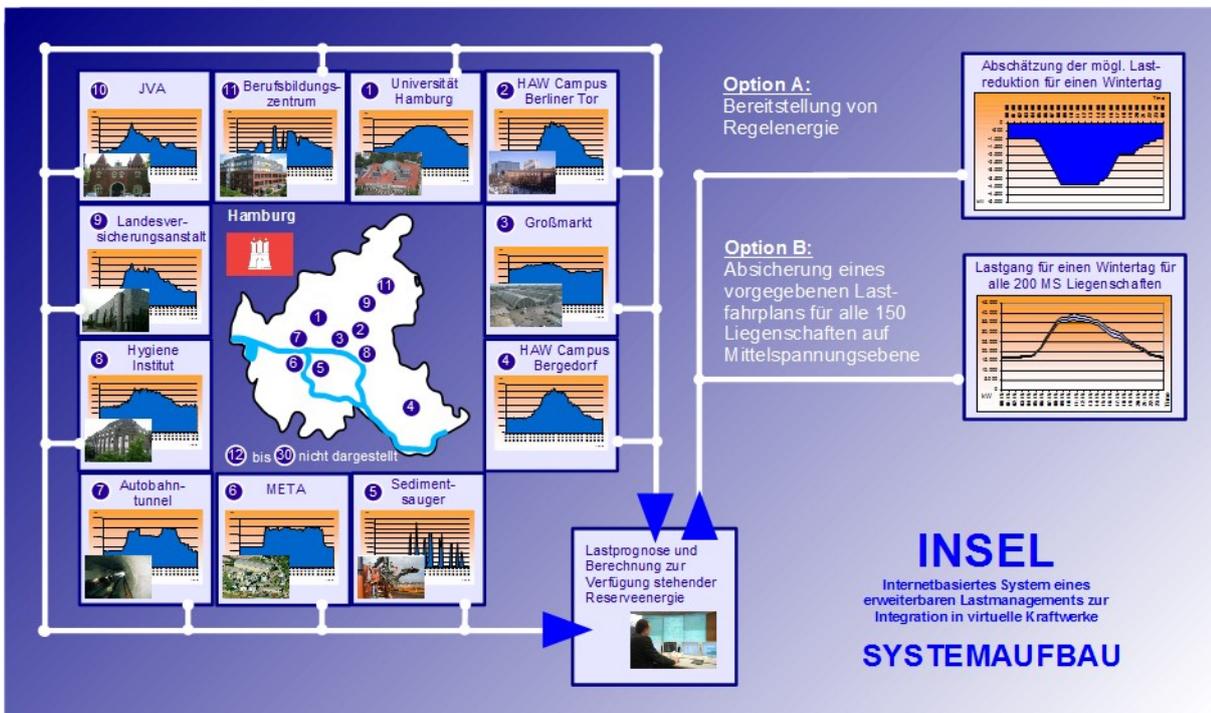


Bild 3-2: Zusammenfassende Darstellung der Systemstruktur und der Forschungsfragestellung im FP „Insel“ [Schäfers et al. 2010, S. 73]

Ins Projekt integriert wurden etwa 160 Liegenschaften mit einem Strombedarf von in der Summe rund 195 GWh/a (195 Mio. kWh).

Sortiert man die Liegenschaften nach den Leistungsspitzen, so zeigt sich, dass diese 2006 nur bei 38 Liegenschaften höher als 400 kW war. Die große Mehrzahl der Liegenschaften hatte einen deutlich niedrigeren Leistungsbezug. Die folgende Grafik verdeutlicht den Zusammenhang.

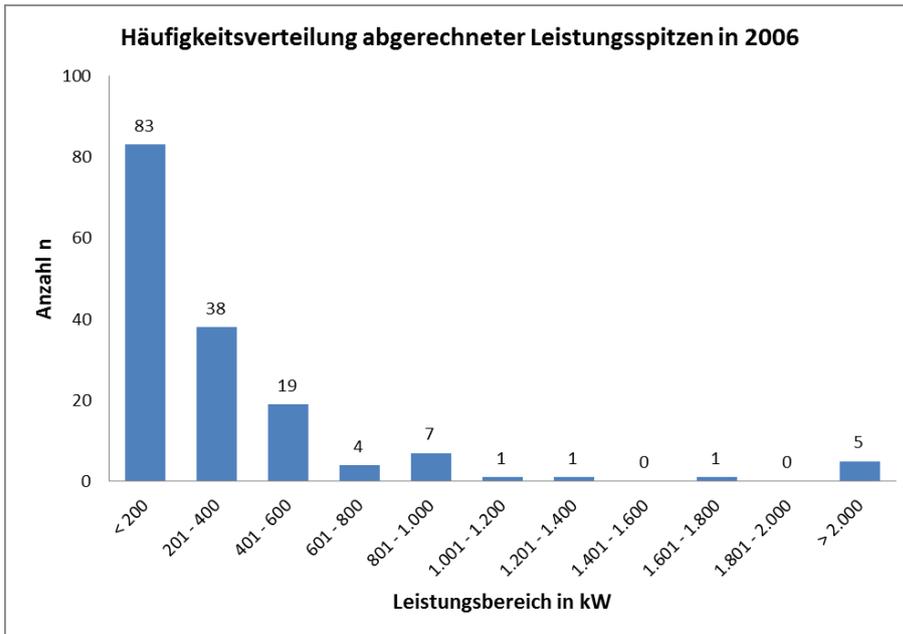


Bild 3-3: Anzahl städt. MSP-Liegenschaften nach Leistungsbereich (Stand 2006)

Die Summe der (nicht zeitgleich) aufgetretenen und in Rechnung gestellten Spitzenlast lag für Hamburg in 2006 für alle 174 abgerechneten MSP-Liegenschaften bei 42.127 kW. Knapp zwei Drittel der abgerechneten Leistung stammen dabei aber von diesen 38 besonders lastintensiven Liegenschaften mit einer Leistungsaufnahme von $> 400 \text{ kW}_{\text{peak/a}}$, wie die folgende Grafik zeigt.

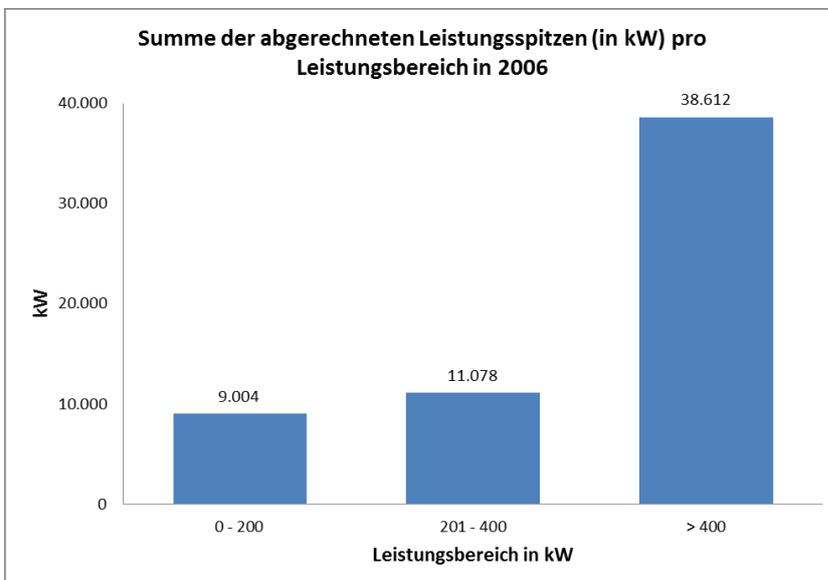


Bild 3-4: Abgerechnete Leistung nach Leistungsbereichen (Stand 2006)

Aus den beiden Darstellungen lässt sich folgern, dass nur wenige Liegenschaften für den Großteil der abgerechneten Leistung verantwortlich sind. Das Überschreiten der „400 kW-Grenze“ führte daher im Projekt „Insel“ dazu, dass die Liegenschaftsbetreiber kontaktiert und gebeten wurden, im Rahmen des Forschungsprojekts eine Installation von Datenloggern zu gestatten, die eine zeitlich hochaufgelöste Erfassung der Verbrauchsdaten ermöglichen. Von 40 zunächst avisierten Liegenschaften wurden dann schließlich 21 konkret mit Datenloggern ausgestattet, um Lastgänge in Minutenschritten aufzeichnen zu können. In den Liegenschaften, in denen LMA vorhanden waren, wurde zudem das Anlagenverhalten der LMA geloggt, um den ursprünglichen Lastgang vor der Beeinflussung durch die LMA rekonstruieren zu können. Für die nicht detailliert gemessenen Liegenschaften wurden aus den

vorhandenen Viertelstundenlastgängen synthetische Minutenlastgänge gebildet, in die das durchschnittliche Lastrauschen¹¹ der detailliert gemessenen Liegenschaften eingerechnet wurde (vgl. dazu Naimi 2008).

3.2 Modellbildung und Simulation der Liegenschaften in „Insel“

Zur Modellbildung und Simulation wurde für das Forschungsprojekt „Insel“ die Software Matlab/Simulink verwendet. Das damit erstellte Modell lässt sich prinzipiell in zwei Teilmodelle unterteilen:

1. ein Teilmodell der Gebäude mit ihren gebäudetechnischen Anlagen und der Lastmanagementanlage in einzelnen Teilmodellen (pro Gebäude eines) und
2. ein Modell des übergeordneten Reglers für das Gesamtsystem als zentrale Vernetzungsinstanz zur Überwachung der Einhaltung eines Summenfahrplans für alle Liegenschaften und/oder der Bereitstellung von Regelenergie.

Beide Teilmodelle werden in Aufbau und Funktion in den folgenden Unterkapiteln des Kapitels 1 erläutert, jedoch nur in einem Detaillierungsgrad, der einer prinzipiellen Erläuterung der Funktionsweise des Modells entspricht. Eine Beschreibung aller Modellparameter, insbesondere der detaillierten Signalführung sowie der algorithmischen Funktionsweise der jeweiligen Teilmodelle weiterer untergeordneter Modellebenen, findet sich im Endbericht des Forschungsprojekts (vgl. Schäfers et al. 2011).

Einen Überblick über den grundsätzlichen Aufbau des Gesamtmodells zeigt die nachfolgende Grafik.

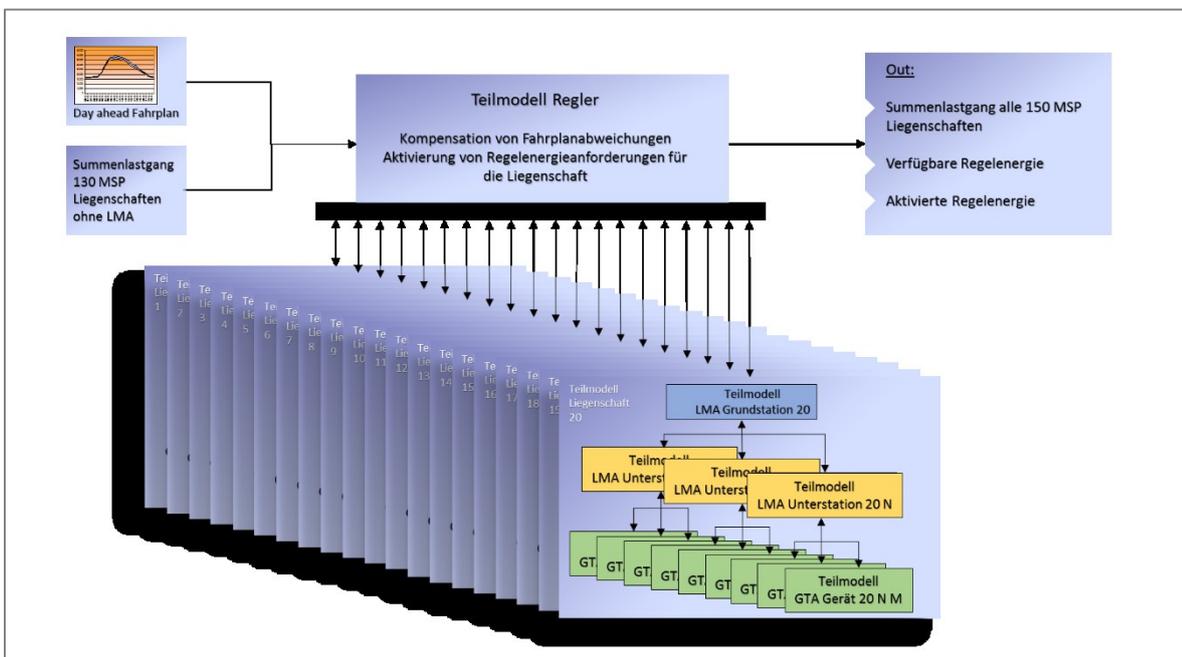


Bild 3-5: Übersicht Funktionsprinzip des Modells [Schäfers 2010]

Die Simulation bildet das Geschehen in dem Gesamtsystem aus Gebäuden/Liegenschaften mit LMA (Teilmodelle Liegenschaften) ab, die über einen zentralen Regler (Modellebene „Regler“) vernetzt sind und im Verbund geregelt werden. Die Simulationen werden diskret durchgeführt, mit einer

¹¹ Zum Problem des Lastrauschens siehe Abschnitt 3.5.3.3.

Schrittweite von einer Minute zwischen zwei berechneten Systemzuständen¹². Eine Simulation eines Tages läuft also in $24\text{h/Simulationstag} * 60 \text{ Simulationsschritte/h} = 1440 \text{ Simulationsschritte/Simulationstag}$ ab.

Ein „Fahrplan“ für den Lastgang (vgl. Kap. 3.5.1) fungiert für die übergeordnete Regelung als Sollwert. Der Regler vergleicht eine Trendberechnung der Lastentwicklung der Summenlast mit dem für die jeweilige Viertelstunde geltenden Sollwert und gibt bei Abweichungen entsprechende Schaltaufforderungen an die LMA weiter. Eine Beschreibung der Funktionsweise der Regelung findet sich im Kapitel 3.5.2.

Dieses Unterkapitel 3.2 und das anschließende Kapitel 3.3 beschreiben zunächst nur den Aufbau und die Funktion des Teilmodells eines einzelnen Gebäudes mit seiner LMA. Das darauf folgende Unterkapitel 3.4 widmet sich der Validierung dieses Modellteils mithilfe gemessener Felddaten. Im Anschluss daran werden im Kapitel 3.5 Aufbau und Funktion des übergeordneten Reglers sowie die Simulation des Gesamtsystems mit den erhaltenen Simulationsergebnissen dargestellt.

Das Teilmodell „Liegenschaft“ gliedert sich in zwei Teile:

1. Teilmodell des Gebäudes mit seinen durch die LMA schaltbaren Anlagen und
2. das Teilmodell der LMA selbst.

Entsprechend ist dieses Unterkapitel 3.2 im Folgenden auch zweigeteilt. Im anschließenden Abschnitt 3.2.1 wird zunächst das Teilmodell „Gebäude“ beschrieben, in 3.5.1 dann das Teilmodell der LMA.

3.2.1 Teilmodelle der Liegenschaften

Für die Modellierung der Gebäude mit den von der LMA schaltbaren Anlagen wurden nur Anlagen berücksichtigt, die in ein Lastmanagementsystem eingebunden sind oder eingebunden würden. Der erste Fall betrifft Liegenschaften, in denen bereits eine Lastmanagementanlage (LMA) installiert ist. In solchen Fällen wurden die existierenden Anlagen und ihre Parametrierung für das Modell übernommen. Der zweite Fall betrifft Liegenschaften, die keine LMA haben, für die jedoch im Modell das Vorhandensein einer LMA simuliert wurde. In diesen Fällen wurden Begehungen in den Liegenschaften durchgeführt, um vor Ort zu analysieren, welche Anlagen mit welcher Parametrierung in eine LMA integriert werden könnten. Diese Begehungen fanden mit Unterstützung durch das Ingenieurbüro ENVIDATEC statt. ENVIDATEC vertreibt LMA und war offizieller Projektpartner im FuE-Projekt „Insel“. Eine (anonymisierte) Übersicht über alle Liegenschaften und die jeweils integrierten gebäudetechnischen Anlagen findet sich im Anhang zu dieser Arbeit.

3.2.1.1 Aufbau des Teilmodells „Liegenschaft“

Jedes Modell einer Liegenschaft wird im Gesamtmodell in Matlab/Simulink zunächst als „Black Box“ abgebildet. Diese Black Boxes enthalten in darunterliegenden Modellebenen die zugehörigen Teilmodelle.

¹² Anders als in kontinuierlichen Simulationen werden in diskreten Simulationen nur Systemzustände in vorher festgelegten Zeitschritten berechnet. Zustände des Systems zwischen zwei diskreten Zeitpunkten t und $t+1$ werden nicht bestimmt (vgl. Domschke & Drexel [2005, S. 224]).

3 Untersuchung der DSI-Potenziale der Mittelspannungsliegenschaften der Freien und Hansestadt Hamburg: Das Forschungsprojekt „Insel“



Bild 3-6: Screenshot der Black Box des Teilmodells einer Liegenschaft am Beispiel des Hochschulcampus der Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) am Campus „Berliner Tor“

So enthält jede Black Box/jedes Teilmodell einer Liegenschaft eine Reihe von gebäudetechnischen Anlagen, die durch eine LMA geschaltet werden können.

In realen LMA werden die Anlagen durch sog. „Unterstationen“ gebündelt an den Hauptrechner der LMA angeschlossen (betitelt mit „Modellebene Grundstation“). Das Modell empfindet dieses nach, indem auch hier jede Black Box einer Liegenschaft eine (parametrierbare) Anzahl von Unterstationen und ein Teilmodell einer LMA enthält.

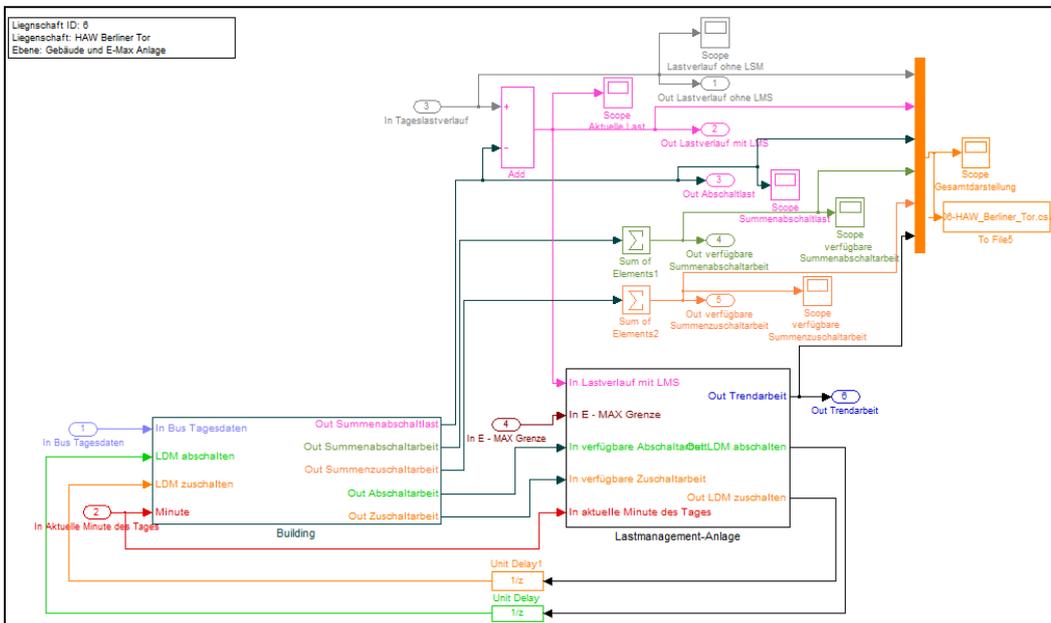


Bild 3-7: Screenshot des inneren Aufbaus der Black Box „Liegenschaft“ mit den Teilmodellen Gebäude (Building) und Lastmanagementanlage [Schäfers et al. 2011, S. 62]

Die Box „Building“ enthält die Unterstationen, die wiederum die Teilmodelle der einzelnen parametrierbaren gebäudetechnischen Anlagen enthalten. Die folgenden Screenshots aus dem Gesamtmodell geben dies wieder.

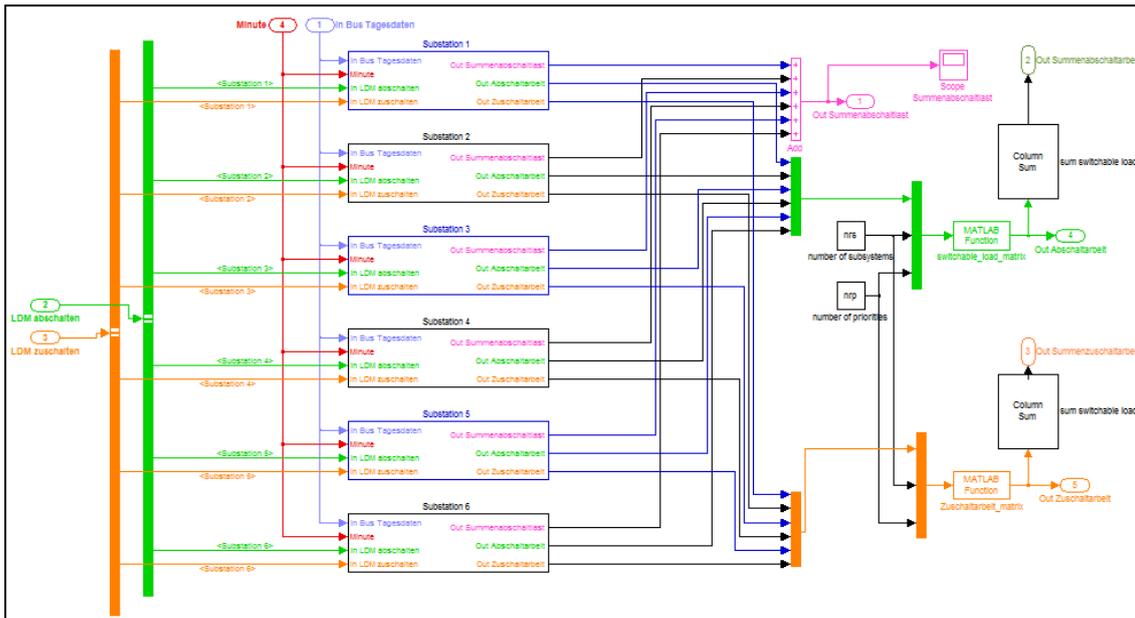


Bild 3-8: Screenshot der inneren Struktur des Teilmodells „Building“ mit den Unterstationen („Substation“) [Schäfers et al. 2011, S. 63]

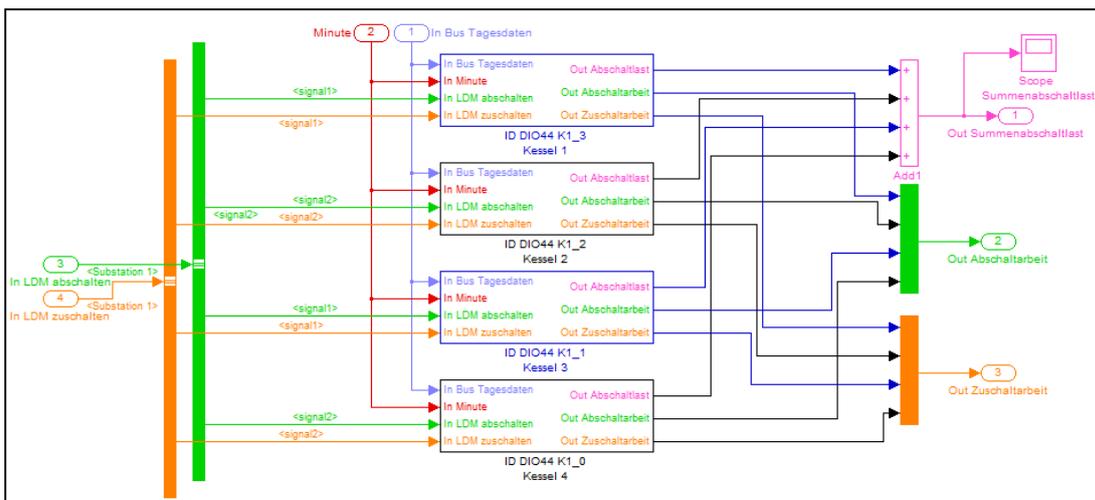


Bild 3-9: Screenshot der inneren Struktur einer Unterstation („Substation“) mit hier vier Anlagen (in diesem Fall Kochkessel einer Großküche) [Schäfers et al. 2011, S. 63]

Jede gebäudetechnische Anlage wird so parametrisiert, dass a) die real vorhandene Anlage abgebildet wird und b) den (vorhandenen oder vorzusehenden) Einstellungen für eine Anbindung dieser Anlage an eine Lastmanagementanlage entsprochen wird. Diese Parametrierungen werden im Folgenden erläutert.

Die Black Box „Lastmanagementanlage“ enthält das Teilmodell der LMA, die versucht, durch Abschalten von Leistung eine vorgegebene maximale Lastgrenze in einer Liegenschaft nicht zu überschreiten und sobald wie möglich abgeschaltete Anlagen wieder zuzuschalten.

3 Untersuchung der DSI-Potenziale der Mittelspannungsliegenschaften der Freien und Hansestadt Hamburg: Das Forschungsprojekt „Insel“

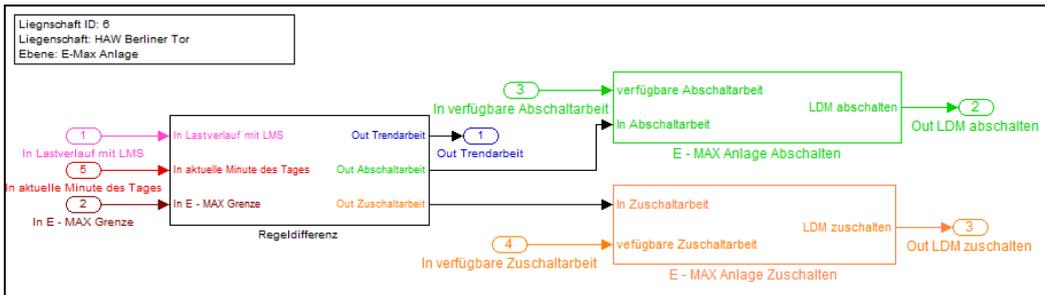


Bild 3-10: Screenshot der inneren Struktur der Black Box „Lastmanagementanlage“ [Schäfers et al. 2011, S. 67]

Im Folgenden wird zunächst die Parametrierung des Teilmodells „gebäudetechnische Anlage“ erläutert. Dies klärt, wie die LMA Kenntnis über die in der jeweiligen Viertelstunde zur Verfügung stehende Zu- bzw. Abschaltarbeit bekommt. Im Anschluss daran wird im Abschnitt 3.2.2 die Funktion der LMA erläutert.

3.2.1.2 Teilmodell „gebäudetechnische Anlage“

Für jede Anlage sind einige Parameter zu definieren, die den Betrieb der Anlage im Gebäude beschreiben. Diese Parametrierungen werden im Modell mithilfe eines GUI vorgenommen und beinhalten folgende Aspekte:

- Nennleistung: Die Einstellung der elektrischen Nennleistung P_{nenn} in kW, die die Anlage in ihrem Betrieb vom versorgenden Stromnetz aufnimmt.
- Betriebszeit: Die Einstellung der Betriebszeit der Anlage legt fest, an welchen Wochentagen und zu welcher Tageszeit (jeweils separat einstellbar) die Anlage betrieben wird. Zudem muss festgelegt werden, ob die Anlage auch an Ferien- und Feiertagen betrieben wird.
- Temperaturgrenzen: Die Einstellung von Temperaturgrenzen legt fest, ab welcher Außentemperatur eine Anlage in Betrieb geht (Heizungs- und Klimaanlage).
- Priorität: Dieser Parameter legt fest, in welcher Rangfolge (1 bis 99) die jeweilige Anlage im Bedarfsfall geschaltet werden soll (niedrige Zahl = hohe Abschaltpriorität, hohe Zahl = niedrige Abschaltpriorität).
- Schaltzeiten: Die Einstellung der Schaltzeiten hat insgesamt drei zu setzende Parameterwerte:
 - Mit dem Parameter „maximale Abschaltzeit“ wird festgelegt, wie lange eine Anlage maximal abgeschaltet werden darf, bevor sie wieder angeschaltet werden muss, um eine Unterversorgung eines Versorgungsbereichs zu vermeiden.
 - Der Parameter „minimale Laufzeit“ legt fest, wie lange eine Anlage nach dem Wiederanschalten mindestens laufen muss, bevor sie wieder ausgeschaltet werden kann (ebenfalls um eine Unterversorgung zu vermeiden).
 - Über den Parameter „Mindestausschaltzeit“ wird festgelegt, wie lange eine Anlage nach dem Abschalten mindestens abgeschaltet bleiben muss, bevor sie wieder angeschaltet werden darf, um zu häufiges Takten der Anlage zu vermeiden.

Diese Parameter finden sich so auch in den real verbauten LMA der Liegenschaften für die einzelnen Anlagen wieder. Sie dienen dem Lastmanagementsystem, das im Bedarfsfall über Ab- und Wiederanschalten von Anlagen entscheiden muss, zu zwei Zwecken:

1. Aus Betriebszeit und ggf. Temperaturabhängigkeit wird erkannt, ob die Anlage überhaupt zu Schaltzwecken zur Verfügung steht.

2. Aus den Abschaltzeiten kann ermittelt werden, welche Ab- bzw. Zuschaltarbeit (kWh) in der laufenden Viertelstunde aus der jeweiligen Anlage für eine Lastgängeränderung noch zur Verfügung steht.

Die Schaltzeiten wurden entweder den realen Einstellungen der vorhandenen LMA entnommen oder in Abstimmung mit dem Ingenieurbüro Envidatec auf Basis der dortigen Erfahrungswerte nach detaillierten Begehungen der Liegenschaften festgelegt.

Auf den Ablauf bei der Erstellung des Schaltsignals durch die LMA wird im folgenden Abschnitt eingegangen.

3.2.2 Regelung zur Einhaltung der Lastgrenze: Die Lastmanagementanlage

Die Grundstation der Lastmanagementanlage beherbergt den zentralen Regelalgorithmus, der in einer Liegenschaft die Einhaltung der eingestellten Lastgrenze überwacht. Die Forschungsthese des FP „Insel“ besagt, dass ein Verbund von LMA verwendet werden kann, um ein anders gelagertes Regelungsproblem (Einhaltung eines Summenlastverlaufsplans) zu lösen. Daher ist für das Vorgehen im FP „Insel“ die Art der Spitzenlastregelung in einer LMA von besonderer Bedeutung. Sie soll im Folgenden kurz erläutert werden.

Prinzipiell stellt eine Regelung einen Vorgang dar, bei dem „die zu regelnde Größe (Regelgröße), fortlaufend erfasst, mit einer anderen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird. (...)“ [DIN IEC 60050: 2012, S. 74]. Dieser Vorgang geschieht im Rahmen einer Regelung fortlaufend. Die folgende Grafik zeigt einen einfachen Regelkreis.

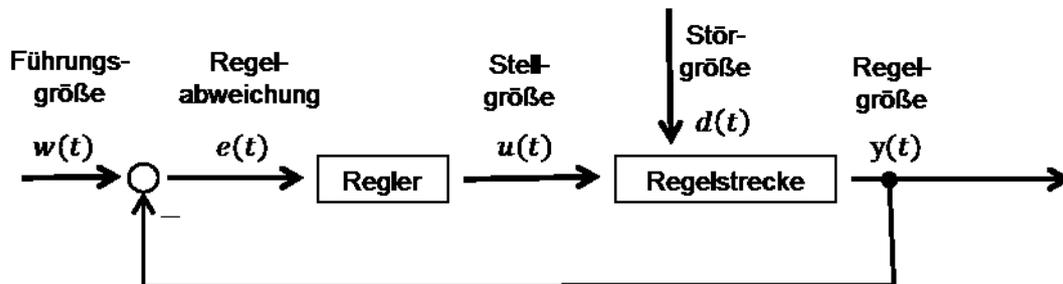


Bild 3-11: Prinzip einfacher Regelkreis

Ein solcher einfacher Regelkreis lässt sich auf das Regelungsproblem „Einhaltung einer Spitzenlast in einer Liegenschaft mithilfe einer LMA“ wie folgt übertragen:

Als Führungsgröße $w(t)$ dient die eingestellte, maximal erlaubte Durchschnittsleistung in einer Viertelstunde $P_{15,max}(t)$. Die Regelgröße $y(t)$ ist die tatsächliche zur Minute (t) der Viertelstunde errechnete Trendleistung $P_{15,Trend}(t)$ der Liegenschaft. Die Trendleistung ist der algorithmische Versuch, während einer laufenden Viertelstunde vorherzusagen, welche Leistung als durchschnittliche Leistung des gesamten Viertelstundenintervalls abrechnungsrelevant werden wird. Da dies eine zentrale Größe der Regelung ist, wird die Trendleistungsberechnung im folgenden Abschnitt genauer erläutert.

Die Regelabweichung $e(t)$ ergibt sich als

$$e(t) = P_{15,max}(t) - P_{15,Trend}(t).$$

Formel 3-4

Ist $e(t)$ negativ, wird die LMA (als Regler) Anlagen abschalten, und zwar möglichst genau so wenige, dass $P_{15,max}(t)$ knapp nicht erreicht wird. Die Bildung des resultierenden Schaltsignals entspricht der Stellgröße $u(t)$. Dies wird im Abschnitt 3.3.2 erläutert.

Das Schaltsignal wird in der Regelstrecke umgesetzt. Die Regelstrecke ist hier die Liegenschaft mit ihrer Lastaufnahme. Der Störgröße $d(t)$ entspricht dabei der stochastische, nicht regelbare Anteil der aktuellen Lastaufnahme $P(t)$. Die LMA misst über das SO-Signal des Lastgangzählers den tatsächlichen Lastgang, bildet darauf die aktualisierte Trendrechnung $P_{15,Trend}(t + 1)$ und der Regelkreis beginnt von vorn.

In den real verbauten LMA läuft dieser Regelkreis i. d. R. einmal alle 15 Sekunden ab. In der Simulation wird er einmal pro Minute durchlaufen. Daraus ergeben sich Abweichungen im dynamischen Verhalten zwischen realer und simulierter LMA, auf die im Abschnitt 3.4 näher eingegangen wird.

3.3 Trendrechnung und Regelung im Gebäude

3.3.1 Trendrechnung

Das Trendrechnungsverfahren im Modell entspricht dem in der Praxis von LMA üblichen Verfahren. Dies verfolgt i. d. R. einen einfachen linearen Ansatz, der im Folgenden beschrieben wird.

Der Stromzähler einer Liegenschaft misst (auch bei einer registrierenden Lastgangmessung) stets nur die elektrische Arbeit W (in kWh), die in der Liegenschaft verrichtet wurde. Die durchschnittliche Leistung einer Viertelstunde \bar{P}_{15} in (W) ergibt sich dann aus der in der Viertelstunde vom Stromzähler gemessenen elektrischen Arbeit W_{15} (in kWh) nach

$$\bar{P}_{15} = \frac{W_{15}}{0,25 h}.$$

Formel 3-5

Zum selben Ergebnis kommt man, wenn man die Arbeit jeweils in kürzeren Zeitintervallen t misst und diese Beträge aufaddiert. Wenn dann n dieser Zeitintervalle einer Viertelstunde entsprechen, ergibt sich

$$\bar{P}_{15} = \sum_{i=0}^n W_i * \frac{1}{0,25 h}.$$

Formel 3-6

Die Trendrechnung fügt nun zu einem gemessenen Wert für die Arbeit, der zu einem schon vergangenen Zeitintervall t_i der Viertelstunde gehört, eine lineare Extrapolation der letzten Messwerterhöhung (dW) für die erfolgte Arbeit im letzten Messzeitraum ($= w_i - w_{i-1}$) bis zum Ende der Viertelstunde hinzu.¹³ Es ergibt sich

$$\bar{P}_{15,Trend}(t_i) = \frac{(W_i + (W_i - W_{i-1}) * (n - i))}{1/4 h}$$

Formel 3-7

als Trend für den Viertelstundenleistungsmittelwert nach einer Zeit $t = i$ und n Messintervallen in $1/4$ h.

Darin entspricht der Term „ $W_i - W_{i-1}$ “ der Änderung der Arbeit dW des letzten Messintervalls (t_i).

Da generell gilt

$$W(t) = \int_0^t P dt$$

Formel 3-8

und daraus folgend

$$\frac{dW(t)}{dt} = P,$$

Formel 3-9

kann man auch schreiben

$$\bar{P}_{15,Trend}(ti) = \frac{W_i + \frac{dW(ti)}{dt} * (tn - ti)}{1/4 h}$$

Formel 3-10

als Trend für den Viertelstundenleistungsmittelwert nach einer Zeit $t = i$ und n Messintervallen in 0,25 h.

Das folgende Bild verdeutlicht den Sachverhalt grafisch.

¹³ In der Anwendung im Feld finden sich auch andere Verfahren zur Trendberechnung (Projektion der Durchschnittsbildung aller Messwerterhöhungen, eines beliebigen Teils davon, Integration der Werte der letzten Viertelstunde u. a.). LMA bieten dem Nutzer meist eine Auswahl unterschiedlicher Trendrechnungsverfahren. Damit wird versucht, das dynamische Verhalten einer Liegenschaft möglichst gut nachzubilden, um eine möglichst gute Trendberechnung zu realisieren. Hier wird nur das im Modell des Projekts „Insel“ verwendete Verfahren referenziert, das dem Standardverfahren der im Feld vorgefundenen LMA entspricht.

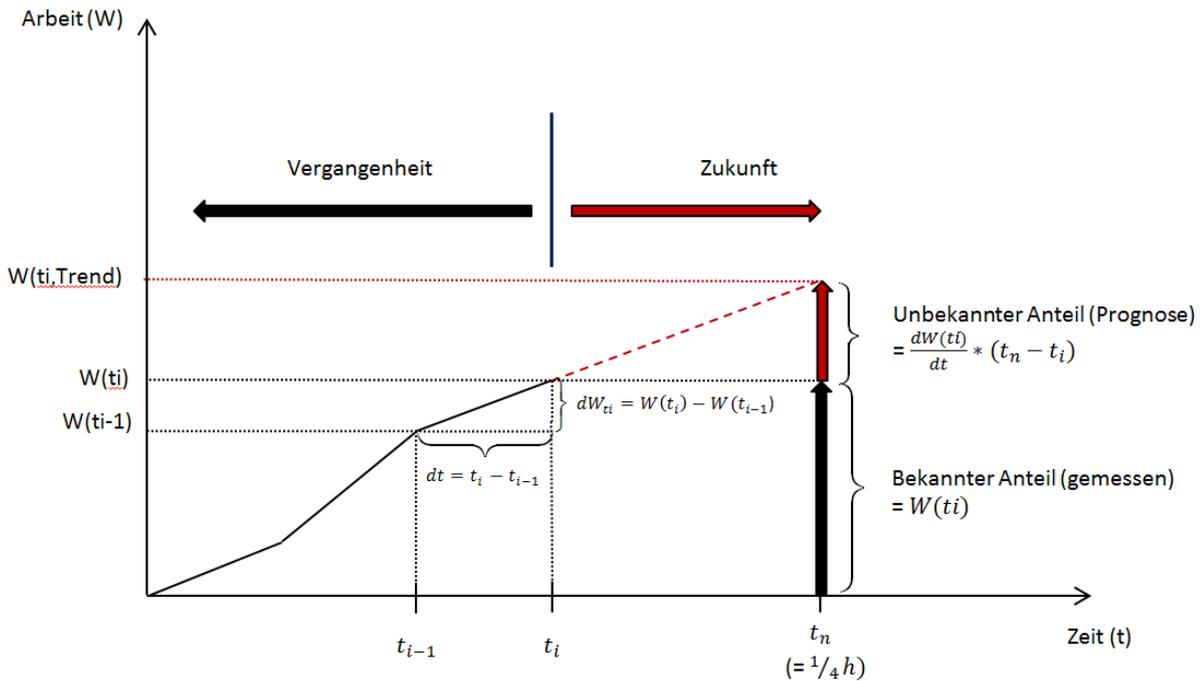


Bild 3-12: Grafische Darstellung des Trendrechnungsverfahrens – eigene Darstellung

3.3.2 Regelung im Gebäude

Mithilfe der Schaltzeiten und Prioritäten erstellt jede Unterstation in einem Gebäude in jeder Minute zwei Matrizen, in denen geordnet nach Priorität aufgelistet wird, wie viele kWh in der gerade laufenden Viertelstunde mithilfe der Anlagen dieser Unterstation noch zu- bzw. abgeschaltet werden können. Im Modell werden diese Matrizen als BUS-Signal an das Teilmodell der LMA geschickt, die diese zusammenführt und so der Regelung Werte übergibt, mit welcher Priorität im Gebäude wie viel Zu- bzw. Abschaltarbeit in welcher Unterstation für die laufende Viertelstunde bereitsteht. Dies ist die zentrale Information für die LMA-Berechnung der Stellgröße $u(t)$, also des benötigten Schaltsignals (vgl. 3.2.2).

Dazu rechnet der Regler zunächst die Regelabweichung $e(t)$ als Differenz zwischen P_{\max} und P_{Trend} aus (vgl. 3.2.2). Ist der Wert negativ, wird die eingestellte maximal erlaubte Last also überschritten, bildet der Regler ein Schaltsignal, das die Informationen über die Prioritäten und Unterstationen enthält, die geschaltet werden sollen. Dabei wird eine „0“ gesendet für den Befehl „Geräte in dieser Unterstation mit dieser Priorität abschalten“ und eine „1“ für „Geräte in dieser Unterstation mit dieser Priorität anschalten“.

Dies sei an folgendem Beispiel erläutert: Die LMA einer Liegenschaft versucht, eine Lastgrenze von 500 kW einzuhalten. Die aktuelle Trendleistung ist zu 550 kW errechnet. Die LMA muss 50 kW Abschaltleistung aktivieren. Die von den Unterstationen gesendeten Lastveränderungsoptionen (= für den Rest der Viertelstunde verfügbare Abschalt- bzw. Zuschaltarbeit) entsprechen den linken Matrizen der folgenden Abbildung. Die LMA wählt aus der Matrize „Verfügbare Abschaltarbeit“ so lange Leistung, bis der Schaltbedarf gedeckt ist. Dabei beginnt sie bei einer zufällig gewählten Unterstation in Priorität 1 und endet, wenn die benötigte Menge an Leistung erreicht oder überschritten ist. Im dargestellten Beispiel betrifft das die Geräte in Priorität 1 in allen vier Unterstationen und die Geräte in Priorität 2 der Unterstation 2. Zusammen sind dies 60 kW, was die benötigten 50 kW überschreitet.

Zusätzlich sendet die LMA eine Matrix zur „angeforderten Zuschaltarbeit“, die ausschließlich aus Nullen besteht, um zu signalisieren, dass bereits ausgeschaltete Anlagen, die wieder zugeschaltet werden könnten, weiter aus bleiben sollen.

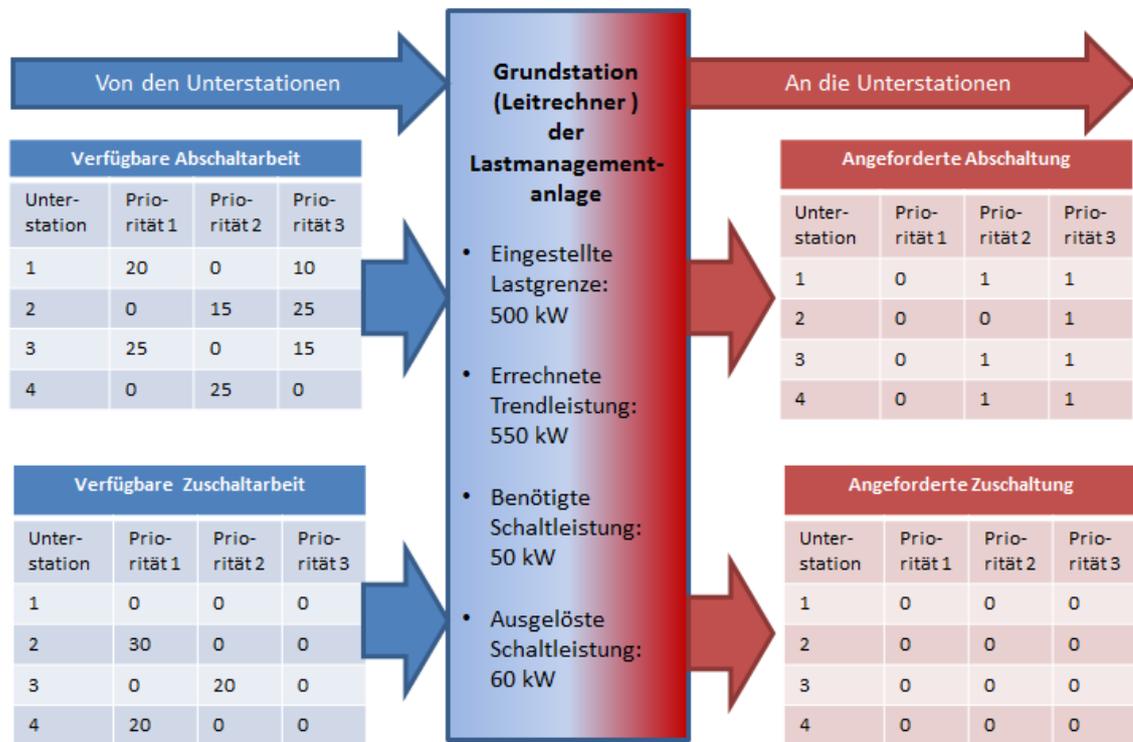


Bild 3-13: Bildung der Schaltmatrizen in der Grundstation (verändert und erweitert nach [Schäfers et al. 2011, S. 64])

Ein Zuschalten von Anlagen erfolgt immer, wenn $P_{trend} + P_{zuschalt} \leq P_{max}$ und die Anlagen zum Zuschalten verfügbar sind, ihre minimale Abschaltzeit also abgelaufen ist. Dabei wird mit Anlagen hoher Priorität begonnen.

Im Folgenden wird nun zunächst dargestellt, wie das LMA-Modell sich im Vergleich zu einer realen LMA verhält, indem Felddaten und Simulationsergebnisse für gleiche Anlageneinstellungen verglichen werden (Kap. 3.4). Der daran anschließende Abschnitt erläutert den Aufbau der Regelung des LMA-Anlagenverbunds (Kap. 3.5).

3.4 Validierung des Modells

Die Validierung des LMA-Modells erfolgte anhand realer Messwerte über das Betriebsverhaltens der LMA am Standort Bergedorf der HAW. Da ein Verbund aus LMA mit einem übergeordneten Regelansatz bisher nicht existiert, kann nur eine Validierung des Modells hinsichtlich der Reproduzierbarkeit des Verhaltens der einzelnen LMA erfolgen. Dies wird im Folgenden dargestellt.

Basis für die Validierung sind Log-Dateien über die Schalthandlungen der LMA-Anlage und Messdaten über die Lastgänge, die im Rahmen einer Projektevaluierung nach der dortigen Inbetriebnahme der LMA aufgenommen wurden [Schäfers 2005]. Grundlage der Evaluation der Performance der LMA am Standort Bergedorf sind die Angaben in den Log-Dateien über Lastverlauf, Trendleistungen und Schalthandlungen der realen LMA. Diese Daten konnten im Rahmen der Validierung mit dem Verhalten des in „Insel“ erstellten LMA-Modells sowohl qualitativ als auch quantitativ verglichen werden.

3 Untersuchung der DSI-Potenziale der Mittelspannungsliegenschaften der Freien und Hansestadt Hamburg: Das Forschungsprojekt „Insel“

Die geloggten Anlagendaten vermitteln ein konkretes Bild, wie die LMA bei Lastabwurf funktioniert. Die folgende Grafik 3-14 gibt dies wieder.

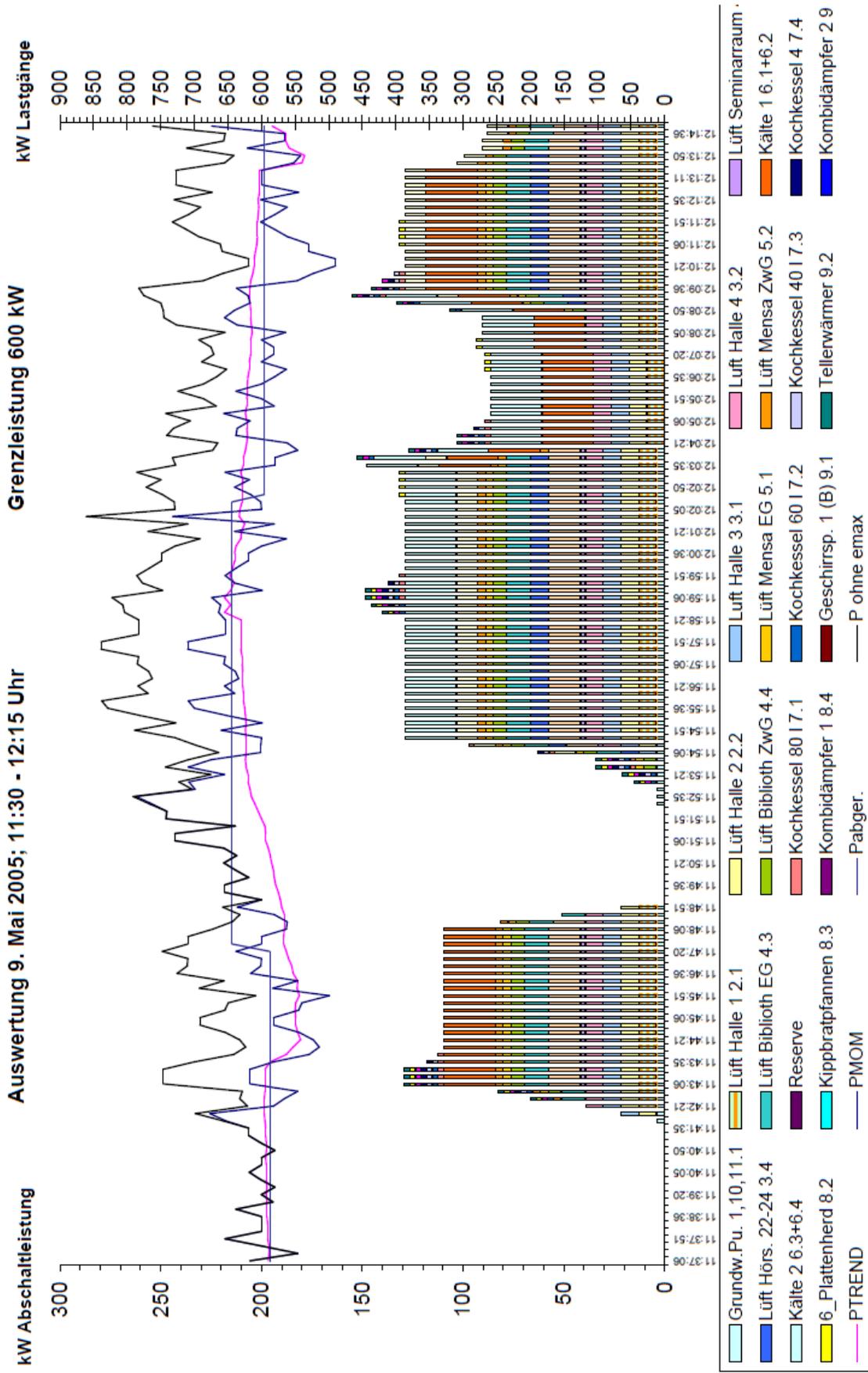


Bild 3-14: Geloggttes Verhalten der realen LMA am Campus Bergedorf der HAW während drei Viertelstunden am 9. Mai 2005 zwischen 11:37 Uhr und 12:15 Uhr [Schäfers 2005]

Die blaue gezackte Linie zeigt die real gemessenen Leistungsdaten in einem Messintervall von 15 Sekunden (mit Bezug zur rechten Ordinate). Die blaue gerade Linie zeigt die sich im Durchschnitt ergebende Leistung für eine Viertelstunde (ebenfalls mit Bezug zur rechten Ordinate). Dieser durchschnittliche Leistungswert ist abrechnungsrelevant und sollte in diesem Fall möglichst die eingestellte Lastgrenze von 600 kW nicht überschreiten. Zur Überprüfung, ob die Leistungsaufnahme des Gebäudes ggf. zu hoch ist und durch Abschaltung von gebäudetechnischen Anlagen reduziert werden muss, wird die in Abschnitt 3.3.1 beschriebene Trendrechnung eingesetzt. Diese erfolgt ebenfalls in einem Intervall von 15 Sekunden und ist hier in Pink dargestellt. Die farbigen Abschnitte der gestapelten Säulen im Diagramm stellen jeweils die Leistungen einzelner gebäudetechnischer Anlagen dar, die von der LMA gerade abgeschaltet wurden. Die gesamte Höhe einer Säule entspricht dann der gesamten abgeschalteten Leistung (mit Bezug zur linken Ordinate). Die schwarze Linie stellt den intendierten Leistungsbezug dar, also die Leistung, die das Gebäude rechnerisch bezogen hätte, wenn die LMA keine Abschaltungen vorgenommen hätte. Dies geschieht nach dem einfachen Ansatz:

$$P_{t, \text{inten}} = P_{t, \text{mess}} + \sum_{i=1}^n P_{i, t, \text{ab}} \quad \text{Formel 3-11}$$

mit	$P_{t, \text{inten}}$	=	im Messintervall t
intendierte			Leistungsaufnahme
			in Watt (W),
	$P_{t, \text{mess}}$	=	im Messintervall t
gemessene	Leistung	in	Watt (W),
	$P_{t, i, \text{ab}}$	=	im Messintervall t
abgeschaltete Leistung der			
einzelnen gebäudetechnischen Anlage i			in Watt (W).

Die abgerechnete Viertelstundenleistung \bar{P}_{mess} ergibt sich dann bei 60 Messintervallen pro Viertelstunde als

$$\bar{P}_{\text{mess}} = \frac{\sum_{t=1}^{60} P_{t, \text{mess}}}{60} \quad \text{Formel 3-12}$$

Bild 3-14 zeigt nun folgendes Verhalten der LMA: Um 11:42:50 Uhr errechnet die Trendrechnung einen Lastwert, der über dem erlaubten Limit von 600 kW liegt, und schaltet sukzessive in der Reihenfolge der Prioritäten Anlagen ab, bis die Trendrechnung wieder unter 600 kW liegt. Da für die Anlagen minimale Abschaltzeiten parametrisiert sind, um zu hohes Takten zu vermeiden, bleiben einige Lüftungsanlagen zu diesem Zeitpunkt weiter abgeschaltet, obwohl die resultierende Lastreduktion laut Trendrechnung nicht mehr notwendig wäre. Im Resultat wird die abgerechnete Viertelstundenleistung (knapp) unter 600 kW gehalten. In der folgenden Viertelstunde liegt die Trendleistung zunächst deutlich unter dem erlaubten Limit. Ab 11:52:21 Uhr nimmt der Leistungsbezug aber stark zu, sodass die Trendleistung wieder Werte größer 600 kW errechnet und die LMA erneut Abschaltungen auslöst. Insgesamt ist der Lastanstieg in dieser Viertelstunde aber so groß, dass er mit den zur Verfügung stehenden Potenzialen nicht ausreichend reduziert werden kann. Die durchschnittliche Leistung dieser Viertelstunde liegt im Resultat leicht über dem Grenzwert. Dies liegt z. T. auch daran, dass die große Kälteanlage (orangefarbene Teilsäule) in der Viertelstunde vorher bereits abgeschaltet war und nun in einer Sperrzeit (minimale Laufzeit nach Abschaltung) steckt. Sie steht erst wieder in der folgenden

Viertelstunde zur Verfügung und wird auch sofort wieder abgeschaltet, da nun mehrere Lüftungsanlagen, die zuvor abgeschaltet waren, in ihrer minimalen Laufzeit und somit für eine Abschaltung gesperrt sind. In dieser Viertelstunde (ab 12:02:20 Uhr) kann die Leistungsbegrenzung auf 600 kW wieder eingehalten werden.

Im Rahmen der Validierung wurde dieses geloggte Verhalten der realen Lastmanagementanlage mit dem Verhalten des Teilmodells für den Standort Bergedorf der HAW verglichen [Schmeding 2010].

Das folgende Bild zeigt exemplarisch den Vergleich zwischen „Original“ und Simulation für den 22.06.2005.

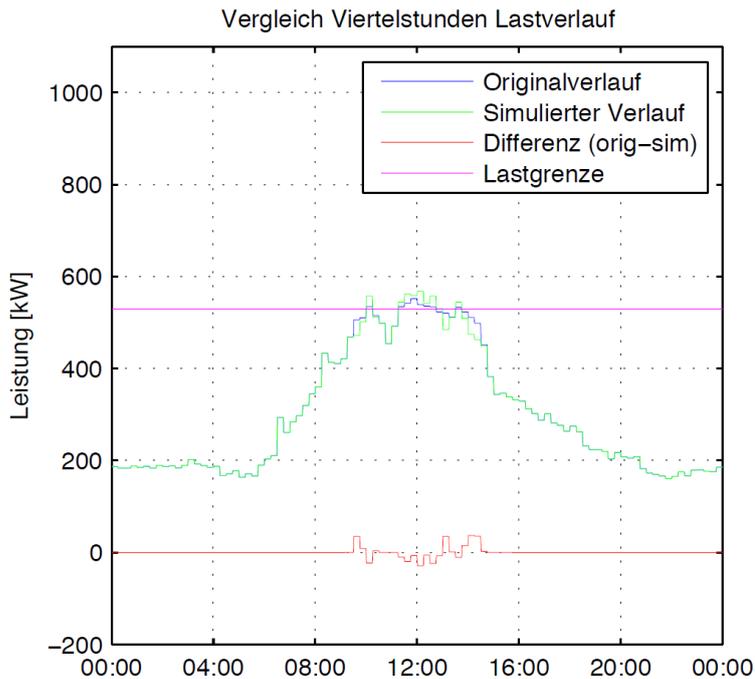


Bild 3-15: Vergleich Viertelstundenlastverläufe am 22.06 2005

Bild 3-15 stellt vergleichend den simulierten Viertelstundenlastgang (grün) mit dem durch die reale Lastmanagementanlage erreichten Lastverlauf (blau) für den 22.06.2005 dar. Es wird deutlich, dass im realen Fall die damals eingestellte Lastgrenze von 550 kW (pinkfarbene Linie) an diesem Tag an drei Viertelstunden hintereinander von 11:45 bis 12:15 Uhr nicht mehr eingehalten wurde. Dies gilt auch für den simulierten Lastgang, bei dem die entstandenen Abweichungen noch etwas größer ausfallen. Hinzu kommt eine Viertelstunde um 10:30 Uhr, in der in der Simulation die Lastgrenze ebenfalls nicht eingehalten werden konnte.

Hier zeigt sich bereits der wesentliche Unterschied zwischen Simulation und Realität. Während in der realen Simulation die Trendrechnung alle 15 Sekunden erneuert und der Systemzustand in einem entsprechend kurzen Zeitraster immer wieder neu bewertet wird, geschieht dies in der Simulation nur im Simulationszeitraster von einer Minute. Das entspricht in einer Viertelstunde 15 statt 60 Abtastzyklen. Dadurch wird die Reaktionszeit der Simulation langsamer. In der Folge werden die ausgelösten Schalthandlungen in der Höhe der geschalteten Last größer. Das System schwingt stärker als in der Realität.

Die orangefarbene Linie in Bild 3-15 zeigt aber, dass es keine systematischen Abweichungen in eine Leistungsrichtung gibt: Die Linie zeigt die direkten Differenzen zwischen den realen und den in der Simulation entstandenen Viertelstundenmittelwerten der Leistung. Sie sind durchgängig gering (10 bis

3 Untersuchung der DSI-Potenziale der Mittelspannungsliegenschaften der Freien und Hansestadt Hamburg: Das Forschungsprojekt „Insel“

20 kW bei 550 kW Lastaufnahme, also im Bereich von 2–4 % der Leistung) und pendeln relativ gleichmäßig um die Nulllinie (= keine systematische Verschiebung in positive oder negative Richtung).

Vergleicht man die Ergebnisse für die Berechnung der Trendleistungen zwischen realem System und Simulation, so zeigt sich deutlich der Ursprung für das oben dargestellte Verhalten.

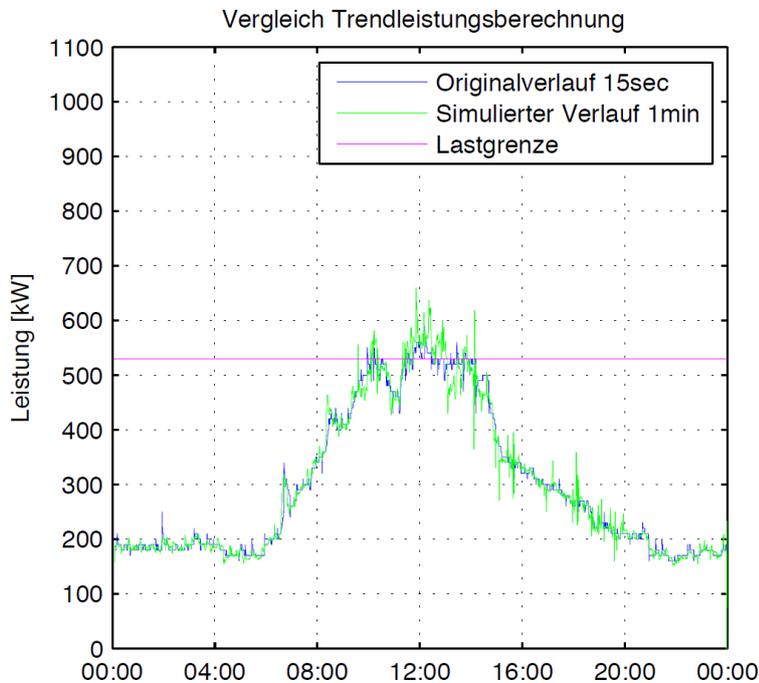


Bild 3-16: Vergleich der realen und simulierten Trendleistungsberechnung

Die reale LMA führt alle 15 Sekunden eine Trendberechnung durch, was zu einer deutlichen Glättung und Präzisierung der Trendberechnung führt. Da aber auf jeden neuen Trendrechnungswert im Regler mit einer Anpassung der Stellgröße reagiert wird, ist die reale LMA mit ihren Regeleingriffen schneller als die nur jede Minute erfolgenden Eingriffe des Reglers in der Simulation. Es werden schneller höhere Lasten abgeschaltet als in der Simulation. Die Abschaltungen werden aber auch schneller wieder zurückgenommen. Bild 3-17 zeigt dieses Verhalten. Dort werden die in den jeweiligen Viertelstunden abgeschalteten Gesamtlasten direkt miteinander verglichen.

Grundsätzlich zeigt die simulierte Lastmanagementanlage aber ein der realen Lastmanagementanlage sehr ähnliches Verhalten. Die gefundenen Abweichungen basieren konkret auf der feineren Auflösung der Messwerte der realen LMA bei der Erstellung der Trendrechnung. Eine vergleichbare Auflösung wäre aber datentechnisch im Modell nicht umsetzbar gewesen (zu hohe Rechenzeiten und nicht vorhandene Daten für so hoch aufgelöste Lastverläufe).

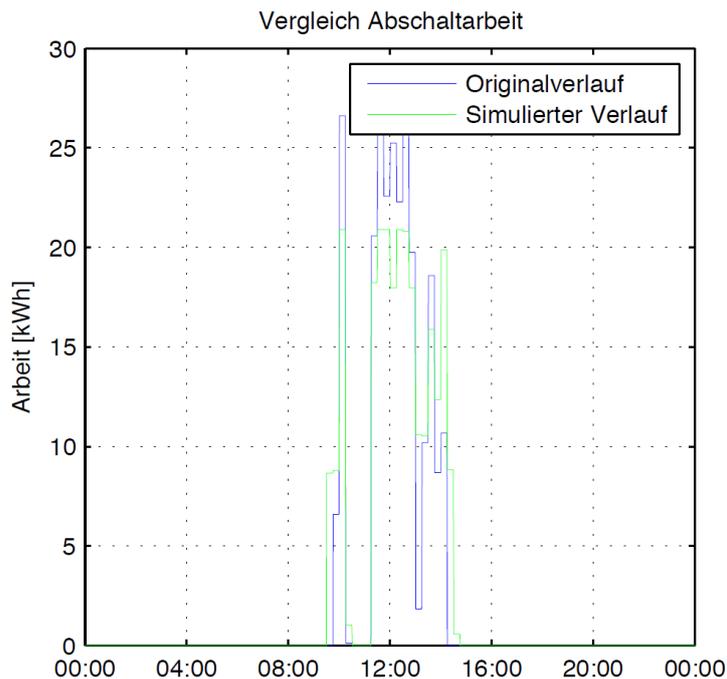


Bild 3-17: Vergleich der abgeschalteten Arbeit (kWh) der realen Lastmanagementanlage

3.5 Simulation des Liegenschaftsverbunds

Dieser Abschnitt widmet sich der Simulation des Verbunds von Lastmanagementanlagen in den 21 Liegenschaften, die zwei Ziele verfolgt:

1. Einhaltung eines vorgegebenen Summenfahrplans für alle Liegenschaften zur Minimierung des Ausgleichsenergieerisikos und
2. Bereitstellung von Regelenergie im Verbund als Systemdienstleistung für das Übertragungsnetz.

Die Möglichkeit, einen für alle Mittelspannungsliegenschaften gültigen Summenfahrplan einzuhalten, bedingt das Vorhandensein einer Prognose über den Leistungsbedarf für den nächsten Tag, die als Fahrplan verwendet werden kann. Das Vorgehen bei der Erstellung dieses Fahrplans wird kurz im folgenden Abschnitt 3.5.1 erläutert. Daran anschließend wird auf die Funktionsweise der übergeordneten Regelung eingegangen (3.5.2). Der Abschnitt schließt mit einer Vorstellung der in den Simulationen gewonnenen Ergebnisse (3.5.3).

3.5.1 Prognose des Lastgangs und Fahrplanerstellung

Vor dem ersten Simulationsschritt werden aus den historischen Lastgangdaten der einzelnen Liegenschaften zunächst Lastgangprognosen für den zu simulierenden Tag erstellt. Das entsprechende Vorgehen wird in diesem Kapitel erläutert. Alle Einzelprognosen werden zu einer Summenlastgangprognose zusammengefasst, die den Fahrplan für den nächsten Tag bildet. In der Realität wäre dies der Lastgang, der durch einen Bilanzkreisverantwortlichen (BKV) am Tag zuvor für die Liegenschaften abgegeben wird (vgl. StromNZV § 5 (1)).

Die Lastgangprognose war zentraler Gegenstand einer Masterarbeit mit dem Titel „Java-basierte Lastprognose für eine geringe Anzahl von Liegenschaften“ [Naimi 2008], die im Rahmen des Forschungsprojekts „Insel“ erstellt wurde. Der im Rahmen dieser Masterarbeit und in der Folge für das FP „Insel“ gewählte Ansatz der Lastprognose mithilfe eines Multi Layer Perception Networks (MLP) basiert auf dem Ansatz (und einer Erweiterung) von Murto [1998, S. 40 ff.]. Dabei wird der Bestand historischer Lastgangdaten genutzt, um mithilfe einer Klassifizierung normalisierte Lastgangdaten für den Lastgang eines zu prognostizierenden Tages zu erzeugen.

Grundlage in „Insel“ waren dafür historische Lastgangdaten der öffentlichen Liegenschaften. Diese lagen für das Projekt ab 2004 als Viertelstundenlastgänge vor. Für die 21 Liegenschaften, für die eine LMA simuliert wurde, sind die Lastgangdaten individuell und für die restlichen Liegenschaften als Summenwert in einer Datenbank abgelegt.

Die Prognose eines Lastgangs für einen Tag erfolgt in erster Linie aus einem Set von historischen Daten, die die gleichen Klassenmerkmale wie der Zieltag haben. Für die Lastgangprognose wurden die einzelnen Tageslastgänge der historischen Daten in folgende Klassen eingeteilt:

1. Jahreszeit: Unterschieden werden die vier kalendarischen Jahreszeiten. Dies geschieht in Anlehnung an die Unterscheidung der Standardlastprofile des BdEW, bei denen nach Sommer, Winter und „Übergangszeit“ (Herbst und Frühjahr) differenziert wird.
2. Wochentag/Wochenende: Da die Lastgänge insbesondere an Montagen und Freitagen sich deutlich von den übrigen Wochentagen unterscheiden, wurden für alle Wochentage eigene Klassen angelegt (inkl. Samstag und Sonntag).
3. Ferientag: Da an Ferientagen deutlich niedrigere Lasten anliegen, ist es notwendig, zu unterscheiden, ob eine Liegenschaft z. Zt. in „Ferien“ ist. Dabei muss differenziert werden, dass manche Ferientage für alle Liegenschaften gelten (gesetzliche Feiertage), während manche Ferien für bestimmte Liegenschaften gelten und für andere nicht (z. B. die Semesterferien der Hochschulen).

Prognosen erfolgen also unter Selektion historischer Daten aus den genannten Klassen und anschließender Normalisierung. So würde die Prognose des Lastgangs für den Universitätscampus für einen Montag im Juli während der Semesterferien nur aus den historischen Daten erfolgen, die den Klassen „Sommer“, „Montage“ und „Semesterferien“ zugeordnet sind.

Klassifizierungen wie diese sind die Grundlage für den anschließenden Schritt der Normalisierung. Diese erfolgt für jeden Viertelstundenlastwert nach folgendem Ansatz (vgl. Murto 1998, S. 41 und Naimi 2008, S. 47 und 86 f.):

$$L_{nor}(i, j) = \frac{L(i, j) - L_{min}i}{L_{max}i - L_{min}i}$$

Formel 3-13

mit

$L_{nor}(i, j)$ = normalisierte Last zum Zeitpunkt j an Tag i (dimensionslos),

$L(i, j)$ = tatsächliche Last zum Zeitpunkt j an Tag i (in W),

$L_{min}i$ = minimale Last am Tag i (in W),

$L_{max}i$ = maximale Last am Tag i (in W).

Setzt man $L(i, j)$ einer Lastprognose gleich, lässt sich durch Umstellen von Formel 3-13 formulieren (vgl. Murto 1998, S. 41 und Naimi 2008, S. 47 und 86 f.):

$$L_{prog}(i, j) = L_{nor,hist}(i, j) * (L_{max,hist}^i - L_{min,hist}^i) + L_{min,hist}^i \quad \text{Formel 3-14}$$

mit

$L_{prog}(i, j)$ = prognostizierte Last zum Zeitpunkt j am Tag i (in W),

$L_{nor,hist}(i, j)$ = auf Basis der historischen Daten erwartete, normalisierte Last zum Zeitpunkt j am Tag i (dimensionslos),

$L_{min,hist}^i$ = minimale erwartete Last auf Basis der historischen Daten am Tag i (in W),

$L_{max,hist}^i$ = maximale erwartete Last auf Basis der historischen Daten am Tag i (in W).

Im Gegensatz zu Murto, der stündliche Lastprofile generiert, wurden im Rahmen des FP „Insel“ Viertelstundenlastprofile erzeugt. Die Prognosegüte wurde auf Basis des durchschnittlichen prozentualen Prognosefehlers E_{ave} bewertet (vgl. Murto 1998, S. 42):

$$E_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|L_{prog,i} - L_i|}{L_i} * 100 \% \quad \text{Formel 3-15}$$

mit

N = Anzahl der Vorhersagen in einem Vorhersageintervall (z. B. Viertelstunden eines Tages),

$L_{prog,i}$ = i-ter Vorhersagewert,

L_i = i-ter tatsächlicher Lastwert.

Die folgende Grafik zeigt ein Histogramm der Verteilung der prozentualen Prognosefehler.

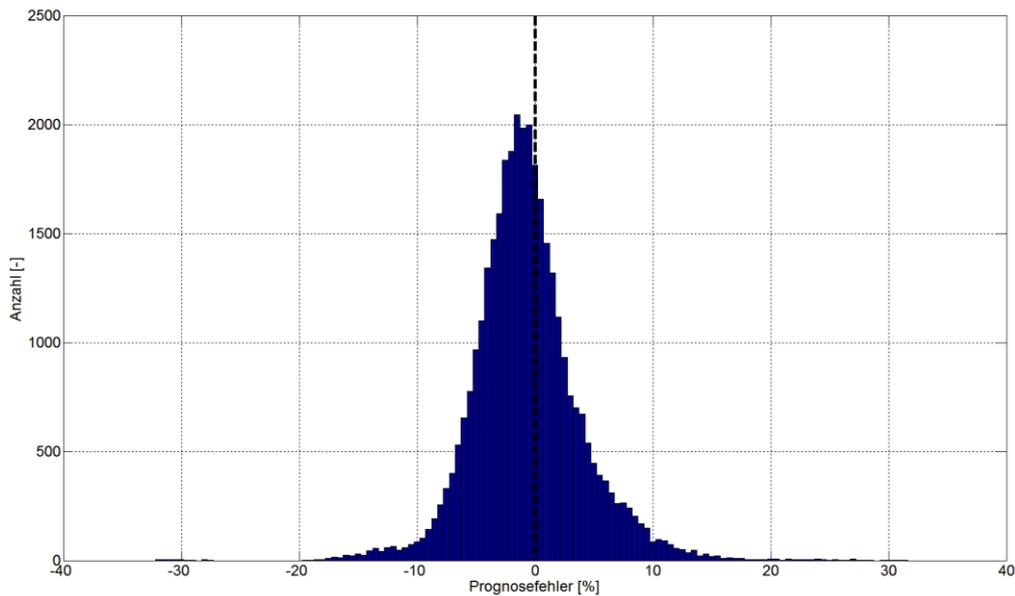


Bild 3-18: Histogramm zur Verteilung der prozentualen Prognosefehler

Der Ansatz liefert folgende Ergebnisse für die Prognosegüte:

- Die Abweichung vom Prognosewert ist normal verteilt, hat jedoch eine leichte Linksverschiebung: Der Mittelwert liegt bei ca. -3 %, d. h., die Prognose ist systematisch im Mittel um etwa 3 % zu niedrig.
- Die Standardabweichung liegt bei etwa 4,5 %.
- Betrachtet man die Prognosen einzelner Wochentage, so ergeben sich systematische Verschiebungen. Dazu sei hier auf das Kapitel 3.5.3.2 verwiesen. Dort finden sich Histogramme zu den Abweichungen vor (= nur Prognosefehler) und nach dem Einsatz der Regelung.

Prinzipiell tauchen (vereinzelt) folgende systematische Verschiebungen bei der Prognose auf (vgl. Schäfers et al. 2011, S. 122 f.):

1. Systematisch zu hohe Prognose: Der Lastverlauf ist systematisch für den ganzen Tag zu hoch prognostiziert (vgl. Bild 3-20).
2. Systematisch zu niedrige Prognose: Der Lastverlauf ist systematisch zu niedrig für den Tag prognostiziert (vgl. Bild 3-20).
3. Systematisch nach links verschobene Prognose: Der Lastanstieg in den Morgenstunden und/oder der Lastrückgang in den Abendstunden sind für einen zu frühen Zeitpunkt prognostiziert/finden später statt (vgl. Bild 3-21).
4. Systematisch nach rechts verschobene Prognose: Der Lastanstieg in den Morgenstunden und/oder der Lastrückgang in den Abendstunden sind für einen zu späten Zeitpunkt prognostiziert/finden früher statt (vgl. Bild 3-22).¹⁴

¹⁴ Dieser Fall taucht eigentlich nicht für ganze Tage auf, jedoch gehäuft Freitagnachmittags. Hier würde ein selbstlernendes Prognosesystem deutliche Vorteile bringen.

Alle vier Fälle treten auf, auch in Mischfällen. Sie sind dann problematisch für die Regelung, wenn die zur Verfügung stehende Regelleistung aus den LMA für den Ausgleich nicht ausreicht. Die Regelung kann dann den Fahrplan nicht mehr einhalten.

Diese systematischen Verschiebungen würden in der Realität aber immer dazu führen, dass der Bilanzkreisverantwortliche den angemeldeten Fahrplan entsprechend der Intraday analysierten systematischen Abweichung anpasst [StromNZV §5(2)]. Daher wurden im Projekt weder die Prognose noch die Regelung auf solche Fälle adaptiert. Sie wurden vielmehr im Sinne einer „fault-ride-through“-Philosophie hingenommen.

Die folgenden Grafiken geben einen Eindruck von diesen Fällen.

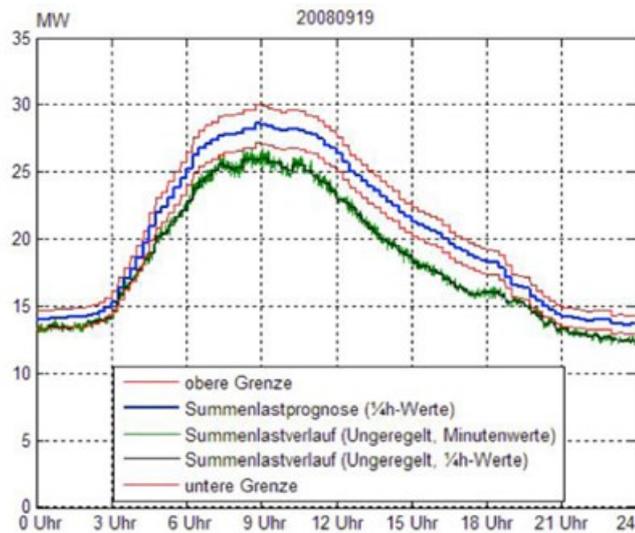


Bild 3-19: Beispiel für systematisch zu hohe Prognose [Schäfers et al. 2011, S. 128]

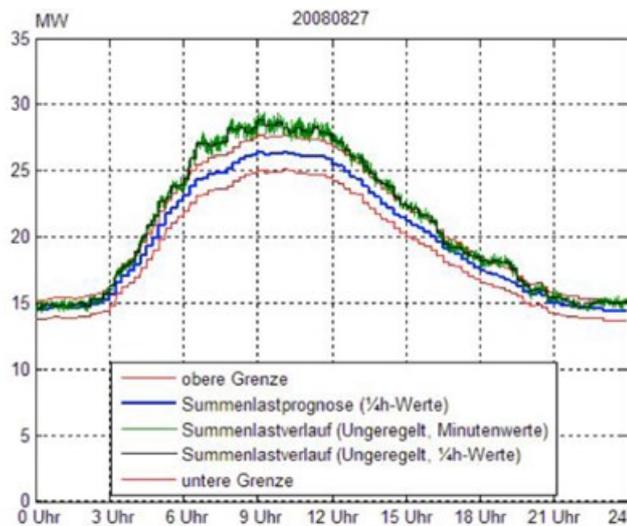


Bild 3-20: Beispiel für systematisch zu niedrige Prognose [Schäfers et al. 2011, S. 131]

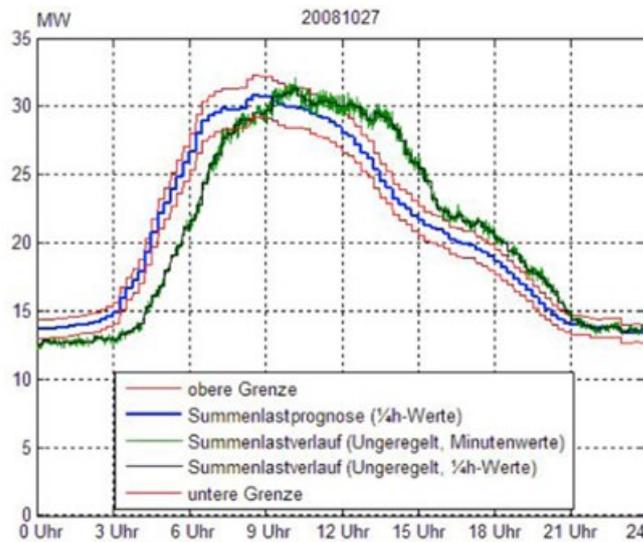


Bild 3-21: Beispiel für systematisch nach links verschobene Prognose [Schäfers et al. 2011, S. 132]

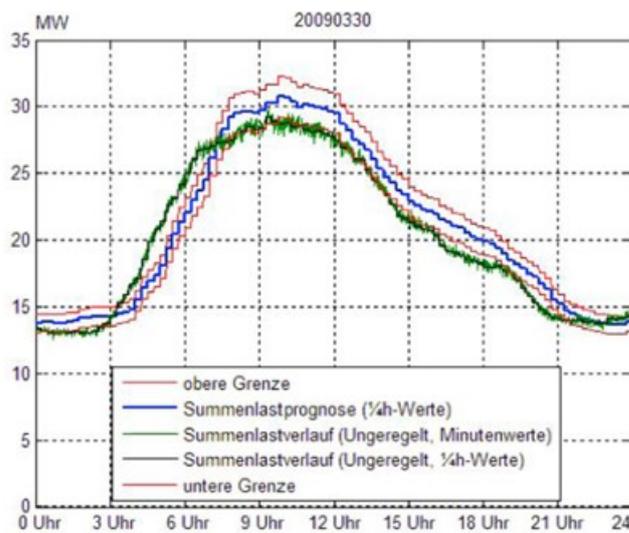


Bild 3-22: Beispiel für systematisch nach rechts verschobene Prognose [Schäfers et al. 2011, S. 142]

Im Fall von Bild 3-22 lässt sich auch argumentieren, dass neben dem Versatz nach rechts eine deutlich zu hohe Prognose für den Peaklast-Zeitraum (8 bis 12 Uhr) vorliegt (Kombination der Fälle 1 und 4).

An dieser Stelle sei aber nochmals angemerkt, dass im Regelfall die Day-Ahead-Prognose relativ geringe Abweichungen zu den dann Intraday anliegenden Lastgängen zeigt. Ein Beispiel für eine solche Prognose ist in der folgenden Grafik dargestellt.

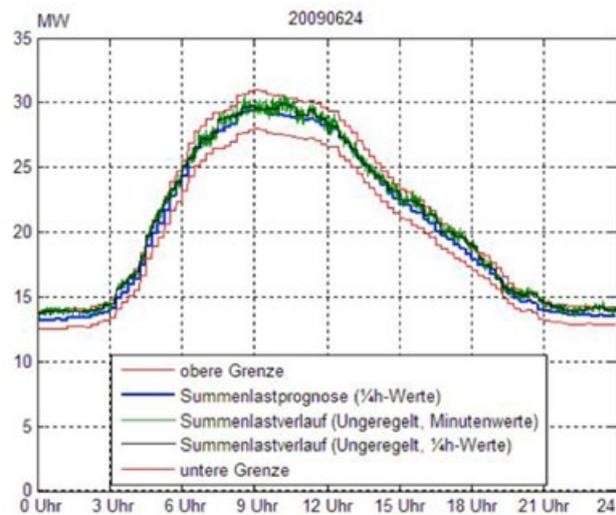


Bild 3-23: Beispiel für eine gute Übereinstimmung zwischen Prognose und tatsächlichem Lastverlauf [Schäfers et al. 2011, S. 148]

Im Abschlussbericht zum FP „Insel“ findet sich ein vollständiges Kalendarium mit allen 365 Tagesprognosen und tatsächlichen Lastverläufen [Schäfers et al. 2011, S. 126 f.].

3.5.2 Regelprinzip des Liegenschaftsverbunds: Kaskadenregelung

Die Regelung des Liegenschaftsverbunds verfolgt zwei Ziele:

- die Einhaltung des Summenlastverlaufsplans für den Verbund aus allen Liegenschaften (also inkl. der Liegenschaften, deren Lastbezug nicht regelbar ist) und
- die Auslösung und Kontrolle von Regelenergielieferungen.

Eine Regelenergielieferung wird im Modell dadurch simuliert, dass der Lastverlaufsplan für die Dauer der Regelenergielieferung um den Betrag der Regelleistung angehoben oder abgesenkt wird (vgl. Kap. 3.5.3.4). Es ergibt sich also infolge eines Regelenergieaufrufs ein (um Richtung und Betrag der Regelenergie) veränderter Lastverlaufsplan. Damit beschränkt sich die Aufgabe des übergeordneten Reglers auf die Einhaltung eines „originalen“ (= day ahead prognostizierten) oder für einen Zeitabschnitt modifizierten Lastverlaufsplans. Der prinzipielle Regleraufbau und die Verfahrensweise der Regelung bei der Simulation werden in diesem Abschnitt beschrieben.

Der zentrale Regler ist als Hauptregler der Regelung der LMA in den Liegenschaften übergeordnet. Gleichwohl hat er keine Möglichkeit, die Lastaufnahme der Liegenschaften direkt zu beeinflussen. Er nimmt lediglich Einfluss auf die eingestellte Leistungsgrenze (erlaubte Höchstlast) (vgl. Kap. 3.2.2). Insofern stellt der Regelkreis des Hauptreglers einen äußeren Regelkreis zu den inneren Regelkreisen in den Liegenschaften dar. Solch ein Regelsystem wird als Kaskadenregelung bezeichnet (vgl. Merz 2003, S. 62 f.). Die folgende Grafik zeigt das Schaltbildprinzip eines Kaskadenreglers.

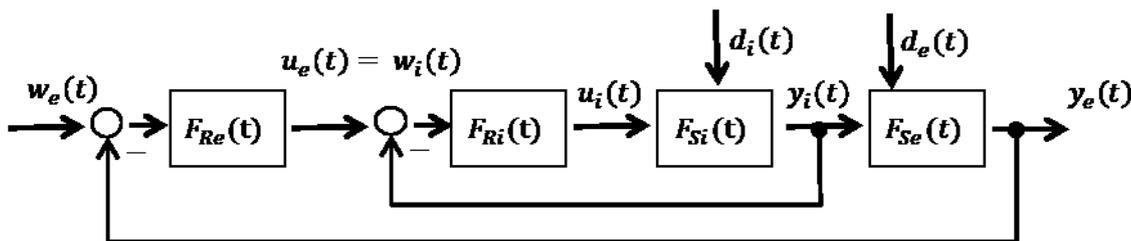


Bild 3-24: Blockschaltbild Prinzip Kaskadenregler (verändert nach Dittmar & Pfeiffer 2004, S. 8)

Darin sind

$w_e(t)$ und $w_i(t)$: externe und interne Führungsgrößen (Sollwerte)

$F_{Re}(t)$ und $F_{Ri}(t)$: externe und interne Regelungsfunktionen

$u_e(t)$ und $u_i(t)$: externe und interne Stellgrößen

$F_{Se}(t)$ und $F_{Si}(t)$: externe und interne Streckenfunktionen

$d_e(t)$ und $d_i(t)$: externe und interne Störgrößen

$y_e(t)$ und $y_i(t)$: externe und interne Regelgrößen

Kaskadenregler haben den Vorteil, dass Störungen im inneren Regelkreis schneller ausgeglichen werden können als im Hauptregelkreis (vgl. Dittmar & Pfeiffer 2004, S. 8). Dieser regelungstheoretische Vorteil ergibt sich in der realen LMA durch die Abtaststrategie des Trendreglers. Diese liegt bei den

betrachteten Systemen bei 15 Sekunden. Eine solche Reaktionsgeschwindigkeit wäre im übergeordneten Regler in der Realität nicht bzw. nur mit extremem Aufwand an IKT möglich. Da im Modell die Abtastrate der LMA der Schrittweite der diskreten Simulation angepasst ist (1 min), ist dieser Vorteil im Modell nicht zu beobachten.

Die Übertragung des grundlegenden Prinzips der Kaskadenregelung auf das Modell war zentraler Gegenstand der Diplomarbeit von [Vuthi, Vuthi 2010]. Dort sind Details des Regleraufbaus und die detaillierte Umsetzung im Modell, insbesondere für die Liegenschaften „Elbtunnel“ und „Großmarkt“, nachzulesen. Im Folgenden werden nur der grundsätzliche Aufbau der übergeordneten Regelung und der Ablauf der Regelung bei der Simulation beschrieben.

Grundsätzlich ergibt sich durch die Übertragung des Ansatzes von kaskadierenden Reglern auf das Modellproblem eines Liegenschaftsverbunds aus LMA das folgende Blockschaltbild.

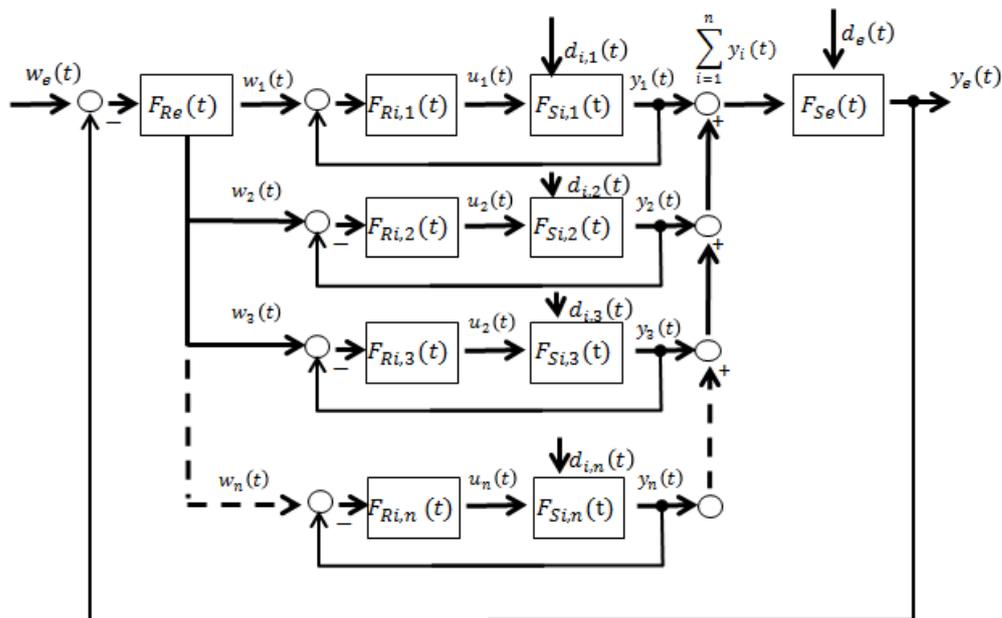


Bild 3-25: Blockschaltbild Prinzip Kaskadenregelung im FP „Insel“ – verändert und ergänzt nach [Vuthi 2010, S. 31]

Jeder innere Regelkreis stellt dabei eine der Liegenschaften (1 bis n) mit ihrer zugehörigen LMA dar (= innere Reglerfunktion $F_{Ri,n}(t)$, vgl. Kapitel 3.2.2). Die innere Regelstrecke $F_{Si,n}(t)$ ist die aktuelle Leistungsaufnahme der Liegenschaft, die Regelgröße $y_n(t)$ ist der Leistungstrend der Viertelstunde, der in der Trendrechnung ermittelt wird und kleiner als der eingestellte Sollwert (erlaubte max. Höchstlast, $w_n(t)$) sein muss.

Im externen Regelkreis gilt der aktuelle Viertelstundenwert des Summenlastverlaufsplans als Führungsgröße $w_e(t)$. Er wird verglichen mit der für die Summe aller Liegenschaften (auch der ohne LMA) im übergeordneten Regler ermittelten Trendlast ($y_e(t)$). Weicht die im zentralen Regler ermittelte Gesamttrendleistung vom Fahrplanwert unerlaubt ab, werden als externe Stellgröße vom zentralen Regler neue Lastobergrenzen an die LMA gesandt ($w_n(t)$), die dort wieder als interne Sollgrößen der inneren Regelung fungieren. Der Regelkreis schließt sich damit.

Ersetzt man die abstrakten Ausdrücke für Regelungsfunktionen und Regelstrecken im obigen Blockschaltbild durch die Bezeichnungen der Modellteile, ergibt sich folgendes etwas anschaulicheres Blockschaltbild:

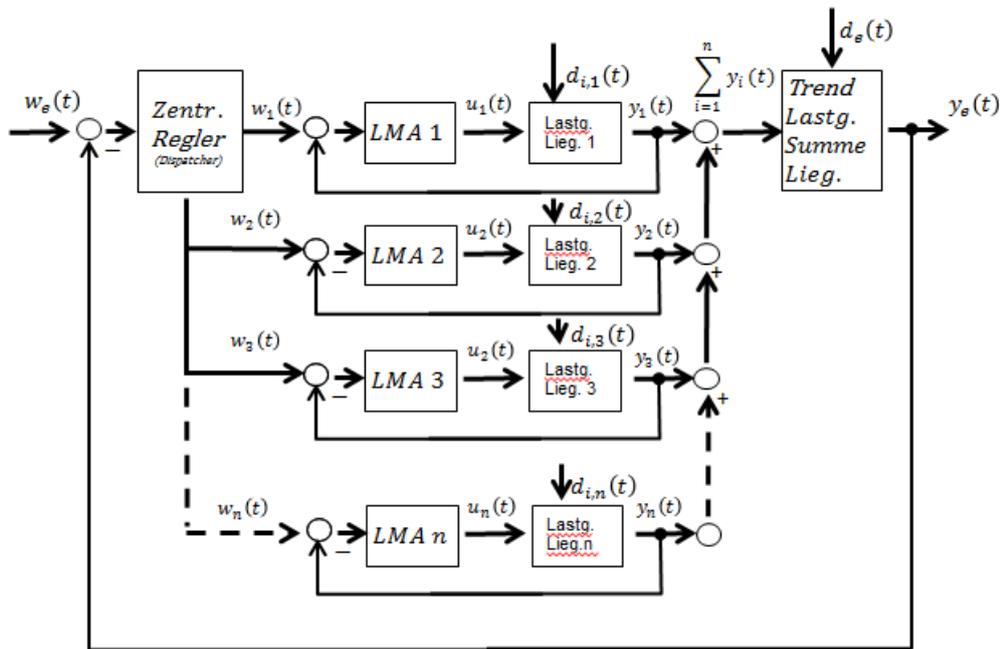


Bild 3-26: Blockschaltbild Kaskadenregelung im FP „Insel“ mit Modellelementen als Regler- und Streckenfunktionen – ergänzt und verändert nach [Vuthi 2010, S. 63]

Das Vorgehen des übergeordneten Reglers bei der Einstellung neuer Lastgrenzen wird im anschließenden Abschnitt erläutert.

Hier sei noch angemerkt, dass ein wesentlicher Aspekt einer stabilen Kaskadenregelung der ist, dass der äußere Regler deutlich langsamer reagiert als der innere. Dies ist notwendig, um dem inneren Regelkreis Zeit für die Umsetzung der durch den äußeren Regelkreis angestoßenen Regelung zu geben und insbesondere regelungsbedingte Abweichungen (Überschwinger) zu tolerieren. Als Daumenwert gilt das Verhältnis 1:4 (vgl. Dittmar & Pfeiffer 2004, S. 8). Da die Zielgröße in der Simulation der Viertelstundenleistungsmittelwert ist und die Simulationsschrittweite eine Minute beträgt, wären bei einem Verhältnis von 1:4 lediglich drei Regeleingriffe des übergeordneten Reglers in einer Viertelstunde möglich, nämlich je zur vierten, achten und zwölften Minute einer Viertelstunde. Da dies als unzureichend empfunden wurde, wurde das Verhältnis auf 1:3 festgelegt. Dies ermöglicht dem übergeordneten Regler in einer Viertelstunde zumindest vier Eingriffe: zur dritten, sechsten, neunten und zwölften Minute einer Viertelstunde.

3.5.3 Simulation der vernetzten Regelung von LMA im Verbund

3.5.3.1 Regelung durch Einstellung neuer Lastgrenzen in den Liegenschaften

Bei der Verwendung von LMA ist dem übergeordneten Regler systembedingt der direkte Zugriff auf die GTA in den einzelnen Liegenschaften nicht möglich. Eine Anpassung des Summenlastgangs kann nur durch Anpassungen der den einzelnen LMA erlaubten Lastgrenzen geschehen. Eine Erhöhung der Lastgrenze führt dann dazu, dass ggf. ausgeschaltete GTA (nach Ablauf ihrer Mindestausschaltzeit) wieder in Betrieb genommen werden. Eine Absenkung der Lastgrenze führt zu (weiteren) Abschaltungen.

Um die Lastgrenzen in den Liegenschaften sinnvoll anpassen zu können, erhält der übergeordnete Regler von den LMA zyklisch (im Modell jede Minute) eine Mitteilung über

- die aktuelle Last der Liegenschaft,

- die derzeit gültige Lastgrenze für die Liegenschaft und
- die verfügbare Abschalt- und Zuschaltarbeit für die aktuelle Viertelstunde.

Der übergeordnete Regler errechnet mithilfe der Lastgangdaten der Liegenschaften den Summenleistungstrend für den Liegenschaftsverbund und vergleicht diesen mit dem Fahrplanwert. Bei einer Abweichung, die außerhalb eines einstellbaren Toleranzbands liegt, errechnet der Regler neue Lastgrenzen für die Liegenschaften mit LMA. Dabei wird wie folgt vorgegangen:

Der Regler errechnet die Regelabweichung $e_e(t) = w_e(t) - y_e(t)$. Die Höhe der Abweichung wird ins Verhältnis gesetzt zur gesamten durch die Liegenschaften angebotenen Zu- bzw. Abschaltleistung. Dieses Verhältnis stellt einen proportionalen Verstärkungsfaktor dar. Dieser wird für jede Liegenschaft mit der individuell durch die Liegenschaft angebotenen Leistung multipliziert. Das Ergebnis wird zur aktuellen Leistungsgrenze addiert (bei Zuschaltung) bzw. von ihr subtrahiert (bei Abschaltung). Der erhaltene Wert ist die neue Lastgrenze und wird der Liegenschaft übermittelt, die diese dann selbständig einregelt (im inneren Regelkreis).

Die folgenden Gleichungen mögen das Vorgehen verdeutlichen:

1. Bildung der Regeldifferenz im Regler

$$e_e(t) = w_e(t) - y_e(t) \quad (\text{vgl. Bild 3-26}) \quad \text{Formel 3-16}$$

mit $e_e(t)$ = externe Regelabweichung,
 $w_e(t)$ = externe Führungsgröße = Viertelstundenfahrplanwert,
 $y_e(t)$ = externe Regelgröße = Lasttrend des Liegenschaftsverbunds.

2. Bildung des proportionalen Verstärkungsfaktors

$$F_{amp,prop}(t) = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_{i,max}(t)}{e_e(t)} \quad \text{Formel 3-17}$$

mit $F_{amp,prop}(t)$ = proportionaler Verstärkungsfaktor
 (bei negativer Regeldifferenz (Abschaltbedarf) ist dieser auch negativ),
 $\sum_{i=1}^n \Delta P_{i,max}(t)$ = Summe der aus den Liegenschaften angebotenen maximalen Leistungsänderung.

3. Berechnung der neuen Lastgrenze

$$P_{i,max,neu}(t) = P_{i,max,alt}(t) + F_{amp,prop}(t) * \Delta P_{i,max}(t) \quad \text{Formel 3-18}$$

mit $P_{i,max,neu}$ = neue Lastgrenze der Liegenschaft i,
 $P_{i,max,alt}$ = alte Lastgrenze der Liegenschaft i,

$\Delta P_{i,max}(t)$ = von der Liegenschaft angebotene maximale Leistungsänderung.

3.5.3.2 Reglerfolg

Der externe Regler arbeitet als Dreipunktregler. Das heißt, er analysiert drei Zustände:

1. Regelabweichung innerhalb eines Toleranzbereichs: Regler inaktiv.
2. Regelabweichung oberhalb des Toleranzbereichs: Leistung reduzieren.
3. Regelabweichung unterhalb des Toleranzbereichs: Leistung zuschalten.

Die Notwendigkeit zur Definition eines Regelbereichs, in dem der Regler inaktiv ist, ergibt sich aus der hohen zufälligen Lastschwankung, dem sog. „Lastrauschen“ (vgl. 3.5.3.3): Die zufällige Änderung der Leistungsaufnahme der Summe der Liegenschaften liegt im Mittel bei +/-275 kW. Das bedeutet, dass die Einstellung eines fixen Sollwerts zu ständigem Reglereinsatz und damit zum Schwingen des Systems führen würde. Es ist daher notwendig, einen Bandbereich zu definieren, in dem eine Reglerabweichung toleriert wird.¹⁵

Im übergeordneten Regler lassen sich dazu verschiedene Einstellungen wählen. Möglich sind Einstellungen für entweder prozentuale oder absolute Toleranzbänder. Ein prozentuales Toleranzband definiert einen sich im Verhältnis zum jeweiligen Fahrplanwert relativen Toleranzbereich (z. B. „5 % des Fahrplanwertes als Abweichung erlaubt“). Ein absolutes Toleranzband definiert einen fixen, auf den eingestellten Toleranzwert bezogenen Bereich (z. B. „50 kW Abweichung erlaubt“).

Im Folgenden werden die Ergebnisse für Toleranzbänder beginnend bei 5 % kleiner werdend bis 1 % vorgestellt. 5 % entsprechen dem zentralen Simulationsszenario im Projekt „Insel“ und sind angelehnt an die alte (bis 2004 gültige) Regelung der Verbändevereinbarung II+, nach der nur Fahrplanabweichungen mit mehr als 5 % der Monatshöchstlast für Ausgleichsenergiezahlungen herangezogen wurden (vgl. [VDN, S. 12]).¹⁶ Die folgende Grafik zeigt dazu eine Auswertung aller Viertelstunden des simulierten Jahres.

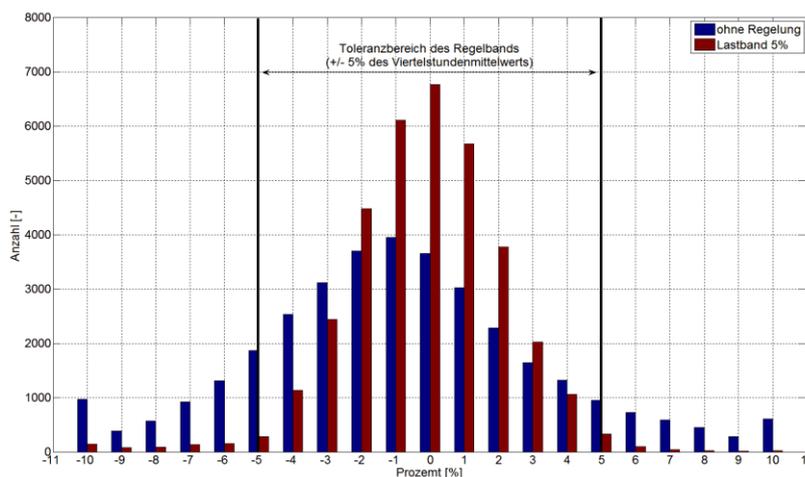


Bild 3-27: Histogramm der Fahrplanabweichungen in 1 %-Schritten
(neue Berechnung auf Basis von [Schäfers et al. 2011])

¹⁵ Eine andere Möglichkeit besteht darin, einen Regler zu verwenden, der die Art der Schwankungen lernt und eine nach Regeln angepasste, flexible Regleraktivität ermöglicht. Ein solches Reglerkonzept basierend auf einer Fuzzy-Logik wurde in der Diplomarbeit von Preuß für das FP „Insel“ entworfen und getestet (vgl. Preuß [2010]). Es zeigt ein nochmals verbessertes Reglergebnis.

¹⁶ Abweichungen innerhalb der 5 % waren mit der Zahlung der Netznutzungsgebühr abgegolten.

Das blaue Histogramm zeigt die Abweichung der Prognose zum dann real auftretenden Verlauf. Es zeigt sich, dass auch im ungeregelten Fall 80,5 % der Viertelstunden innerhalb des Toleranzbereichs von 5 % liegen. Das rote Histogramm zeigt das Verhalten mit aktiviertem, übergeordnetem Regler: Nun sind 97,7 % der Viertelstunden in den Toleranzbereich eingeregelt. Der Regler verbessert das Ergebnis also um gute 17,2 Prozentpunkte. 75,6 % der Viertelstundenwerte haben nach der Regelung nur noch eine Abweichung von +/- 2 % zum Fahrplanwert. Ohne Regler sind nur rund 47 % der Viertelstunden so nah am Zielwert.

Der Regler lässt sich auch auf kleinere Toleranzen einstellen. Dadurch verbessert sich das Regelergebnis weiter. Die folgende Grafik zeigt Regelerfolge mit dem Dreipunktregler bis zu einem Toleranzband von 1 %. Die Farben stehen für die Dezile von zehn bis 90 Prozent der auftretenden Werte. Die randständigen Dezile (0–10 % der Werte und 90–100 % der Werte) werden nicht dargestellt, da die Streuung in den Extremen sehr hoch ist und die Auflösung im interessanten Wertebereich von 0–5 % Abweichung vom Fahrplanwert stark verschlechtern würde. Zusätzlich dargestellt sind die Regelergebnisse für ein Konzept, in dem anstelle der binären Schaltung über LMA ein zentraler Regler und Frequenzumrichter in den Lüftungs- und Kälteanlagen der Liegenschaften angenommen wurde. Dies basiert auf der Masterarbeit von Drzymalla, in der die möglichen Verbesserungen beim Lastrauschen durch den Einsatz von FU untersucht wurden [Drzymalla 2013].

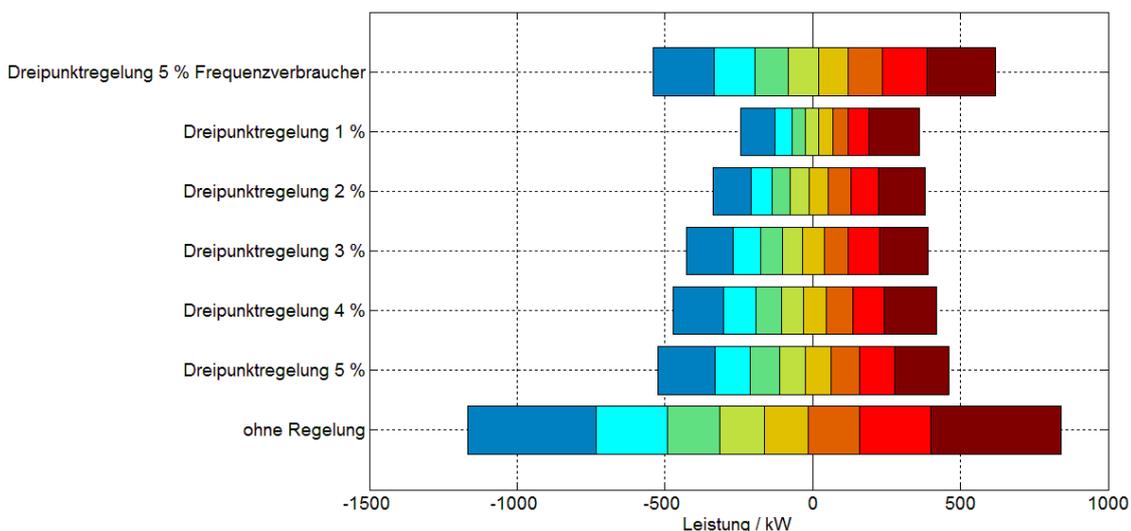


Bild 3-28: 20–80 % Dezile des Regelungserfolgs für unterschiedliche Toleranzbänder (eigene Darstellung).

Führt man diese Analyse getrennt nach Wochentagen durch, ergibt sich für die einzelnen Tage ein durchaus leicht unterschiedliches Bild.¹⁷ Gut prognostizieren lassen sich z. B. die Donnerstage. Hingegen ist der Regelungserfolg an den Wochenenden begrenzt, da viele GTA am Wochenende gar nicht betrieben werden. Dadurch lassen sich an diesen Tagen z. B. „nur“ 96,2 % bzw. 96,8 % der Viertelstunden in das 5 %-Toleranzband bringen.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Tagesvariabilität der Ergebnisse.

¹⁷ Histogramme für alle Wochentage finden sich in (Schäfers et al. [2011, S. 164 ff.]), Darstellungen der Verläufe für alle Wochentage als Kalendarium ebd. (S. 171 ff.).

**3 Untersuchung der DSI-Potenziale der Mittelspannungsliegenschaften der Freien und Hansestadt Hamburg:
Das Forschungsprojekt „Insel“**

Wochentag	Ohne Regelung im 5 % Toleranzband	Regelerfolg bei 5 % Toleranz	Regelerfolg bei 4 % Toleranz	Regelerfolg bei 3 % Toleranz	Regelerfolg bei 2 % Toleranz	Regelerfolg bei 1 % Toleranz
Montag	76,98 %	97,79 %	97,51 %	95,10 %	91,44 %	85,21 %
Dienstag	80,85 %	98,38 %	98,46 %	97,64 %	95,01 %	90,80 %
Mittwoch	78,02 %	97,66 %	96,92 %	95,83 %	93,23 %	88,26 %
Donnerstag	84,56 %	99,14 %	99,20 %	98,14 %	96,13 %	91,25 %
Freitag	81,17 %	98,14 %	98,02 %	95,85 %	91,95 %	84,11 %
Samstag	80,77 %	96,19 %	95,89 %	94,23 %	91,49 %	86,68 %
Sonntag	80,85 %	96,79 %	96,71 %	95,65 %	93,07 %	88,54 %
Summe	80,47 %	97,73 %	97,53 %	96,07 %	93,19 %	87,84 %

Tabelle 3-1: Regelerfolg nach Wochentagen für unterschiedliche Toleranzen – Bezug zum jeweils gültigen Toleranzbereich

Eine Untersuchung der einzelnen Tage des Simulationszeitraums zeigt zudem, dass es einzelne Tage gibt, an denen die Regelung nicht gut funktioniert. Dies lässt sich zeigen, wenn man die durchschnittliche Abweichung jedes Tages in einem 3D-Plot vergleichend nebeneinanderstellt. Dies ist in der folgenden Grafik wiedergegeben.

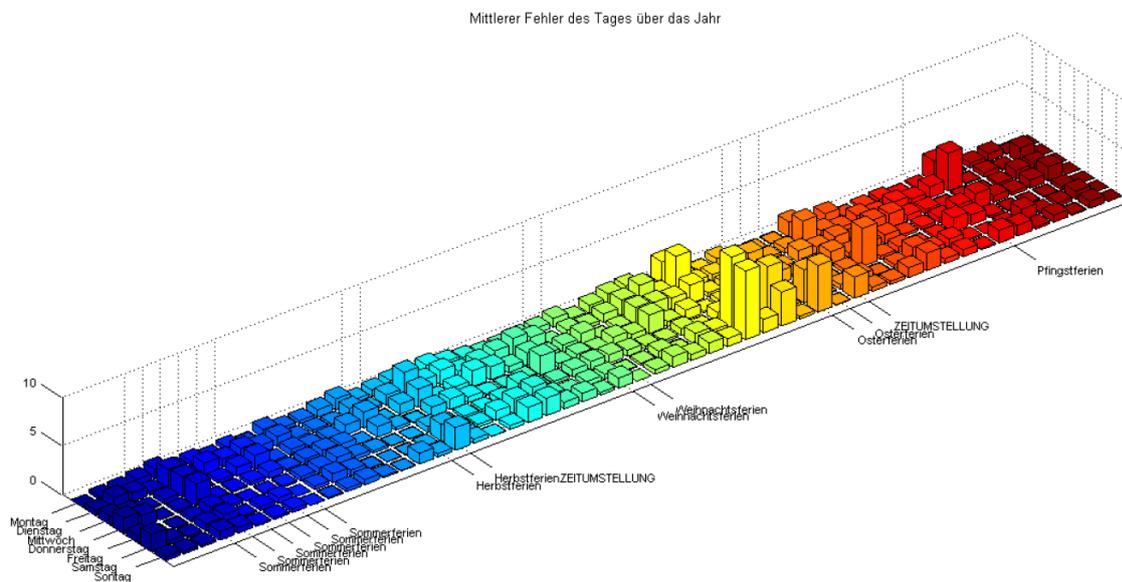


Bild 3-29: Mittlere Fahrplanabweichung je Tag in Prozent (Betrag) [Schäfers et al. 2011, S. 170]

Gründe für die hohen Abweichungen an den unterschiedlichen Tagen scheinen unterschiedlicher Natur zu sein und betreffen vor allem die Ausgangsprognose und damit die Fahrplanerstellung. Ist diese sehr schlecht und wird sie untertägig nicht angepasst (was in „Insel“ nicht vorgesehen war), wird das verfügbare Leistungspotenzial verwendet, um einen Zustand zu erreichen, der nicht einstellbar ist.

Solche Situationen entstehen z. B., wenn ein Tag nicht als Feiertag prognostiziert wurde, sondern als normaler Werktag, oder in Phasen der Zeitumstellung von Winter- auf Sommerzeit und umgekehrt. Dieses Ergebnis betont nachdrücklich die Notwendigkeit einer Möglichkeit zur Intraday-Anpassung einer schlechten Day-Ahead-Prognose.

3.5.3.3 Lastrauschen

Zur Beurteilung der Qualität der Regelung ist es sinnvoll, sich mit der Streuung der momentanen Last um den Viertelstundenmittelwert der Last auseinanderzusetzen. Da der Strombedarf von Verbrauchern nicht konstant ist, sondern nutzerbedingt schwankt, schwankt auch die aus dem Netz bezogene Momentanleistung. Diese Streuung wird Lastrauschen genannt [Haubrich 2008, S. 6]. Sie stellt sich als Zufallsgröße dar, die sich normalverteilt um den Viertelstundenmittelwert bewegt. Die folgende Grafik verdeutlicht dies.

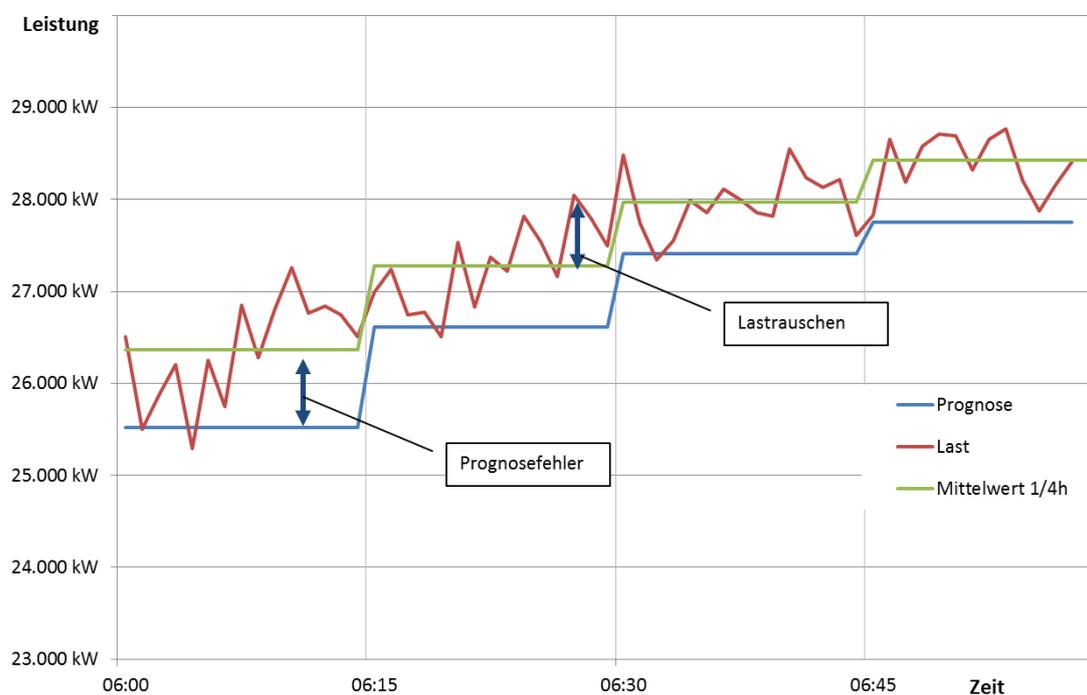


Bild 3-30: Prinzip Lastrauschen – eigene Darstellung mit realen Lastgangwerten aus „Insel“ nach [Haubrich 2008, S. 7]

Da der Fahrplan eine Abfolge von Viertelstundenmittelwerten enthält, die die Führungsgrößen darstellen, wird die Regelung versuchen, mittels Schalthandlungen diese Mittelwerte am Ende der jeweiligen Viertelstunde zu erreichen. Dabei können insbesondere durch die Art des binären Schaltens (an, aus) durch die LMA im Modell (und bei Umsetzung auch in der Realität) größere Schalthübe entstehen, die die aktuelle Last ggf. stärker als normal um den Fahrplanwert (Viertelstundenmittelwert) schwanken lassen.

Über die Höhe des Lastrauschens im Verteilnetz gibt es keine Daten, da es nicht systematisch erfasst wird. Für das Übertragungsnetz findet Haubrich [2008] ein durchschnittliches Lastrauschen von 0,5 % der Regelzonenhöchstlast (ebd., S. 7). Dies bedeutet, dass etwa 68 % aller Momentanlasten im Bereich von $\pm 0,5\%$ des maximalen Viertelstundenmittelwerts um den aktuellen Fahrplanwert der Regelzone streuen.

Im untersuchten Modell werden durch den Regler eine Reihe von gleichgerichteten Schalthandlungen gleichzeitig ausgelöst. Dies muss notwendigerweise das Lastrauschen vergrößern. Hinzu kommt das

3 Untersuchung der DSI-Potenziale der Mittelspannungsliegenschaften der Freien und Hansestadt Hamburg: Das Forschungsprojekt „Insel“

Reglerverhalten, das jede Veränderung des Sollwerts mit einem Einpendeln hin zum neuen Zielwert beantwortet (Überschwinger als Sprungantwort). Auch dies vergrößert das Lastrauschen.

Aus diesen Gründen war es interessant, das Lastrauschen im Projekt „Insel“ zu untersuchen. Die folgenden Zeilen geben die Ergebnisse zusammenfassend wieder (vgl. auch Schäfers et al. [2011, S. 135 ff.]). Die folgenden Grafiken zeigen die Situation für das betrachtete System. Dabei wird die Verteilung des Lastrauschens im untersuchten System über den Simulationszeitraum von einem Jahr zunächst unbeeinflusst und danach bei aktivierter Fahrplanregelung (1–5 % Toleranzband und FU-Regelung) dargestellt.

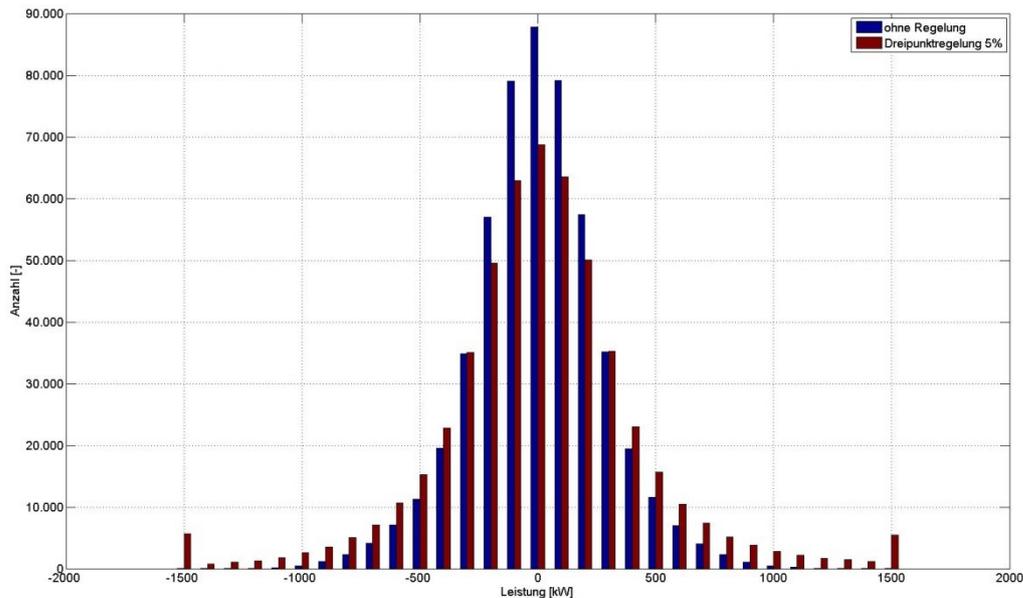


Bild 3-31: Histogramm des Lastrauschens für das unregulierte System und den Regler mit 5 % Toleranz im Vergleich

Das unregulierte System weist ein Lastrauschen von 0,77 % auf. Das entspricht einer Standardabweichung von ± 275 kW bezogen auf eine Höchstlast des Systems von etwa 35,7 MW. Dieser Wert passt gut zur Angabe von Haubrich: Da es sich im untersuchten System um eine kleinere Anzahl von Liegenschaften handelt, ist der Durchmischungseffekt notwendigerweise kleiner und damit das resultierende Lastrauschen größer.

Durch die aktive Fahrplanregelung vergrößert sich das Lastrauschen auf 1,46 %, was ± 530 kW entspricht. Die Regelung vergrößert das Lastrauschen also signifikant (um 0,69 % bzw. 255 kW). Die folgende Tabelle zeigt zudem, dass ein engeres Toleranzband das Lastrauschen kontinuierlich erhöht, bis es sich bei 1 % mit einem absoluten Wert von rund 1 MW gegenüber dem unregulierten System fast verdreifacht hat. Hier zeigt sich deutlich, dass mit einem solchen Reglerkonzept zwar ein Viertelstundenfahrplanwert gut eingehalten werden kann, dies aber zum Preis einer Belastung des Gesamtsystems erkauft würde, die zumindest fragwürdig erscheint.

Lastrauschen mit ...							
	Ohne Regelung	5 % Toleranz- band	4 % Toleranz- band	3 % Toleranz- band	2 % Toleranz- band	1 % Toleranz- band	FU- Rege- lung
Lastrauschen absolut	275 kW	520 kW	583 kW	687 kW	859 kW	1.057 kW	622 kW
Prozentual zur Höchstlast	0,77 %	1,46 %	1,63 %	1,93 %	2,41 %	2,96 %	1,74 %

Tabelle 3-2: Lastrauschen bei verschiedenen Reglereinstellungen

Die Zunahme wäre zunächst für sich allein betrachtet zwar nicht weiter systemrelevant. Stellt man sich jedoch eine starke Verbreitung eines solchen Regelkonzepts wie in „Insel“ vor, ist zumindest vorherzusehen, dass eine deutliche Zunahme des Lastrauschens allgemein zu erwarten wäre.

Ein Q/Q-Plot zeigt außerdem, dass das Lastrauschen bei aktiviertem Regler nicht mehr normalverteilt ist, sondern extreme Werte gehäuft auftreten. Die folgende Grafik stellt dies dar.

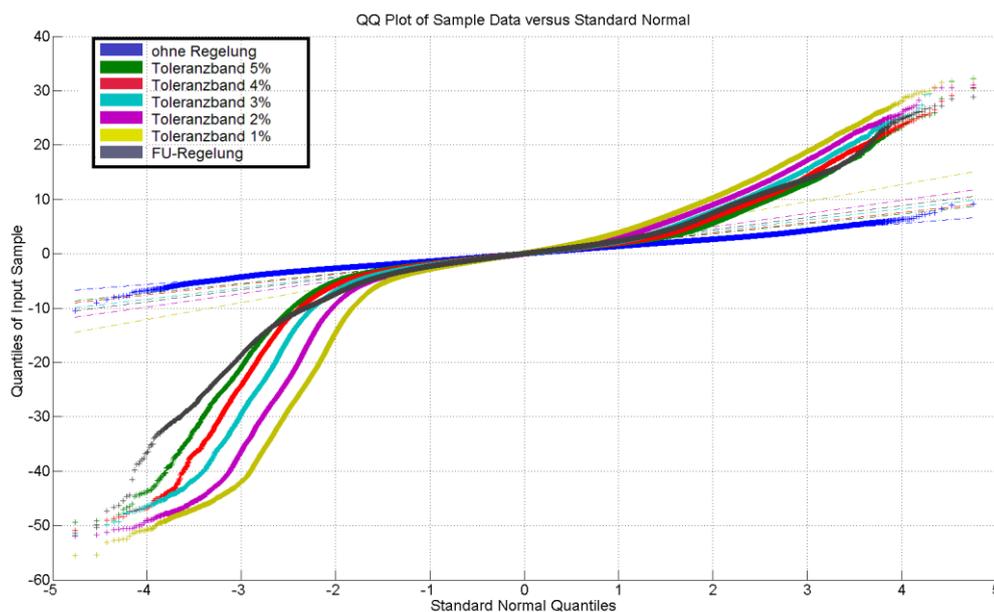


Bild 3-32: Q/Q Diagramm zur Verteilung des Lastrauschens bei aktiviertem Regler

Die Häufigkeitsverteilung der Leistungsschwankung des Lastrauschens dargestellt über die Dezile 20–80 % ergibt folgendes Bild.

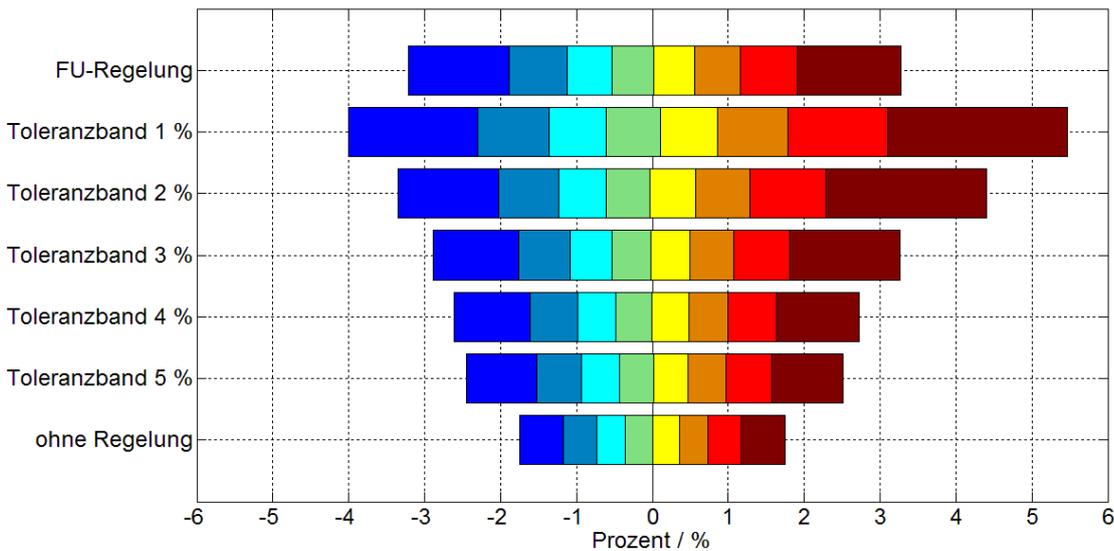


Bild 3-33: 20–80 % Dezile des Lastrauschens für unterschiedliche Toleranzbänder und FU-Regelung

Die Reduktion des Lastrauschens durch die Verwendung von Frequenzumrichtern bei der Lastreduktion als Alternative zum einfachen binären Schalten (letzte Spalte der Tabelle) ist in der Masterthesis von Drzymalla untersucht worden [Drzymalla 2013]. Hier liegen deutliche Potenziale sowohl für die Reduktion des Lastrauschens als auch für eine verbesserte Fahrplaneinhaltung, da sich mithilfe der Frequenzumrichter die Schrittweite der Regelung besser organisieren lässt. Für Details sei auf die genannte Arbeit verwiesen.

Der Lastgradient im europäischen UCTE-Netz liegt im Durchschnitt bei etwa 19.500 MW/Hz (vgl. [UCTE 2004c, S. 6]). Die Primärregelung wird bei einer Abweichung zwischen 10 und 20 mHz ausgelöst. Das entspricht einer Leistungsschwankung von 195 bis 390 MW und liegt damit um drei Größenordnungen über der Höhe der gefundenen Zunahme des Lastrauschens im betrachteten System.

3.5.3.4 Regelenergiebereitstellung

Im Rahmen des FP „Insel“ wurde auch untersucht, inwieweit das System zur Lieferung von Regelenergie geeignet ist. Dazu wurden spontane Lastwechsel um mehrere MW durch eine spontane Änderung des Day-Ahead-Fahrplans induziert und getestet, wie das System darauf reagiert. Die Lieferung positiver Regelenergie entspricht dabei dem Abschalten von Anlagen, die Lieferung negativer Regelenergie entspricht dem Zuschalten zusätzlicher Verbraucher.

Letzteres ist systembedingt nur begrenzt möglich. Zwar können mit den LMA Anlagen, die in Betrieb sind, abgeschaltet und auch wieder in Betrieb genommen werden, wenn die LMA sie vorher abgeschaltet hat. Wenn die Anlagen jedoch nach dem internen Plan der Gebäudeleittechnik nicht in Betrieb sind, kann die LMA darauf keinen Einfluss nehmen. Die Möglichkeiten für negative Regelenergie sind daher in diesem System sehr begrenzt. Dies gilt nicht für die Lüftungsanlagen im Elbtunnel (Autobahntunnel unter der Elbe). Hier existiert die Möglichkeit, quasi 24 Stunden auf eine große Anzahl Lüftungsanlagen zuzugreifen, da diese im regelhaften Betrieb nur in Teillast oder gar nicht betrieben werden und die dortige LMA direkt darauf zugreifen könnte [Schäfers et al. 2011, S. 80]. Negative Regelenergie stammt also im FP „Insel“ a) zunächst aus der Wiederinbetriebnahme zuvor abgeregelter Anlagen und dann b) im Wesentlichen aus den Lüftungsanlagen des Elbtunnels. Dies ist eine echte Limitation des Einsatzes eines Verbunds von LMA. Gerade die Kälteanlagen der Liegenschaften haben bei Anwendung von Vor- und/oder Nachkühlstrategien ein gutes Potenzial für negative Regelenergie (vgl. 6.3).

Insgesamt zeigt sich, dass die Liegenschaften im Modell sehr schnell auf fahrplanseitig induzierte Lastwechsel reagieren und das System damit gut in der Lage ist, auch schnelle Regelergieananforderungen (Sekundärregelleistung) zu bedienen. Die folgende Grafik zeigt beispielhaft die Reaktion auf eine Anforderung von 2,5 MW tagsüber und 1 MW nachts.

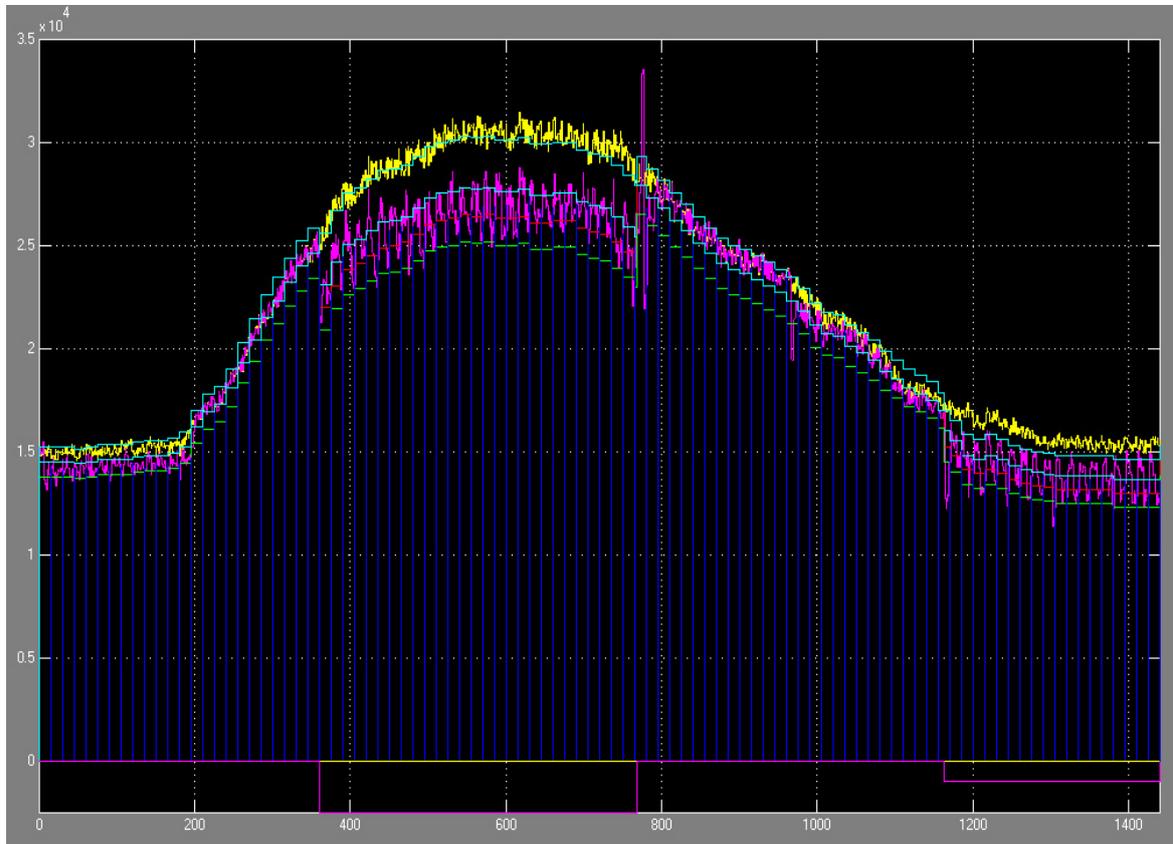


Bild 3-34: Lieferung positiver Regelernergie aus dem Liegenschaftsverbund – Beispiel 02.07.2008 2,5 MW tagsüber, 1 MW abends/nachts (vgl. [Schäfers et al. 2011, S. 120])

Ordinate: Leistung in Watt; Abszisse: Zeit in Minuten (24 h = 1440 Minuten)

Die Farben stehen für

- Pink: Lastgang der Liegenschaften unter dem Einfluss des übergeordneten Reglers
- Gelb: Lastgang ohne Reglereinfluss
- Hellblaue Linie: Fahrplan ohne Lieferung positiver Regelernergie; bei Regelergielieferung: obere Grenze des Toleranzbereichs
- Dunkelblau und -grün: Obere und untere Toleranzgrenze für Abweichungen.

Hier wurde für den 2. Juli 2008 eine positive Reserve von 2,5 MW tagsüber und 1 MW abends/nachts simuliert. Dazu wurde die obere Grenze des Toleranzbands zur Definition der Höhe der Reservelieferung verwendet. Dies hat den Sinn, dass möglichst keine Zustände auftreten, bei denen die Reservelieferung kleiner als die vereinbarte Lieferhöhe ist. Dies ist bei Verwendung des Dreipunktreglers aber nur möglich, wenn die obere Grenze des Toleranzbands, die ja die Regelung auslöst, um den angeforderten Reserveleistungsbetrag vom Fahrplan entfernt ist. Das heißt, der neue Fahrplanwert liegt noch 5 % unter der Differenz zwischen altem Fahrplanwert und Reserveanforderung.

Zu erkennen ist insbesondere im direkten Vergleich mit dem unbeeinflussten Lastgang, dass das Lastrauschen bei Regelergielieferung deutlich zunimmt, da vermehrt Schalthandlungen ausgelöst

werden. Zudem können die 2,5 MW nicht in jeder Minute sicher erbracht werden. Im Durchschnitt ist die Reservelieferung zwar deutlich höher als die angeforderte Menge von 2,5 MW, aber sie ist nicht konstant. Eine solche konstante Lieferung sehen die Präqualifikationsbedingungen der ÜNB für eine Zulassung zur Minutenreservelieferung aber vor [Berndt 2007, s. Anhang D3, S. 6 f.]. Bei der Sekundärreserve sind kurzzeitige Überschinger aber erlaubt [Berndt 2007, s. Anhang D2 Teil 1, S. 8 f.]. Nicht geklärt ist in diesem Zusammenhang aber der messtechnische Nachweis der Reserveerbringung, da eine (eigentlich nach den Präqualifikationsbedingungen geforderte) Leistungsmessung an allen bei der Erbringung beteiligten Anlagen wegen des Installationsaufwands ausscheidet.

Die Grafik zeigt außerdem, dass es regelungsbedingt bei der Rückkehr zum ursprünglichen Fahrplan zu einem starken Einschwingverhalten als Antwort auf die Sprungfunktion kommt.

Die folgende Grafik zeigt das Simulationsergebnis für die Lieferung negativer Reserve in der Höhe von 3 MW für den gleichen Tag.

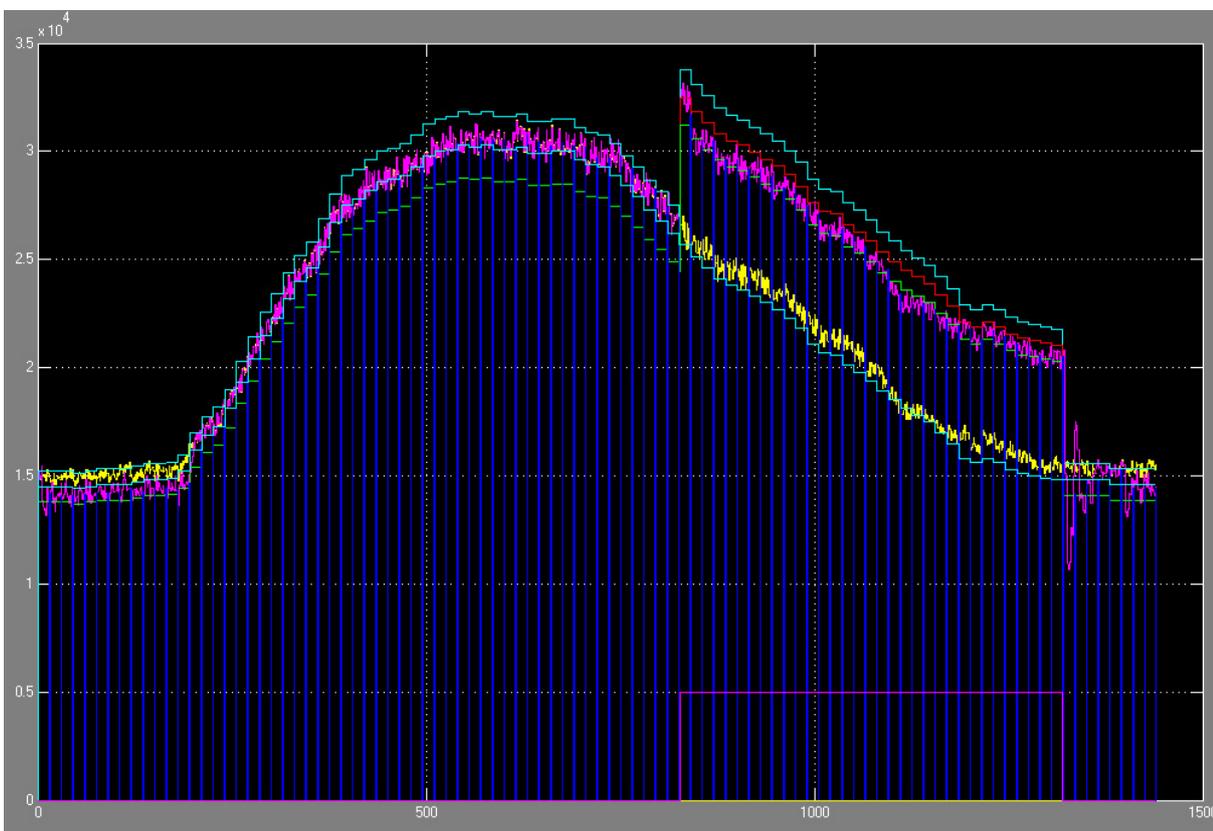


Bild 3-35: Lieferung positiver Regelenergie aus dem Liegschaftsverbund – Beispiel 02.07.2008 5 MW (bisher nicht veröffentlicht)

Auch hier findet sich das Einschwingverhalten bei der Rückkehr zum alten Fahrplan. Das Lastrauschen ist bei der Aktivierung negativer Reserve deutlich geringer, da es fast ausschließlich mit wenigen sehr leistungsstarken Lüftungsanlagen im Elbtunnel realisiert wird und entsprechend wenige Schalthandlungen auftreten.

Um zu analysieren, wie viel positive bzw. negative Regelenergie das System maximal bereitstellen kann, wurde der übergeordnete Regler tageweise auf „alles aus“ bzw. „alles an“ eingestellt. Die Ergebnisse, wieder am Beispiel des 2. Juli 2008, zeigen die beiden folgenden Grafiken.

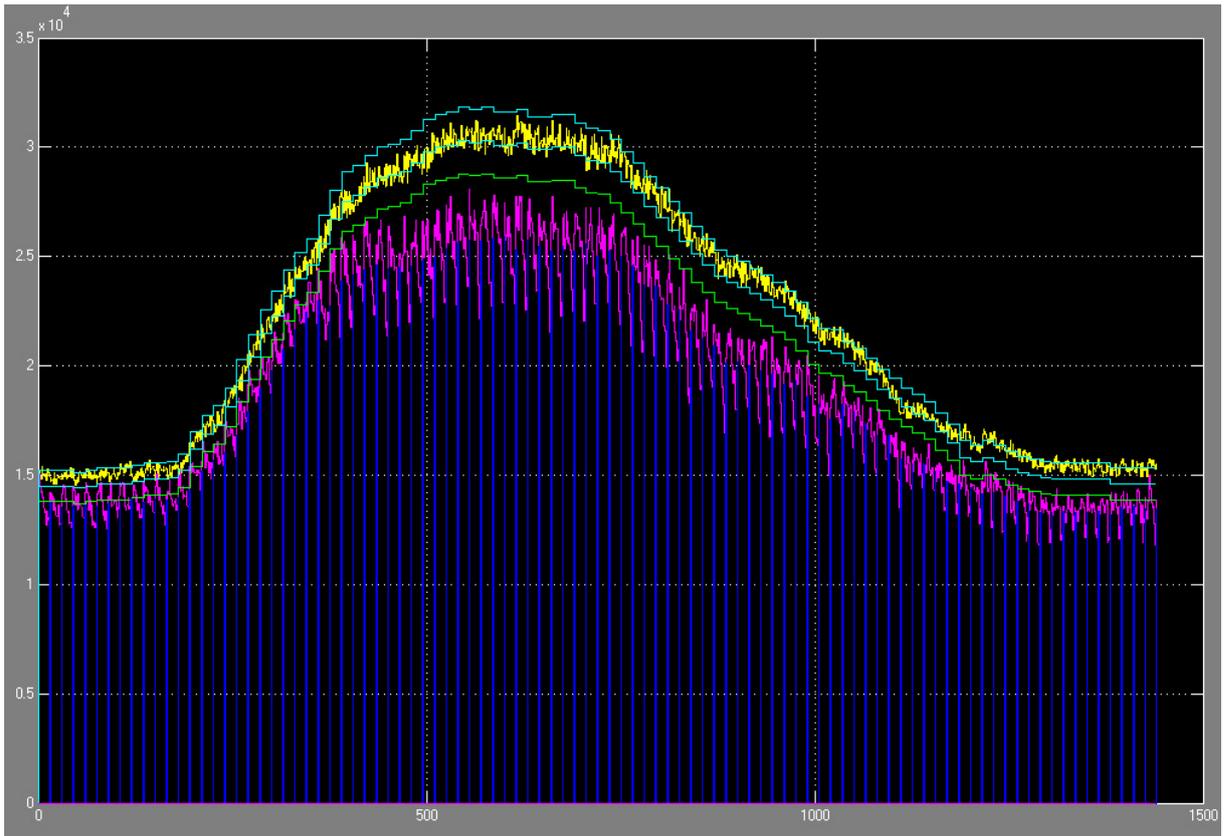


Bild 3-36: Maximale Lastreduktion am Beispiel 02.07.2008 (vgl. [Schäfers et al. 2011, S. 121])

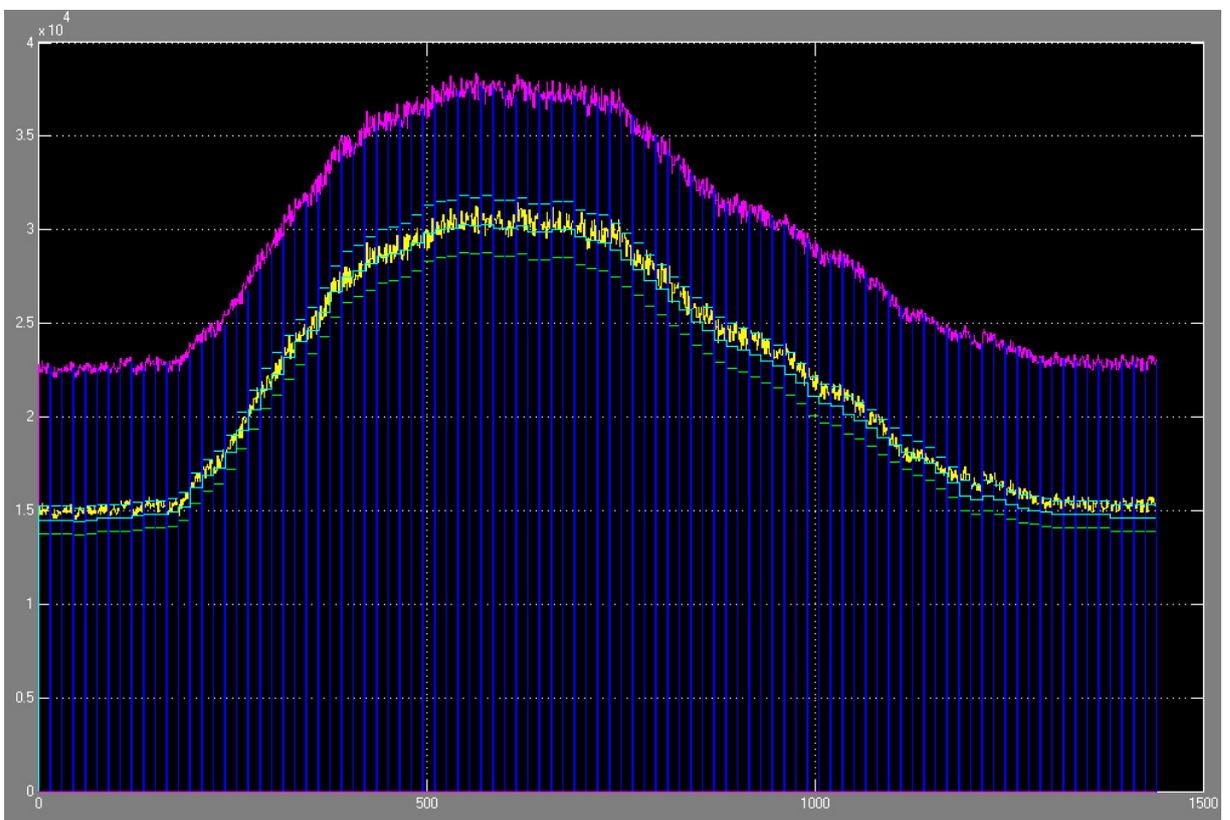


Bild 3-37: Maximale Lasterhöhung am Beispiel 02.07.2008 (vgl. [Schäfers et al. 2011, S. 122])

Es zeigt sich, dass das System „Off-Peak“ also in einem Zeitraum, in dem in den Liegenschaften (fast) nicht mehr gearbeitet wird und die meisten GTA nicht in Betrieb sind, lediglich 0,5 MW bis 1 MW Lastreduktion realisieren kann. Zu den Hauptarbeitszeiten (Peak-Zeit) liegt das Reduktionspotenzial bei etwa 3 MW. Die Übergänge zwischen beiden Phasen sind fließend und müssten wie der Fahrplan prognostiziert werden, um die Regelenergie sicher vermarkten zu können.

Die negative Regelenergie ist dagegen sehr stabil und mit sehr geringem Lastrauschen bei etwa 7 MW. Die großen Lüfter des Elbtunnels als negative Reserve zu verwenden, mag daher u. U. monetär attraktiv erscheinen. Es sei hier aber daran erinnert, dass die Entlüftung der Röhren eines Autobahntunnels keinen guten Energiespeicher darstellt und eine entsprechende Nutzung daher eher nicht anzustreben ist.

4 Methode zur DSI-Potenzialabschätzung im Rahmen einer automatisierten Voranalyse unter Verwendung von ALKIS und ArcMap

Das folgende Kapitel beschreibt die Entwicklung einer Methodik zur Abschätzung des DSI-Potenzials in Städten unter Verwendung digitaler Katasterdaten der Vermessungsämter. Dies ist insofern von besonderem wissenschaftlichen Interesse, als mit dem „Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem“ (ALKIS) eine vereinheitlichte Datenbankorganisation dieser Katasterdaten seit diesem Jahr in allen Bundesländern umgesetzt ist. Eine Methode zur DSI-Potenzialermittlung mit ALKIS hat also den Vorteil, dass ein einmal erstellter Algorithmus mit jedem ALKIS-Datensatz einer beliebigen Stadt verbunden werden kann, um sofort das DSI-Potenzial der Stadt (für die im Algorithmus berücksichtigten Nutzungen) sowohl rechnerisch-quantitativ als auch kartografisch-qualitativ in seiner geografischen Verteilung darstellen zu können.

Dieses Kapitel stellt zunächst das dafür verwendete Datenmodell ALKIS und anschließend den erstellten methodischen Ansatz zur DSI-Potenzialermittlung vor. Dies geschieht ohne genauere Kenntnis der Gebäude. Die Methode stellt also eine Voranalyse erweiterter Art dar.

Für die Potenzialermittlung wird grundsätzlich folgender Ansatz verfolgt:

- Aus der Grundgesamtheit aller Gebäude im ALKIS der Stadt Hamburg werden zunächst die Nichtwohngebäude (NWG) ausgewählt, deren Nutzung den Nutzungen der im FP „Insel“ betrachteten Gebäude ähnlich ist.
- Aus dieser Teilmenge werden im Rahmen einer ABC-Analyse auf Basis von Energieverbrauchskennwerten und Vollnutzungsstunden die Gebäude bestimmt, in denen „A = sicher“ bzw. „B = nur unter günstigen Umständen“ auf Basis der Anschlussleistung der Gebäude ein größeres DSI-Potenzial vermutet werden kann. Die Kategorie C kennzeichnet die Gebäude, in denen vermutlich kein größeres DSI-Potenzial aus Lüftungs- und Kälteanlagen (LuK) besteht.
- Für die Gebäude in den Kategorien A, B und C werden mithilfe von Teilenergiekennwerten die bei unterschiedlichen Projektionen von GTA-Durchdringung (hoch, mittel, niedrig) zu erwartenden Anschlusswerte für Lüftung und Kühlkälte abgeschätzt.

Dieses Kapitel beschreibt die Datengrundlage und die Methodik im Detail. Im folgenden Kapitel 5 werden die gewonnenen Ergebnisse dargestellt und den aus „Insel“ vorliegenden detaillierten Erkenntnissen zur Validierung und Diskussion gegenübergestellt.

Es sei an dieser Stelle noch einmal ausdrücklich hervorgehoben, dass die hier entwickelte Methodik ein Verfahren für eine (erweiterte) Voranalyse beschreibt. Im Sinne der VDI 3807 Teil 4 erfolgt im Rahmen einer Voranalyse keine Begehung des Objekts. Vielmehr wird anhand von Kennwerten eine Einordnung zur Selektion [VDI 3807-4: 2008, S. 4] vorgenommen. Genau dies soll die Methode ermöglichen: eine Einordnung des Gebäudebestands zur Selektion und eine Verortung der Gebäude, in denen ein signifikantes DSI-Potenzial vermutet werden darf. Die genauere gebäudespezifische Analyse dieses DSI-Potenzials muss dann im Rahmen von zunächst Grob- und dann ggf. Feinanalysen unter Zuhilfenahme detaillierterer Gebäudeinformationen aus Planunterlagen und Begehungen ermittelt werden. Dies ist insbesondere notwendig, da im Rahmen der Voranalyse keine individuelle Zonierung der betrachteten Gebäude erfolgen kann. Jedoch ist der tatsächliche Energiebedarf eines NWG entscheidend abhängig von Größe und Art der Konditionierung (Versorgung mit Nutzenergien) der unterschiedlichen Nutzungszonen eines Gebäudes.

Die hier dargestellte Methode soll im Vorfeld dazu dienen, herauszufinden, welche der 370.000 Hamburger Gebäude man begehen sollte, auf der Suchen nach DSI-Potenzialen aus Lüftung und Kälte (und auf welche Größenordnung von DSI-Potenzial man dabei jeweils hoffen darf).

4.1 Datengrundlage in ALKIS

4.1.1 ALKIS

Für die hier vorgestellte Methodik zur DSI-Potenzialermittlung stellt das ALKIS die Quelle für die benötigten Informationen über die Gebäude dar, in denen ein DSI-Potenzial vermutet werden kann. Dies sind insbesondere Angaben zu

- Größe des Gebäudes (Grundfläche und Anzahl der Geschosse),
- geografischer Lage/Position des Gebäudes und
- Nutzungsart des Gebäudes.

ALKIS ist Bestandteil des AAA-Modells der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Bundesrepublik Deutschland (AdV). In Deutschland liegen das Raumordnungswesen und damit auch das Vermessungswesen in der Rechtshoheit der Länder [GG, Art. 72]. Dies hat in der Vergangenheit zu unterschiedlichen Datenmodellen bei der Verwaltung der raumbezogenen Daten in den Bundesländern geführt. Die Idee, harmonisierend und länderübergreifend zu standardisieren, entstand in der AdV bereits 1973 mit dem „Sollkonzept des Automatisierten Liegenschaftsbuchs (ALB)“ und zehn Jahre später mit dem Sollkonzept für die grafische Kartendarstellung der Informationen des Liegenschaftsbuchs: die „Automatisierte Liegenschaftskarte (ALK)“ [Steudle & Witke 2012, S. 217].

1996 wurde beschlossen, die Datenstrukturen von ALB und ALK im „Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS®)“ zusammenzufassen (ebd.). Dazu erfolgte auch eine Abstimmung und Harmonisierung mit dem damals schon existenten Datenmodell für die topografisch-kartografischen Daten, dem ATKIS® (Amtliches Topografisch-Kartografisches Informationssystem). ALKIS und ATKIS wurde ein Datenmodell für die Verwaltung der Festpunkte (Lage, Höhe und Schwere) hinzugefügt, das AFIS® (Amtliches Festpunktinformationssystem). Damit entstand das heute bundeseinheitlich verwendete AAA-Datenmodell (AAA = ALKIS + ATKIS + AFIS) [AdV 2013d]. Die Migration der Datenbestände in die neue vereinheitlichte Struktur begann 2005 und ist in fast allen Bundesländern seit dem ersten Halbjahr 2013 abgeschlossen. Eine detaillierte Übersicht über den Stand wurde vom AdV zuletzt im März 2013 veröffentlicht [AdV 2013c].

Sinn des AAA-Datenmodells ist es, den Datenbestand an raumbezogenen Daten der Bundesländer so zu vereinheitlichen und zusammenzuführen, dass die Datenverarbeitung einheitlich ablaufen kann. Dadurch kann eine Datenanwendung bspw. bayerische Vermessungsdaten nach dem gleichen Ablauf behandeln wie niedersächsische oder jegliche andere ALKIS-konforme Daten. Datenstrukturen und Datenbeziehungen (Datenschemata, Kataloge, Erläuterungen zur Verwendung etc.) des AAA-Datenmodells sind in diesem Kontext umfänglich beschrieben in der „Dokumentation zur Modellierung der Geoinformationen des amtlichen Vermessungswesens (GeoInfoDok)“ des AdV (AdV 2013c).

Das Anwendungsschema des AAA-Datenmodells beschreibt die Dateninhalte und die Datenbeziehungen in der Modellierungssprache UML und wird unterteilt in einen Grundbereich (Basisschema) und einen Fachbereich (Fachschemata).

Das Basisschema beschreibt die grundlegenden Eigenschaften der Datenobjekte und dient als Datenquelle für Fachinformationssysteme. Das Fachschema enthält die Beschreibung der Objektartenbereiche, Objektartengruppen und Objektarten sowie deren Eigenschaften und sämtliche

vorhandenen Informationen aus Liegenschaftskataster (ALKIS), Topografie/Kartografie (ATKIS) und Grundlagenvermessung (AFIS) [AdV 2013b].

ALKIS ist als Datenbank in folgende Objektartenbereiche aufgeteilt. Objektartenbereiche enthalten Objektartengruppen, die wiederum Objektarten enthalten. Allen ist jeweils eine eindeutige Kennung zugeteilt, beginnend mit „AX“ und einer fünfstelligen Schlüsselnummer. Die erste Ziffer der Schlüsselnummer kennzeichnet den Objektartenbereich, die zweite die Objektartengruppe und die letzten drei die Objektart. So trägt die Objektart „Gebäude“ die Kennung AX 31001. Darin steht die „3“ für den Objektartenbereich „Gebäude“, die „1“ für die Objektartengruppe „Angaben zum Gebäude“ und die „001“ für die Objektart „Gebäude“. Folgende Objektartengruppen sind in ALKIS vorhanden [AdV 2013e]:

- AX 10000 „Flurstück, Lage, Punkt“
- AX 20000 „Eigentümer“
- AX 30000 „Gebäude“
- AX 40000 „Tatsächliche Nutzung“
- AX 50000 „Bauwerke, Einrichtungen und sonstige Angaben“
- AX 60000 „Relief“
- AX 70000 „Gesetzliche Festlegungen, Gebietseinheiten, Kataloge“
- AX 80000 „Nutzerprofile“
- AX 90000 „Migration“

Mit Ausnahme des Objektartenbereichs AX20000 „Eigentümer“ stehen im Rahmen der Nutzungslizenz der HCU Inhalte aller Objektartengruppen zur Verfügung. Wichtig sind für die hier im Folgenden dargestellte Methode die Objektarten

- AX 31001 Gebäude,
- AX 31002 Bauteile und
- AX 11001 Flurstücke.

Für die Verortung/Identifizierung der Gebäude wird zudem die Objektart AX 12002 „Lagebezeichnung mit Hausnummer“ verwendet. Zur späteren Darstellung in Karten finden diverse weitere Objektarten Eingang, die allerdings lediglich für eine ausführlichere Darstellung und damit zur besseren Kartenübersicht dienen.

Objektarten werden i. A. in der Geodatabase (GDB) als Shape Files zur Verfügung gestellt. Ein Shape File besteht aus einer zusammengehörigen Gruppe von mindestens drei Dateien: einer Vektordatei (Punkt, Linie oder Polygon) mit dem in der digitalen Karte darzustellenden grafischen Element, dem eigentlichen „shape“ (*.shp), einer zugehörigen Attributdatei im dBase-Format (*.dbf) mit den zu dem grafischen Objekt zugehörigen Informationen (Attributen) und einer Relationsdatei (*.shx), die die beiden Dateien eindeutig miteinander verknüpft. Dem Datenpaket können ferner Dateien mit Informationen über Relationen und Verknüpfungen zu anderen Dateien und weitere für die grafische Darstellung relevante Informationen (Projektionen u. Ä.) angehören [GI Geoinformatik 2012, S. 74].

Im Folgenden sind im Wesentlichen die Attributdateien von Interesse. Diese lassen sich öffnen und die darin enthaltenen Informationen für Berechnungen verwenden. Dabei können die Attributdateien erweitert und verändert werden. Dies lässt sich mit unterschiedlichen Programmen bewerkstelligen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dafür das Programm ArcMap der Fa. ESRI verwendet. Eine umfangreiche Python-Routine wurde geschrieben, die die notwendigen Datenberechnungen durchführt und sowohl eigenständig laufen als auch ArcMap als Shell (Laufzeitumgebung) verwenden kann (s. u.).

4 Methode zur DSI-Potenzialabschätzung im Rahmen einer automatisierten Voranalyse unter Verwendung von ALKIS und ArcMap

Eine Objektart in ALKIS ist also i. d. R. eine Gruppe grafischer Elemente, die gleiche Dinge darstellen (z. B. Polygone, die Gebäude darstellen) und zu denen in einer Attributtabelle definierte Informationen hinterlegt sind. Die für die Methode zur Abschätzung von DSI-Potenzialen wichtigste Objektart ist AX 31001 „Gebäude“, die Informationen zum Hamburger Gebäudebestand enthält. Dabei ist nach ALKIS ein Gebäude „(...) ein dauerhaft errichtetes Bauwerk, dessen Nachweis wegen seiner Bedeutung als Liegenschaft erforderlich ist sowie dem Zweck der Basisinformation des Liegenschaftskatasters dient“ [AdV 2013a, S. 190].

4.1.2 Die Objektart AX 31001 „Gebäude“

Die Objektart AX 31001 Gebäude enthält eine durch das ALKIS-Schema verbindlich definierte Reihe von Attributarten zu den in der Datenbank erfassten Gebäuden. Als Attributart wird dabei die Art der Information definiert. Ein Attribut ist dann die spezifische Ausprägung dieser Information für ein Objekt (hier Gebäude). Im Folgenden werden die für die Entwicklung der Methode wichtigen Attributarten kurz dargestellt. Für eine vollständige Darstellung aller in ALKIS definierten Attributarten sei auf [AdV 2013a, S. 189 ff.] verwiesen. Nicht alle Attributarten des Schemas werden in Hamburg auch geführt. Eine Darstellung der in Hamburg geführten Attribute findet sich in [LGV 2011].

Die folgende Abbildung zeigt einen Ausschnitt aus der Datei AX 31001 der GDB Hamburg.

OBJECTI	UUID*	BEG	ENDE	MAT	ANL	GFK	BAW	AOG	AUG	HOH	HHO	HHOU	DAF	ZUS	GFL	GFLU	GRF		
1	DEHHALKAJ00017E4	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	1010	1100	1	1	<Null>	<Null>	<Null>	3100	<Null>	<Null>	<Null>	169,7	urn:	
2	DEHHALKAJ0001B7j	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	2463	<Null>	1	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	1000	<Null>	<Null>	<Null>	147,3	urn:	
3	DEHHALKAJ0000u7H	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	1010	1100	1	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	3200	<Null>	<Null>	<Null>	92,8	urn:	
4	DEHHALKAJ0000tu4	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	2510	<Null>	1	<Null>	43,5	urn:								
5	DEHHALKAJ0001Aee	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	2463	<Null>	1	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	1000	<Null>	<Null>	<Null>	17	urn:	
6	DEHHALKAJ0004oTM	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	1313	<Null>	urn:											
7	DEHHALKAJ00017Xx	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	1010	1100	1	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	3100	<Null>	<Null>	<Null>	47	urn:	
8	DEHHALKAJ00016uS	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	1010	2200	2	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	1000	<Null>	<Null>	<Null>	64,8	urn:	
9	DEHHALKAJ00015PH	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	2010	<Null>	1	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	9999	<Null>	<Null>	<Null>	122,4	urn:	
10	DEHHALKAJ0000nDh	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	2463	<Null>	1	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	1000	<Null>	<Null>	<Null>	15,7	urn:	
11	DEHHALKAJ0004oys	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	1313	<Null>	urn:											
12	DEHHALKAJ0004nDh	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	1313	<Null>	urn:											
13	DEHHALKAJ0000vI	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	2020	<Null>	1	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	1000	<Null>	<Null>	<Null>	66,6	urn:	
14	DEHHALKAJ0000tcX	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	1120	2400	5	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	3100	<Null>	<Null>	<Null>	361,7	urn:	
15	DEHHALKAJ00015en	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	1010	1100	1	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	3100	<Null>	<Null>	<Null>	96,1	urn:	
16	DEHHALKAJ00014Ka	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	2310	<Null>	5	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	1000	<Null>	<Null>	<Null>	315,6	urn:	
17	DEHHALKAJ0000owT	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	1130	2400	5	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	3400	<Null>	<Null>	<Null>	158	urn:	
18	DEHHALKAJ00014EE	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	2020	<Null>	2	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	3100	<Null>	<Null>	<Null>	400,9	urn:	
19	DEHHALKAJ0004oyS	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	1313	<Null>	urn:											
20	DEHHALKAJ0000p3e	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	2463	<Null>	1	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	3100	<Null>	<Null>	<Null>	34	urn:	
21	DEHHALKAJ0000sML	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	2463	<Null>	1	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	3100	<Null>	<Null>	<Null>	140,8	urn:	
22	DEHHALKAJ00015iC	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	2020	<Null>	1	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	1000	<Null>	<Null>	<Null>	22,2	urn:	
23	DEHHALKAJ00014tx	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	1010	1100	1	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	3200	<Null>	<Null>	<Null>	89,6	urn:	
24	DEHHALKAJ0000sxB	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	1100	1100	3	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	3100	<Null>	<Null>	<Null>	124,3	urn:	
25	DEHHALKAJ00016m9	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	2020	<Null>	3	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	1000	<Null>	<Null>	<Null>	1359,5	urn:	
26	DEHHALKAJ0000p3e	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	2071	<Null>	3	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	3100	<Null>	<Null>	<Null>	209,7	urn:	
27	DEHHALKAJ0001Bib	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	1010	1100	1	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	3100	<Null>	<Null>	<Null>	158,8	urn:	
28	DEHHALKAJ0000rde	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	2140	<Null>	1	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	3700	<Null>	<Null>	<Null>	337,6	urn:	
29	DEHHALKAJ0000sB3	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	2120	<Null>	1	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	3100	<Null>	<Null>	<Null>	1210,1	urn:	
30	DEHHALKAJ0000ro	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	1313	<Null>	urn:											
31	DEHHALKAJ0004oJ	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	1313	<Null>	urn:											
32	DEHHALKAJ00019SD	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	1010	1100	1	1	<Null>	<Null>	<Null>	3100	<Null>	<Null>	<Null>	85,5	urn:	
33	DEHHALKAJ00017yq	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	1010	1100	1	<Null>	<Null>	<Null>	<Null>	9999	<Null>	<Null>	<Null>	91,9	urn:	
34	DEHHALKAJ0004ohk	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	1313	<Null>	urn:											
35	DEHHALKAJ0001BIU	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	1010	2400	3	<Null>	55,5	urn:								
36	DEHHALKAJ0004nKD	16.12.2009	<Null>	"DLKM"	<Null>	1313	<Null>	urn:											

Bild 4-1: Ausschnitt aus der AX 31001-Attributtabelle der GDB Hamburg 2010. Die Pfeile kennzeichnen die verwendeten Attribute.

Die Datei enthält folgende für die Methode zur DSI-Potenzialabschätzung wichtige Informationen:

- UUID: Ein eindeutiger Identifikator für das in der Zeile dargestellte Objekt.
- GFK (Gebäudefunktion): Die Gebäudefunktion ist die „(...) zum Zeitpunkt der Erhebung vorherrschend funktionale Bedeutung des Gebäudes“ [AdV 2013a, S. 190]. Das bedeutet, dass die Festlegung dieses Attributs u. U. bestehende zusätzliche Nutzungen des Gebäudes nicht wiedergibt. ALKIS definiert daher neben der Attributart GFK/Gebäudefunktion auch die

Attributart „weitere Gebäudefunktion“ (WGF). Zu den Arten der geführten Gebäudefunktionen siehe Abschnitt 4.2.1.

- AOG: Anzahl der oberirdischen Geschosse (selbsterklärend)
- AUG: Anzahl der unterirdischen Geschosse (selbsterklärend)
- GRF: Grundfläche des Gebäudes in m² (selbsterklärend)

Die Informationen über Grundfläche und Anzahl der Geschosse werden im Folgenden als Basis zur Ermittlung der Bruttogeschossfläche (BGF) der Gebäude verwendet. Die Gebäudefunktion dient für die in dieser Arbeit angewandte Methodik zur Auswahl geeigneter Energiekennwerte.

Darüber hinaus findet sich auch das Attribut BJA: Baujahr. Es wird im ALKIS von Hamburg abweichend von den Regelungen des Objektartenkatalogs nicht direkt in AX31001 geführt, sondern in einer eigenen Attributtabelle „AX31001_BJA“. Grundsätzlich ist die Angabe des Baujahrs eine zur energetischen Einordnung der Gebäude wesentliche Information. Sie liegt aber lediglich für etwa ein Drittel der Gebäude vor (118.101 von 370.705, entspr. 31,9 %). Zudem kann die Jahreszahl auch das Jahr der letzten einmessungspflichtigen Bauänderung bedeuten. Diese Information ist daher für die hier dargestellte Methodik nur sehr eingeschränkt hilfreich und wird daher nicht verwendet.

4.1.3 Die Objektart AX 31002 „Bauteile“

Im ALKIS werden in der Objektart „Bauteile“ (AX 31002) Merkmale zu Teilen von Gebäuden geführt, die gegenüber dem Objekt „Gebäude“, zu dem sie gehören, abweichen oder besondere Eigenschaften aufweisen [AdV 2013a, S. 207]. Dabei liegt ein Bauteil im Rahmen einer Konsistenzbeziehung stets „innerhalb des Gebäudeumrisses, sofern (...) (es) nicht unterhalb der Erdoberfläche liegt“ (ebd.). Eine wesentliche Information für die hier dargestellte Methode ist dabei die Attributart „Bauart“ (BAT), da sie direkt Einfluss auf die Berechnung der BGF der Gebäude hat. Die folgende Tabelle listet die in ALKIS für Bauteile definierten Bauarten auf und zeigt die für Hamburg auftretende Häufigkeit.

Bauart; Bemerkung zur Nutzung in Hamburg	Kennung	Anzahl	Häufigkeit in %
Geringergeschossiger Gebäudeteil	1100	1.620	16,6 %
Höhergeschossiger Gebäudeteil	1200	31	0,3 %
Hochhausgebäudeteil; <i>wird in Hamburg nicht geführt.</i>	1300	-	-
Abweichende Geschosshöhe; <i>wird in Hamburg nicht geführt.</i>	1400	-	-
Keller	2000	155	1,6 %
Tiefgarage	2100	433	4,4 %
Loggia; <i>wird in Hamburg nicht geführt.</i>	2300	-	-
Wintergarten; <i>wird in Hamburg nicht geführt.</i>	2350	-	-
Arkade	2400	2.051	21 %
Auskragende/zurückspringende Bauteile; <i>dürfen nicht geführt werden. Es ist zwischen 2510 und 2520 zu unterscheiden.</i>	2500		
Auskragende Geschosse	2510	69	0,7 %
Zurückspringende Geschosse	2520	30	0,3 %
Durchfahrt im Gebäude	2610	5.183	53,1 %
Durchfahrt an überbauter Straße	2620	177	1,8 %
Schornstein im Gebäude	2710	7	0,1 %
Turm im Gebäude	2720	0	0 %
Sonstiges; <i>wird in Hamburg nicht geführt.</i>	9999	-	-
Summe		9.756	100 %

Tabelle 4-1: Bauarten von Bauteilen und ihre Prävalenz in Hamburg

Es zeigt sich, dass über 50 % der Bauteile im ALKIS Durchfahrten in Gebäuden sind. Diese sind gemessen an der gesamten BGF des Gebäudes flächenmäßig vernachlässigbar klein. Ebenfalls häufig vertreten sind Arkaden, deren Berücksichtigung flächenmäßig schon bedeutsamer wird, da sie öfter größere Flächen einnehmen. Wichtig im Sinne einer möglichst korrekten Erfassung der BGF der Gebäude ist zudem die Korrektur um Gebäudeanteile mit mehr oder weniger Geschossen (1100 und 1200) bzw. auskragende und zurückspringende Geschosse (2510 und 2520). Der Abschnitt 4.3.3.1 beschreibt daher, wie die Bauarten bei der BGF-Berechnung berücksichtigt werden.

Die AX 30002 enthält neben dem Hinweis auf die Art des Bauteils folgende im Weiteren zur Flächenberechnung wichtige Angaben zu

- AOG: Anzahl der oberirdischen Geschosse (selbsterklärend)
- SHP: Grundfläche des Bauteils in m² (aus dem Umriss (Shape))

Es gibt keine Angaben in der AX 31002 über die Anzahl etwaiger Untergeschosse. Diese müssen bei Bedarf ersatzweise der Angabe in der AX31001 zum zugehörigen Gebäude entnommen werden.

4.1.4 Die Objektart AX11001 „Flurstücke“ und die Gruppierung von Gebäuden zu „Liegenschaften“

Eine weitere wichtige Objektart findet sich unter der Bezeichnung AX 11001 „Flurstück“ im ALKIS. Hier sind die wesentlichen Daten zu Flurstücken festgehalten. Der Objektartenkatalog definiert ein Flurstück dabei als den „Teil der Erdoberfläche, der von einer im Liegenschaftskataster festgelegten Grenzlinie umschlossen und mit einer Nummer bezeichnet ist. Es ist die Buchungseinheit des Liegenschaftskatasters“ [AdV 2013a, S. 43]. Dabei ist ein Flurstück ein geografisch eindeutig festgelegtes Polygon einer definierten Fläche. Flurstücke grenzen lückenlos aneinander. Das bedeutet, dass die gesamte Fläche der Bundesrepublik in überschneidungsfreie Objekte der Objektart „Flurstück“ unterteilt ist.

Eine entscheidende Hilfe ist die Verwendung der Flurstücke bei der Festlegung, ob mehrere Gebäude organisatorisch zusammengehören, da Flurstücke die (kleinste) Buchungseinheit des Liegenschaftskatasters darstellen. Ein „Grundstück“ kann aus mehreren Flurstücken bestehen, aber ein Flurstück kann nicht aus mehreren Grundstücken bestehen. Flurstücke sind stets einem Eigentümer zugeordnet. Da unbewegliche Gegenstände wie Gebäude nach deutschem Recht zu den wesentlichen Bestandteilen eines Grundstücks zählen [BGB §§ 93, 94], gehören sie damit auch einem Eigentümer. Dies ist insofern von entscheidender Relevanz bei der Analyse von DSI-Potenzialen, als es bei einer Realisierung der Potenziale zu einer vertraglichen Regelung mit dem Eigentümer der Gebäude kommen muss. Befinden sich auf einem Grundstück mehrere Gebäude, addiert sich ggf. deren Potenzial zu einem neuen Gesamtpotenzial. Dieser Aspekt ist besonders relevant, da Kontaktaufnahme und Verhandlungen mit einem Eigentümer über die genauere Analyse und ggf. eine sich anschließende spätere Nutzung des vermuteten DSI-Potenzials mit einem Aufwand und damit mit Transaktionskosten verbunden sind. Man wird daher stets geneigt sein, je nach Vermarktungsansatz erst ab einer bestimmten Größenordnung (Grenzleistung) von einer wirtschaftlich interessanten Höhe des DSI-Potenzials zu sprechen. Einzeln betrachtet kann ein Gebäude unter einer solchen Grenzleistung liegen, in einer Gruppe von Gebäuden auf einem Grundstück jedoch ggf. darüber. Es gilt daher, Gebäude, die sich auf einem Flurstück befinden, zusammenfassend zu betrachten. Dafür wird im Folgenden der Begriff der Liegenschaft verwendet. Das Gabler Wirtschaftslexikon definiert eine Liegenschaft im engeren Sinn als „Grundstück mit oder ohne Bebauung, das entsprechend einem Flächennutzungsplan (Bauleitplanung) und ggf. einem kommunalen Bebauungsplan als industriell oder gewerblich zu nutzende Fläche ausgewiesen ist oder faktisch entsprechend genutzt wird“ [Gabler 2013]. Eine Liegenschaft beinhaltet damit alle Gebäude und damit das gesamte DSI-Potenzial dieser Gebäude, die sich auf einem Grundstück befinden. Auch im Rahmen der ABC-Analyse (4.3.1) wird die Leistung des gesamten Flurstücks berücksichtigt.

4.1.5 Verwendete Software ArcMap in Kombination mit der Scriptsprache Python

Zur Darstellung des ALKIS und zur Nutzung sowie Verarbeitung der enthaltenen Daten und Informationen wird die Software ArcGIS der Fa. Esri in der Version 10.2 verwendet. ArcGIS ist ein etabliertes und verbreitetes Softwarepaket zur Geodatenverarbeitung. Kernbestandteil ist das Programm ArcMap, das verschiedene Funktionalitäten zum Umgang und zur Bearbeitung von Geoinformationsdaten bereitstellt. Es dient sowohl der Kartenerstellung als auch der Be- und Verrechnung von Daten aus Geodatenbanken untereinander oder mit externen Zusatzinformationen. Für diese Rechnungen stehen verschiedene Möglichkeiten bereit. So lassen sich Datentabellen direkt

in ArcMap öffnen und manipulieren. Daten daraus lassen sich selektieren und direkt in Karten anzeigen. Ferner besteht die Möglichkeit, eine Reihe von Werkzeugen (Tools für unterschiedliche Anwendungen) für eine große Anzahl unterschiedlicher Standardoperationen individuell zu parametrieren und zu verwenden. Die Werkzeuge lassen sich zudem in einem grafisch organisierten Modellbaufenster anordnen (Modelbuilder), sodass für komplexere Operationen kleinere Modelle gebaut werden können. Auch Schleifen und bedingte Datenabfragen sind darin möglich. Diese Modelle können gespeichert werden und stehen dann als selbstdefinierte Werkzeug-Blackboxen zur erneuten Verwendung zur Verfügung. Eine nachträgliche Anpassung (re-editing) der Modelle ist dann allerdings nicht mehr möglich.

Eine weitere Funktion ist das direkte Einbinden von Algorithmen als Skripte in der Programmierungssprache Python in einen dafür vorgesehenen Python Interpreter (ArcPy) direkt in ArcMap. Diese Möglichkeit gestattet nahezu unbegrenzte Operationen in ArcMap, da mit Python beliebige algorithmische Abläufe verfasst werden können. Alle Tools aus ArcMap lassen sich als Python Code direkt verwenden, Modelle aus dem Modelbuilder in Python-Skripte exportieren. Zudem sind alle weiteren externen Python-Funktionsbibliotheken bzw. -module (Libraries, Modules) direkt anbindbar.

Der weiter unten beschriebene Ablauf zur Abschätzung des DSI-Potenzials ist daher mit Python umgesetzt worden. Dies gestattet es, sowohl den Ablauf als auch die Qualität und Quantität der im Algorithmus verwendeten Daten flexibel und anpassbar zu halten. Verwendete externe Daten werden als einfach zu editierende CSV-Dateien angelegt. Das Skript selbst ist mit jedem Texteditor zu bearbeiten. Es erzeugt als Ergebnis ein Shape File, das direkt in das Layer-Inhaltsverzeichnis von ArcMap geschrieben wird.

Python ist eine Open-Source-Skript-Sprache, die Anfang der 1990er Jahre von Guido van Rossum am Centrum voor Wiskunde en Informatica in Amsterdam entwickelt wurde und aktuell in der Version 3.3 vorliegt [Ernesti & Kaiser 2009, S. 23]. Ein wichtiger Anspruch bestand darin, eine einfache, syntaktisch klar strukturierte und leicht zu lernende Programmiersprache zu entwickeln. Dieses Ziel wurde erfolgreich erreicht, sodass Python heute breite Verwendung findet (Anwender sind u. a. Google, YouTube, NASA, CERN u. v. a.) (ebd., S. 26). Die Rechte an Python hält die Python Foundation, die den Python Interpreter unter einer offenen, eigenen Lizenzform (PSF-Lizenz) veröffentlicht (ebd., S. 25 – das macht Python auch für kommerzielle Anwendungen attraktiv) und hat maßgeblich dazu beigetragen, dass Python (statt vorher VBA) nun die in ArcMap integrierte Skriptsprache darstellt.

Da für die Methode der DSI-Potenzialermittlung eine Reihe von Rechenschritten notwendig sind, für die die Objektarten AX31001 „Gebäude“, AX 31002 „Bauteile“ und AX 11001 „Flurstücke“ und einige Tabellen mit Kennwerten und Faktoren für Flächenumrechnungen benötigt werden, wurde ein Algorithmus entwickelt und in Python umgesetzt, der diese Berechnungen ausführt. Der Algorithmus kann direkt aus ArcPy heraus gestartet werden. Er erzeugt ein Shape File mit den Berechnungsergebnissen, die dann sofort in ArcMap geöffnet und visualisiert werden können.

4.2 Einteilung von Gebäuden nach ihrer Funktion

Für den Energiebedarf von Gebäuden ist die Art ihrer Nutzung bzw. ihre Funktion ausschlaggebend. Diese bedingt, welche Nutzenergien in welchem Umfang und mit welcher Dynamik in einem Gebäude benötigt werden. Folglich ist das Wissen über die Gebäudefunktion für eine Methode zur DSI-Potenzialabschätzung essenziell.

4.2.1 Gebäudefunktion in ALKIS

In ALKIS werden für die Objektart Gebäude in der Attributart „Gebäudefunktion (GFK)“ 220 verschiedene Gebäudefunktionen unterschieden. Jede Nutzung erhält eine vierstellige Kennung. Dabei

gibt die erste Ziffer an, ob es sich um ein privates Gebäude zum Wohnen (Ziffer „1“; bildet Gruppe 1000 „Wohnen allgemein“), ein privatwirtschaftliches Objekt (Ziffer „2“; bildet Gruppe 2000 „Wirtschaft oder Gewerbe allgemein“) oder ein Gebäude für öffentliche Zwecke (Ziffer „3“; bildet Gruppe 3000 „Öffentliche Zwecke“) handelt. Die zweite Ziffer bildet Untergruppen, z. B. 1100 für „Mischnutzung mit Wohnen“, die nur der weiteren Einteilung dienen und zur Kategorisierung nicht verwendet werden sollen [LGV 2011, s. Anlage 1, S. 2 f.]. Die dritte und vierte Ziffer dienen der finalen Kategorisierung der Gebäudefunktion.

So klar diese Kennzeichnung in ihrer Einteilung ist, so ist doch zu bedauern, dass hier eine vom Bauwerkzuordnungskatalog (BWZK, [Arge Benchmark 2010]) abweichende, neue Kennzeichnungssystematik zur Anwendung kommt. Immerhin ist der BWZK ein etabliertes Verzeichnis, das nicht nur bei der Kostenplanung öffentlicher Gebäude Verwendung findet, sondern auch (z. T. mit leichten Anpassungen) von so unterschiedlichen Institutionen wie dem Baukosteninformationszentrum der Deutschen Architektenkammer (BKI), dem Verein Deutscher Ingenieure (VDI) und im Rahmen der Umsetzung der Energieeinsparverordnung benutzt wird (vgl. [BKI 2013], [VDI 3807-2: 1998] und [BMVBS 2009]). Entsprechend ist es relativ üblich geworden, die Klassifizierung des BWZK für Studien und Forschungsprojekte zu verwenden. In ALKIS wurde an dieser Stelle eine Chance zur Bezeichnungsharmonisierung versäumt, was insofern zusätzlich verwundert, da beide Systeme, sowohl der BWZK wie auch das ALKIS, von der öffentlichen Hand geschaffene, zwischen den Ländern harmonisierte und stetig verwendete Register darstellen.

Die Möglichkeiten der Nutzungssystematik werden im ALKIS zudem nicht konsequent umgesetzt. So existiert beispielsweise die Kennung 1210 „Land- und forstwirtschaftliches Wohngebäude“ und es wird deutlich, dass alle weiteren GFK der Gruppe 12xx sowohl mit Land- oder Forstwirtschaft als auch mit Wohnen (weil ja in der Gruppe „1000“) zu tun haben. Gleichwohl fehlt eine Gruppenkennung 1200 „Wohngebäude in Land- und Forstwirtschaft“ [LGV 2011, Anhang 1, S. 1]. An anderer Stelle gibt es eine Gruppenkennung 3100 „Öffentliche Zwecke mit Wohnen“, ohne dass danach eine weitere Differenzierung erfolgt und eigentlich die Maßgabe gilt, dass Kennziffern zweiter Gliederungsebene nicht zur Kategorisierung verwendet werden sollen (ebd.).

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Systematik der GFK-Kennungen bis in ihre dritte Gliederungsebene. Brüche in der Systematik werden darin deutlich. Gebäude sollen eigentlich in die vierte (wegen des Umfangs nicht dargestellte) Ebene eingeordnet werden. Die dritte Gliederungsebene soll zur Einordnung nur Verwendung finden, wenn a) keine weitere Untergliederung (vierte Ebene) vorliegt oder b) die Einordnung in eine der vorgesehenen Unterkategorien der vierten Ebene nicht eindeutig erfolgen kann (ebd., S. 2).

Wert	Bezeichner
1000	Wohnen allgemein
1010	Wohnhaus
1020	Wohnheim
<i>1100</i>	<i>Mischnutzung mit Wohnen (allgemein)</i>
1110	Wohnen mit Gemeinbedarf
1120	Wohnen mit Handel und Dienstleistung
1130	Wohnen mit Gewerbe und Industrie
1210	Land- und forstwirtschaftliches Wohngebäude
1220	Land- und forstwirtschaftliches Wohn- und Betriebsgebäude
1310	Freizeit
2000	Wirtschaft oder Gewerbe (allgemein)
2010	Handel und Dienstleistung
2020	Bürogebäude
2030	Kreditinstitut
2040	Versicherung
2050	Geschäft
2060	Messehalle
2070	Beherbergung
2080	Bewirtung
2090	Freizeit und Vergnügungsstätte
<i>2100</i>	<i>Gewerbe und Industrie (allgemein)</i>
2110	Produktion
2120	Werkstatt
2130	Tankstelle
2140	Vorratshaltung
2150	Spedition
2160	Forschung
2170	Grundstoffgewinnung
2180	Betriebliche Sozialeinrichtung

2200	<i>Sonstige Gebäude für Gewerbe und Industrie</i>
2210	Mühle
2220	Wetterstation
2310	Handel und Dienstleistung mit Wohnen
2320	Gewerbe und Industrie mit Wohnen
2400	<i>Betriebsgebäude zu Verkehrsanlagen (allgemein)</i>
2410	Straßenverkehr
2420	Schienenverkehr
2430	Flugverkehr
2440	Schiffsverkehr
2450	Seilbahn
2460	Parken
2500	<i>Versorgung (allgemein)</i>
2510	Wasserversorgung
2520	Elektrizitätsversorgung
2540	Fernmeldewesen
2560	Oberirdisches Gebäude an unterirdischen Leitungen
2570	Gasversorgung
2580	Heizwerk
2590	Versorgungsanlage
2600	<i>Entsorgung (allgemein)</i>
2610	Abwasserbeseitigung
2620	Abfallbehandlung
2700	<i>Land- und Forstwirtschaft (allgemein)</i>
2720	Land- und Forstwirtschaftliches Betriebsgebäude
2740	Gewächshaus
3000	<i>Öffentliche Zwecke</i>
3010	Verwaltung
3020	Bildung und Forschung
3030	Kultur
3040	Religiöse Zwecke
3050	Gesundheit
3060	Soziale Zwecke

3070	Sicherheit und Ordnung
3080	Friedhof
3090	Empfangsgebäude
3100	Öffentliche Zwecke mit Wohnen
3200	Erholung (allgemein)
3210	Gebäude für Sportzwecke
3220	Badegebäude
3230	Stadion
3240	Kurbetrieb
3260	Gebäude im Zoo
3270	Gebäude im botanischen Garten
3280	Gebäude für andere Erholungseinrichtungen
3290	Touristisches Informationszentrum
9998	Nach Quellenlage nicht zu spezifizieren.

Tabelle 4-2: Systematik der Einteilung der Gebädefunktion in der Objektart AX Gebäude – editiert nach [Anhang 1 in LGV 2011, S. 1 ff.]

Prinzipiell gestattet ALKIS, einem Gebäude eine weitere, zusätzliche Funktion zuzuweisen. Dies erfolgt über das Attribut „Weitere Gebädefunktion (WGF)“. Damit wird eine Funktion bezeichnet, „(...) die ein Gebäude neben der dominierenden Gebädefunktion hat“ [AdV 2013a, S. 199]. Für dieses Attribut sind allerdings nur 25 Kennwerte (= unterschiedliche, weitere Gebädefunktionen) definiert. Dies lässt nur eine begrenzte Konkretisierung der Gebäudenutzung zu. Der Nutzen ist also eingeschränkt.

Anders als das Attribut GFK kann das Attribut WGF mehrere Male auftauchen und so prinzipiell eine beliebige Anzahl von Teilnutzungen erfassen. Über das ebenfalls mehrfach verwendbare Attribut „Nutzung (NTZ)“ werden dann die prozentualen Anteile an der Gesamtnutzung angegeben.

Leider werden in Hamburg die Attribute WGF und NTZ nicht geführt [LGV 2011, S. 5], sodass eine Nutzung dieser Informationen für die Entwicklung der Methodik nicht möglich war. Im Folgenden wird also immer die GFK des Gebäudes als alleinig funktionsbestimmend angenommen. Gebäude mit Mischnutzung (GFK = 11xx oder 3100) werden nicht berücksichtigt. Bei einer Übertragung auf Städte, die die Attribute WGF und NTZ führen, ist hier sinnvollerweise eine neue Subroutine zur Berücksichtigung vorzusehen. Allerdings ist dieses Attribut in der Führung sehr aufwendig, sodass eine Verwendung in anderen Großstädten wenig wahrscheinlich ist.

4.2.2 Der Hamburger Gebäudebestand nach Funktionen – ein Überblick

Das ALKIS beinhaltet für Hamburg 370.705 Gebäude in der Objektart AX 31001 „Gebäude“. Der Objektartenkatalog der AdV definiert ein Gebäude dabei als „(...) dauerhaft errichtetes Bauwerk, dessen Nachweis wegen seiner Bedeutung als Liegenschaft erforderlich ist (...)“ [AdV 2013a, S. 190]. Darunter fallen aber auch Gebäude, die für eine Analyse von Energiebedarfen faktisch keine Bedeutung haben, da sie nicht oder fast nicht mit Nutzenergie versorgt werden. Legt man als Maßstab die Frage an, ob es sich um beheizte oder unbeheizte Gebäude handelt, so findet man etwa 127.000 nicht beheizte Gebäude, was nach Anzahl einem Anteil von etwa 33 % entspricht. Davon machen allein

Garagen mit einer Anzahl von 62.000 knapp die Hälfte aus. Zusammen mit Parkhäusern und Tiefgaragen (beide als eigenständige Gebäude zu verstehen und nicht als Bauteile) macht die Nutzung „Parken“ sogar fast 54 % der nicht beheizten Gebäude Hamburgs aus. Gartenhäuser bilden mit etwa 29 % (37.000 Stück) den zweitgrößten Anteil. Die folgende Grafik gibt einen Überblick über die Verteilung der nicht beheizten Gebäude.

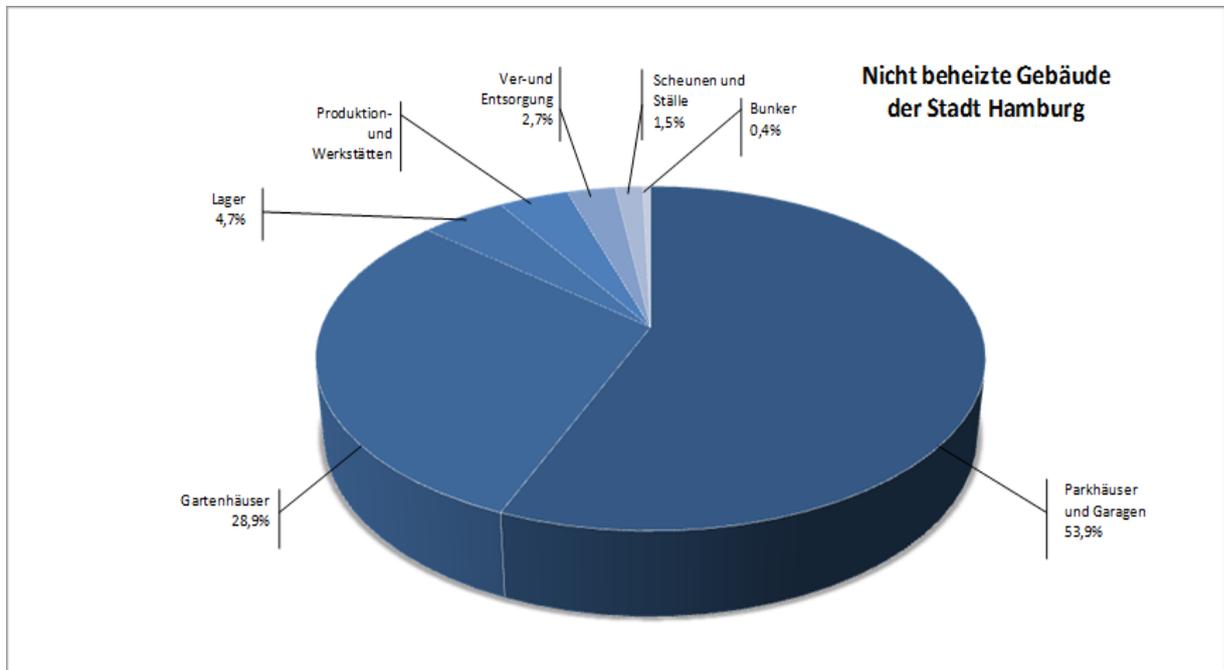


Bild 4-2: Prozentuale Aufteilung der nicht beheizten Gebäude der Freien und Hansestadt Hamburg

Mit etwa 243.000 stellt die Gruppe der beheizten Gebäude etwa 66 % des Gebäudebestands. Für 3.769 Gebäude wird für die Attributart „Gebäudefunktion“ der Wert „9998“ angegeben, was der Bezeichnung „Nach Quellenlage nicht zu identifizieren“ entspricht. Das heißt, dass für etwa 1 % der Gebäude nicht festgelegt werden kann, ob es sich um beheizte oder unbeheizte Gebäude handelt. Es ist allerdings eher davon auszugehen, dass es sich in der Mehrzahl der Fälle um beheizte Gebäude handelt. Dies lässt sich aus folgender Überlegung ableiten: Unbeheizte Gebäude haben im Durchschnitt eine kleinere BGF als beheizte Gebäude. So liegt der Anteil der beheizten Gebäude an der gesamten Brutto-Grundfläche (BGF) bei etwas über 81 %, jener der nicht beheizten Gebäude aber nur noch bei 16 %. Der Flächenanteil der nicht identifizierten Gebäude steigt auf knapp 2,5 %. Es scheint sich also dabei im Regelfall eher um große und damit eher beheizte Gebäude zu handeln. Die folgende Grafik gibt dies wieder.

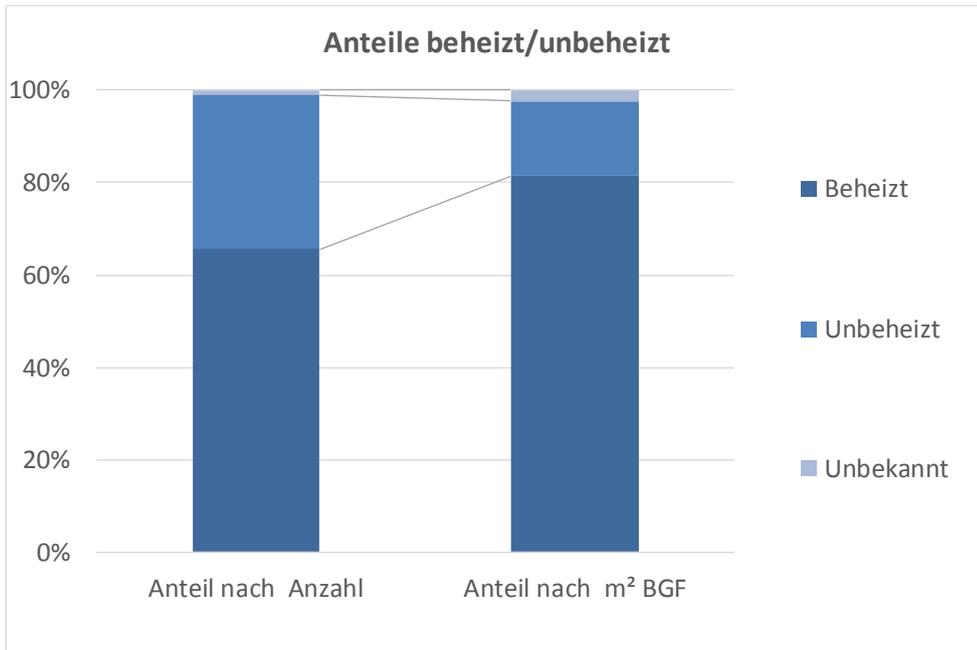


Bild 4-3: Verteilung beheizter und unbeheizter Gebäude nach Anzahl und BGF-Anteil

Die BGF lässt sich in ALKIS relativ leicht grob abschätzen, indem die angegebene Grundfläche des Gebäudes mit der Anzahl der Geschosse multipliziert wird (Summe aus AOG und AUG, vgl. Bild 4-1). Dies berücksichtigt allerdings noch nicht die notwendige Korrektur um den Einfluss von Bauteilen, die in AX 31002 geführt werden (dazu siehe 4.2.5). Um den Aufwand an dieser Stelle zu begrenzen, soll im Folgenden die überschlägige Berechnung der BGF den Ausführungen als ausreichende Grundlage dienen.

Von den beheizten Gebäuden ($n = 243.000$) stellen die Wohngebäude (GFK 1000) mit etwa 218.000 einen Anteil von etwa 90 %. Gebäude der Gruppe Wirtschaft und Gewerbe (GFK 2000) kommen auf einen Anteil von etwa 8 % (19.000 Gebäude) und Gebäude für öffentliche Zwecke (GFK 3000) stellen mit etwa 6.000 Gebäuden rund 2,5 %. Diese Verteilung deckt sich gut mit der vermuteten Verteilung von NWG und Wohngebäuden in Deutschland: Nach den Daten des letzten Zensus von 2011 gibt es in Deutschland etwa 19 Mio. Wohngebäude [Destatis 2013, S. 4]. Die Anzahl beheizter Nichtwohngebäude ist, da diese nicht statistisch erfasst werden, schwieriger abzuschätzen. So taxieren Clausnitzer und Dittrich auf Basis einer Flächenabschätzung von Kleemann die Gesamtzahl beheizter Nichtwohngebäude in Deutschland auf etwa 1,55 Mio. [Clausnitzer & Dittrich 2005, S. 45]. Dirlich und Markfort BMVBS schätzen auf Basis des statistisch erfassten Anlagevermögens den Bestand rund 20 % geringer auf etwa 1,26 Mio. [Dirlich & Markfort 2011, S. 103]. Nichtwohngebäude stellen nach Anzahl also vermutlich zwischen 6 und 8 % des beheizten deutschen Gebäudebestands.

Der Flächenanteil von NWG ist mit etwa 24 % an der gesamten BGF aller beheizten Gebäude in Deutschland aber deutlich größer (Fläche der Wohngebäude nach [Destatis 2013, S. 15] 3,9 Mio. m². Fläche der NWG rund 927.000 m² [Kleemannach Clausnitzer & Dittrich 2005, S. 45 u. 50 f.]). Für Hamburg ergibt sich diesbezüglich eine noch stärkere Verschiebung: Der auf die BGF bezogene Anteil liegt für die NWG bei etwa 35 %. Hier kommt vermutlich der Effekt einer Großstadt zum Tragen, in der eher verdichtet gewohnt wird. Der Wohnflächendurchschnitt pro Kopf liegt eher niedriger, gleichzeitig liegt ein hoher Anteil großer Gebäude des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) vor. Die folgende Grafik gibt die Anteile für Wohn- und Nichtwohngebäude in Hamburg für die GFK-Gruppen 1000 „Wohnen“, 2000 „Wirtschaft und Gewerbe“ und 3000 „Öffentliche Zwecke“ wieder.

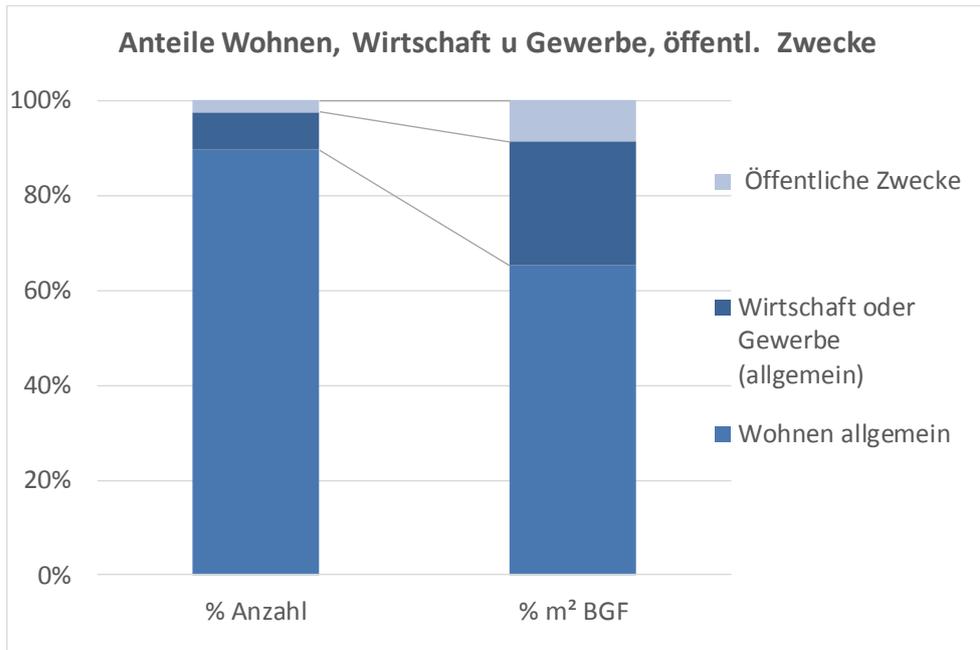


Bild 4-4: Anteile der beheizten Gebäude an den GFK-Schlüsselgruppen 1000 „Wohnen“, 2000 „Wirtschaft und Gewerbe“ und 3000 „Öffentliche Zwecke“

Betrachtet man die Gruppe der Nichtwohngebäude genauer, so lässt sich feststellen, dass den größten Anteil nach Anzahl (ca. 28 %) sowie – und zwar noch erheblich stärker – nach Fläche (41 %) die Gebäude der Gruppe Wirtschaft und Gewerbe (GFK 2000) mit büroähnlicher Nutzung einnehmen. Im Bereich der öffentlichen Gebäude ist die zahlen- und flächenmäßig stärkste Gruppe die der allgemeinbildenden Schulen (10 % bzw. 7 %). Öffentliche Gebäude mit büroähnlicher Nutzung bilden zahlenmäßig zwar nur einen Anteil von unter 1 %, flächenmäßig allerdings von 2,3 %. Hochschulgebäude und Institute stellen weniger als 0,5 % der Gebäude dar, ihr Flächenanteil liegt aber bei knapp 2 % der Fläche aller NWG Hamburgs. Die folgende Tabelle gibt die Anteile für ausgewählte Nutzungen wieder.

GFK	Gebäudefunktion	Anzahl	BGF in m ²	Anteil nach Anzahl an NWG ges.	Anteil nach Fläche BGF an NWG ges.
2010–2040	Büroähnlich	7.053	20.242.188	27,93 %	40,68 %
2050	Verkaufsgebäude	2.238	4.956.007	8,86 %	9,96 %
2070	Beherbergung	430	1.650.602	1,70 %	3,32 %
2080	Bewirtung	940	393.736	3,72 %	0,79 %
2310+2320	GHD mit Wohnen	1.553	2.571.709	6,15 %	5,17 %
Rest 2000		6.954	7.413.610	27,54 %	14,90 %
	Summen	19.168	37.227.852	75,90 %	74,82 %
30xx	Öffentliche Zwecke, Büroähnlich	216	1.166.552	0,86 %	2,34 %
3021	Allgemeinbildende Schulen	2.515	3.356.362	9,96 %	6,75 %
3022	Berufsbildende Schulen	125	494.277	0,49 %	0,99 %
3023 u 24	Hochschulen u. Institute	112	969.796	0,44 %	1,95 %
3100	Öffentliche Zwecke mit Wohnen	148	297.755	0,59 %	0,60 %
3210 u 11	Gebäude für Sport, ohne Schwimmbäder	271	313.938	1,07 %	0,63 %
Rest 3000		2.699	5.931.726	10,69 %	11,92 %
	Summen	6.086	12.530.406	24,10 %	25,18 %

Tabelle 4-3: Häufigkeit und Flächenanteile für ausgesuchte Nutzungen von NWG

4.2.3 Gebäudefunktionen im Projekt „Insel“

Im Projekt „Insel“ wurden 38 Gebäude für eine Integration in das erstellte Modell näher betrachtet, deren Anschlussleistung jeweils größer als 400 kW war. Diese Gebäude dienen als Referenz für andere Gebäude mit im Folgenden betrachteten Gebäudenutzungen (GFK). Dazu wurde die Referenzgruppe zunächst um die Gebäude reduziert, deren Nutzungsart nur ein einziges Mal vorkam bzw. deren Nutzungsart einzigartig war (z. B. Autobahntunnel oder Großmarkt).

Die verbliebenen Gebäude wurden zu Nutzungsgruppen zusammengefasst. Dabei ließen sich eindeutig folgende Gruppierungen bilden:

„Hochschulgebäude/Forschungsinstitute“

„Gebäude mit büroähnlicher Nutzung“

„Theater, Museen, Konzerthäuser“

„Allgemein- und berufsbildende Schulen“

Die folgenden Tabellen liefern jeweils eine Übersicht für die einzelnen Gruppen. Mehrere Gebäude auf einem Flurstück sind dabei zu Liegenschaften zusammengefasst, die Anzahl der Gebäude der Liegenschaft wird angegeben. Im Rahmen des Projekts „Insel“ wurde den Betreibern der Gebäude eine Anonymisierung ihrer Daten zugesichert. Daher werden die Gebäude im Folgenden mit einer Identifikationsnummer (ID) aus dem Projekt „Insel“, ihrer verallgemeinerten Nutzungsart und den in der AX 31001 des ALKIS zugewiesenen GFK genannt.

Folgende Hochschulliegenschaften wurden in „Insel“ untersucht:

ID „Insel“	Nutzungsart	Anzahl Gebäude	GFK in ALKIS	Bezeichnung GFK
01	Hochschul-campus	35	3023	Hochschulgebäude
		2	3024	Forschungsinstitut
06	Hochschul-campus	6	3023	Hochschulgebäude
10	Hochschul-campus	2	3023	Hochschulgebäude
		1	2020	Bürogebäude
16	Hochschul-campus	2	2023	Hochschulgebäude
23	Hochschul-campus	2	3023	Hochschulgebäude
		1	3024	Forschungsinstitut
28	Hochschul-campus	6	3024	Forschungsinstitut
		3	2160	Gebäude für Forschungszwecke
31	Hochschul-campus	9	3023	Hochschulgebäude
		1	2020	Bürogebäude
		1	3034	Museum
38	Forschungs-anstalt des Bundes	5	3024	Forschungsinstitut
		1	3010	Verwaltungsgebäude
Summen		56	3023	Hochschulgebäude
		14	3024	Forschungsinstitut
		3	2160	Gebäude für Forschungszwecke
		1	3010	Verwaltungsgebäude
		2	2020	Bürogebäude
		1	3034	Museum

Tabelle 4-4: Hochschulliegenschaften in „Insel“ und ihre GFK in ALKIS

4 Methode zur DSI-Potenzialabschätzung im Rahmen einer automatisierten Voranalyse unter Verwendung von ALKIS und ArcMap

Folgende Liegenschaften büroähnlicher Nutzung wurden in „Insel“ untersucht:

ID „Insel“	Nutzungsart	Anzahl Gebäude	GFK in ALKIS	Bezeichnung GFK
08	Verwaltungsgebäude der Polizei	1	3071	Polizei
14	Versicherungsgebäude	1	2020	Bürogebäude
17	Verwaltungsgebäude einer Landesbehörde	1	3010	Verwaltungsgebäude
22	Verwaltungsgebäude einer Landesbehörde	3	3010	Verwaltungsgebäude
27	Verwaltungsgebäude einer Landesbehörde	1	3010	Verwaltungsgebäude
29	Verwaltungsgebäude einer Landesbehörde	2	3015	Gericht
		1	3010	Verwaltungsgebäude
32	Verwaltungsgebäude einer Anstalt öfftl. Rechts	1	2020	Bürogebäude
35	Bezirksamt	1	3012	Rathaus
37	Gebäude der Stadtreinigung	5	2020	Bürogebäude
		1	2010	Gebäude für Handel & Dienstleistung
39	Verwaltungsgebäude der Landesregierung	1	3010	Verwaltungsgebäude
		1	3012	Rathaus
43	Verwaltungsgebäude einer Landesbehörde	1	2020	Bürogebäude
	Summen	7	3010	Verwaltungsgebäude
		8	2020	Bürogebäude
		2	3012	Rathaus
		2	3015	Gericht
		1	3017	Polizei
		1	2010	Gebäude für Handel & Dienstleistung

Tabelle 4-5: Gebäude büroähnlicher Nutzung in „Insel“ und ihre GFK in ALKIS

Folgende Liegenschaften der Nutzungsgruppe „Theater, Museen, Konzerthäuser“ wurden in „Insel“ untersucht:

ID „Insel“	Nutzungsart	Anzahl Gebäude	GFK in ALKIS	Bezeichnung GFK
11	Museum	2	3034	Museum
18	Konzerthaus	1	3034	Theater, Oper
24	Theater	1	3032	Theater, Oper
33	Konzerthaus	1	3033	Konzertgebäude
53	Theater	1	3032	Theater, Oper
	Summen	2	3034	Museum
		3	3032	Theater, Oper
		1	3033	Konzertgebäude

Tabelle 4-6: Theater, Museen, Konzerthäuser in „Insel“ und ihre GFK in ALKIS

Folgende Liegenschaften aus der Gruppe „Allgemein- und berufsbildende Schulen“ wurden in „Insel“ untersucht:

ID „Insel“	Nutzungsart	Anzahl Gebäude	GFK in ALKIS	Bezeichnung GFK
15	Gesamtschule	3	3021	Allgemeinbildende Schule
21	Gesamtschule	4	3021	Allgemeinbildende Schule
		1	3022	Berufsbildende Schule
22	Berufsschule	4	3022	Berufsbildende Schule
		2	3211	Sport-, Turnhalle
34	Berufsschule	3	3021	Allgemeinbildende Schule
		1	3022	Berufsbildende Schule
	Summen	10	3021	Allgemeinbildende Schule
		6	3022	Berufsbildende Schule
		2	3211	Sport-, Turnhalle

Tabelle 4-7: Allgemein- und berufsbildende Schulen in „Insel“ und ihre GFK in ALKIS

4.2.4 Eingrenzung des Datenrahmens: Berücksichtigte Gebäudefunktionen aus ALKIS

Aus den in „Insel“ vorkommenden Nutzungen werden die GFK des ALKIS für gleiche oder ähnliche Nutzungen abgeleitet, sodass ähnliche Energiebedarfe angenommen werden können. Nur diese werden im Folgenden weiter betrachtet, da die entwickelte Methodik anschließend validiert werden soll. Die nächsten Tabellen listen dafür die GFK des ALKIS auf, die im Folgenden weiter betrachtet werden sollen. Auf Basis des Vorkommens in „Insel“ finden folgende GFK Berücksichtigung in der weiteren Methodenentwicklung:

4 Methode zur DSI-Potenzialabschätzung im Rahmen einer automatisierten Voranalyse unter Verwendung von ALKIS und ArcMap

- „Hochschulgebäude/Forschungsinstitute“

GFK	Bezeichnung	Anzahl im ALKIS für HH	Anzahl in „Insel“
Aus der Gruppe 2000 Gebäude für Wirtschaft und Gewerbe			
2160	Gebäude für Forschungszwecke	7	3
Aus der Gruppe 3000 Gebäude für öffentliche Zwecke			
3020	Gebäude für Bildung und Forschung	16	0
3023	Hochschulgebäude	112	56
3024	Forschungsinstitut	29	14
	Summen	157	73 (44,5 %)

Tabelle 4-8: Betrachtete GFK aus der Gruppe „Hochschulgebäude/Forschungsinstitute“ und ihre Häufigkeit im ALKIS und im FP „Insel“

- „Gebäude mit büroähnlicher Nutzung“

Die Anzahl der betrachteten GFK wird für diese Gruppe um die Nutzungen „Kreditinstitut“ und „Versicherung“ sowie „Parlament“, „Zollamt“, „Kreisverwaltung“, „Bezirksregierung“ und „Finanzamt“ erweitert. Für diese wird eine hinreichend büroähnliche Nutzung unterstellt, die sich nicht wesentlich von den in „Insel“ aufgetretenen anderen GFK büroähnlicher Nutzung unterscheidet.

GFK	Bezeichnung	Anzahl im ALKIS für HH	Anzahl in „Insel“
Aus der Gruppe 2000			
Gebäude für Wirtschaft und Gewerbe			
2010	Gebäude für Handel und Dienstleistungen	747	1
2020	Bürogebäude	6.054	10
2030	Kreditinstitut	157	0
2040	Versicherung	95	0
Aus der Gruppe 3000			
Gebäude für öffentliche Zwecke			
3010	Verwaltungsgebäude	50	7
3011	Parlament	0	0
3012	Rathaus	29	2
3014	Zollamt	17	0
3015	Gericht	19	2
3017	Kreisverwaltung	1	0
3018	Bezirksregierung	0	0
3019	Finanzamt	6	0
3071	Polizei	57	1
	Summen	7.232	23 (0,32 %)

Tabelle 4-9: Betrachtete GFK aus der Gruppe „Gebäude büroähnlicher Nutzung“ und ihre Häufigkeit im ALKIS und im FP „Insel“

Allgemein- und berufsbildende Schulen werden im Folgenden nicht weiter betrachtet, da die Prävalenz von Lüftungs- und Kälteanlagen in diesen sehr gering ist. Dazu sei insbesondere auch auf Dirlich & Markfort [2011, S. 38] verwiesen, die in ihrer Typologie zum NWG-Bestand die Prävalenz von Lüftungsgeräten in Schulgebäuden mit „sehr selten“ und die von Kälteanlagen mit „gar nicht“ angeben. Im Rahmen des FP „Insel“ waren zwar je zwei Gesamtschulzentren und zwei Berufsschulzentren in der Gruppe der Liegenschaften mit einer Leistungsspitze von mehr als 400 kW vertreten. Jedoch dürfen diese durchaus schon aufgrund ihrer Größe eher als Ausnahmen betrachtet werden.

Gute Potenziale bieten auch die in „Insel“ untersuchten Museen und Konzerthäuser. Auch diese werden nachfolgend jedoch nicht weiter betrachtet. Der Grund liegt in ihrer starken Heterogenität. Museen haben bedingt durch die in ihnen ausgestellten Exponate sehr unterschiedliche Konditionierungsbedarfe. Eine Verallgemeinerung ist daher schwer möglich und soll im Rahmen der Methodenentwicklung zunächst unterbleiben. Für Konzerthäuser und Theater gilt, dass die Höhe der installierten Leistung für den reinen Zuschauerbereich mit etwas Aufwand zwar abgeschätzt werden könnte. Der entstehende Fehler zum Potenzial der Gesamtgebäude wäre aber vermutlich hoch, da die Nutzung von Werkstätten und Probestüben, die in den Häusern erheblich sein kann, unberücksichtigt

4 Methode zur DSI-Potenzialabschätzung im Rahmen einer automatisierten Voranalyse unter Verwendung von ALKIS und ArcMap

bliebe. Eine Zuordnung solch energiebedarfsbestimmender Teilnutzungen ist aber nicht pauschal möglich, da Konzerthäuser und Theater sich sehr häufig in historischen Gebäuden befinden, deren Raumangebot durch die historisch gegebene Situation bestimmt wird und individuell sehr unterschiedlich einzuschätzen ist [Neufert & Kister 2012]. Konzerthäuser und Theater sollen daher im Rahmen dieser Arbeit zunächst als individuell zu begutachtende Gebäude definiert sein.

Im Rahmen der weiteren Entwicklung der Methodik reduziert sich damit der betrachtete Gebäudebestand von rund 25.000 beheizten NWG insgesamt (s. o.) auf

- 157 Gebäude aus vier GFK der Gruppe „Hochschulgebäude/Forschungsinstitute“ und
- 7.232 Gebäude aus 13 GFK der Gruppe „Gebäude mit büroähnlicher Nutzung“.

Die folgenden Grafiken verdeutlichen die Mengen- und Flächenanteile der ausgewählten GFK an der ausgewählten Teilmenge der beheizten NWG Hamburgs.

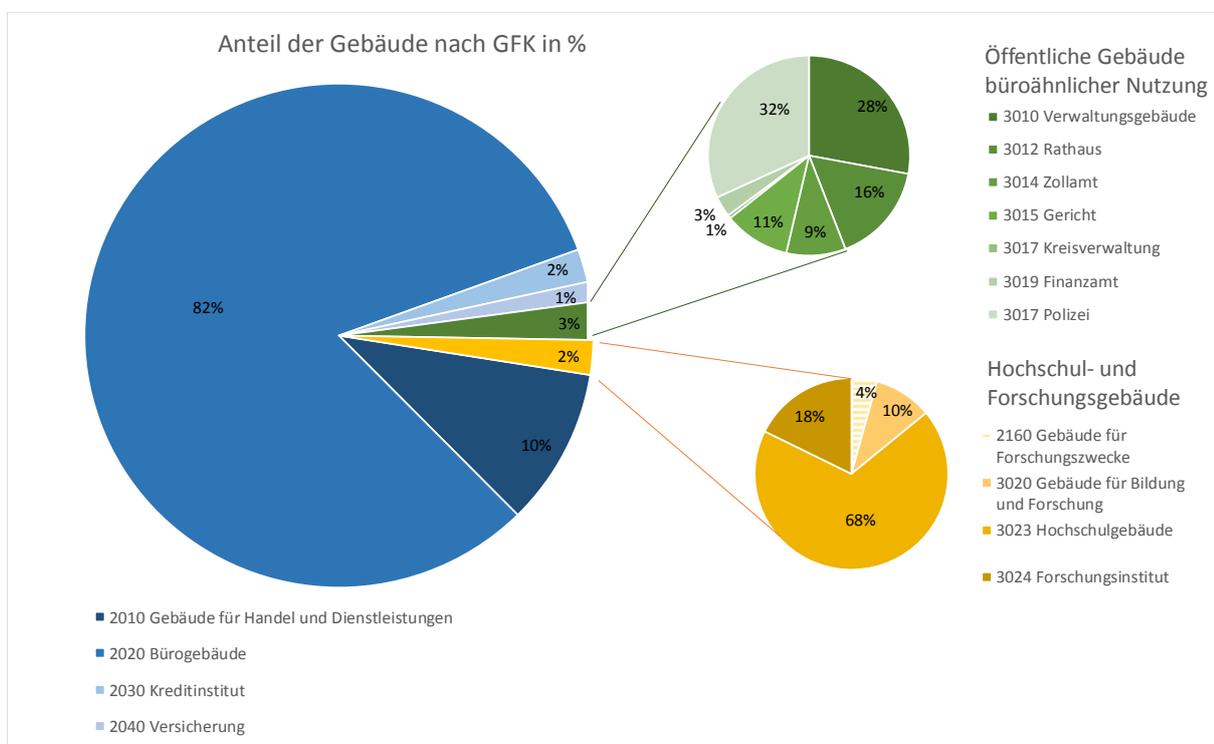


Bild 4-5: Relative Anteile der Gebäude pro GFK an der Gesamtmenge der selektierten Gebäude

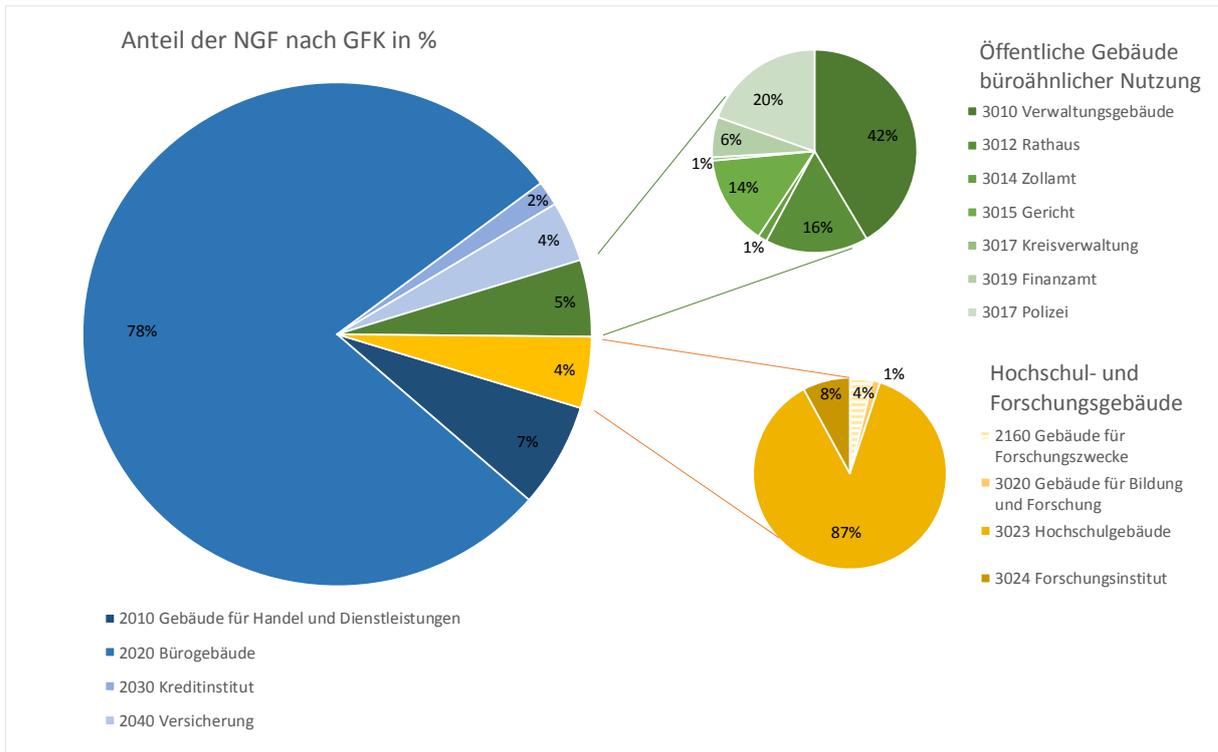


Bild 4-6: Relative Anteile der aufsummierten NGF pro GFK an der Gesamtmenge der NGF der selektierten Gebäude

Es zeigt sich, dass einige GFK offensichtlich eher überdurchschnittlich große Gebäude beinhalten (z. B. Versicherungen (2040), Verwaltungsgebäude (3010), Hochschulgebäude (3023)) und andere eher kleinere (Gebäude Handel & Dienstleistung (2010), Zollämter (3014) oder Forschungsinstitute (3024)).

Mit der selektierten Gebäudeauswahl deckt die weitere Untersuchung knapp 30 % des NWG-Bestands bzw. 45 % der Fläche der NWG der Stadt Hamburg ab (und damit auch etwa 0,5 % des bundesdeutschen NWG-Bestands).

Da im Folgenden mit unterschiedlichen Energiekennwerten operiert werden soll, folgen nun zunächst Erläuterungen zur Verwendung funktionsbezogener Energiekennzahlen bei der Abschätzung von Energiebedarfen von NWG.

4.2.5 Funktionsbezogene Kennwerte zur Abschätzung des Energiebedarfs von Nichtwohngebäuden

Der Energiebedarf von Gebäuden wird entscheidend geprägt von der Art ihrer Nutzung. Eine erste prinzipielle Unterscheidung wird daher nach der Frage getroffen, ob ein Gebäude zu Wohnzwecken verwendet wird oder nicht (Wohngebäude vs. Nicht-Wohngebäude). Zwar stellen Wohngebäude zahlenmäßig und nach der BGF den größten Anteil am Gebäudebestand (vgl. Kapitel 4.2.2). Dies ändert sich jedoch, betrachtet man die energetische Relevanz der Gebäude. So wird der Heizenergiebedarf des tertiären Sektors (Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD)) vom BMWI für 2011 mit 1.355 PJ angegeben. Dies allein ist nur geringfügig niedriger als der Heizenergiebedarf aller Wohngebäude, der für dasselbe Jahr vom BMWI mit 1.444 PJ angegeben wird. Der Anteil der NWG am Strombedarf ist noch höher: Im Sektor GHD lag er für 2011 mit rund 500 PJ beim 1,8-Fachen des für Wohngebäude ermittelten Werts, der mit 278 PJ angegeben wird.

Anders als bei Wohngebäuden ist mit der Festlegung „Nichtwohngebäude“ (NWG) die Funktion eines Gebäudes aber noch nicht abschließend geklärt. Gut ersichtlich wird dies bereits an der obigen Tabelle zu den Kennungen für die in ALKIS verwendete Gebädefunktion: Von den 220 verschiedenen Funktionen bezeichnen nur sechs reine Wohngebäude (Kennung 1000 bis 1025), die restlichen kategorisieren NWG.

Die Art der Gebädefunktion ist aber bestimmend für den Energiebedarf eines Gebäudes. Dies gilt sowohl für den Heizwärmebedarf (und die Frage nach internen Wärmegewinnen aus in den Gebäuden betriebenen Geräten) als auch noch stärker für den Strombedarf, der sich durch die installierte Gebäudetechnik ergibt (Licht, Raumluftechnik, Kälteanlagen, Hilfsenergien für Pumpen etc., Bürotechnik und ggf. Geräte und Maschinen zur Produktion von Waren und Gütern). Entsprechend werden für eine Abschätzung des Energiebedarfs von NWG je nach Gebädefunktion spezifische Energiekennwerte herangezogen. Für Energiekennwerte gilt die allgemeine Darstellung

$$\text{Energiekennwert} = \frac{\text{Energieaufwand}}{\text{Bezugsgröße} * \text{Bezugszeitraum}} \quad \text{Formel 4-1}$$

Wobei die Bezugsgrößen i. d. R. Flächenangaben sind (BGF, NGF, NF etc.), aber insbesondere bei NWG auch andere Bezüge auftreten können (Personen, Menge Güterproduktion etc.). Die Bezugszeiträume variieren, sind i. d. R. aber längerfristig (Monat oder Jahr).

Auf das Gesamtgebäude bezogene Energiekennwerte werden „Gesamtenergiekennwerte“ genannt (enob Quelle S. 12). Diesen gegenüber stehen „Teilenergiekennwerte“, die für z. B. einzelne Gebäudezonen und/oder Nutzenergien (z. B. „Elektrische Energie für Lüftung“ o. Ä.) angegeben werden (ebd.). Mit Teilenergiekennwerten wird im Abschnitt 4.4 zur Abschätzung der installierten Leistung aus Lüftung und Klimakälte gearbeitet.

Unterschieden werden zudem Bedarfs- und Verbrauchskennwerte: Verbrauchskennwerte entstehen durch die Auswertung real gemessener Energieverbräuche der Gebäude; Bedarfskennwerte ergeben sich aus theoretischen Berechnungen, um Energiebedarfe abzuschätzen. Die DIN 15603 unterscheidet in diesem Zusammenhang noch „genormte“ Bedarfskennwerte (auf Basis genormter, verallgemeinerter Randbedingungen) für die Erstellung öffentlich rechtlicher Nachweise (z. B. Energiebedarfsausweis nach EnEV) von „individualisierten“ Energiebedarfskennwerten mit individuellen (= für das Gebäude spezifisch ermittelten) Randbedingungen [DIN EN 15603: 2013, S. 25].

Neben der Gebädefunktion sind weitere wichtige Typologisierungsmarkkmale für Gebäude die Gebäudegröße und die Baualtersklasse. Eine Einordnung nach diesen beiden Merkmalen existiert zwar seit den 1990er Jahren für Wohngebäude, für NWG gibt es sie jedoch noch nicht. Das Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) in Darmstadt erarbeitet zurzeit im Forschungsprojekt „Typologiegestützte Analyseinstrumente für die energetische Bewertung bestehender Nichtwohngebäude“ eine solche Typologie [IWU 2013b]. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit lagen daraus jedoch noch keine nutzbaren Ergebnisse vor. Ein erster Versuch einer solchen Typologisierung von NWG unter Berücksichtigung der Baualtersklasse, jedoch leider nicht der Gebäudegröße, findet sich in [Dirlich & Markfort 2011].

Sowohl Gesamt- als auch Teilenergiekennzahlen werden im Folgenden verwendet, um zu Aussagen über das DSI-Potenzial der betrachteten Hamburger NWG zu gelangen. Dabei wird zunächst (Abschnitt 4.3.2) mithilfe von Gesamtenergiekennzahlen eine ABC-Analyse des NWG-Bestands durchgeführt, um die Gebäude zu identifizieren, in denen mit einer gewissen Sicherheit ein DSI-Potenzial vermutet werden kann.

Darauf aufbauend wird dann mit Teilenergiekennwerten die Höhe des vermuteten Potenzials aus Lüftungs- und Kälteanlagen abgeschätzt (in Abschnitt 4.4).

4.3 Qualitative Abschätzung der Wahrscheinlichkeit für ein DSI-Potenzial aus Lüftungs- und Kälteanlagen in den Gebäuden

Dieser Abschnitt beschreibt den ersten Teil der Methodik zur DSI-Potenzialabschätzung, der dazu dient, aus der Summe der NWG des Bestands in ALKIS diejenigen Gebäude herauszufiltern, in denen ein nennenswertes DSI-Potenzial aus Lüftungs- und Kälteanlagen (LuK) vermutet werden darf. Dies erfolgt anhand einer ABC-Analyse. Diese Einteilung ist nötig, weil NWG nicht per se mit Lüftungs- und Kälteanlagen ausgestattet sind. Diejenigen Gebäude, für die das Vorhandensein von Lüftungs- und Kälteanlagen einer relevanten Größenordnung angenommen werden kann, gilt es daher möglichst sicher zu identifizieren. Dazu stehen aber im Rahmen der hier entwickelten Voranalyse nur die in ALKIS verfügbaren Daten zur Gebäudegeometrie und -nutzung sowie Energiekennwerte aus der vorhandenen Literatur zur Verfügung. Daher wird in diesem Abschnitt ein Verfahren vorgeschlagen, anhand dessen mit hinreichender Sicherheit auf das Vorhandensein von DSI-Potenzialen aus Lüftungs- und Kälteanlagen in interessanter Größenordnung geschlossen werden kann. Grundlage dafür ist eine ABC-Analyse auf Basis der Größenverteilung der Gebäude.

4.3.1 Analyse der Größenverteilung der selektierten Gebäude

Lüftungs- und Kälteanlagen dienen der Herstellung eines Innenraumklimas, das von den Gebäudenutzern als behaglich empfunden wird. Die Größe der zu konditionierenden Luftmenge ist dabei (neben anderen gebäudenutzungsabhängigen Parametern) vom Innenraumvolumen V_i abhängig. Da sich V_i in Abhängigkeit der Gebäudegrundfläche und der Raumhöhe ergibt, ist auch der Aufwand zur Konditionierung der Raumluft direkt von der zu konditionierenden Nutzfläche (bzw. der Nettogrundfläche) abhängig. Entsprechend finden sich Teilenergiekennwerte zur Belüftung und Kühlung von Gebäuden in der [VDI 3807-4: 2008] als installierte Leistung P mit Bezug zur konditionierten Teilfläche in m^2 Nutzfläche.

Durch diese Abhängigkeit ergibt sich eine direkte Beziehung zwischen Gebäudegröße und Höhe der installierten Leistung der LuK. Wird die Größenverteilung der Gebäude in ALKIS analysiert, ergibt sich daraus bereits eine gute qualitative Näherung an die Verteilung der Höhe der installierten Leistung aus LuK. Diese ist zusätzlich abhängig von der Art der Nutzung des Gebäudes und dem Flächenanteil der jeweiligen konditionierten Flächen an der BGF des Gebäudes. Diese beiden Abhängigkeiten werden im Abschnitt 4.4 näher betrachtet. Im Folgenden wird zunächst die Abhängigkeit von der Gebäudegröße diskutiert.

Bei Betrachtung der Größenverteilung der Gebäude in ALKIS wird deutlich, dass sie eine ausgeprägte Pareto-Verteilung darstellt. Diese Art der Verteilung ist nach dem italienischen Ökonomen Vilfredo Pareto (1848–1923) benannt, der sie für die Beschreibung der Einkommensverteilung in Italien fand. Er beschrieb, dass die Anzahl der Einwohner mit einem Einkommen größer dem Schwellenwert x näherungsweise zu finden ist mit C/x^k , wobei k üblicherweise für die meisten Länder bei etwa 1,5 liegt (C bildet soziodemografische Konstanten ab) [Dekking 2005, S. 63]. Andere Beispiele für Pareto-Verteilungen sind das Eintreten von Versicherungsfällen und auch die Größenverteilung von Städten (bezogen auf die Einwohnerzahl). In Pareto-Verteilungen findet sich stets ein x_{min} , für das die Verteilungsdichte maximal wird. Mit größer werdendem x nimmt die Wahrscheinlichkeit exponentiell ab. Je größer k , desto steiler der Abfall. Die Verteilungsfunktion für Pareto-Verteilungen ist mathematisch definiert als

$$f(x) = \frac{k}{x_{min}} \left(\frac{x_{min}}{x}\right)^{k+1} \text{ für } x \geq x_{min}$$

Formel 4-2

und wird geschrieben als $Par(k, x_{min})$.

Die Summenverteilung ergibt sich dann durch Integration als

$$F(x) = \int_{x_{min}}^x \frac{k}{x_{min}} \left(\frac{x_{min}}{x}\right)^{k+1} = 1 - \left(\frac{x_{min}}{x}\right)^k.$$

Formel 4-3

Für die Größenverteilung der aus ALKIS zur DSI-Potenzialbestimmung selektierten Gebäude ergibt sich die folgende Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der Gebäudegröße (Bezug ist m² NGF, Klassenbreiten in 1.000er-Schritten, $x_{min} = 5 \text{ m}^2$).

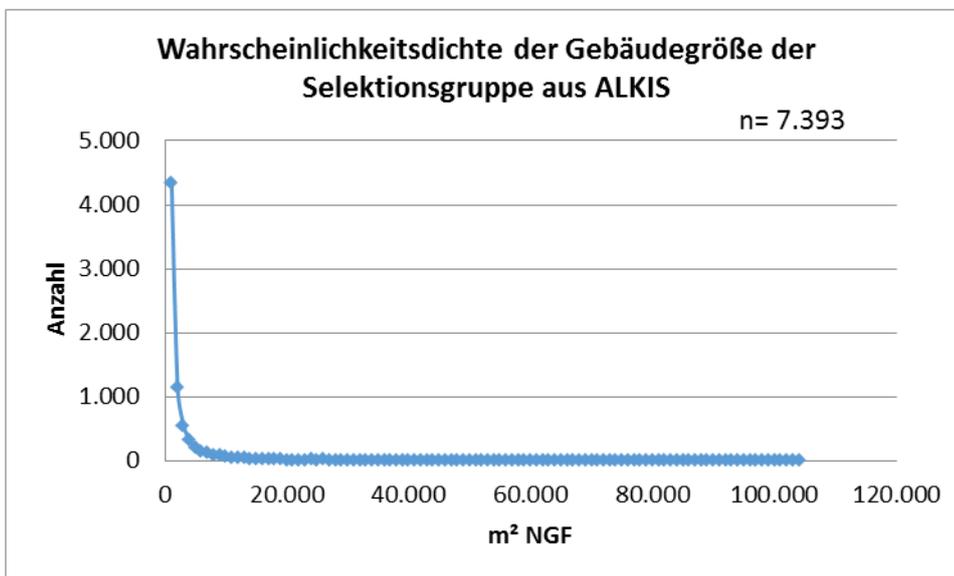


Bild 4-7: Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung nach Gebäudegröße mit Bezug auf NGF

Durch doppelt-logarithmische Darstellung (log-log plot) lässt sich erkennen, ob eine Pareto-Verteilung vorliegt, da es sich dabei prinzipiell um eine Sonderform der Exponentialverteilung handelt und sich sowohl die Verteilungsdichtefunktion als auch die Summenverteilung nach doppeltem Logarithmieren als Geraden mit negativer Steigung darstellen lassen. Für $f(x)$ gilt für die Steigung $b = -(k + 1)$, für $F(x)$ gilt $b = -k$.

Die folgende Grafik zeigt den log-log plot für die Wahrscheinlichkeitsdichte der aus ALKIS selektierten Gebäude (für $x > 1.000$). k ergibt sich näherungsweise zu 0,957.

4.3 Qualitative Abschätzung der Wahrscheinlichkeit für ein DSI-Potenzial aus Lüftungs- und Kälteanlagen in den Gebäuden

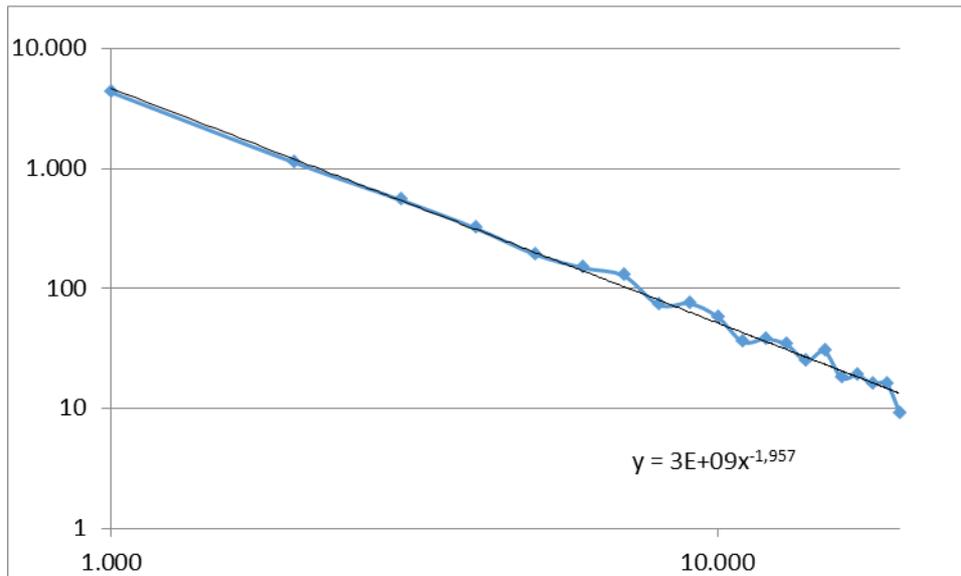


Bild 4-8: Log-log-Plot für die Wahrscheinlichkeitsdichte der aus ALKIS selektierten Gebäude

Das Ergebnis lässt den Schluss zu, dass nicht nur die Größe von Städten – gemessen an deren Einwohnerzahl – eine Pareto-Verteilung darstellt, sondern auch die Größe von Gebäuden in einer Stadt – gemessen an deren Flächen (pro Gebäude) – auf diese Weise verteilt ist.

In diesem Fall und unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die Höhe der installierten Leistung aus LuK, wie oben argumentiert, mit der Gebäudegröße weitgehend linear korreliert, bedeutet dies, dass auch die installierte Leistung aus LuK in einer Stadt mindestens näherungsweise Pareto- bzw. allgemein exponentiell verteilt ist. Es gibt dann in der Konsequenz eine verhältnismäßig kleine Anzahl von Gebäuden, in denen ein Großteil des DSI-Potenzials aus LuK zu finden ist (Paretos 20/80-Regel, s. u.). Zur Identifizierung der Gebäude mit hohem DSI-Potenzial eignet sich dann eine ABC-Analyse.

4.3.2 ABC-Analyse zur qualitativen Abschätzung der Wahrscheinlichkeit von DSI-Potenzialen

In den Wirtschaftswissenschaften ist die Methodik der ABC-Analyse im engeren Sinne eine 1951 zuerst von H. F. Dickie durchgeführte Umsetzung des Prinzips der Pareto-Verteilung auf den Zusammenhang zwischen Kundenanzahl und Umsatz pro Kunde (Umsetzung der 20/80-Regel: 20 % der Kunden bringen 80 % des Umsatzes) [Guo 2013, S. 7 f.]. In einer ABC-Analyse geben die Kategorien A, B und C drei definierte Klassenbreiten der Summenverteilung an. Danach sind bei einer Pareto-Verteilung in der Klasse A die X % einer Menge, die 50 % eines Effekts oder Zielwerts erreichen, B die 20 – X %, die die folgenden 30 % (in Summe dann 80 %) eines Zielwerts erreichen, und C die verbleibenden 80 %, die nur für die letzten 20 % der Zielerreichung stehen. Eine strenge Festlegung dieser 20/80-Regel zur ABC-Einteilung macht in der Praxis selten Sinn, da die Prämisse, mit 20 % einer Menge 80 % der Zielerreichung zu realisieren, vom Exponenten k der gegebenen (Pareto-)Verteilung abhängig ist. Insofern wird bei ABC-Analysen die Klasseneinteilung in die Kategorien A, B und C gewöhnlich frei(er) gehandhabt.

Die folgende Grafik zeigt die Summenverteilungskurve der NGF der selektierten Gebäudegruppe aus ALKIS. Für diese Verteilung gilt, dass die NGF der 462 größten selektierten Gebäude etwa 50 % der gesamten NGF der selektierten Gebäude entspricht. Das sind 6,25 % der insgesamt 7.389 selektierten

Gebäude¹⁸. Die 1.703 größten Gebäude stellen 23 % der Gesamtanzahl und machen zusammen 80 % der gesamten NGF aus. Dies entspricht näherungsweise der theoretischen 20/80-Regel.

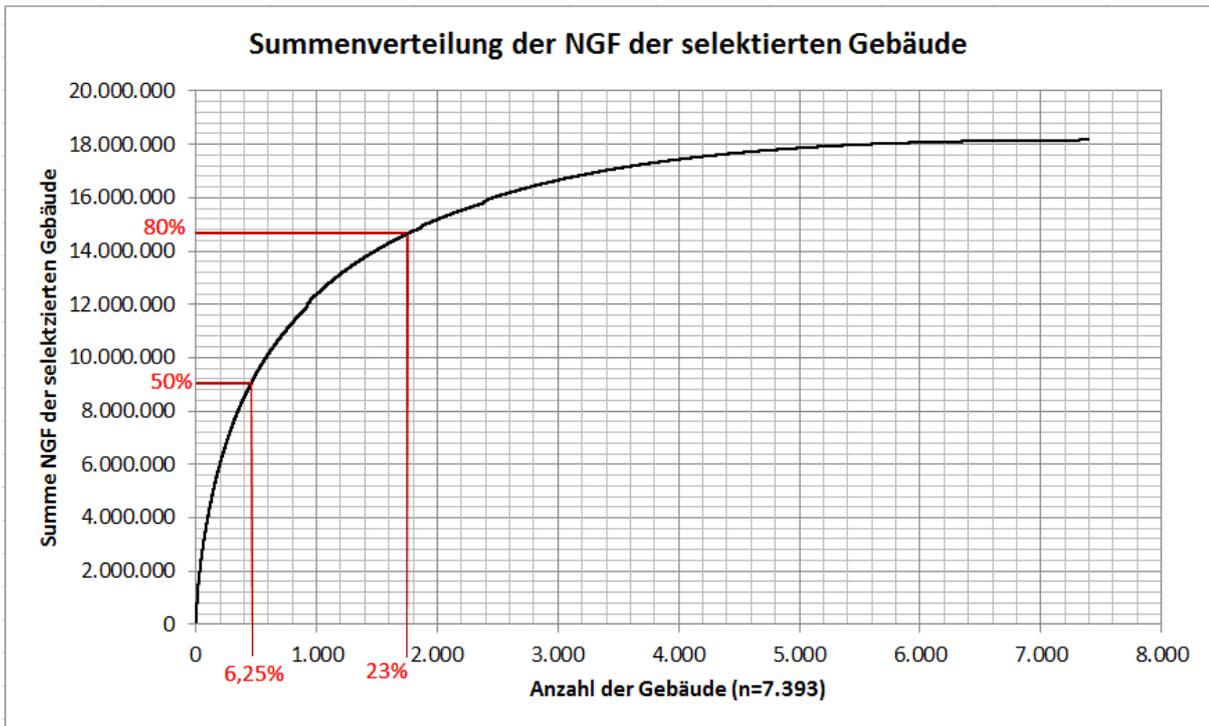


Bild 4-9: Summenverteilung der NGF der selektierten Gebäude

Cordts definiert die ABC-Analyse als Methode „(...) zur Bestimmung von Schwerpunkten bei Planungen und Untersuchungen (...). Sie ermöglicht es, das Wesentliche vom Unwesentlichen zu trennen und somit die Aufmerksamkeit und die Aktivitäten auf die Bereiche und Positionen mit hoher wirtschaftlicher Bedeutung zu konzentrieren“ [Cordts 1992, S. 2]. Entsprechend soll die Methode hier Verwendung finden.

Bei den Bemühungen, aus der Gruppe der auf Basis ihrer Nutzung selektierten Gebäude „das Wesentliche vom Unwesentlichen zu trennen“, ist zunächst festzustellen, dass es eine Korrelation gibt zwischen Gebäudegröße und Komplexität der technischen Gebäudeausrüstung und damit dem Vorhandensein von LuK. Eine Auswertung von Daten des Baukosteninformationszentrums deutscher Architektenkammern [BKI 2013] führt zu einer Grafik, die den Zusammenhang zwischen Gebäudegröße und technischer Komplexität gut zeigt. Diese Grafik wird auf Basis der Größenverteilung der in [BKI 2013] gelisteten Bürogebäude erstellt, sortiert nach dem technischen Standard, dem sie zugeordnet werden. Die Grafik stellt die Verteilungen für die drei Kategorien „einfacher Standard“, „mittlerer Standard“ und „hoher Standard“ dar (n = 120).

¹⁸ In Summe weist das ALKIS für Hamburg 7.393 Gebäude büroähnlicher Nutzung und Hochschulgebäude aus. In vier Fällen konnte jedoch keine valide Gebäudefläche errechnet werden. Durch nicht sinnvolle Angaben sind in diesen Fällen negative Gesamtflächen errechnet worden. In Konsequenz wurden diese vier Gebäude nicht in die Auswertung aufgenommen. Die Grundgesamtheit von 7.393 Gebäuden reduziert sich also auf 7.389 ausgewertete Gebäude.

4.3 Qualitative Abschätzung der Wahrscheinlichkeit für ein DSI-Potenzial aus Lüftungs- und Kälteanlagen in den Gebäuden

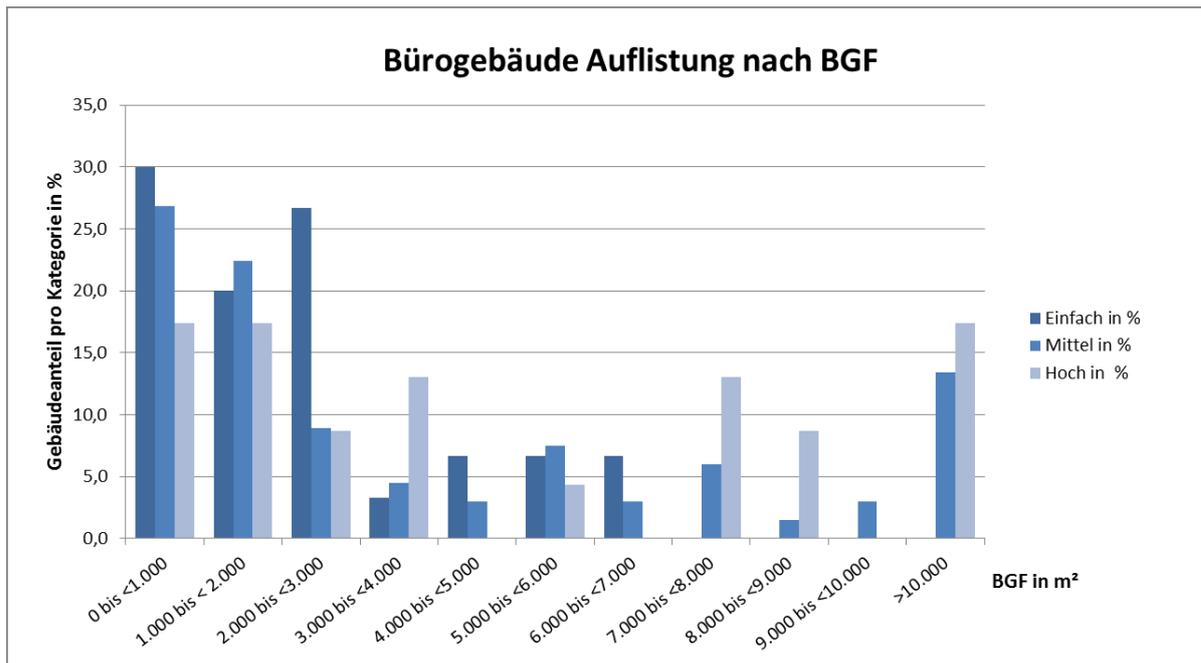


Bild 4-10: Größenverteilung von Bürogebäuden nach Ausstattungsstandard

Es zeigt sich, dass oberhalb einer Grenze von 7.000 m² BGF keine Gebäude mit einfachem Standard aufgeführt sind. Gebäude mit hohem Standard finden sich jedoch über das gesamte Größenspektrum verteilt. In Gebäuden mit „einfachem Standard“ ist der Anteil belüfteter und gekühlter Nutzfläche sehr gering bzw. gleich null [BKI 2013, S. 89]. Lediglich in den Gebäuden mittleren und hohen Standards finden sich größere gelüftete und gekühlte Flächenanteile [BKI 2013, S. 99 und 111 f.].

Auf Basis dieser Grundlage wäre eine schnelle Selektion über die Gebäudegröße denkbar. Gebäude jenseits von 7.000 m² BGF verfügen demnach über ein gesichertes Vorhandensein einer signifikanten Menge an LuK-Anlagen.

Für kleine Gebäude lässt sich aber keine Grenze für das Nicht-Vorhandensein von LuK-Anlagen angeben!

Nun ist 7.000 m² BGF für Bürogebäude nicht klein – nur rund 10 % der selektierten Gebäude sind größer als 7.000 m². Will man nach dem Ansatz der 20/80-Regel, die nach der Arbeitshypothese Gültigkeit haben soll, 20 % der selektierten Gebäudeflächen berücksichtigen, liegt die Grenze der zu berücksichtigenden Gebäudegröße im Bereich von 3.500 m². In diesem Größenbereich sind der „mittlere Standard“ und der „hohe Standard“ auch stark anteilig vertreten. Daraus lässt sich schließen, dass auch Gebäude < 7.000 m² BGF bei entsprechender Ausstattung über einen signifikanten Anteil belüfteter und gekühlter Flächen verfügen und damit u. U. auch ein signifikantes DSI-Potenzial darstellen. Im Folgenden wird gezeigt, dass bei einem hohen technischen Standard die installierte Leistung aus LuK in Bürogebäuden von 3.500 m² BGF noch in der Größenordnung von 75 kW liegen kann. Allerdings ist der Anteil der Gebäude mit einfachem Standard vor allem in den Größenklassen unter 4.000 m² hoch. In Gebäuden mit BGF < 4.000 m² ist die Wahrscheinlichkeit, auf einen einfachen Gebäudestandard zu stoßen (ohne LuK), erheblich höher.

Sicherlich wird es aber kleinere Gebäude (bestimmter Funktionen) mit hohen/mittleren Standards geben, die über eine ausreichend hohe Leistung aus Lüftungs- und Kälteanlagen verfügen, um ein wirtschaftlich interessantes DSI-Potenzial darzustellen. Wenn solche Gebäude über eine signifikante Leistung aus Lüftungs- und Klimaanlage verfügen, darf aber auch unterstellt werden, dass ein für sie gültiger Gesamtenergieverbrauchskennwert für Strom ($e_{V,S}$) höher ist als bei Vertretern ihrer Gruppe mit niedrigerem Potenzial. Diesen Zusammenhang zeigen Weber et al. in einer großen Fallstudie für

das Schweizer Bundesamt für Energie bereits 1999: Gebäude, in denen eine signifikante Menge Lüftungs- und Kälteanlagen betrieben wird, haben einen deutlich höheren Energieverbrauchskennwert [Weber et al. 1999, S. 52]. Die folgende Grafik zeigt denselben Sachverhalt für eine aktuellere Studie mit 90 Bürogebäuden [Jakob et al. 2008].

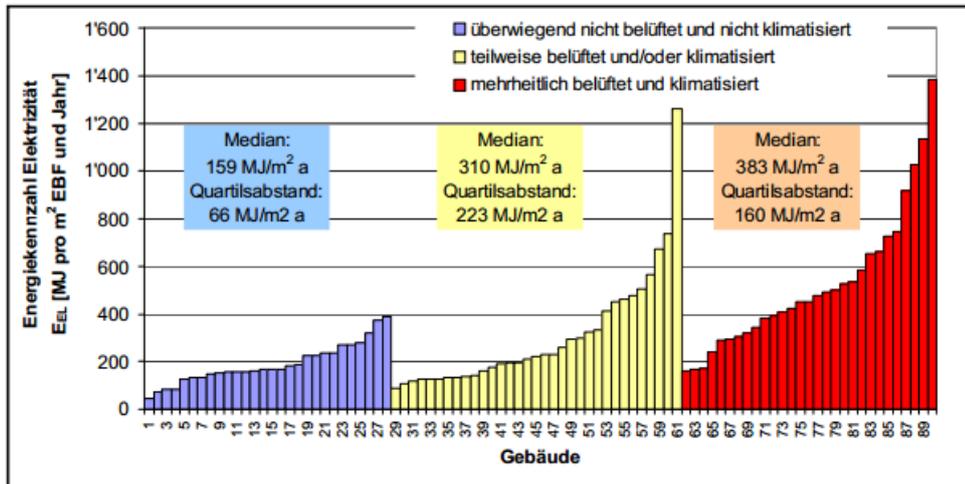


Bild 4-11: Energieverbrauchskennzahlen $e_{V,S}$ (hier mit E_{EL} bezeichnet) für unterschiedlich konditionierte Bürogebäude (Jakob et al. 2008, S. 107)

Es zeigt sich, dass der $e_{V,S}$ unkonditionierter Gebäude in dieser Studie unter $110 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ ($< 400 \text{ MJ/m}^2\text{a}$) liegt. Etwa ein Drittel der Gebäude, die teilweise konditioniert sind, liegen über diesem Wert, von den überwiegend konditionierten Gebäuden sind es sogar zwei Drittel. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Gebäude einen höheren $e_{V,S}$ als $110 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ aufweist, steigt also mit dem technischen Standard signifikant an. Ähnliche Werte finden sich auch in [Aiulfi et al. 2010, S. 54]. Die Studie der Arbeitsgemeinschaft Benchmark liefert als maximalen Wert für unkonditionierte Gebäude $200 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ in einer untersuchten Gruppe von 600 Gebäuden diesen Standards. 87,5 % dieser Stichprobe liegen aber auch unter $110 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ (Arge Benchmark 2009, S. 5). Der $e_{V,S}$ stellt also neben der Gebäudegröße einen zweiten Kennwert für eine Trennung von sicher konditionierten zu unsicher(er) konditionierten Gebäuden dar.

Nach unten bietet aber auch der $e_{V,S}$ keine Sicherheit, denn auch Gebäude mit Kennwerten $< 110 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ weisen Lüftungs- und ggf. auch Kälteanlagen auf. Sind diese Gebäude ausreichend groß, könnten sie auch über ein wirtschaftlich interessantes Potenzial verfügen. Das Selektionsfeld wird durch diese Betrachtung aber nun zweidimensional: Eine Dimension ist die Gebäudegröße, die zweite der Energieverbrauch des Gebäudes. Für das DSI-Potenzial spielt dabei aber nicht so sehr der Gesamtenergiebedarf an Strom eine Rolle, sondern eher die Leistung, da die Vermarktung des DSI-Potenzials eher durch die Leistungsnachfrage der Regelleistungsmärkte bestimmt ist.

Übertragen auf die Mittelspannungsliegenschaften (MSP-Liegenschaften) der Stadt Hamburg, die im Forschungsprojekt „Insel“ untersucht wurden, wurde als Trennung des „Wesentlichen vom Unwesentlichen“ eine Spitzenleistung einer Liegenschaft von $> 400 \text{ kW}$ angenommen. Es ergab sich die in der folgenden Grafik dargestellte Summenverteilung bezüglich der gesamten durch die Liegenschaften verursachten Spitzenlast. Die 400 kW -Grenze ist darin eingetragen. Es zeigt sich, dass bei dieser Festlegung knapp 25 % der Gebäude zwei Drittel der Summe der Spitzenleistung aller Mittelspannungsliegenschaften ausmachen, also deutlich unter 80 %.

4.3 Qualitative Abschätzung der Wahrscheinlichkeit für ein DSI-Potenzial aus Lüftungs- und Kälteanlagen in den Gebäuden

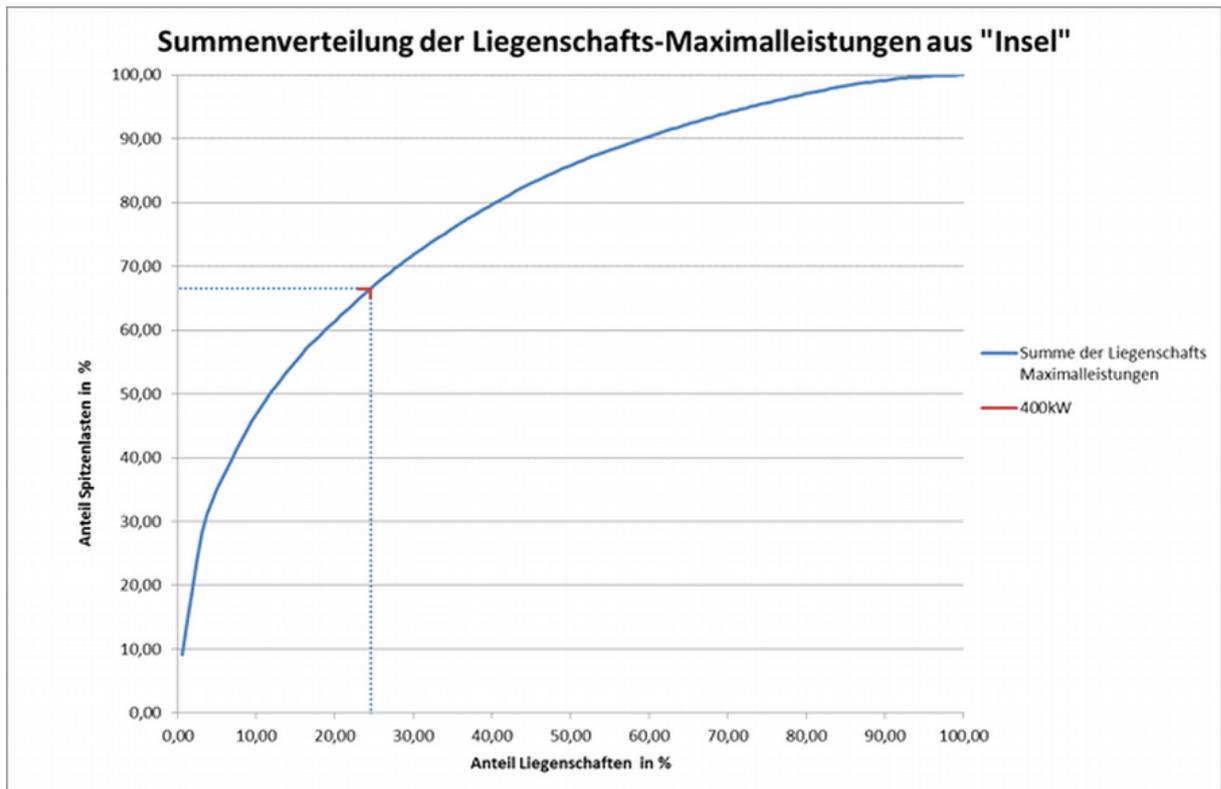


Bild 4-12: Summenverteilung der Liegenschafts-Maximalleistungen der Mittelspannungsliegenschaften in „Insel“

Dass das Pareto-Prinzip der 20/80-Regel an dieser Stelle nicht vollständig greift, liegt vermutlich vor allem daran, dass es sich bei den Gebäuden in „Insel“ um eine nach Leistung vorselektierte Gruppe handelte: Vertreten waren lediglich Mittelspannungsliegenschaften, Niederspannungsliegenschaften wurden nicht berücksichtigt. Die Stadt Hamburg besitzt aber neben den 178 Mittelspannungsliegenschaften noch etwa 4.500 Liegenschaften mit Niederspannungsanschluss [BSU 2007, S. 5].

Die aus ALKIS ausgewählten Gebäude dieser Untersuchung sind nicht entsprechend vorselektiert und repräsentieren alle Größenklassen. Dabei weisen die kleinsten Gebäude mit Nutzungsangabe „Bürogebäude“ Flächen von unter 15 m² BGF auf. In solch kleinen Gebäuden ist aber kein Potenzial aus LuK zu erwarten.

Es ist daher sinnvoll, die selektierte Gebäudegruppe in Richtung kleinerer Gebäude einzugrenzen, und zwar auf die Gebäude, in denen eine sinnvolle Größenordnung für ein DSI-Potenzial aus LuK-Anlagen erwartet werden darf. Zu diesem Zweck soll, wie im FP „Insel“, eine Trennung zwischen Gebäuden mit Mittelspannungsanschluss und Gebäuden mit Niederspannungsanschluss modelliert werden. Dies ist insofern schwierig, als die Strombezugsebene der Gebäude nicht öffentlich bekannt ist und es keine Festlegung irgendwelcher Art gibt, ab welcher Leistung ein Gebäude auf Mittelspannungsebene anzuschließen ist. Festgelegt ist lediglich, dass Gebäude ab einem Jahresverbrauch von 100.000 kWh Strom mit einer registrierenden Lastgangmessung auszustatten sind [StromNZV §12 (1)]. Dies betrifft von den 4.200 Niederspannungsliegenschaften der FHH rund 230. Mittelspannungsliegenschaften sind demgegenüber in Summe nur rund 200 vorhanden.

Ein Anschluss an das Mittelspannungsnetz ist im Wesentlichen verbunden mit einer Kostenabwägung: Den höheren Investitionskosten in eine eigene Trafoanlage stehen niedrigere Strombezugskosten durch ein reduziertes Netznutzungsentgelt (sowie ggf. geringeren Arbeitspreis) entgegen. Dabei stellt sich auch die Frage, ob der Eigentümer gleichzeitig Nutzer des Gebäudes ist.

Ab einem gewissen Leistungsbedarf (und damit ab einer gewissen Gebäudegröße) ist ein Anschluss auf Niederspannungsebene nicht mehr sinnvoll umzusetzen, da über die Niederspannung nur eine begrenzte Leistung übertragen werden kann. Als Richtgröße dafür können etwa 100 kW angenommen werden. Dass dies ein vermutlich geeigneter Grenzwert ist, lässt sich an folgenden Hinweisen ablesen:

- Ein Niederspannungshausanschluss ist pro Phase mit ≤ 100 A abgesichert. Das entspricht einer maximalen Leistungsentnahme von $100 \text{ A} \cdot 230 \text{ V/Phase} \cdot 3 \text{ Phasen} = 69 \text{ kVA}$. Dies entspräche wiederum 69 kW bei rein ohmschen Verbrauchern. Ein Teil der Leistung wird aber für die Blind- und Scheinleistungsanteile der nicht-ohmschen Verbraucher (Spulen in Motoren, Kondensatoren in den Vorschaltgeräten der Beleuchtung etc.) benötigt. Kann überschlägig von einem Wirkleistungsanteil von 50 kW ausgegangen werden und liegt der Leistungsbedarf des Gebäudes höher, muss entweder ein zweiter Hausanschluss gelegt (was in Städten nicht selten der Fall ist) oder ein Mittelspannungsanschluss realisiert werden. Mehr als zwei Hausanschlüsse zum Niederspannungsnetz sind unwahrscheinlich/selten.
- Im FP „Insel“ lag die niedrigste Leistungsspitze von noch auf Mittelspannung angeschlossenen Liegenschaften mit büroähnlicher Nutzung bei knapp unter 100 kW.
- In Österreich bilden 100 kW die gesetzlich festgelegte untere Leistungsgrenze für den Anschluss an das Mittelspannungsnetz [e-control 2013].

Da LuK einen erheblichen Anteil an der installierten Gesamtleistung elektrischer Anlagen ausmachen, wird daher an dieser Stelle festgelegt, dass ein Gebäude im Sinne dieser ABC-Analyse in die

- Kategorie „A“ fällt, wenn es größer 7.000 m² BGF ist oder auch bei der Kombination ungünstiger Kennwerte sicher einen Leistungsbedarf von > 100 kW hat. Es fällt in die
- Kategorie „B1“, wenn bei Verwendung mittlerer Kennwerte eine Anschlussleistung von > 100 kW errechnet wird und in die
- Kategorie „B2“, wenn nur unter günstigen Umständen (Kombination günstiger Kennwerte) eine Anschlussleistung von > 100 kW angenommen werden kann.
- Kategorie „C“ bilden dann die Gebäude, deren Spitzenleistung auch bei Kombination günstiger Kennwerte sicher unter 100 kW bleibt.

Die Bestimmung der Kategorien A, B1, B2 und C wird auf Basis der Variation einer sinnvollen Bandbreite der Parameter Gesamtenergiebedarfskennwert $e_{B,S}$ und Vollnutzungsstunden h_{voll} durchgeführt. Die Diskussion hinsichtlich der Festlegung „günstiger“, „mittlerer“ und „ungünstiger“ Kennwerte (Festlegung der Bandbreite der Kennwertvariation) erfolgt in den verbleibenden Abschnitten des Kapitels 4.3.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass der Sinn dieser ABC-Analyse – und mithin der Kategorisierung – darin liegt, die Gebäude qualitativ zu selektieren, in denen vernünftigerweise eine größere Menge von LuK-Geräten vermutet werden kann. Die Diskussion zum Vorgehen zur Abschätzung des quantitativen Potenzials erfolgt in Abschnitt 4.4.

4.3.3 Spitzenleistung $P_{el,max,Geb}$ als ABC-Indikator

Für die Bestimmung der Kategorien ist die Abschätzung der Jahresspitzenlast der Gebäude notwendig. Dazu muss im Rahmen dieser Voranalyse der Energieverbrauchskennwert durch einen Energiebedarfskennwert $e_{B,S}$ ersetzt werden, da die Energieverbräuche für die Gebäude in ALKIS nicht bekannt sind.

4.3 Qualitative Abschätzung der Wahrscheinlichkeit für ein DSI-Potenzial aus Lüftungs- und Kälteanlagen in den Gebäuden

Mithilfe des $e_{B,S}$ kann der Jahresenergiebedarf für Strom, $E_{B,S}$, abgeschätzt werden. $E_{B,S}$ berechnet sich als

$$E_{B,S} = e_{B,S} * A_{B,el,i} \quad \text{Formel 4-4}$$

mit

$e_{B,S}$ = auf die Gebäudefläche bezogener Energiebedarfskennwert für Strom in kWh/m²*a (m² Energiebezugsfläche) und

$A_{B,el,i}$ = Energiebezugsfläche des Gebäudes i in m².

Zwischen Jahresenergiebedarf und Jahresspitzenlast ($P_{el,max,Geb}$) ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$P_{el,max,Geb} = \frac{E_{B,S,Geb}}{h_{voll,Geb}} \text{ in kW} \quad \text{Formel 4-5}$$

mit

$E_{B,S}$ = Jahresenergiebedarf des Gebäudes für Strom in kWh/a und

$h_{voll,Geb}$ = Jahresvollnutzungsstunden des Gebäudes in h/a.

Beziehungsweise unter Verwendung der obigen Gleichung:

$$P_{el,max,Geb} = \frac{e_{B,S}}{h_{voll,Geb}} * A_{B,el,i} \quad \text{Formel 4-6}$$

Werden beide Parameter $e_{B,S}$ und $h_{voll,Geb}$ variiert, ergibt sich eine zweidimensionale Matrix mit möglichen Anschlussleistungen für ein Gebäude. „Ungünstig“ im Sinne der ABC-Analyse sind dann Parameterkombinationen, in denen der Leistungsgrenzwert nur schwer erreicht wird, also bei der Kombination niedriger $e_{B,S}$ und hoher $h_{voll,Geb}$. Günstig im Sinne der ABC-Analyse sind Kombinationen, in denen der Leistungsgrenzwert leicht erreicht wird, also in der Kombination hoher $e_{B,S}$ und niedriger $h_{voll,Geb}$.

Im Folgenden werden nun die Quellen für die Annahmen von $e_{B,S}$ und $h_{voll,Geb}$ sowie deren angenommene Variationsbreiten diskutiert.

4.3.3.1 Festlegung von Quelle und Variationsbreite des angesetzten Energiebedarfskennwerts $e_{B,S}$

Für einen zu verwendenden Gesamtenergiebedarfskennwert $e_{B,S}$ gibt es verschiedene mögliche Quellen. Die umfangreichste Untersuchung zu funktionsbezogenen Gesamtenergiekennwerten für NWG ist dabei die zuerst 1996 (mit Mitteln der Bundesstiftung Umwelt, DBU) durchgeführte und 1999 sowie zuletzt 2005 aktualisierte und erweiterte Erhebung der AGES GmbH [Zeine et al. 2007]. Darin sind Gesamtenergieverbrauchskennwerte für Wärme und Strom aus inzwischen 25.000 Nichtwohngebäuden unterschiedlichster Funktion zusammengetragen. Dies entspricht immerhin zwischen 1,5 und 2 % des gesamten deutschen Bestands an NWG.

Die Einteilung der Gebäude erfolgt bei der AGES dabei nach der Kennung des BWZK der Arge Bau. Die Erhebung entstand auf Basis der in der [VDI 3807-1: 2013] beschriebenen Systematik und fand aufgrund der hohen Fallzahl z. T. Berücksichtigung in den Gesamtenergiekennwerten der [VDI 3807-2: 1998]. Diese verwendet ebenfalls eine an den BWZK angelehnte Gebäudekategorisierung, allerdings sind dort nur 15 Gebäudekategorien vertreten. Die [VDI 3807-2: 1998] scheidet daher als Quelle für Gesamtenergiekennwerte aus. Weiterführende Erhebungen durch die AGES finden laufend statt,

4 Methode zur DSI-Potenzialabschätzung im Rahmen einer automatisierten Voranalyse unter Verwendung von ALKIS und ArcMap

derzeit für Studentenwerke und Krankenhäuser, und werden in den Veröffentlichungen der AGES zur Verfügung gestellt bzw. finden Eingang in Revisionen der [VDI 3807-2: 1998].

Aufgrund der soliden Datenbasis wäre die AGES eigentlich die Kennwertquelle der Wahl. Allerdings entsteht bei ihrer Verwendung eine systematische Abweichung aufgrund eines methodischen Nachteils bei der Erhebung der Kennwerte: Die AGES erhebt die Kennwerte nicht selbst, sondern schreibt Gebäudebetreiber an und bittet diese um Übermittlung von Gebäude- und Energieverbräuchen. Diesem Anliegen entsprechen dann vor allem diejenigen Gebäudebetreiber, bei denen die Daten leicht zu ermitteln sind, also nur ein begrenzter Arbeitsaufwand mit der Anfrage verbunden ist. Das ist überproportional häufig dann der Fall, wenn das Thema Energie im Unternehmen bereits Betrachtungsgegenstand ist und z. B. im Rahmen eines Energiemanagementsystems die Analyse und Dokumentation der Verbrauchsdaten bereits stattgefunden hat. In solchen Fällen sind aber oft auch schon erste effizienzsteigernde und/oder verbrauchssenkende Maßnahmen erfolgt. Dies führt dazu, dass die von der AGES angegebenen Kennwerte tendenziell als für den Bestand zu niedrig betrachtet werden dürfen. Die AGES weiß um diese methodische Schwäche und kommentiert sie selbst im Bericht von 2000 [Zeine et al. 2000, S. 7]. Auch die bisher erfolgte Erweiterung der Datengrundlage scheint diesen Mangel noch nicht behoben zu haben. Ein Vergleich der Energieverbräuche der in „Insel“ untersuchten Liegenschaften mit den unter Verwendung der AGES-Kennwerte errechneten Bedarfen zeigt diese Verschiebung jedenfalls deutlich, wie der folgenden Grafik zu entnehmen ist. Grundlage für den jeweiligen Verbrauchskennwert sind über drei Jahre gemittelte Verbrauchswerte der Liegenschaften aus „Insel“, entsprechend den Regeln in [BMVBS 2009, S. 9 ff.].

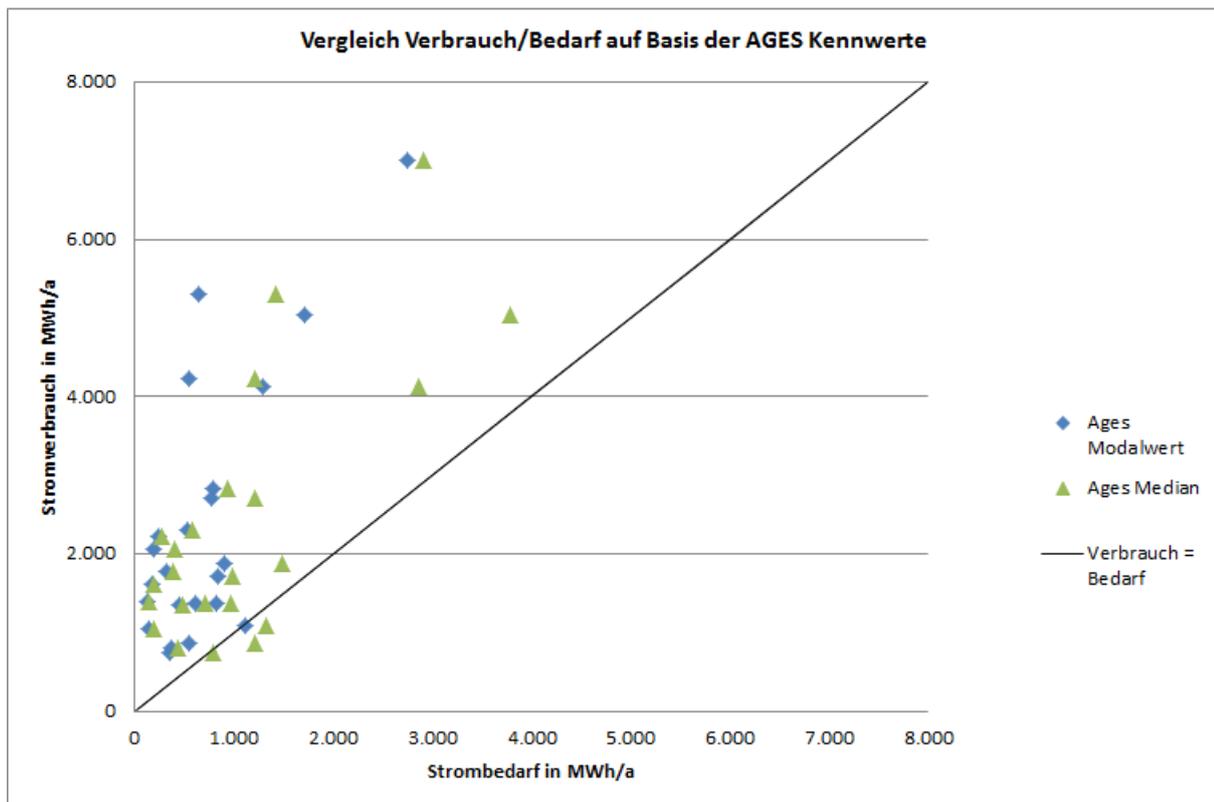


Bild 4-13: Vergleich von Verbrauch und Bedarf auf Basis der AGES-Kennwerte

Die Auswertung zeigt, dass die tatsächlichen Stromverbräuche der Liegenschaften in aller Regel höher sind als die theoretisch auf Basis der in AGES angegebenen Modal- und auch Medianwerte errechneten

4.3 Qualitative Abschätzung der Wahrscheinlichkeit für ein DSI-Potenzial aus Lüftungs- und Kälteanlagen in den Gebäuden

Bedarfwerte.¹⁹ Die AGES-Werte befinden sich daher in der Grafik alle links der Mittellinie, die die Werte markiert, für die Verbrauch und Bedarf gleich sind. Aufgrund dieses systematischen Fehlers werden die AGES-Kennwerte nicht verwendet.

Das BMVBS machte im Rahmen der Regeln zur Erstellung von Energieausweisen für Nichtwohngebäude nach EnEV einen eigenen Kennzahlenkatalog verpflichtend [BMVBS 2009]. Er ist ebenfalls nach dem BWZK aufgebaut und entstand aus einer Studie der zu diesem Zweck gegründeten Arge Benchmark (Arge Benchmark 2009; BBSR 2009). Aus der Studie entstanden die Vergleichswerte, die nach § 19 Absatz 4 EnEV bei der Ausstellung von Energieausweisen für bestehende Nichtwohngebäude auf der Grundlage des erfassten Energieverbrauchs zu verwenden sind [BMVBS 2009, S. 16]. Die Verwendung dieser Kennzahlen liefert ein besseres Bild: Beim direkten Vergleich zwischen Bedarf und Verbrauch streuen die Werte nun um die Gerade, die die Gleichheit zwischen Bedarf und Verbrauch markiert. Neun liegen links, acht rechts der Geraden, eine Liegenschaft liegt genau auf der Linie. Es liegt keine systematische Abweichung mehr vor. Die folgende Grafik gibt das Ergebnis des Abgleichs mit den „Insel“-Liegenschaften wieder.

Die Werte des BMVBS lassen eine Streuung vermuten, wenn man die Richtwerte der EnEV 2009 als untere Grenze annimmt [BMVBS 2009]. Diese liegen pauschal etwa 20 % unter den für die EnEV 2007 angegebenen Werten [BMVBS 2009, S. 22]. Diese Werte können nur von relativ neuen oder modernisierten, energieeffizienten Gebäuden eingehalten werden. Auch die für die EnEV 2007 angegebenen Mittelwerte sind „nur“ Mittelwerte, empfohlen von der Arge Benchmark, die in ihrer Studie auch deutliche Abweichungen nach oben von diesen Werten feststellte (vgl. etwa für konditionierte Bürogebäude Arge Benchmark 2009, S. 87 u. 89 f.). Daher wird im Folgenden für die Einordnung des Bestands auch eine Variation nach oben von 20 % angenommen. Für die Einschätzung des jährlichen Energiebedarfs der Gebäude wird also der jeweilige BMVBS-Mittelwert der EnEV 2007 mit +/-20 % angesetzt.

¹⁹ Dazu sei angemerkt, dass es sich bei Verteilungen von Energiebedarfskennwerten in AGES i. d. R. um linksverschobene Verteilungen handelt, mit hohen Fallzahlen in niedrigen Quantilen und geringer werdenden Fallzahlen in höheren Quantilen. Die AGES gibt daher zur Orientierung statt eines Mittelwerts den Modalwert an, den Wert mit dem häufigsten Vorkommen. Der Mittelwert wird als Median angegeben und befindet sich rechts vom Modalwert bei höheren Kennzahlen (ohne, wie in Normalverteilungen gültig, gleichzeitig der häufigste Wert zu sein) (Zeine et al. [2000, S. 19]).

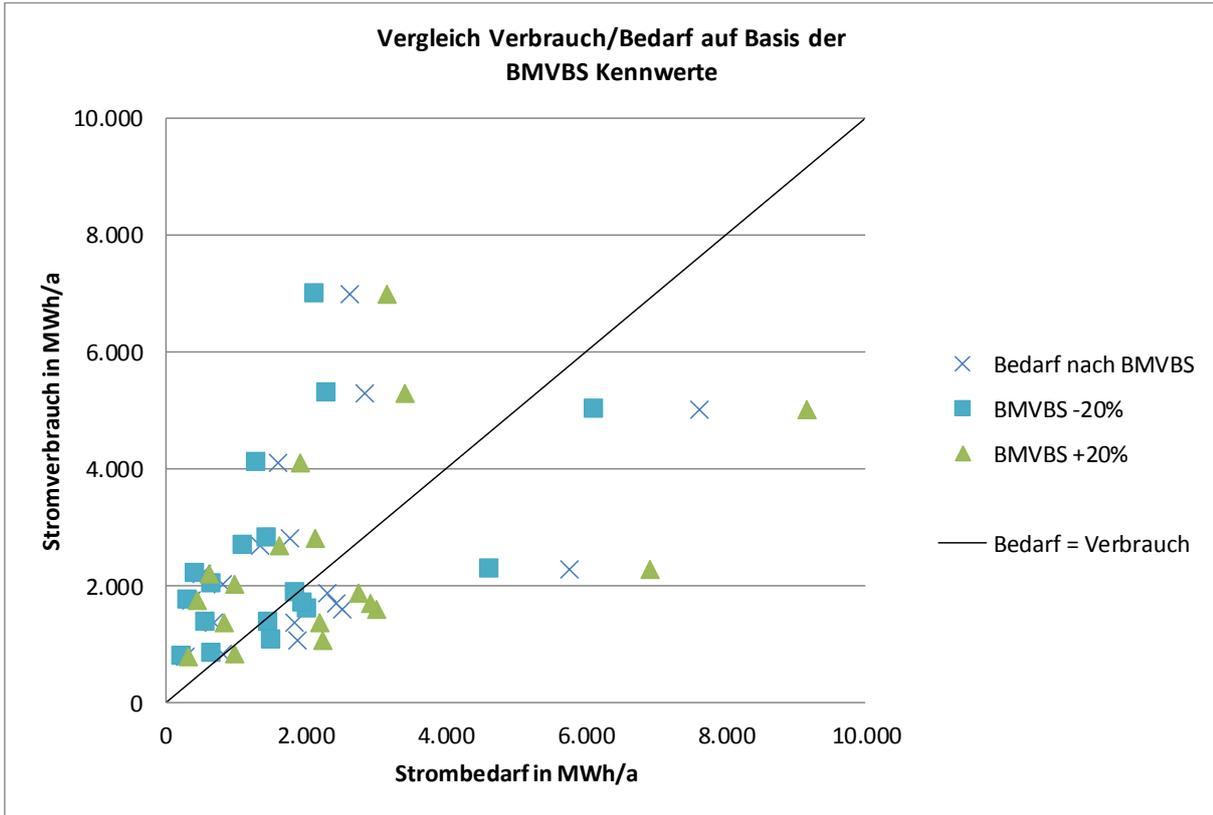


Bild 4-14: Vergleich von Verbrauch und Bedarf auf Basis der BMVBS Kennwerte, mit Spreizung um +/-20 %

Da die Kennwerte nach der Art der Gebäudenutzung variieren und die Nutzungen nach dem BWZK zu unterscheiden sind, muss noch eine Zuordnung der ALKIS GFK zu den Kennziffern des BWZK erfolgen. Diese sind in der folgenden Tabelle wiedergegeben.

4.3 Qualitative Abschätzung der Wahrscheinlichkeit für ein DSI-Potenzial aus Lüftungs- und Kälteanlagen in den Gebäuden

GFK Kennziffer in ALKIS	Bezeichnung der GFK in ALKIS	BWZK	Bezeichnung BWZK	Mittelwert für $e_{B,S}$ nach [BMVBS 2009] in kWh/m ² *a	$e_{B,S,max}$ = $e_{B,S} * 1,2$ in kWh/m ² *a	$e_{B,S,min}$ = $e_{B,S} * 0,8$ in kWh/m ² *a
3010	Verwaltungsgebäude	1300	Verwaltungsgebäude normale technische Ausstattung	45	54	36
3012	Rathaus					
3014	Zollamt					
3017	Kreisverwaltung					
3018	Bezirksregierung					
3019	Finanzamt					
3011	Parlament	1100	Parlamentsgebäude	55	66	44
3015	Gericht	1200	Gerichtsgebäude	35	42	28
3071	Polizei	1340	Polizeidienstgebäude	40	48	32
3020	Gebäude für Bildung und Forschung	2200	Institutsgebäude für Lehre und Forschung	95	114	76
3023	Hochschulgebäude					
3024	Forschungsinstitut					

Tabelle 4-10: Zuordnung der Energieverbrauchskennwerte $e_{B,S}$ des BMVBS zu den selektierten GFK-Kennziffern der Gruppe 3000 aus ALKIS

Nichtöffentliche Gebäude haben keine BWZK und werden in [BMVBS 2009] in Tabelle 2.2 der Anlage 2 mit einer laufenden Nummer versehen. Dies betrifft die ALKIS GFK-Gruppe 2000. In der selektierten Gebäudegruppe sind daraus fünf Gebäudetypen vertreten. Deren Kennwertzuordnung zeigt die folgende Tabelle:

GFK-Kennziffer in ALKIS	Bezeichnung der GFK in ALKIS	Kennziffer (BMVBS 2009) Tabelle 2.2	Bezeichnung ²⁰	Mittelwert für $e_{B,S}$ nach (BMVBS 2009) in kWh/m ² *a	$e_{B,S,max}$ = $e_{B,S} * 1,2$ in kWh/m ² *a	$e_{B,S,min}$ = $e_{B,S} * 0,8$ in kWh/m ² *a
2010	Gebäude für Handel und Dienstleistungen	9.2	Bürogebäude normale Ausstattung	140	180	100
2020	Bürogebäude					
2030	Kreditinstitut	9.3	Bürogebäude höhere Ausstattung	150	180	120
2040	Versicherung					
2160	Gebäude für Forschungszwecke	4	Institutsgebäude für Forschung und Untersuchung	50	60	40

Tabelle 4-11: Zuordnung der Energieverbrauchskennwerte $e_{B,S}$ des BMVBS zu den selektierten GFK-Kennziffern der Gruppe 2000 aus ALKIS

4.3.3.2 Ermittlung der Energiebezugsfläche $A_{B,el,i}$

Da sich die Energiebedarfskennwerte nicht auf die BGF, sondern die Energiebezugsfläche $A_{B,el,i}$ beziehen, muss diese zusätzlich bestimmt werden. Bei Verwendung der Kennwerte aus [BMVBS 2009] entspricht die Energiebezugsfläche der Nettogrundfläche (NGF) und kann über die in [BMVBS 2009, S. 20] für die unterschiedlichen Gebäudenutzungen angegebenen Faktoren aus der BGF abgeleitet werden.

Zunächst muss dafür aber die BGF der Gebäude ermittelt werden. Dazu ist insbesondere die Berücksichtigung der Bauteile der Gebäude in der AX 31002 notwendig. Das entsprechende Vorgehen wird im Folgenden dargestellt.

Nach [DIN 277-1: 2005] errechnet sich die BGF aus der Grundfläche des Gebäudes auf Basis seiner Außenmaße multipliziert mit der Anzahl der Geschosse. Beide Werte sind in der AX 31001 für die Gebäude enthalten. Die zu einem Gebäude gehörenden Bauteile müssen aber ebenfalls berücksichtigt werden, da sich aus ihnen Zuschläge oder Abzüge ergeben können. Die BGF errechnet sich dann für jedes Gebäude als

$$BGF_{UUID} = GRF_{UUID} * (AOG_{UUID} + AUG_{UUID}) + KorrA_{BAT} \quad \text{Formel 4-7}$$

²⁰ Die Bezeichnung lautet in BMVBS [2009] für 9.2 korrekt „Bürogebäude temperiert und belüftet“ bzw. für 9.3 „Bürogebäude mit Vollklimaanlage, Konditionierung unabhängig von der Außentemperatur“. Da das Vorhandensein einer Kälteanlage im Rahmen der Voranalyse nicht geprüft werden kann, werden die Werte hier sinngemäß verwendet für Bürogebäude mit normaler LuK-Ausstattung und Bürogebäude mit höherer LuK-Ausstattung.

4.3 Qualitative Abschätzung der Wahrscheinlichkeit für ein DSI-Potenzial aus Lüftungs- und Kälteanlagen in den Gebäuden

mit

GRF_{UUID} = Grundfläche des Gebäudes mit der UUID i in m²,

$(AOG_{UUID} + AUG_{UUID})$ = Summe aus der Anzahl der Obergeschosse und Untergeschosse des Gebäudes mit der UUID i und

$KorrA_{BAT}$ = Korrekturfläche aus der Berücksichtigung der zu dem Gebäude mit der UUID i gehörenden Bauteile in m².

Für die Bestimmung von $KorrA_{BAT}$ ist zunächst eine Zuordnung der Bauteile zu den Gebäuden notwendig. Dazu wird zunächst über eine geografische Beziehung („spatial join“ in ArcPy) eine Referenztabelle erstellt, in der für jede Gebäude-UUID die zugehörigen Bauteile aufgelistet werden.

Anschließend werden die Teilflächen der Bauteile als Abzugs- oder Zuschlagsflächen ermittelt und mit der bis zu diesem Schritt vorläufigen Gebäudefläche (ermittelt aus Grundfläche multipliziert mit der Anzahl der Geschosse) verrechnet. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über Bauteile und ihre Eigenschaft als Zuschlags- oder Abzugsfläche.

Bauart; Bemerkung zur Nutzung in Hamburg	Kennung	Zuschlag	Abschlag
Geringergeschossiger Gebäudeteil	1100		x
Höhergeschossiger Gebäudeteil	1200	x	
Hochhausgebäudeteil; <i>wird in Hamburg nicht geführt.</i>	1300	x	
Abweichende Geschosshöhe; <i>wird in Hamburg nicht geführt.</i>	1400		
Keller	2000	x	
Tiefgarage	2100	x	
Loggia; <i>wird in Hamburg nicht geführt.</i>	2300		x
Wintergarten; <i>wird in Hamburg nicht geführt.</i>	2350		x
Arkade	2400		x
Auskragende/zurückspringende Bauteile; <i>dürfen nicht geführt werden. Es ist zwischen 2510 und 2520 zu unterscheiden.</i>	2500		
Auskragende Geschosse	2510	x	x
Zurückspringende Geschosse	2520		x
Durchfahrt im Gebäude	2610		x
Durchfahrt an überbauter Straße	2620	x	
Schornstein im Gebäude	2710		x
Turm im Gebäude	2720		x
Sonstiges; <i>wird in Hamburg nicht geführt.</i>	9999		

Tabelle 4-12: Liste der vorkommenden Bauteile mit Kennung und Angabe als Abschlags- oder Zuschlagsfläche zur BGF

Die Logiken für die Verrechnung der Bauteile sind für die einzelnen Bauarten individuell festzulegen, da die angegebenen Grundflächen im ALKIS die senkrechte Projektion des Gebäudeumrisses darstellen und – je nach Fall – zur Korrektur unterschiedliche Rechenwege notwendig werden. Dies sei kurz am Beispiel zurückspringender und auskragender Bauteile erläutert. Dazu zeigt die folgende Grafik den Sachverhalt für die Flächenangaben in ALKIS für diese Fälle.

Auskragende/zurückspringende Geschosse

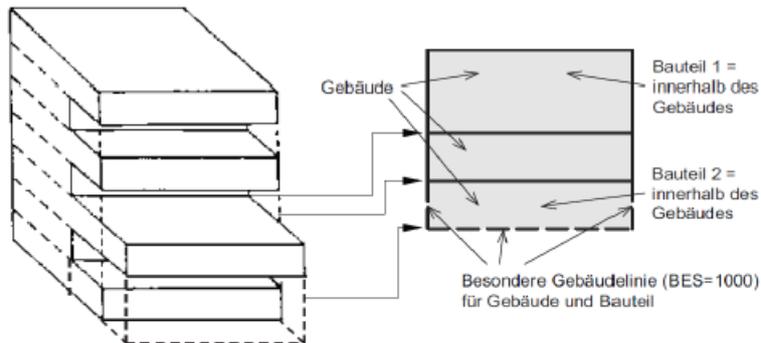


Bild 4-15: Auskragende/zurückspringende Geschosse [LGV 2011, S. 324]

Die senkrechte Projektion liefert immer die größte Grundfläche. Bei einem auskragenden Bauteil bedeutet dies, dass die auskragenden Bauteile die senkrechte Projektion größer machen und so eine zu große Grundfläche für das Gebäude angegeben wird: Die in der AX 31001 angegebene Grundfläche enthält die Teilfläche des auskragenden Bauteils. Sie muss also für die BGF-Berechnung um diese Teilfläche korrigiert werden. Danach muss eine Fläche aus der Grundfläche des Bauteils multipliziert mit der Anzahl der auskragenden Geschosse wieder hinzuaddiert werden. Ein auskragendes Bauteil ist also sowohl Abzugs- als auch Zuschlagsfläche (siehe Tabelle 4-12). Ein zurückspringendes Geschoss wird aber von der Projektionsfläche des Gebäudes überdeckt. Es ergibt sich eine reine Abzugsfläche aus dem Faktor der Grundfläche des Bauteils und der Anzahl der Obergeschosse des Bauteils. Auskragende und zurückspringende Geschosse können gleichzeitig vorkommen. Zudem haben Gebäude häufig mehrere Bauteile. Die Verwendung eines Algorithmus zur Berechnung der korrigierten BGF der Gebäude ist daher notwendig. Die Logik der Verrechnung der einzelnen Bauteilarten wird im Rahmen dieser Arbeit nicht im Detail wiedergegeben. Sie kann dem Python-Skript entnommen werden.

Die ermittelte BGF wird mithilfe der Flächenumrechnungsfaktoren aus [BMVBS 2009, S. 20] in die NGF umgerechnet. Die NGF dient dann als Energiebezugsfläche für die Energiebedarfskennwerte. Die folgende Tabelle gibt die Konversionsfaktoren für die Gebäudenutzungen der selektierten Gebäude wieder.

4.3 Qualitative Abschätzung der Wahrscheinlichkeit für ein DSI-Potenzial aus Lüftungs- und Kälteanlagen in den Gebäuden

GFK-Kennziffer in ALKIS	Bezeichnung der GFK in ALKIS	BWZK (BMVBS 2009) Tabelle 2.1	Bezeichnung BWZK	Umrechnungsfaktor BGF zu NGF (BMVBS)
3010	Verwaltungsgebäude	1300	Verwaltungsgebäude normale technische Ausstattung	0,85
3012	Rathaus			
3014	Zollamt			
3017	Kreisverwaltung			
3018	Bezirksregierung			
3019	Finanzamt			
3011	Parlament	1100	Parlamentsgebäude	0,85
3015	Gericht	1200	Gerichtsgebäude	0,83
3071	Polizei	1340	Polizeidienstgebäude	0,84
3020	Gebäude für Bildung und Forschung	2200	Institutsgebäude für Lehre und Forschung	0,89
3023	Hochschulgebäude			
3024	Forschungsinstitut			

Tabelle 4-13: Zuordnung der GFK-Kennziffern zum Umrechnungsfaktor BGF zu NGF des BMVBS zu den selektierten GFK-Kennziffern der Gruppe 3000 aus ALKIS

GFK-Kennziffer in ALKIS	Bezeichnung der GFK in ALKIS	Kennziffer (BMVBS 2009) Tabelle 2.2	Bezeichnung	Umrechnungsfaktor BGF zu NGF (BKl)
2010	Gebäude für Handel und Dienstleistungen	9.2	Bürogebäude normale Ausstattung	0,86
2020	Bürogebäude			
2030	Kreditinstitut	9.3	Bürogebäude höhere Ausstattung	0,88
2040	Versicherung			
2160	Gebäude für Forschungszwecke	4	Institutsgebäude für Forschung und Untersuchung	0,86

Tabelle 4-14: Zuordnung der GFK-Kennziffern zum Umrechnungsfaktor BGF zu NGF des BMVBS zu den selektierten GFK-Kennziffern der Gruppe 2000 aus ALKIS

4.3.3.3 Festlegung von Quelle und Variationsbreite der angesetzten Vollnutzungsstunden

Da sich der Leistungsbedarf der Gebäude aus $P_{el,max,Geb} = \frac{e_{B,S}}{h_{voll,Geb}} * A_{B,el,i}$ ergibt (vgl. Formel 4-6), muss noch eine Festlegung der zu verwendenden Vollnutzungsstunden $h_{voll,Geb}$ erfolgen.

Anders als bei den Energiebedarfskennwerten gibt es in der Literatur wenig Hinweise über typische Bereiche von elektrischen Vollnutzungsstunden von Nichtwohngebäuden. Es finden sich anlagenbezogene Vollnutzungsstunden für den jährlichen Betrieb von Lüftungs- und Kälteanlagen in [VDI 3807-4: 2008]. Diese sind jedoch auf Gebäudeteilflächen bezogen (Teilenergiekennwerte). Ebenso auf Gebäudeteilflächen bezogen sind die Angaben der [DIN V 18599-10: 2013] zu Betriebszeiten und Nutzungszeiten der unterschiedlichen Gebäudenutzungs-zonen. Legt man diese Werte zunächst für einen Vergleich mit den aus „Insel“ bekannten Werten für die dort betrachteten Gebäude zugrunde, ergibt sich das in der folgenden Grafik dargestellte Bild:

4.3 Qualitative Abschätzung der Wahrscheinlichkeit für ein DSI-Potenzial aus Lüftungs- und Kälteanlagen in den Gebäuden

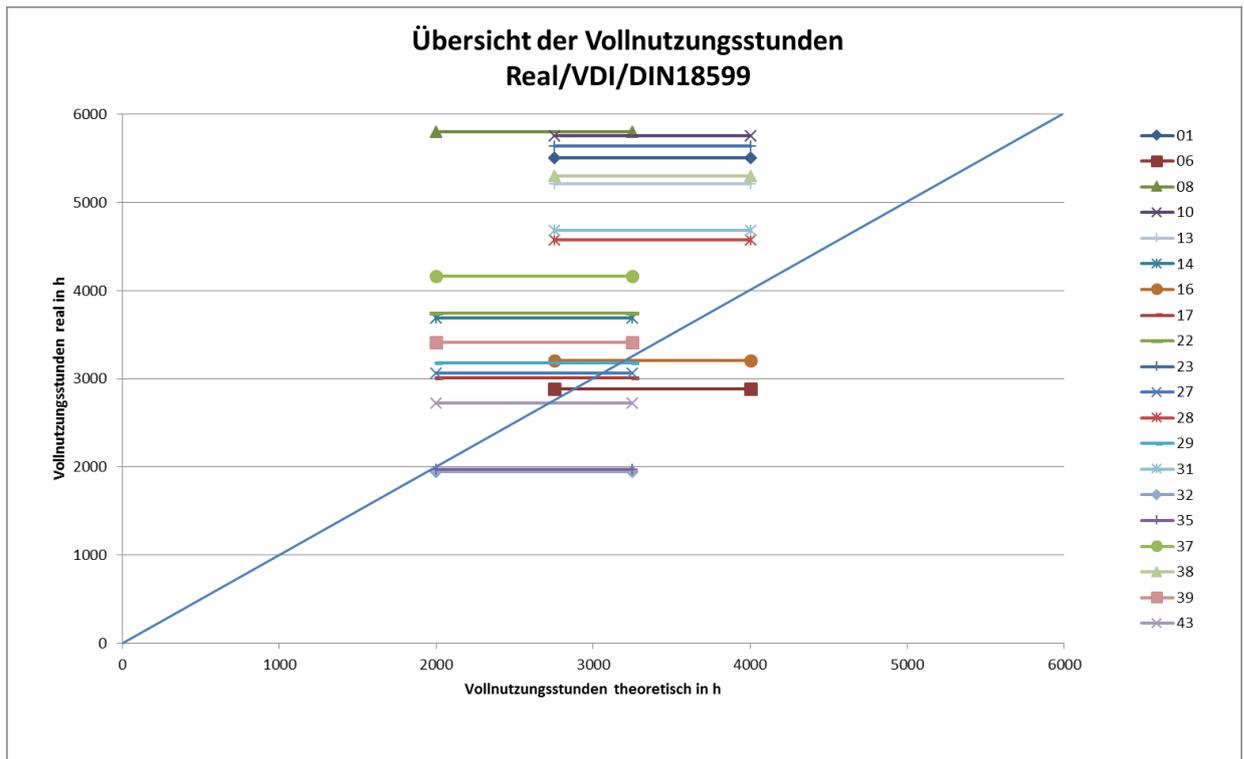


Bild 4-16: Vergleich tatsächlicher und theoretischer Jahresvollnutzungsstunden für die Mittelspannungsliegenschaften in „Insel“

Die Vollnutzungsstunden der Gebäude aus dem FP „Insel“ passen z. T. gut zu den Werten aus VDI 3807-4: 2008 und DIN V 18599-10: 2013. Für 60 % der Gebäude sind sie allerdings zu niedrig. Zudem zeigen die in „Insel“ untersuchten Gebäude eine relativ hohe Bandbreite bei den Vollnutzungsstunden innerhalb der Kategorien „Bürogebäude“ bzw. „Hochschulgebäude“. Indirekt zeigt dies schon die obige Grafik (durch die zwei „Stapelbereiche“). Es sei an den beiden folgenden Grafiken aber noch verdeutlicht. Diese zeigen die normierten Jahresdauerlinien der in „Insel“ untersuchten Gebäude und die jeweils dazugehörenden Jahresvollnutzungsstunden (als senkrechte Striche) in jeweils einem Diagramm für alle Liegenschaften mit büroähnlicher Nutzung und für alle Hochschulgebäude.

4 Methode zur DSI-Potenzialabschätzung im Rahmen einer automatisierten Voranalyse unter Verwendung von ALKIS und ArcMap

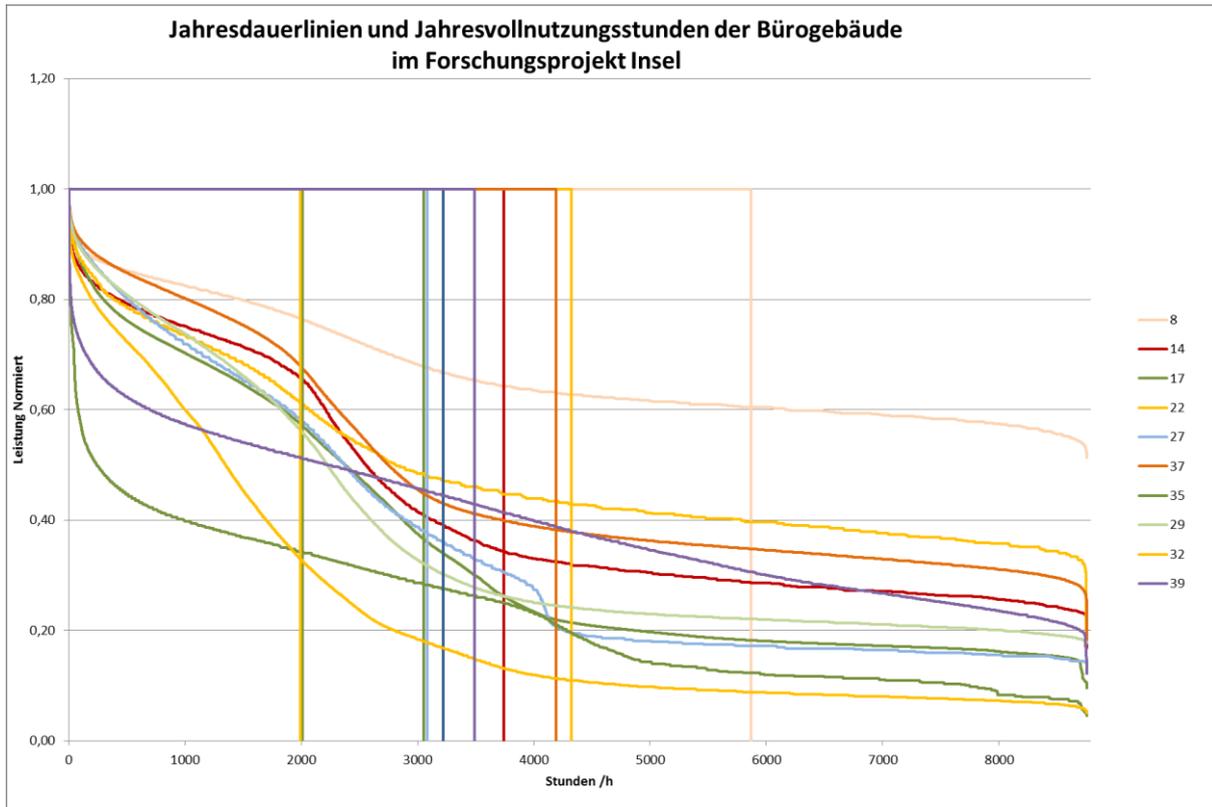


Bild 4-17: Jahresdauerlinien und Jahresvollnutzungsstunden für Gebäude büroähnlicher Nutzung in „Insel“

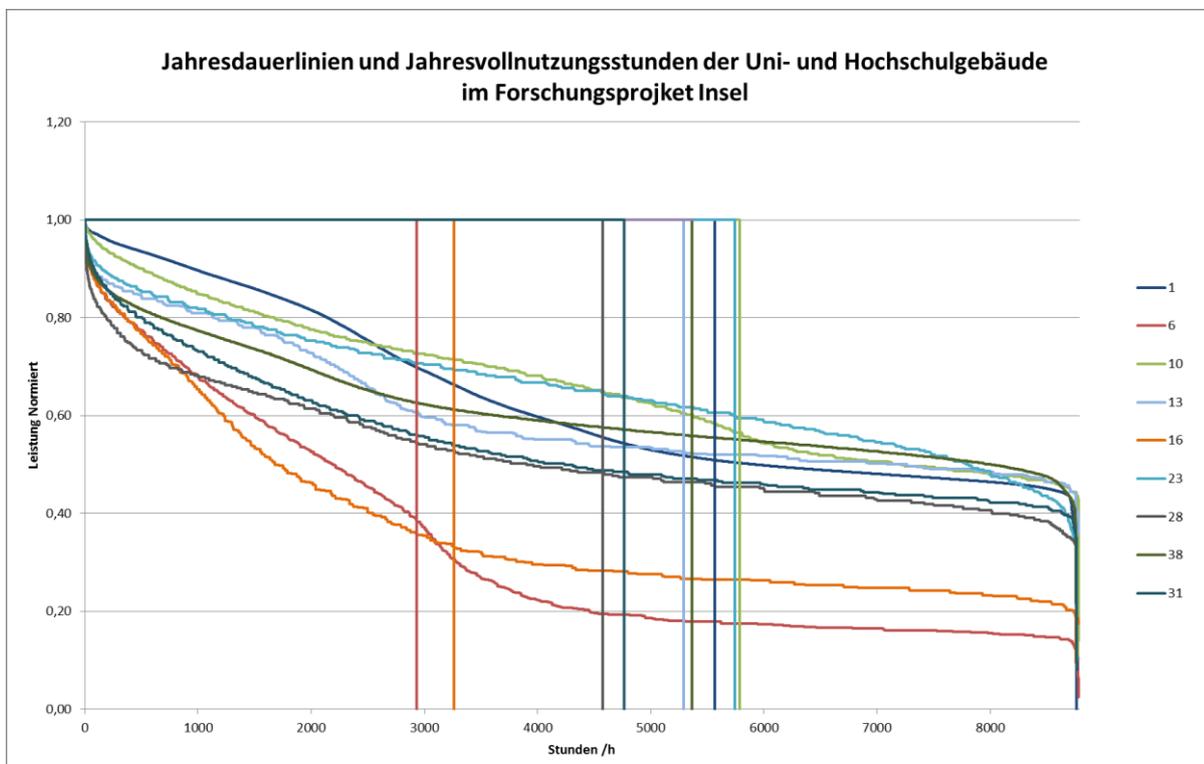


Bild 4-18: Jahresdauerlinien und Jahresvollnutzungsstunden für Hochschulgebäude in „Insel“

4.3 Qualitative Abschätzung der Wahrscheinlichkeit für ein DSI-Potenzial aus Lüftungs- und Kälteanlagen in den Gebäuden

Resultierend aus diesen Ergebnissen werden als Variationsbreite zwei Bereiche für Vollnutzungsstunden angenommen. Beide bewegen sich um den in der VDI 3807-4: 2008 für Lüftungsanlagen in Gebäudezonen mit Büronutzung angegebenen Wert von 3.250 h/a. Dieser wird für Gebäude büroähnlicher Nutzung als Mittelwert festgelegt. Als obere Grenze wird für diese Gebäude 4.500 h/a angesetzt, der Ausreißer des Gebäudes ID 08 ergibt sich aus dem dort vorherrschenden Bereitschaftsdienst. Als untere Grenze für Bürogebäude werden 2.000 h/a angenommen. Für Hochschulgebäude wird als obere Grenze 5.700 h/a und als untere Grenze 2.900 h/a angenommen. Als Mittelwert werden 4.800 h/a festgelegt.

4.3.3.4 Faktoren zur ABC-Klasseneinteilung für die selektierten Gebäudenutzungen

Nach der Bestimmung der anzunehmenden Variationsbreiten für $e_{B,S}$ und $h_{voll,Geb}$ lassen sich jetzt für jeden Gebäudenutzungstyp Matrizen mit je neun unterschiedlichen Kombinationen der Kennwerte für $P_{el,max,Geb} = \frac{e_{B,S}}{h_{voll,Geb}} * A_{B,el,i}$ finden. Gemäß der Festlegung in 4.3.2 soll dabei die Kategorie A den Gebäuden vorbehalten sein, bei denen auch bei der Kombination ungünstiger Kennwerte $P_{el,max,Geb} > 100$ kW ist. Ungünstig in diesem Sinne ist ein kleiner Faktor $\frac{e_{B,S}}{h_{voll,Geb}}$, der sich aus minimalem $e_{B,S}$ und maximalen $h_{voll,Geb}$ ergibt. Dies entspricht genau einem Wert der Matrix.

Für die Kategorien B1 und B2 sind mehrere Kombinationen denkbar. Daher wird hier festgelegt, dass die jeweils drei höchsten Werte für $\frac{e_{B,S}}{h_{voll,Geb}}$ die Kategorie B2 bilden und die fünf verbleibenden Kombinationen den Bereich für die Kategorie B1 bilden. Kategorie C bilden die Gebäude, die auch bei maximalem $e_{B,S}$ und minimalen $h_{voll,Geb}$ den Grenzwert nicht erreichen.

Da $\frac{e_{B,S}}{h_{voll,Geb}}$ je nach Gebäudenutzung variiert, werden die Ergebnisse in den folgenden Tabellen für jede Nutzung dargestellt. Dabei ist Kategorie A grün gekennzeichnet, B1 gelb und Kategorie B2 rot.

GFK-Kennziffer in ALKIS	Bezeichnung der GFK in ALKIS	BWZK	Bezeichnung BWZK	$\frac{e_{B,S}}{h_{voll,Geb}}$ in kW/m ² $A_{B,el,i}$			
				$e_{B,S}$			
				$h_{voll,Geb}$	niedrig	mittel	hoch
3010	Verwaltungsgebäude	1300	Verwaltungsgebäude normale technische Ausstattung	hoch	0,008	0,010	0,012
3012	Rathaus			mittel	0,011	0,014	0,017
3014	Zollamt			niedrig	0,018	0,023	0,027
3017	Kreisverwaltung						
3018	Bezirksregierung						
3019	Finanzamt						

Tabelle 4-15: ABC-Matrix zur relativen Anschlussleistung für Verwaltungsgebäude mit normaler technischer Ausstattung

4 Methode zur DSI-Potenzialabschätzung im Rahmen einer automatisierten Voranalyse unter Verwendung von ALKIS und ArcMap

GFK-Kennziffer in ALKIS	Bezeichnung der GFK in ALKIS	BWZK	Bezeichnung BWZK	$\frac{e_{B,S}}{h_{voll,Geb}}$ in kW/m ² $A_{B,el,i}$			
					$e_{B,S}$		
				$h_{voll,Geb}$	niedrig	mittel	hoch
3011	Parlament	1100	Parlamentsgebäude	hoch	0,010	0,012	0,015
				mittel	0,014	0,017	0,020
				niedrig	0,022	0,028	0,033

Tabelle 4-16: ABC-Matrix zur relativen Anschlussleistung für Parlamentsgebäude

GFK-Kennziffer in ALKIS	Bezeichnung der GFK in ALKIS	BWZK	Bezeichnung BWZK	$\frac{e_{B,S}}{h_{voll,Geb}}$ in kW/m ² $A_{B,el,i}$			
					$e_{B,S}$		
				$h_{voll,Geb}$	niedrig	mittel	hoch
3015	Gericht	1200	Gerichtsgebäude	hoch	0,006	0,008	0,009
				mittel	0,009	0,011	0,013
				niedrig	0,014	0,018	0,021

Tabelle 4-17: ABC-Matrix zur relativen Anschlussleistung für Gerichtsgebäude

GFK-Kennziffer in ALKIS	Bezeichnung der GFK in ALKIS	BWZK	Bezeichnung BWZK	$\frac{e_{B,S}}{h_{voll,Geb}}$ in kW/m ² $A_{B,el,i}$			
					$e_{B,S}$		
				$h_{voll,Geb}$	niedrig	mittel	hoch
3071	Polizei	1340	Polizeidienstgebäude	hoch	0,007	0,009	0,011
				mittel	0,010	0,012	0,015
				niedrig	0,016	0,020	0,024

Tabelle 4-18: ABC-Matrix zur relativen Anschlussleistung für Polizeidienstgebäude

4.3 Qualitative Abschätzung der Wahrscheinlichkeit für ein DSI-Potenzial aus Lüftungs- und Kälteanlagen in den Gebäuden

GFK-Kennziffer in ALKIS	Bezeichnung der GFK in ALKIS	BWZK	Bezeichnung BWZK	$\frac{e_{B,S}}{h_{voll,Geb}}$ in kW/m ² $A_{B,el,i}$			
				$h_{voll,Geb}$	$e_{B,S}$		
				niedrig	mittel	hoch	
3020	Gebäude für Bildung und Forschung	2200	Institutsgebäude für Lehre und Forschung				
3023	Hochschulgebäude			hoch	0,013	0,017	0,020
3024	Forschungsinstitut			mittel	0,023	0,029	0,035
				niedrig	0,026	0,033	0,039

Tabelle 4-19: ABC-Matrix zur relativen Anschlussleistung für Institutsgebäude für Lehre und Forschung

GFK-Kennziffer in ALKIS	Bezeichnung der GFK in ALKIS	BWZK	Bezeichnung	$\frac{e_{B,S}}{h_{voll,Geb}}$ in kW/m ² $A_{B,el,i}$			
				$h_{voll,Geb}$	$e_{B,S}$		
				niedrig	mittel	hoch	
2010	Gebäude für Handel und Dienstleistungen	9.2	Bürogebäude normale Ausstattung				
2020	Bürogebäude			hoch	0,022	0,031	0,040
				mittel	0,031	0,043	0,055
				niedrig	0,050	0,090	0,090

Tabelle 4-20: ABC-Matrix zur relativen Anschlussleistung für Bürogebäude normale Ausstattung

GFK-Kennziffer in ALKIS	Bezeichnung der GFK in ALKIS	BWZK	Bezeichnung BWZK	$\frac{e_{B,S}}{h_{voll,Geb}}$ in kW/m ² $A_{B,el,i}$			
				$h_{voll,Geb}$	$e_{B,S}$		
				niedrig	mittel	hoch	
2030	Kreditinstitut	9.3	Bürogebäude höhere Ausstattung				
2040	Versicherung			hoch	0,027	0,033	0,040
				mittel	0,037	0,046	0,055
				niedrig	0,060	0,075	0,090

Tabelle 4-21: ABC-Matrix zur relativen Anschlussleistung für Bürogebäude höhere Ausstattung

GFK-Kennziffer in ALKIS	Bezeichnung der GFK in ALKIS	BWZK	Bezeichnung	$\frac{e_{B,S}}{h_{voll,Geb}}$ in kW/m ² $A_{B,el,i}$			
				$h_{voll,Geb}$	$e_{B,S}$		
				hoch	niedrig	mittel	hoch
2160	Gebäude für Forschungszwecke	4	Institutsgebäude für Forschung und Untersuchung	hoch	0,007	0,009	0,011
				mittel	0,012	0,015	0,018
				niedrig	0,014	0,017	0,021

Tabelle 4-22: ABC-Matrix zur relativen Anschlussleistung für Institutsgebäude für Forschung und Untersuchung

4.4 Vorgehen zur Quantifizierung des DSI-Potenzials aus Lüftungs- und Kälteanlagen

Zur Abschätzung des quantitativen DSI-Potenzials aus LuK in den Gebäuden können die Teilenergiekennwerte für Lüftungs- und Kälteanlagen der VDI 3807-4: 2008 verwendet werden. Die Richtlinie bezieht sich hinsichtlich der Methodik auf die von IWU und der DS Plan GmbH im Auftrag der DBU erstellte Studie „Methodik zur Erfassung, Beurteilung und Optimierung des Elektrizitätsbedarfs von Gebäuden (MEG)“ [Knissel & Hörner 2007]. Die in der Richtlinie angegebenen Kennwerte beziehen sich auf [Weber et al. 1999].

Die Richtlinie enthält in Tabelle 5 spezifische Teilenergiekennwerte für Lüftungs- und in Tabelle 7 für Kälteanlagen [VDI 3807-4: 2008, S. 32 u. 37 f.], jeweils angegeben in W/m² Energiebezugsfläche $A_{B,el}$. Wobei die Energiebezugsfläche als „(...) Nettofläche einer Nutzungszone (...), in der elektrische Energie verbraucht wird“, definiert ist [VDI 3807-4: 2008, S. 66]. Die Kennwerte gelten also nur für die jeweilige Nutzfläche einer Nutzungszone eines Gebäudes. Das ist der Anteil an der gesamten Nutzfläche, der eine Standardnutzung NZ zugeordnet werden kann, wobei NZ der Bezeichnung der Standardnutzung nach [VDI 3807-4: 2008], Spalte 1, entspricht. So gilt z. B. der Kennwert mit der Bezeichnung „Gruppenbüro“ nur für die Teile der Nutzfläche des Gebäudes, die als „Gruppenbüro“ genutzt werden. Daraus ergibt sich das Problem, dass die Flächenanteile der unterschiedlichen Nutzungszone der Gebäude abgeschätzt werden müssen (Zonierung). Das entsprechende Vorgehen wird im folgenden Abschnitt weiter diskutiert.

Die Teilenergiekennwerte der Richtlinie werden für fünf Bedarfsklassen angegeben: Sehr hoch, Hoch, Mittel, Niedrig und Sehr niedrig. Dabei gilt „Sehr niedrig“ laut Richtlinie als Zielwert und „Niedrig“ als Grenzwert. Der Zielwert wird erreicht „(...) durch eine optimale Kombination von energetisch guten Komponenten und Systemen. Die Machbarkeit und die Wirtschaftlichkeit sind von Fall zu Fall zu prüfen“ [VDI 3807-4: 2008, S. 10]. Aus Sicht der hier entwickelten Methode zur Voranalyse stellt der Zielwert damit eine nicht relevante Größe dar. Er wird gelegentlich in sehr neuen Gebäuden des Bestands vertreten sein, aber die seltene Ausnahme bilden.

Der Grenzwert ist definiert als Wert, der „mit Komponenten und Systemen, die dem Stand der Technik entsprechen, erreichbar und wirtschaftlich vertretbar ist“ [VDI 3807-4: 2008, S. 9]. Dies dürfte dem durchschnittlichen Neubaustandard entsprechen und auch nach Anlagensanierung regelmäßig vorkommen. Die Richtlinie taxiert diesen Wert auf 70 % des Mittelwerts (ebd.). Der Grenzwert

(Bedarfsklasse „Niedrig“) dürfte daher mit einer niedrigen, aber signifikanten Häufigkeit im Bestand zu finden sein. Er wird daher im Folgenden als untere Grenze der vermuteten installierten Leistung verwendet.

Die Bedarfsklasse „Sehr hoch“ beschreibt einen Bedarf, wie er sich bei Verwendung heute deutlich überholter Technik ergeben würde (vgl. dazu auch die Anlagenbeschreibungen zu den Bedarfsklassen in den Tabellen 6 und 8 der VDI 3807-4: 2008). Solche Fälle mögen im Bestand vorkommen, vermutlich sogar häufiger als der „sehr niedrige“ Fall. Jedoch wäre eine so ausgestattete Liegenschaft zunächst gewinnbringender einer Sanierung zur Realisierung des Energieeinsparpotenzials zu unterziehen und erst das verbleibende Potenzial stünde dann zum DSI bereit (dann eher auf dem Niveau von „Niedrig“). Diese Bedarfsklasse soll daher im Folgenden ebenfalls keine weitere Verwendung finden.

Somit kann unter Verwendung der Teilenergiekennwerte der [VDI 3807-4: 2008] für jedes Gebäude ein wahrscheinlicher Bereich angegeben werden, in dem sich die im Gebäude für LuK installierte Leistung bewegt. Sie bewegt sich zwischen den Bedarfsklassen „Hoch“ und „Niedrig“ mit einem Mittelwert in der Bedarfsklasse „Mittel“. Wäre nun noch die Verteilung des Gebäudebestands über diese Bedarfsklassen aus Untersuchungen bekannt, wäre es möglich, Wahrscheinlichkeiten für die einzelnen Bedarfsklassen zu berechnen. Da solche Untersuchungen aber bislang fehlen und Verteilungen von Energiekennwerten i. d. R. nicht normalverteilt sind (vgl. Zeine et al. 2007), muss dies im Rahmen dieser Arbeit unterbleiben. Alternativ wird wie folgt vorgegangen: Für jedes Gebäude wird die Leistung für die drei Bedarfsklassen „Niedrig“, „Mittel“ und „Hoch“ berechnet. Die Bedarfsklasse „Hoch“ bildet die obere, die Bedarfsklasse „Niedrig“ die untere Grenze des als wahrscheinlich anzusehenden Bereichs der installierten elektrischen Leistungsaufnahme für die LuK-Anlagen. Die Bedarfsklasse „Mittel“ bildet den Mittelwert. Dabei ist der abgedeckte Leistungsbereich zwischen „Niedrig“ und „Hoch“ sehr groß: Für die Nutzungen „Einzelbüro“ oder „Gruppenbüro“ z. B. wird für die installierte Leistung zur Belüftung in der Bedarfsklasse „Niedrig“ ein Wert von 2,4 W/m² Energiebezugsfläche angegeben. „Mittel“ ist der 3,4-fache Wert davon: 8,1 W/m². Die Bedarfsklasse „Hoch“ liegt bei 13,6 W/m², das entspricht dem 5,6-Fachen der Bedarfsklasse „Niedrig“ und dem 1,7-Fachen der Bedarfsklasse „Mittel“. Durch die Verwendung dieser drei Kennwerte wird also ein relativ breiter Wahrscheinlichkeitsbereich möglicher installierter Leistungen aus LuK eröffnet.

Zwei Voraussetzungen müssen für die Anwendung der Teilenergiekennwerte erfüllt sein:

- Die jeweilige Energiebezugsfläche für die Teilenergiekennwerte muss bekannt sein. Dazu müssen die Teilnutzungsflächen des Gebäudes (Nutzungszonen) abgeschätzt werden.
- Nicht 100 % jeder Zone sind konditioniert. Es muss daher zusätzlich abgeschätzt werden, zu welchem Anteil die jeweilige Nutzungszone konditioniert ist.

Dem ersten Problem widmet sich im Folgenden der Abschnitt 4.4.1. Der Abschnitt 4.4.2 diskutiert, wie der konditionierte Flächenanteil abgeschätzt werden kann. Abschnitt 4.4.3 beschreibt daran anknüpfend ein vereinfachtes Verfahren zur Abschätzung der Dynamik des Betriebsverhaltens des analysierten Potenzials aus LuK.

4.4.1 Das Zonierungsproblem

Die Umsetzung der EU-Gebäuderichtlinie 2002/91/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Gesamteffizienz von Gebäuden (Energy Performance of Buildings Directive, EPBD) in nationales Recht machte es notwendig, eine Regelung zu finden, mit der insbesondere die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden bewertet werden konnte, sowohl unter Berücksichtigung a) der Gebäudefunktion als auch b) der Effizienz einzelner, energetisch relevanter Bereiche wie Beleuchtung, Lüftung und Kälteanlagen [2002/91/EU 2002, s. Artikel 3 und Anhang f.]. Für Deutschland erfolgte die Umsetzung mithilfe der Normenreihe DIN V 18599. Darin wurde festgelegt, dass ein Gebäude zur

Beurteilung seiner Energieeffizienz nicht pauschal einer Gebäudekategorie zuzuordnen ist, sondern vielmehr zunächst die unterschiedlichen Nutzungszonen eines Gebäudes zu definieren sind (Zonierung) und daraus folgend im Referenzgebäudeverfahren deren Energiebedarf zu bestimmen ist. Dies geschieht anhand typischer Teilenergiekennwerte für die einzelnen Nutzungen und Anlagentypen. Mit deren Hilfe werden für die jeweiligen Nutzungszonen die Teilenergiebedarfe der Gewerke Heizung, Warmwasser, Beleuchtung, Lüftung und Kälte sowie daraus folgend der Gesamtenergiebedarf des Gebäudes ermittelt [DIN V 18599-1: 2013, S. 18 ff.].

Der Vorteil dieses Vorgehens liegt in dem sehr universellen, auf alle Nichtwohngebäude anwendbaren Ansatz. Die Schwierigkeit des Verfahrens ergibt sich aus der sich als Resultat der Zonierung ergebenden Komplexität der Bestimmung der Teilenergiebedarfe (pro Zone) und insbesondere bei der Verrechnung von Teilenergieströmen als Verluste und Gewinne von einer Gebäudezone in eine andere (z. B. Wärmeenergie von einer wärmeren Gebäudezone (Gruppenbüro) in eine kältere (Flur)). Durch diese kleinteilige Verrechnung im Mehrzonenmodell und die dazu notwendige detaillierte Dateneingabe wird die Anwendung der DIN V 18599 zeitaufwendig und unübersichtlich. In der Folge wird die DIN V 18599 zwar angewandt, um den Anforderungen der EnEV zu genügen. Für die Energieeffizienzanalyse von Nichtwohngebäuden hat sie sich aber aufgrund des mit ihrer Anwendung verbundenen Aufwands nicht durchgesetzt.

Jedoch erlaubt die EnEV u. U. die Bilanzierung im vereinfachten Verfahren, in dem das Gebäude mit nur einer Zone abgebildet wird (Einzonenmodell). Dies ist insbesondere für Bürogebäude erlaubt, sofern eine Reihe von Bedingungen gegeben ist. Zum Beispiel muss gelten, dass diese nicht gekühlt werden und mindestens zwei Drittel der Grundfläche der Hauptnutzung zuzurechnen sind [EnEV: 2007, Anlage 2 (3)]. Die Anwendung des vereinfachten Verfahrens im Einzonenmodell führt dann aber im Vergleich zum ausführlichen Verfahren zu Abweichungen von bis zu 14 % [Kempf 2011, S. 14] und ist daher prinzipiell unbefriedigend.

In der Folge gibt es derzeit verschiedene Ansätze, um vereinfachte Verfahren zur Energieeffizienzanalyse von NWG zu etablieren, die zwar den Vorteil des differenzierten Ansatzes mit Teilenergiekennwerten im Mehrzonenmodell beibehalten, aber den Aufwand bei der Anwendung der Zonierung deutlich minimieren. Insbesondere zu nennen ist hierbei die Arbeit von [Lichtmeß 2010], die ein Kurzverfahren für die pauschale anteilige Zuweisung zu den Gebäudehüllflächen vorstellt. Darauf aufbauend entwickelte das IWU das Teilenergiekennwerteverfahren (TEK), das auch den Aufwand bei der Zuweisung der installierten Anlagentechnik zu den ermittelten Gebäudezonen deutlich reduziert [IWU 2013a].

Diese Ansätze erleichtern das Arbeiten mit Teilenergiekennwerten zur Bilanzierung von Gebäuden erheblich, da der bei der Anwendung der DIN V 18599 zu betreibende Aufwand bei der Zuweisung von Hüllflächenanteilen und Technikanteilen zu den Zonen erheblich reduziert wird. Bedingung bleibt allerdings, dass die Nutzflächenanteile der jeweiligen Gebäude bekannt sind. Für eine Grobanalyse, in deren Rahmen eine Vor-Ort-Begehung, mindestens jedoch eine Auswertung detaillierter Gebäudepläne, möglich ist, stellt dies kein Problem dar. Im Kontext der hier angewandten Voranalyse liegt für die Gebäude jedoch keine Aufteilung in Nutzungszonen vor. Daher müssen innerhalb dieser Arbeit Verfahren zur Erstellung von Mehrzonenmodellen gefunden werden, die im Rahmen einer Voranalyse, auch ohne näheres Wissen um die konkreten Gegebenheiten in den Gebäuden, zu brauchbaren Erstannahmen führen. Dazu wird wie folgt vorgefahren:

- Mithilfe einer pauschalen Flächenaufteilung nach Neufert & Kister (2012) wird die NGF für Bürogebäude in unterschiedliche Nutzungszonen aufgeteilt.
- Das Prinzip von Neufert & Kister [2012] wird weiter abstrahiert und nach einer Sensitivitätsanalyse als Prinzip für die Flächenaufteilung in Hochschulen verwendet.

Die Ergebnisse beider Verfahren werden am Ende indirekt beim Vergleich der errechneten Anschlussleistungen mit den aus „Insel“ bekannten tatsächlichen Anschlusswerten für LuK validiert.

Diese Vorgehensweise wurde gewählt, weil die Verwendung der VDI-Kennwerte eine Flächenaufteilung zwingend notwendig macht. Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Versuche mit Einzonenmodellen gemacht, die aber weder für Büro- noch für Hochschulgebäude befriedigende Ergebnisse brachten. Übliche Abweichungen gegenüber einer Rechnung mit einer Flächenaufteilung nach Neufert & Kister lagen zwischen 40 % und 50 %. Die Literatur stellt zwar Informationen zur Nutzflächenaufteilung relativ homogener Gebäude (Büros, Schulen etc.), nicht jedoch für die Nutzflächenabschätzung eher inhomogener, individueller Nichtwohngebäude (z. B. Hochschulen, Theater) zur Verfügung. Es soll daher mithilfe der Methodik auch überprüft werden, ob die Anwendung eines vereinfachten Mehrzonenansatzes (abstrahiert nach Neufert & Kister) für den Fall des Fehlens detaillierterer Kenntnisse über die Nutzflächenanteile bei bestimmten Gebäudenutzungen noch hinreichend genaue Aussagen liefert. Vor dem Hintergrund der relativ breiten Streuung, die sich in den Bedarfsklassen „Niedrig“ bis „Hoch“ der in der [VDI 3807-4: 2008] angegebenen Anschlussleistungen widerspiegelt, ist dieses denkbar.

Im Folgenden wird nun zunächst die Flächenaufteilung für Bürogebäude nach Neufert & Kister beschrieben. Daran anschließend werden die sich ergebenden Teilenergiekennwerte eines solchen Mehrzonenmodells denen eines abstrahierten Mehrzonenmodells für Bürogebäude gegenübergestellt. Das abstrahierte Mehrzonenmodell wird dann auf Hochschulgebäude übertragen. Die so gewonnenen Ergebnisse für die Anschlussleistungen werden mit den Ergebnissen für Hochschulgebäude aus „Insel“ verglichen. An dieser Stelle sei noch einmal darauf verwiesen, dass im Rahmen dieser Arbeit neben Gebäuden büroähnlicher Nutzung nur noch Gebäude mit Hochschulnutzung untersucht werden, von denen es in Hamburg nur etwa 157 gibt (gegenüber 7.232 Gebäuden büroähnlicher Nutzung). Der Aufwand der Abstrahierung der Flächenzerlegung und der Validierung des Vorgehens scheint vor dem Hintergrund dieser doch sehr geringen Fallzahl vernachlässigbar zu sein. Es ist jedoch der Versuch, eine Möglichkeit zu schaffen, um für Gebäude, für die sich keine pauschalen Flächenanteile finden lassen, ein sinnvolles „Ersatzvorgehen“ zu definieren und dessen Gültigkeit zu belegen.

4.4.1.1 Pauschale Zonierung nach Neufert und Kister für Bürogebäude

Die Grundlage für die pauschale Aufteilung der Nutzflächen in Bürogebäuden bildet die „Bauentwurfslehre“ von Neufert & Kister. Hierbei handelt es sich um ein Standardwerk für Architekten in der inzwischen 40. Auflage [Neufert & Kister 2012], das Grundlagen über Gestaltung und Raumbedarf insbesondere beim Bau von Nichtwohngebäuden beinhaltet. Es enthält eine detaillierte Beschreibung der in Bürogebäuden benötigten Neben- und Zusatzflächen und gibt dafür Flächenbedarfe in m²/Büroarbeitsplatz an (ebd., S. 476). Da auch absolute Flächenbedarfe für die Hauptnutzung (Büroarbeitsplatz) genannt werden, lässt sich ein relativer Bedarf m² NF/m² NGF ableiten. Zu jeder Teilfläche lässt sich dann der entsprechende Teilenergiekennwert der VDI 3807-4: 2008 zuordnen und damit die Gesamtanschlussleistung für LuK eines Gebäudes berechnen. Dazu dient der Ansatz

$$P_{vent,BK} = P_{inst,vent,BK} = \sum_{NZ=1}^n p_{vent,NZ,BK}^{VDI} * A_{NF,NZ,vent} \quad \text{Formel 4-8}$$

für Lüftungsanlagen bzw.

$$P_{kühl,BK} = P_{inst,kühl,BK} = \sum_{NZ=1}^n p_{kühl,NZ,BK}^{VDI} * A_{NF,NZ,kühl} \quad \text{Formel 4-9}$$

für Kälteanlagen

mit

$P_{vent,BK}$ $P_{inst,vent,BK}$ bzw. $P_{kühl,BK}$ $P_{inst,kühl,BK}$: installierte Gesamtleistung für Lüftungs- bzw. Kälteanlagen in der jeweiligen Bedarfsklasse BK in W,

$p_{vent,NZ,BK}^{VDI}$ bzw. $p_{kühl,NZ,BK}^{VDI}$: nutzungsabhängiger (NZ) und bedarfsklassenabhängiger (BK) Teilenergiekennwert für Lüftung bzw. Kälte in W/m² Bezugsfläche der Zone mit der Nutzung NZ aus [VDI 3807-4: 2008],

$A_{NF,NZ,vent}$ bzw. $A_{NF,NZ,kühl}$: belüftete bzw. gekühlte Nutzfläche der Zone mit der Nutzung NZ in m² Nutzfläche (NF) bzw. Verkehrsfläche (VF) für Verkehrsflächen,

NZ: Bezeichnung der Nutzung der Zone gemäß [VDI 3807-4: 2008].

Dabei ergeben sich $A_{NF,NZ,vent}$ bzw. $A_{NF,NZ,kühl}$ als

$$A_{NF,NZ,vent} = f_{vent} * A_{NF,NZ,ges} \quad \text{Formel 4-10}$$

bzw.

$$A_{NF,NZ,kühl} = f_{kühl} * A_{NF,NZ,ges} \quad \text{Formel 4-11}$$

mit

$A_{NF,NZ,ges}$: Nutzfläche der Zone mit der Nutzung NZ in m² Nutzfläche (NF) bzw. Verkehrsfläche (VF) für Verkehrsflächen,

f_{vent} bzw. $f_{kühl}$: Verhältnis des belüfteten bzw. gekühlten Flächenanteils der NF zur gesamten NF. Dazu gilt:

$$f_{vent} = \frac{A_{NF,vent}}{A_{NF,ges}} \text{ bzw. } f_{kühl} = \frac{A_{NF,kühl}}{A_{NF,ges}} \quad \text{Formel 4-12}$$

mit

$A_{NF,vent}$ bzw. $A_{NF,kühl}$: belüfteter bzw. gekühlter Teil der NF des Gebäudes in m²,

$A_{NF,Geb}$: gesamte Nutzfläche (NF) des Gebäudes in m².

Die Abschätzung von f_{vent} bzw. $f_{kühl}$ und damit des konditionierten Flächenanteils erfolgt in 4.4.2. Hier werden im Weiteren alle $A_{NF,NZ,ges}$ bestimmt. Dies geschieht anhand des Ansatzes

$$A_{NF,NZ,ges} = f_{NZ} * A_{NGF,Geb} \quad \text{Formel 4-13}$$

mit

f_{NZ} : Anteil der Nutzfläche einer Nutzungszone (bzw. der Verkehrsfläche) an der NGF des Gebäudes. Dazu gilt:

$$f_{NZ} = \frac{A_{NF,NZ,ges}}{A_{NGF,Geb}} \quad \text{Formel 4-14}$$

Es ergibt sich durch Einsetzen:

$$A_{NF,NZ,vent} = f_{NZ} * f_{vent} * A_{NGF,Geb} \quad \text{Formel 4-15}$$

bzw.

$$A_{NF,NZ,kühl} = f_{NZ} * f_{kühl} * A_{NGF,Geb} \quad \text{Formel 4-16}$$

und daraus

$$P_{vent,BK} = P_{inst,vent,BK} = \sum_{NZ=1}^n (p_{vent,NZ,BK}^{VDI} * f_{NZ}) * f_{vent} * A_{NGF,Geb} \quad \text{Formel 4-17}$$

bzw.

$$P_{kühl,BK} = P_{inst,kühl,BK} = \sum_{NZ=1}^n (p_{kühl,NZ,BK}^{VDI} * f_{NZ}) * f_{kühl} * A_{NGF,Geb} \quad \text{Formel 4-18}$$

Es zeigt sich, dass die Verwendung der Kennwerte der VDI mit der Bestimmung der Faktoren f_{vent} , $f_{kühl}$ und f_{NZ} direkt mit der NGF der Gebäude erfolgen kann. Ferner wird deutlich, dass es einen direkten linearen Zusammenhang gibt zwischen Gebäudegröße und installierter Leistung aus LuK. Dieser ist abhängig von der Gebäudenutzung bzw. der Nutzung der einzelnen im Gebäude vertretenen Zonen und damit für unterschiedliche Gebäudetypen (Gebäudenutzungen) verschieden, aber für einen Gebäudetyp (eine Gebäudenutzung) immer gleich, sofern innerhalb der Gruppe gleiche f_{NZ} angenommen werden.

Die Ergebnisse für die f_{NZ} bei einer Flächenzerlegung nach Neufert & Kister werden in der folgenden Tabelle 4-23 dargestellt. Dabei wird der von Neufert & Kister genannte Mittelwert für den Flächenbedarf der jeweiligen Teilfläche verwendet. Die Berücksichtigung der von Neufert und Kister angegebenen Streuung ist im Verhältnis zu der großen Bandbreite zwischen den Bedarfsklassen in der

4 Methode zur DSI-Potenzialabschätzung im Rahmen einer automatisierten Voranalyse unter Verwendung von ALKIS und ArcMap

VDI 3807-4: 2008 nicht sinnvoll (s. o.) und unterbleibt daher zur Vereinfachung. Die Tabelle 4-23 verwendet folgenden Farbcode:

- Nutzflächen (NF): nicht farblich hinterlegt
- Verkehrsflächen (VF): grün hinterlegt
- Technische Funktionsflächen (TF): orange hinterlegt

Zwei Teilflächen, die bei Neufert und Kister in den Nebenflächen auftauchen, werden in der weiteren Zuordnung aber den Gebäudeflächen zugerechnet. Es sind die Flächen für die Ver- und Entsorgung (diese werden den technischen Funktionsflächen zugeordnet) und der Eingangsbereich, für den es in der [VDI 3807-4: 2008] keine sinnvolle Entsprechung gibt, sodass er der Verkehrsfläche zugewiesen wird. Die technische Funktionsfläche ist nach VDI nicht konditioniert.

Flächenbezeichnung nach Neufert und Kister		Mittelwerte der Flächenanteile nach Neufert u. Kister		Bezeichnung in [VDI 3807-4: 2008] Tabellen 5 und 7
		in m ² NGF pro Arbeits- platz	f_{NZ} in % NGF	
Arbeitsplatz	Engerer Arbeitsplatz	13	40,625 %	2. Gruppenbüro
	Zusatzfläche Beratung Ablage	2,5	7,813 %	
Nebenflächen	Sanitäranlage	0,7	2,188 %	16. WC und Sanitärräume in Nichtwohngebäuden
	Konferenz/Schulung	0,6	1,875 %	4. Besprechung/Sitzung/ Seminar
	Archivfläche	0,6	1,875 %	20. Lager
	Lager	0,6	1,875 %	20. Lager
	Kantine Cafeteria Teeküche	1,1	3,438 %	12. Kantine
	Eingangsbereich	0,4	1,250 %	19. Verkehrsflächen
	Ver- und Entsorgung	1	3,125 %	-
	Poststelle	0,4	1,250 %	17. Sonstige Aufenthaltsräume
	Rechenzentrum	1	3,125 %	21. Rechenzentrum
	Garagenstellplatz	2,6	8,125 %	32. Parkhäuser für Büro- und Privatnutzung
	Haustechnik	3	9,375 %	-
	Verkehrsfläche (VF)	4,5	14,063 %	19. Verkehrsflächen
Summen		32	100 %	

Tabelle 4-23: Absolute und relative Flächenanteile der Nutzungszonen nach [Neufert & Kister 2012, S. 476] und Zuweisung zu den Teilenergiekennwerten [VDI 3807-4: 2008]

Einige Zuweisungen der VDI-Bezeichnungen zu den Bezeichnungen nach Neufert und Kister sind in der Voranalyse nicht eindeutig zu treffen. Für den Büroarbeitsplatz ist z. B. nicht ersichtlich, ob es sich um ein Gebäude mit Einzelbüros (VDI Nr. 1), Gruppenbüros (VDI Nr. 2) oder Großraumbüros (VDI Nr. 3) handelt. Es wird daher „Gruppenbüro“ stellvertretend als Mittelwert angenommen. Archivflächen nach Neufert & Kister werden der VDI-Nutzung „Lager“, Poststelle nach Neufert und Kister der VDI-Nutzung „Sonstige Aufenthaltsräume“ zugeordnet.

4.4.1.2 Abstrahierung der Zonierung nach Neufert und Kister

Betrachtet man die obige Tabelle genauer, so fallen folgende Dinge auf:

1. Die TF macht 12,5 % der NGF aus, die nicht konditioniert wird.
2. Die VF machen für Bürogebäude einen Anteil von 15 % an der NGF aus. Bei der Lüftung wird diese Fläche gar nicht (0 W/m^2 für alle Bedarfsklassen [VDI 3807-4: 2008]), bei der Kühllaste mit dem geringsten der aufgeführten Bedarfe ($3\text{--}10 \text{ W/m}^2$; ebd., Tabelle 7) berücksichtigt. Der Einfluss der Verkehrsflächen auf die installierte Leistung ist also eher gering.
3. Die Hauptnutzfläche hat mit 48,44 % den größten Anteil an der NGF des Gebäudes (NZ „Büroarbeitsplatz“). Hier wird nur eine Zone nach VDI berücksichtigt, in diesem Fall die Nr. 2. Diese Festlegung hat den entscheidenden Anteil am Gesamtergebnis, ist aber auch relativ einfach zu treffen.
4. Die verbleibende Nebennutzfläche unterteilt sich in sieben verschiedene Nutzungen mit unterschiedlichen Flächenanteilen. In der Summe liegt ihr Anteil mit 23,75 % bei etwa der Hälfte der Hauptnutzfläche. Diese Flächen bilden das Hauptproblem der Zonierung: Es ist ohne weitere Hilfe nicht möglich, sie nach Art und/oder Flächenanteil sinnvoll abzuschätzen. In dieser Gruppe befinden sich Nutzflächen mit geringem Einfluss auf die installierte Leistung aus LuK (Lager, Sanitäräume) und solche mit hohem Einfluss (Kantine, Rechenzentrum).

Die Abschätzung der Flächenanteile der Nebennutzflächen ist ohne weitere Anhaltspunkte nicht möglich. Für Bürogebäude hilft hier die Aufteilung nach Neufert & Kister. Ein Verzicht auf diese Aufteilung und eine Rechnung mit nur einer Gebäudezone (alles Hauptnutzung) führt zu einem relativ großen Unterschied im Vergleich zu einer Flächenaufteilung nach Neufert und Kister. Er liegt je nach Bedarfsklasse zwischen 40 % und 50 % (s. o.). Bereits die Berücksichtigung der Verkehrsfläche reduziert die Abweichung auf dann noch zwischen 10 % und 20 %. Der Fehler lässt sich weiter reduzieren, wenn die Zonen der Nebennutzung zusammengefasst, aber weiter separat betrachtet und nicht (wie im Einzonenmodell) der Hauptnutzung zugeteilt werden. So lassen sich die Nebennutzflächen z. B. vereinfacht und abstrahiert der Standardnutzung „Sonstige Aufenthaltsräume“ zuweisen.

Dies kann wie folgt begründet werden: Grundsätzlich lassen sich die Nebennutzflächen einteilen in Flächen mit regelmäßigem oder dauerhaftem Aufenthalt von Personen (Sitzungsräume, Poststelle, Kantine, Sanitäräume) und nur gelegentlichem Aufenthalt von Personen (Garage, Lager, Archiv, Rechenzentrum). Sie könnten daher auch den zwei Standardnutzungen „Sonstige Aufenthaltsräume“ und „Nebenflächen ohne Aufenthaltsräume“ zugewiesen werden. Dies wäre insofern sachlich sinnvoll, als das Ziel der Konditionierung davon abhängt, ob die Raumluft für Menschen behaglich sein soll oder lediglich technisch bedingte Grenzwerte eingehalten werden müssen (Lager, Garage, Rechenzentrum). Bei den z. T. erheblichen Unterschieden bezüglich der Anforderungen dieser Flächen an die LuK macht dieser Ansatz aber einen zu großen Fehler. Die Anschlussleistungen der Standardnutzung „Sonstige Aufenthaltsräume“ liegen jedoch in einem mittleren Bereich, sodass sich Flächenanteile der Nebennutzung mit geringem Bedarf (Lager) und solche mit hohem Bedarf (Rechenzentrum) mitteln.

Eine abstrahierte, pauschale Flächenzuweisung für Bürogebäude könnte daher wie folgt aussehen:

- Hauptnutzfläche: 48 % Anteil an der NGF mit der Hauptnutzung „Einzel- bzw. Gruppenbüro“
- Nebennutzflächen: 24 % Anteil an der NGF mit der Nebennutzung „Sonstige Aufenthaltsräume“
- Verkehrsflächen: 15 % Anteil an der NGF
- Technische Funktionsfläche: 13 % Anteil an der NGF (nicht konditioniert)

Vergleichbare Werte für die Hauptflächenanteile (NF und VF) finden sich in BKI 2013, S. 85 (allerdings mit Bezug zur BGF, sodass die dort angegebenen Werte vor dem Vergleich mit dem Umrechnungsfaktor $NGF/BGF = 0,86$ zu multiplizieren sind). Der Ansatz der abstrahierten Flächenaufteilung wird im Folgenden auf seine Abweichung gegenüber einer detaillierten Flächenaufteilung nach Neufert und Kister überprüft. Für die weitere Betrachtung wird dazu $f_{kon} = 1$ angenommen. Das entspricht der modellhaften Annahme, dass die gesamte Nutzfläche konditioniert wird. Zudem sei $A_{NGF,Geb} = 1$. Dadurch können $P_{vent,BK}$ und $P_{kühl,BK}$ nun als relative (auf 1 m^2 NGF bezogene) Anschlussleistungen beispielhaft und vergleichbar über zwei Wege berechnet werden: zunächst mit der detaillierten Flächenaufteilung nach Neufert & Kister und danach mit der hier dargestellten abstrahierten Variante der Flächenaufteilung. Die Berechnungen wurden für alle drei Bedarfsklassen jeweils für Lüftung und Kühlkälte erstellt. Es gilt

$$p_{vent,NZ,BK}^{NF,Neufert} = f_{NZ}^{Neufert} \cdot p_{vent,NZ,BK}^{VDI} \quad \text{Formel 4-19}$$

mit

$p_{vent,NZ,BK}^{NGF,Neufert}$: installierte Leistung für Lüftung in der Nutzungszone NZ für die Bedarfsklasse BK in W/m^2 NGF bei einer Flächenaufteilung nach Neufert und Kister,

$f_{NZ}^{Neufert}$: Verhältnis der Nutzfläche einer Nutzungszone an der NGF des Gebäudes

$$f_{NZ}^{Neufert} = \frac{A_{NF,NZ}^{Neufert}}{A_{NGF,Geb}} \quad \text{Formel 4-20}$$

für die Flächenaufteilung nach Neufert

und

$$p_{vent,NZ,BK}^{NF,abstr} = f_{NZ}^{abstr} \cdot p_{vent,NZ,BK}^{VDI} \quad \text{Formel 4-21}$$

mit

$p_{vent,NZ,BK}^{NGF,abstr}$: installierte Leistung für Lüftung in der Nutzungszone NZ für die Bedarfsklasse BK in W/m^2 NGF bei einer abstrahierten Flächenaufteilung,

$f_{NZ}^{BGF,abstr}$: Verhältnis der Nutzfläche einer Nutzungszone an der NGF des Gebäudes für die abstrahierte Flächenaufteilung

$$f_{NZ}^{BGF,abstr} = \frac{A_{NZ,ges,abstr}}{A_{NGF,Geb}} \quad \text{Formel 4-22}$$

Analoges gilt für $p_{kühl,NZ,BK}^{BGF,Neufert}$ und $p_{kühl,NZ,BK}^{BGF,abstr}$.

Die jeweiligen Teilkennwerte für die Nutzungszonen werden aufaddiert und die Summen verglichen. Die Werte aus der Flächenaufteilung nach Neufert und Kister sind die Bezugsgröße (100 %). Die Ergebnisse werden im Folgenden vergleichend dargestellt. Dazu dienen die folgenden drei Tabellen Tabelle 4-24 bis Tabelle 4-26. Die erste Tabelle zeigt die Ergebnisse der Berechnung bei einer Aufteilung nach Neufert und Kister. Die zweite Tabelle gibt die Ergebnisse bei einer abstrahierten Aufteilung wieder. Die dritte Tabelle vergleicht die Summenwerte ($\sum p_{vent,NZ,BK}^{NGF,Neufert}$ mit $\sum p_{vent,NZ,BK}^{NGF,abstr}$ bzw. $\sum p_{kühl,NZ,BK}^{NGF,Neufert}$ mit $\sum p_{kühl,NZ,BK}^{NGF,abstr}$) und gibt die prozentualen Abweichungen des Ansatzes mit der abstrahierten Flächenverteilung im Vergleich zu den Werten mit einer Flächenverteilung nach Neufert und Kister an.

4 Methode zur DSI-Potenzialabschätzung im Rahmen einer automatisierten Voranalyse unter Verwendung von ALKIS und ArcMap

			VDI 3807 -4						Installierte Leistung mit Flächenaufteilung nach Neufert & Kister							
			$p_{vent,NZ,BK}^{VDI}$ in W/m ² Nutzfläche der Zone			$p_{kühl,NZ,BK}^{VDI}$ in W/m ² Nutzfläche der Zone			$p_{vent,NZ,BK}^{BGF,Neufert}$ in W/m ² NGF, für $f_{kon} = 1$			$p_{kühl,NZ,BK}^{BGF,Neufert}$ in W/m ² NGF, für $f_{kon} = 1$				
Flächenaufteilung nach Neufert			Stnd- ntz	Bedarfsklassen Luftförderung			Bedarfsklassen Kühlkälte			Bedarfsklassen Luftförderung			Bedarfsklassen Kühlkälte			
Bezeichnung und Zuordnung		$f_{NZ}^{Neufert}$	Nr.	Hoch	Mittel	Niedrig	Hoch	Mittel	Niedrig	Hoch	Mittel	Niedrig	Hoch	Mittel	Niedrig	
HNF	Arbeitsplatz	48,44 %	2	13,6	8,1	2,4	35	19	11	6,59	3,92	1,16	16,95	9,20	5,33	
Neben- flächen	Sanitäranlage	2,19 %	16	4,5	4,1	3,8	43	24	18	0,10	0,09	0,08	0,94	0,53	0,39	
	Konferenz/ Schulung	1,86 %	4	31,4	16,1	9,1	55	32	21	0,59	0,30	0,17	1,03	0,60	0,39	
	Archivfläche	1,86 %	20	7,2	3,4	0,9	17	7	5	0,14	0,06	0,02	0,32	0,13	0,09	
	Lager	1,86 %	20	7,2	3,4	0,9	17	7	5	0,14	0,06	0,02	0,32	0,13	0,09	
	Kantine Cafeteria Teeküche	3,44 %	12	31,9	19,3	10,9	63	40	26	1,10	0,66	0,37	2,17	1,38	0,89	
	Eingangsbereich	1,25 %	19	0	0	0	10	5	3	0,00	0,00	0,00	0,13	0,06	0,04	
	Ver- und Entsorgung	3,13 %	-	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	Poststelle	1,25 %	17	18	9,8	4,2	42	24	15	0,23	0,12	0,05	0,53	0,30	0,19	
	Rechenzentrum	3,13 %	21	6,2	2,9	0,8	123	79	41	0,19	0,09	0,03	3,84	2,47	1,28	
	Garagenstellplatz	8,15 %	32	15,2	8,6	4,9	0	0	0	1,24	0,70	0,40	0,00	0,00	0,00	
	Haustechnik	9,36 %	-	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Verkehrsfläche (VF)	14,06 %	19	0	0	0	10	5	3	0,00	0,00	0,00	1,41	0,70	0,42		
Summen		100 %								10,30	6,02	2,30	27,63	15,50	9,13	

Tabelle 4-24: Installierte Leistung mit Flächenaufteilung nach Neufert und Kister für alle NZ und BK jeweils für Lüftung und Kälte

4.4 Vorgehen zur Quantifizierung des DSI-Potenzials aus Lüftungs- und Kälteanlagen

		VDI 3807 -4								Installierte Leistung mit abstrahierter Flächenaufteilung					
		$p_{vent,NZ,BK}^{VDI}$ in W/m ² Nutzfläche der Zone	$p_{kühl,NZ,BK}^{VDI}$ in W/m ² Nutzfläche der Zone			$p_{vent,NZ,BK}^{BGF,abstr}$ in W/m ² NGF, für $f_{kon} = 1$			$p_{kühl,NZ,BK}^{BGF,abstr}$ in W/m ² NGF, für $f_{kon} = 1$						
Abstrahierte Flächenaufteilung		Stdn- ntz	Bedarfsklassen Luftförderung			Bedarfsklassen Kühlkälte			Bedarfsklassen Luftförderung			Bedarfsklassen Kühlkälte			
Bezeichnung nach VDI und Zuordnung		$f_{NZ}^{BGF,abstr}$	Nr.	Hoch	Mittel	Niedrig	Hoch	Mittel	Niedrig	Hoch	Mittel	Niedrig	Hoch	Mittel	Niedrig
HNF	Arbeitsplatz	48 %	2	13,6	8,1	2,4	35	19	11	6,53	3,89	1,15	16,80	9,12	5,28
Neben- flächen	Sonstige Aufenthalts- räume	24 %	17	4,5	4,1	3,8	43	24	18	4,32	2,35	1,01	10,08	5,76	3,60
	Technische Funktionsfläche (TF)	13 %	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Verkehrsfläche (VF)	15 %	19	0	0	0	0	10	5	0,00	0,00	0,00	1,50	0,75	0,45
Summen		100 %								10,85	6,24	2,16	28,38	15,63	9,33

Tabelle 4-25: Installierte Leistung mit abstrahierter Flächenaufteilung für alle NZ und BK jeweils Lüftung und Kälte

Flächenaufteilung nach	Berechnete installierte Leistungen für					
	$p_{vent,NZ,BK}^{BGF}$ in W/m ² NGF, für $f_{kon} = 1$			$p_{kühl,NZ,BK}^{BGF}$ in W/m ² NGF, für $f_{kon} = 1$		
	Hoch	Mittel	Niedrig	Hoch	Mittel	Niedrig
Neufert & Kister	10,30	6,02	2,30	27,63	15,50	9,13
Abstrahiert	10,85	6,24	2,16	28,38	15,63	9,33
Absoluter Fehler	0,55	0,22	-0,14	0,75	0,13	0,20
Relativer Fehler	5,37 %	3,69 %	-6,10 %	2,72 %	0,84 %	2,25 %

Tabelle 4-26: Abweichungen in den Summen für die installierte Leistung zwischen abstrahierter Flächenaufteilung und Flächenaufteilung nach Neufert und Kister für alle BK und jeweils Lüftung und Kälte

Tabelle 4-26 zeigt, dass die Fehler mit dem abstrahierten Ansatz im einstelligen Prozentbereich (zwischen +5,37 % und -6,1 % für Lüftung und +0,85 % bis +2,72 % für Kälte) liegen. Tendenziell weichen die Werte mit der abstrahierten Flächenermittlung leicht nach oben ab. Einzige Ausnahme bildet bei der Lüftung die Bedarfsklasse „Niedrig“. Hier wird der Wert, der sich mit einer Flächenaufteilung nach Neufert und Kister ergeben würde, um 6,1 % unterschritten. Der Grund hierfür liegt darin, dass in dieser Bedarfsklasse die Anschlussleistung der Standardnutzung „Sonstige Aufenthaltsräume“ stärker abfällt als in der Summe der anderen (abstrahierten) Teilflächen.

4.4.1.3 Abstrahiertes Mehrzonenmodell für Hochschulgebäude

Die Ergebnisse des Vergleichs lassen eine abstrahierte Flächenaufteilung für eine Voranalyse zu. Die Streuung der angegebenen Leistungswerte der Bedarfsklassen ist erheblich höher als die Abweichung aus den Flächenaufteilungen. Im Folgenden soll dieses Vorgehen daher auf Hochschulgebäude übertragen werden. Dazu müssen einige Anpassungen vorgenommen werden, u. a. muss die Art der Hauptnutzung angepasst werden. Hochschulgebäude sind jedoch eine sehr heterogene Gebäudegruppe. Schon die Unterscheidung, ob ein Gebäude einer naturwissenschaftlichen oder einer geisteswissenschaftlichen Fakultät zuzuordnen ist, bedingt einen erheblichen Unterschied in der Gebäudeausstattung und mithin der Flächenaufteilung. Einen sehr detaillierten Überblick über die unterschiedlichen Flächenanteile in Hochschulgebäuden unterschiedlicher Disziplinen liefern Witkowski & Wertz in einer Studie der HIS GmbH über Ersteinrichtungskosten für Hochschulgebäude [Witkowski & Wertz 2011]. Sie konstatieren: „Die Problematik der vorliegenden Studie liegt (...) in der Zuordnung der Gebäude. Gerade im Bereich der Hochschulinstutitsbauten findet sich – im Gegensatz zu den eher „reinen“ Forschungsgebäuden – eine große Varianz hinsichtlich der Nutzungskonfigurationen. Dies betrifft hinsichtlich der Zusammensetzung der Nutzungsbereiche: Den flächenmäßigen Anteil für theoretische Lehrflächen, den Anteil Praktikumsflächen, den Umfang der im Gebäude geleisteten Forschung und die Integration oder Nichtintegration von zuzuordnenden Nutzungsbereichen (Versuchshallen, Mitarbeiterbüros, Handbibliotheken etc.)“ (ebd., S. 7). Mutig liefern sie trotzdem Flächenaufteilungen auf Basis von mehreren Fallbeispielen für geisteswissenschaftliche Gebäude und Verwaltungsgebäude (ebd., S. 20), naturwissenschaftliche Fakultätsgebäude (ebd., S. 34), „Strukturwissenschaften“ (Informatik) (ebd., S. 41) und Maschinenbau als Beispiel für ingenieurwissenschaftliche Fakultäten (ebd., S. 47). Auf dieser Basis ließe sich eine wunderbar individuelle Flächenaufteilung für das hier zu behandelnde Problem der Teilenergiekennwertzuordnung erstellen. Jedoch ist die Information über die Fachzugehörigkeit der Hochschulgebäude im ALKIS nicht enthalten. Dort wird lediglich unterschieden zwischen Hochschulgebäude (GFK 3023) und Forschungsinstitut (GFK 3024), nicht aber zwischen naturwissenschaftlicher und geisteswissenschaftlicher Zugehörigkeit. Für typische Flächenbezeichnungen der Natur- und Ingenieurwissenschaften (fachspezifische Fläche, Praktikumsfläche, Laborfläche) gibt es darüber hinaus ebenso keine Entsprechungen bei den Teilenergiekennwerten der [VDI 3807-4: 2008].

Werden die Ergebnisse von Witkowski & Wertz für die einzelnen Disziplinen genauer betrachtet, so kann festgestellt werden, dass die Büro- und Seminarräume den größten Anteil an der Nutzfläche bei den Geisteswissenschaften und in der Informatik einnehmen. Für die Natur- und Ingenieurwissenschaften wird dieser Flächenanteil übertroffen von den fachspezifischen Flächen. Diese sind aber nicht näher definiert. Folglich findet sich keine Entsprechung in der [VDI 3807-4: 2008]. Größter gemeinsamer Nenner für eine Hauptnutzung ist die Standardnutzung „Besprechung, Sitzung, Seminar“. Sie liegt in den Anschlusswerten deutlich über der Standardnutzung „Gruppenbüro“ und kann so auch ein Sammelbecken bilden für die eher höheren technischen Anschlussleistungen der LuK in den naturwissenschaftlich-technischen Fakultätsgebäuden.

Als Hauptnutzung wird für Hochschulgebäude (GFK 3023 u. 3024) daher im Folgenden die Standardnutzung nach [VDI 3807-4: 2008] Nr. 4 „Besprechung, Sitzung, Seminar“ festgelegt. Als Nutzung für alle Nebennutzungsflächen wird – wie bei den Bürogebäuden – die Standardnutzung „Sonstige Aufenthaltsräume“ als abstrahierter Mittelwert angenommen.

Schließlich sind noch die anzunehmenden Anteile der Nutzungsflächen festzulegen, ebenso wie die für die Verkehrsfläche (und die technische Funktionsfläche). Eine hilfreiche Quelle für die grundsätzliche Flächenaufteilung sind die statistischen Kennwerte des Baukosteninformationszentrums der Deutschen Architektenkammern [BKI 2013]. Dort findet sich für „Instituts- und Laborgebäude“ (so wie für alle anderen Gebäudetypen auch) eine Tabelle für typische Flächenanteile an der BGF (ebd., S. 119). Umgerechnet (mit dem Umrechnungsfaktor $NGF/BGF = 0,86$; ebd.) ergeben sich als Mittelwerte für den Anteil an der NGF eines „Instituts- und Laborgebäudes“:

- Nutzfläche: 66 %
- Verkehrsfläche: 21 %
- Technische Funktionsfläche: 13 %

Das Verhältnis von Hauptnutzung zu Nebennutzungen ist für Bürogebäude etwa 70/30. Überträgt man dieses Verhältnis auf Hochschulgebäude, so resultiert daraus 46 % der BGF für die Hauptnutzung und 20 % für die Nebennutzung. Als Hauptnutzung wäre auch die Standardnutzung nach [VDI 3807-4: 2008] Nr. 9 „Hörsaal, Auditorium“ denkbar, jedoch sind damit größere Säle gemeint, die keinen guten Wert für die Hauptnutzung bieten, da ihr Flächenanteil i. d. R. zu gering ist [Witkowski & Wertz 2011] und die in der VDI 3807-4: 2008 angegebenen Anschlusswerte für den Durchschnitt der Gebäudenutzung zu groß sind.

Aus diesen Überlegungen ergeben sich als Annahme für die Flächenverteilung von Hochschulgebäuden nach dem abstrahierten Verfahren für das weitere Vorgehen folgende Werte:

- Hauptnutzfläche: 46 % der NGF mit der Standardnutzung Nr. 4 „Besprechung, Sitzung, Seminar“
- Nebennutzung: 20 % der NGF mit der Standardnutzung Nr. 17 „Sonstige Aufenthaltsräume“
- Verkehrsfläche: 21 % der NGF (Standardnutzung Nr. 19 „Verkehrsflächen“)
- Technische Funktionsfläche: 13 % der NGF ohne Konditionierung

4.4.2 Abschätzung des konditionierten Anteils der Nutzfläche

Die Abschätzung der konditionierten Anteile der Nutzfläche $A_{NF,NZ,vent}$ bzw. $A_{NF,NZ,kühl}$ erfolgt mithilfe der statistischen Kennwerte des Baukosteninformationszentrums der Deutschen Architektenkammern (BKI 2013). Dort findet sich für jede aufgeführte Gebäudegruppe eine Tabelle mit Angaben zu den raumluftechnisch behandelten Flächenanteilen. Als Flächenbezug werden sowohl die Nutzfläche als auch die BGF angegeben. Der erste Bezug ist hier zu wählen, da die Flächenanteile der Zonen (Nutzflächen) zuvor mit f_{NZ} aus der NGF berechnet worden sind (s. o.).

Unterschieden werden „entlüftete“ und „be- und entlüftete“ Flächen sowie „teilklimatisierte“ und „vollklimatisierte“ Nutzflächenanteile. Die Werte basieren auf einer unterschiedlichen Anzahl von Fallbeispielen und werden mit einer Streuung über drei Bedarfsklassen angegeben, d. h., es sind jeweils Werte gegeben für den minimal konditionierten Flächenanteil, den mittleren konditionierten Flächenanteil und den maximal konditionierten Flächenanteil. Die Kennwerte des Baukosteninformationszentrums sind neubauorientiert, d. h., sie sollen Anhaltspunkte für die Kalkulationen im Rahmen der Bauplanung liefern. In der Konsequenz werden die Werte immer wieder aktualisiert und Werte älterer Ausgaben sukzessive durch Werte aus neueren Projekten ersetzt. Dies ist für die hier intendierte Verwendung der Daten schlecht. Hier gilt: Je größer die Grundgesamtheit, insbesondere auch im Hinblick auf ältere Gebäude, desto belastbarer die Aussagen. Daher wurden für die Angaben die Werte der älteren Ausgaben des Baukennwertkatalogs recherchiert und in die Grundgesamtheit re-integriert. Konkret recherchiert wurden die Fälle der Ausgaben aus den Jahren 2003, 2004, 2007, 2009 und 2011. Diese dienen zur Ergänzung der Werte der Ausgabe BKI 2013, sodass für Bürogebäude 120 Fallbeispiele in Summe vorliegen und für Institutsgebäude die Anzahl auf 20 erhöht werden kann.

4 Methode zur DSI-Potenzialabschätzung im Rahmen einer automatisierten Voranalyse unter Verwendung von ALKIS und ArcMap

Die folgende Tabelle gibt zunächst die Werte für die lufttechnisch behandelten Teilflächen für Bürogebäude wieder.

Konditionierter Flächenanteil an der NGF für Bürogebäude (Standardeinordnung nach [BKI 2013]) in % NF (Streuung aus n = 120 Fällen)			
	Niedrig	Mittel	Hoch
Entlüftete Fläche	24,6 %	28,6 %	58,2 %
Be- und entlüftete Fläche	19,7 %	26,1 %	70,0 %
Teilklimatisierte Fläche	32,6 %	50,1 %	77,4 %
Klimatisierte Fläche	21,8 %	27,6 %	44,8 %

Tabelle 4-27: Konditionierter Flächenanteil an der NGF für Bürogebäude

Zur Festlegung des zu verwendenden Bereichs von f_{vent} muss Folgendes bedacht werden: Im Regelfall gibt es in einem Gebäude Bereiche, die nur entlüftet werden (z. B. Sanitärbereiche), und Bereiche, die be- und entlüftet werden (i. d. R. die Hauptnutzfläche). Es tauchen aber auch Gebäude auf, die nur entlüftet bzw. nur be- und entlüftet werden. Für die Grenzwertbetrachtung $f_{vent,niedrig}$ ist es daher sinnvoll, den niedrigeren der beiden Werte als Grenzwert für den ventilierten Flächenanteil zu verwenden. Für den Mittelwert $f_{vent,mittel}$ werden beide Werte addiert aus der Überlegung, dass beide Lüftungsvarianten parallel vorkommen können. Für den Maximalwert $f_{vent,hoch}$ findet jeweils der höhere der angegebenen Flächenanteile Verwendung. Hier würde eine Addition einen Wert über 100 % ergeben.

Es gilt

$$\begin{aligned}
 & f_{vent,niedrig} \\
 & = \begin{cases} f_{NF,entl.niedrig}^{BKI} & ; \text{für } f_{NF,entl,niedrig}^{BKI} < f_{NF,bel.+entl,niedrig}^{BKI} \\ f_{NF,bel.+entl,niedrig}^{BKI} & ; \text{für } f_{NF,entl,niedrig}^{BKI} > f_{NF,bel.+entl,niedrig}^{BKI} \end{cases} f_{vent,niedrig} \\
 & = \begin{cases} f_{NF,entl.niedrig}^{BKI} & ; \text{für } f_{NF,entl,niedrig}^{BKI} < f_{NF,bel.+entl,niedrig}^{BKI} \\ f_{NF,bel.+entl,niedrig}^{BKI} & ; \text{für } f_{NF,entl,niedrig}^{BKI} > f_{NF,bel.+entl,niedrig}^{BKI} \end{cases}
 \end{aligned}
 \quad \text{Formel 4-23}$$

$$f_{vent,mittel} = f_{NF,entl,mittel}^{BKI} + f_{NF,entl,mittel}^{BKI}
 \quad \text{Formel 4-24}$$

$$f_{vent,hoch} = \begin{cases} f_{NF,entl,hoch}^{BKI} & ; \text{für } f_{NF,entl,hoch}^{BKI} > f_{NF,bel.+entl,hoch}^{BKI} \\ f_{NF,bel.+entl,hoch}^{BKI} & ; \text{für } f_{NF,entl,hoch}^{BKI} < f_{NF,bel.+entl,hoch}^{BKI} \end{cases}
 \quad \text{Formel 4-25}$$

mit

f_{vent} : lufttechnisch behandelte (ventilierter) Flächenanteil der NF,

$f_{NF,entl.}^{BKI}$: entlüfteter Flächenanteil der NF nach [BKI 2013],

$f_{NF,bel.+entl.}^{BKI}$: be- und entlüfteter Flächenanteil der NF nach [BKI 2013].

Jeweils für die Bedarfsklassen (BK) niedrig, mittel und hoch.

Es ergibt sich für Bürogebäude:

f_{vent} für Bürogebäude in % NF		
Niedrig	Mittel	Hoch
19,7 %	54,7 %	70 %

Tabelle 4-28: f_{vent} für Bürogebäude

Die drei Projektionen „Niedrig“, „Mittel“, „Hoch“ werden mit den jeweiligen Bedarfsklassen der VDI-Kennwerte verrechnet. Dadurch entstehen die Grenzwerte der für die Gebäude errechneten Leistungsbereiche für Lüftung (und Kälte): Der Faktor aus niedrigem Flächenanteil $f_{vent,niedrig}$ und niedriger Bedarfsklasse $p_{vent,NZ,niedrig}^{VDI}$ bildet den unteren, minimalen Wert der möglichen installierten Leistung. Hoher Flächenanteil $f_{vent,hoch}$ multipliziert mit hoher Bedarfsklasse $p_{vent,NZ,hoch}^{VDI}$ bildet den maximalen anzunehmenden Wert der installierten Leistung. Als Mittelwert wird das Ergebnis aus mittlerem Flächenanteil multipliziert mit der mittleren Bedarfsklasse verwendet. Es ergibt sich

$$P_{vent,min} = P_{inst,vent,min} = \sum_{NZ=1}^n p_{vent,NZ,niedrig}^{VDI} * A_{NF,NZ,vent,niedrig} \quad \text{Formel 4-26}$$

mit

$P_{vent,min} P_{inst,vent,min}$: zu erwartender Mindestwert der installierten Leistung für Lüftung in W,

$p_{vent,NZ,niedrig}^{VDI}$: nutzungsabhängiger (NZ) Teilenergiekennwert für Lüftung in der Bedarfsklasse niedrig in W/m² Bezugsfläche der Zone mit der Nutzung NZ aus (VDI 3807-4: 2008),

$A_{NF,NZ,vent,niedrig}$: minimal als belüftet anzusehender Anteil der Nutzfläche NF der Zone NZ nach dem Ansatz (s. o.)

$$A_{NZ,niedrig} = f_{vent,niedrig} * A_{NF,NZ,ges} \quad \text{Formel 4-27}$$

mit

$f_{vent,niedrig}$: niedrigster zu erwartender lufttechnisch behandelter Flächenanteil,

$A_{NF,NZ,ges}$: Gesamtnutzfläche der Zone mit der Nutzung NZ (Bestimmung s. o.).

Analog wird verfahren für den maximal und den im Mittel zu erwartenden Wert der Anschlussleistung für Lüftungsanlagen.

Für die Berechnung der Leistung für die Kühlkälte kann analog verfahren werden. Allerdings ist eine Addition der Werte für die teilklimatisierten und die vollklimatisierten Flächen zur Mittelwertbildung hier nicht sinnvoll. Dies liegt daran, dass eine teilklimatisierte Fläche nicht zwangsläufig gekühlt sein muss. Teilklimatisiert bedeutet, dass neben der Funktion der Lufterwärmung eine weitere der Funktionen „Befeuchtung“ oder „Kühlung“ gegeben sein muss. Es kann sich bei einer teilklimatisierten Fläche also auch um eine Fläche handeln, in der eine H,x-Regelung neben einer Lufterwärmung eine

4 Methode zur DSI-Potenzialabschätzung im Rahmen einer automatisierten Voranalyse unter Verwendung von ALKIS und ArcMap

Befeuchtung der Luft ermöglicht. Dabei wird die Luft auch (adiabatisch) gekühlt. Ist neben der freien und der adiabatischen Kühlung der Raumluft keine weitere Kühlung durch Kompressionskälte mehr nötig oder (aus Kostenreduktionsgründen) nicht vorgesehen, gibt es in einem solchen Gebäude auch kein DSI-Potenzial aus Kühllälte (außer dem Abschalten der Befeuchtung, was aber hier nicht weiter verfolgt werden soll). Die folgende Grafik verdeutlicht diesen Zusammenhang. Sie zeigt, durch welche Maßnahmen (Heizen, Kühlen, Befeuchten und Kombinationen davon) das Behaglichkeitsfeld für die Innenraumluft hergestellt werden kann, wenn zuvor die dargestellten Abweichungen vorliegen. Durch den Verzicht auf eine Kälteanlage werden nur Fälle dauerhaft hoher Außentemperatur ($> 24\text{ °C}$) und einer absoluten Luftfeuchte von $< 11\text{ g/kg}$ nicht bewältigt. Bedingungen mit Temperaturen unter 24 °C und einer absoluten Feuchte von $4\text{--}5\text{ g/kg}$ lassen sich durch Befeuchten allein ins Behaglichkeitsfeld bringen. Bedingungen mit Temperaturen über 24 °C und einer absoluten Feuchte von $> 11\text{ g/kg}$ lassen sich durch Entfeuchten (und ggf. wieder Aufheizen) beherrschen. Eine Kälteanlage ist (insbesondere bei gutem Sonnenschutz, moderaten inneren Lasten und ggf. unter Ausnutzung von Nachtkühlung) durchaus verzichtbar.

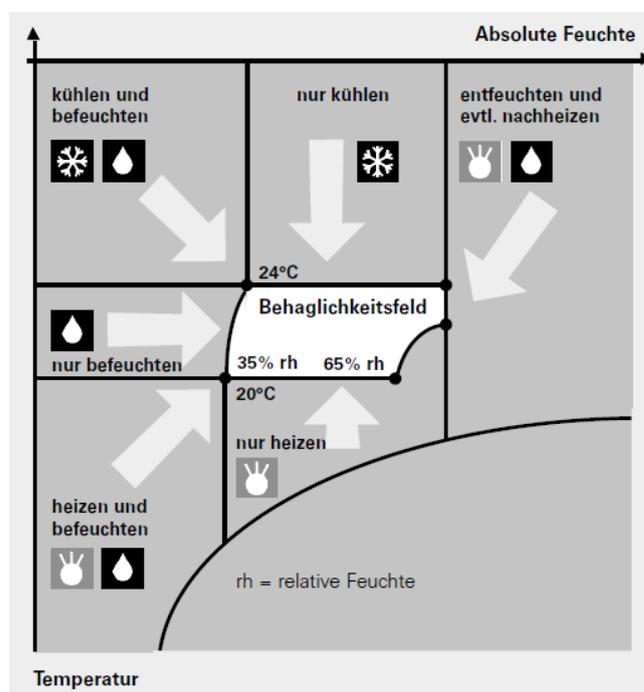


Bild 4-19: Erreichen des Behaglichkeitsfeldes mit unterschiedlichen Klimatisierungsmaßnahmen [Keller 2005, S. 66]

Eine teilklimatisierte Fläche kann durchaus gekühlt sein. In diesem Fall hat sie keine Be- und/oder Entfeuchtungsfunktion. Erst bei Vorliegen aller drei Luftbehandlungsvarianten spricht man von einer (Voll-)Klimaanlage [DIN 1946-1: 1988]. Zur Bestimmung der gekühlten Fläche kann daher nicht wie bei der Lüftung einfach eine Addition der Faktoren für die teilklimatisierte und die klimatisierte Fläche erfolgen. Für eine Abschätzung der gekühlten Fläche wird daher wie folgt verfahren:

- Für den minimalen gekühlten Flächenanteil die kleinere der beiden Angaben zur klimatisierten Fläche verwendet. Diese soll als sicher gekühlt angenommen werden (sofern überhaupt eine Kälteanlage vorhanden ist).
- Für den mittleren Flächenanteil wird der größere der beiden angegebenen Werte des mittleren Bereichs verwendet. Diese Festlegung soll die große Unsicherheit bei der Festlegung des gekühlten, teilklimatisierten Flächenanteils beheben. In einigen Fällen dürfte es sich bei der teilklimatisierten Fläche um gekühlte, aber nicht be- oder entfeuchtete Flächen handeln. Klimatisierte und teilklimatisierte (und damit u. U. teilgekühlte) Flächen können

nebeneinander vorkommen. In anderen Fällen mag die teilklimatisierte Fläche zur Gänze Kühlung beinhalten und keine vollklimatisierte Fläche vorhanden sein.

- Für den maximalen Flächenanteil wird ebenfalls der größere der beiden Werte verwendet.

Die folgende Tabelle beinhaltet die sich aus der obigen Festlegung ergebenden, Flächenanteile $f_{kühl,niedrig}$, $f_{kühl,mittel}$ und $f_{kühl,hoch}$ für Bürogebäude mit Bezug zur NGF.

$f_{kühl}$ für Bürogebäude in % NF		
Niedrig	Mittel	Hoch
21,85 %	50,1 %	77,4 %

Tabelle 4-29: $f_{kühl}$ für Bürogebäude

Die Werte für Hochschulgebäude weichen deutlich von denen für Bürogebäude ab. Insbesondere die klimatisierte Fläche ist deutlich kleiner. Die folgende Tabelle gibt die Werte aus BKI wieder.

Konditionierter Flächenanteil in % NGF für Hochschulgebäude nach (BKI diverse Ausgaben, Jahreszahl jeweils in Klammern, wenn nicht 2013)			
	Niedrig	Mittel	Hoch
Entlüftete Fläche	19,5 %	20,7 %	36,8 %
Be- und entlüftete Fläche	64,5 %	65,7 %	71,3 % (2011)
Teilklimatisierte Fläche			
Klimatisierte Fläche	26,4 % (2009)	30,4 % (2011)	46,2 %

Tabelle 4-30: Konditionierter Flächenanteil in % NGF für Hochschulgebäude

Es ergeben sich folgende Werte für f_{vent} für Hochschulgebäude:

f_{vent} für Hochschulgebäude in % NGF		
Niedrig	Mittel	Hoch
19,5 %	65,7 %	71,3 %

Tabelle 4-31: f_{vent} für Hochschulgebäude

Dabei ist für $f_{vent,mittel}$ abweichend von der oben dargestellten Logik nicht die Summe der beiden Werte zu verwenden, sondern der größere der beiden Werte. Die Summe wäre als Mittelwert zu hoch. Dieses Problem ist hier deutlich der niedrigen Fallzahl geschuldet.

Folgende Werte ergeben sich für $f_{kühl}$ für Hochschulgebäude:

$f_{kühl}$ für Hochschulgebäude in % NGF		
Niedrig	Mittel	Hoch
26,4 %	30,4 %	46,2 %

Tabelle 4-32: $f_{kühl}$ für Hochschulgebäude

4.4.3 Abschätzung der Dynamik des Betriebsverhaltens der installierten Leistung für Lüftung und Kühlung

Lüftungs- und Kälteanlagen sind in ihrem Betriebsverhalten dynamisch. Während der Betrieb von Lüftungsanlagen sich in den meisten Fällen an festgelegten Betriebszeiten orientiert, ist der Betrieb von

4 Methode zur DSI-Potenzialabschätzung im Rahmen einer automatisierten Voranalyse unter Verwendung von ALKIS und ArcMap

Kälteanlagen neben den Gebäudebetriebszeiten auch und vor allem abhängig von der Außentemperatur. Diese Dynamiken gilt es zu berücksichtigen, wenn Aussagen getroffen werden müssen, wann (zu welchem Datum und zu welcher Uhrzeit) welche DSI-Potenziale aus LuK zu erwarten sind. Im Folgenden wird daher die Grundlage für eine grafische Darstellung hergeleitet, die dann das dynamische Verhalten der installierten Leitung aus LuK verdeutlicht. Dafür wird der stündliche Verlauf der mittleren Leistung über ein Jahr dargestellt.

Dazu ist es zunächst notwendig, die Betriebszeit der Anlagen festzulegen, die sich aus der Nutzungszeit der Gebäude ergibt. Eine gute Quelle für pauschale Annahmen dieser Art stellt die DIN V 18599-10: 2013 dar. Dort sind in Anhang A ausführliche Nutzungsprofile für Nutzungszonen in Nichtwohngebäuden aufgeführt (ebd., S. 22). Die Bezeichnung der Zonen deckt sich dabei vollständig mit der Bezeichnung in der [VDI 3807-4: 2008]. Angegeben werden u. a. die tägliche Nutzungszeit der Zone, die tägliche Betriebszeit für RLT in der Zone und die Anzahl der Betriebstage pro Jahr. Da die Anschlusswerte für LuK mit dem oben beschriebenen Verfahren pro Nutzungszone errechnet werden, können diese natürlich auch für die Nutzungszonen aufaddiert wiedergegeben werden. Nimmt man für diese dann die Betriebszeiten der RLT an, wie sie in der DIN V 18599-10: 2013 angegeben werden, ergibt sich ein (stark vereinfachtes) dynamisches Profil. Die folgende Tabelle gibt die Betriebszeiten für die in dieser Arbeit verwendeten Nutzungszonen (NZ) wieder.

Nr.	Bezeichnung der Nutzungszone	Tägliche Nutzungszeit der Zone	Tägliche Betriebszeit der RLT der Zone	Betriebstage pro Jahr	Anmerkung
2	Gruppenbüro	7:00–18:00 Uhr	5:00–18:00 Uhr	250	Kein Betrieb am WE u. an Feiertagen
4	Besprechung/ Sitzung/ Seminar	7:00–18:00 Uhr	5:00–18:00 Uhr	250	Kein Betrieb am WE u. an Feiertagen
12	Kantine	8:00–15:00 Uhr	6:00–15:00 Uhr	250	Kein Betrieb am WE u. an Feiertagen
16	Sanitärräume in NWG	7:00–18:00 Uhr	5:00–18:00 Uhr	250	Kein Betrieb am WE u. an Feiertagen
17	Sonstige Aufenthalts- räume	7:00–18:00 Uhr	5:00–18:00 Uhr	250	Kein Betrieb am WE u. an Feiertagen
19	Verkehrsfläche	7:00–18:00 Uhr	5:00–18:00 Uhr	250	Kein Betrieb am WE u. an Feiertagen
20	Lager	7:00–18:00 Uhr	5:00–18:00 Uhr	250	Kein Betrieb am WE u. an Feiertagen
21	Rechen- zentrum	0:00–24:00 Uhr	0:00–24:00 Uhr	365	
32	Parkhäuser für Büro- und Privatnutzung	7:00–18:00 Uhr	5:00–18:00 Uhr	250	Kein Betrieb am WE u. an Feiertagen

Tabelle 4-33: Betriebszeiten der Nutzungszonen nach [DIN V 18599-10: 2013]

Es ist zu erkennen, dass es für die hier betrachteten Gebäude eigentlich nur drei verschiedene Betriebsprofile gibt: ein Standardprofil für die Hauptnutzungszeiten von 7:00 Uhr bis 18:00 Uhr, ein Profil für die Kantine, das zeitlich etwas reduziert von 8:00 Uhr bis 15:00 Uhr reicht, und ein Profil von 0:00 Uhr bis 24:00 Uhr für das Rechenzentrum. Diese Betriebszeiten können für die Lüftungsanlagen direkt übernommen werden. Dabei sind in einer Darstellung für ein Jahr neben den Wochenenden die gesetzlichen Feiertage zu berücksichtigen. Für die Hochschulen lässt sich zudem ein reduzierter Betrieb in den Semesterferien unterstellen.

Für eine dynamische Darstellung der Kühlleistung muss ein vereinfachtes Verfahren zur Berücksichtigung der Außentemperaturabhängigkeit des Betriebs der Kälteanlagen verwendet werden. Dazu wird wie folgt vorgegangen:

Es wird eine stark vereinfachte lineare Beziehung zwischen der herrschenden Außenlufttemperatur t_e und der benötigten Kälteleistung angenommen in Anlehnung an [Siemens 2013, S. 5 f.]. Diese berücksichtigt nicht die grundsätzlich sehr unterschiedlichen thermischen Dispositionen der Gebäude, sondern legt einen durchschnittlichen Kälteleistungsbedarf für alle Gebäude zugrunde. Ein solches Vorgehen ist nur sinnvoll, da es hier nicht um Aussagen zur Betriebsdynamik für einzelne Gebäude geht, sondern um die Dynamik des gesamten Kollektivs, die ein insgesamt durchschnittliches Verhalten zeigen dürfte (Standardkälteprofil).

Grundsätzlich ist dabei das Teillastverhalten der Kälteerzeuger (Hubkolben-, Schrauben- und Turboverdichter) tatsächlich sehr ähnlich, jedoch kann sich das Teillastverhalten der Wärmeübertragflächen deutlich unterscheiden [Recknagel & Schramek 2007, S. 1862 f.]

Die Temperaturabhängigkeit des Kälteanlagenbetriebs lässt sich für einen vereinfachten Ansatz grob in vier Abschnitte unterteilen [Siemens 2013, S. 5 f.]:

- **$t_e < 12 \text{ °C}$:** Die Kälteanlage kommt nicht zum Einsatz.
- **$12 \text{ °C} \leq t_e < 16 \text{ °C}$:**
Ab etwa 12 °C Außentemperatur ist das Wärmearaufkommen aus internen und solaren Gewinnen größer als die Transmissions- und Lüftungswärmeverluste. Es entsteht ein Wärmeüberschuss, der aber bis zu einer Temperatur von etwa 16 °C mit freier Kühlung (ohne den Einsatz einer Kältemaschine) abgeführt werden kann. In diesem Temperaturbereich entsteht ein Energieaufwand nur für die Hilfsaggregate (Pumpen, Ventilatoren etc.). Nach [VDI 3807-4: 2008, S. 17] liegt der Energieaufwand dafür zwischen 20 % und 30 % der maximalen Leistung.
- **$16 \text{ °C} \leq t_e < 20 \text{ °C}$:**
In diesem Bereich steigt der Kälteleistungsenergiebedarf stark an, da nun die freie Kühlung zur Wärmeabfuhr nicht mehr ausreicht und der Betrieb der Kältemaschine(n) beginnt. Der Leistungsbedarf für die Kälteerzeugung steigt steil an.
- **$20 \text{ °C} \leq t_e$:** Der Kälteleistungsenergiebedarf steigt weiter an, jedoch ist der Anstieg nicht mehr so steil. Ab einer Außenlufttemperatur von 32 °C ist die Kälteanlage dann zu 100 % ausgelastet.

Der Leistungsbedarf über diese vier Temperaturbereiche lässt sich grob annähern durch eine abschnittsweise definierte Geradengleichung der allgemeinen Form:

$$E_C = (f_C * t_e + f_{EC,korr}) * 100 \%$$

Formel 4-28

mit

E_C : Anteil der benötigten elektrischen Leistung zur Kühlung in % $P_{kühl}$,

t_e : Außentemperatur in °C,

4 Methode zur DSI-Potenzialabschätzung im Rahmen einer automatisierten Voranalyse unter Verwendung von ALKIS und ArcMap

f_C : Proportionalitätsfaktor für den Kühlleistungsanteil

mit

$$f_C = \begin{cases} 0 & \text{für } te < 12 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 0,025 & \text{für } 12 \text{ } ^\circ\text{C} \leq te < 16 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 0,1 & \text{für } 16 \text{ } ^\circ\text{C} \leq te < 20 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 0,025 & \text{für } te \geq 20 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases}$$

$f_{Ec,korr}$: lineares Korrekturglied für die Leistungsanteilsbestimmung

mit

$$f_{Ec,korr} = \begin{cases} 0 & \text{für } te < 12 \text{ } ^\circ\text{C} \\ -0,1 & \text{für } 12 \text{ } ^\circ\text{C} \leq te < 16 \text{ } ^\circ\text{C} \\ -1,3 & \text{für } 16 \text{ } ^\circ\text{C} \leq te < 20 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 0,2 & \text{für } te \geq 20 \text{ } ^\circ\text{C}. \end{cases}$$

Die folgende Grafik zeigt den sich ergebenden Verlauf des prozentualen elektrischen Leistungsbedarfs zur Kälteerzeugung über die Außentemperatur.

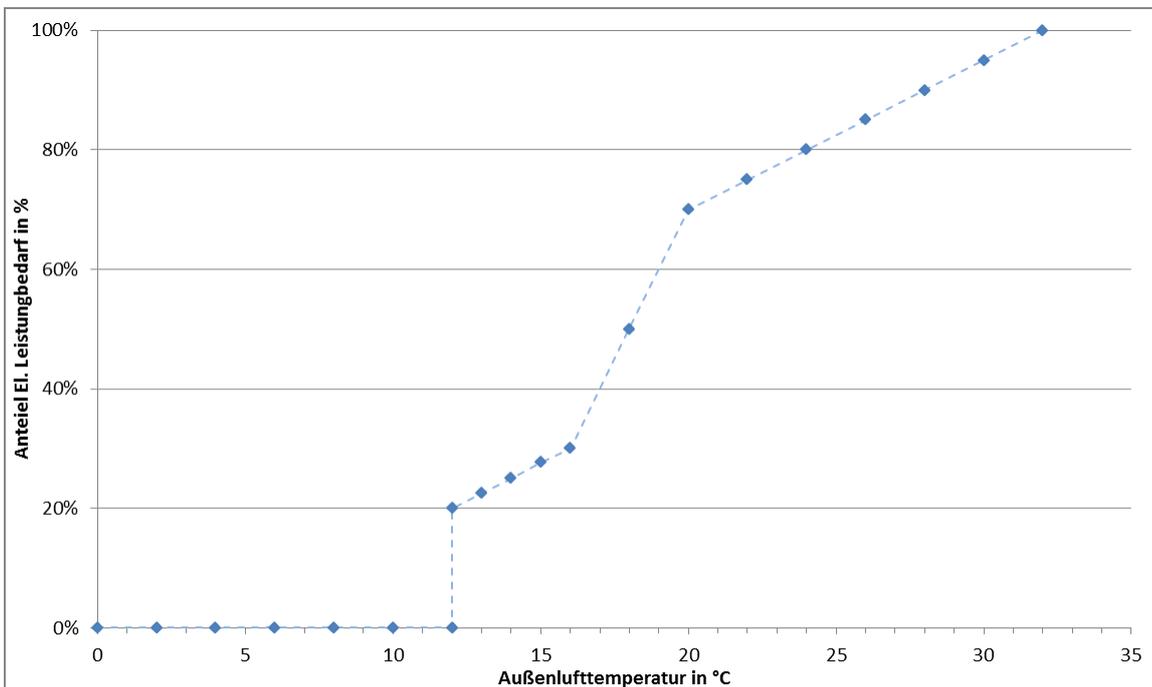


Bild 4-20: Energiebedarf für die Erbringung der notwendigen Kälteleistung in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur (eigene Darstellung, nach [Siemens 2013]).

Wird die Temperaturabhängigkeit mit den oben angegebenen Betriebszeiten kombiniert, so lässt sich mit Annahme eines Außentemperaturverlaufs auch für die benötigte elektrische Leistung zur Kühlung der Gebäude ein dynamisches Profil erstellen (Lastgang). Dazu wurden Stundenmittelwerte der Wetterstation Hamburg-Fuhlsbüttel verwendet [DWD 2013]. Daten des langjährigen Mittels wurden bewusst nicht verwendet, da wegen der Temperaturentwicklungen der letzten Jahre diese Daten nicht

mehr repräsentativ für das Wettergeschehen erscheinen. Stattdessen werden die Ergebnisse beispielhaft für die Wetterdaten des Jahres 2012 berechnet.

Die Ergebnisse aller Berechnungen für die installierte Leistung aus LuK der untersuchten Gebäude werden im folgenden Kapitel wiedergegeben.

5 Validierung der DSI-Potenzialabschätzung

Die Validierung der durch Anwendung der oben beschriebenen Methode gewonnenen Ergebnisse erfolgt im Abgleich mit den im Rahmen des Projekts „Insel“ detailliert untersuchten Gebäuden. Dafür stehen die Liegenschaften aus „Insel“ zur Verfügung, für die im Projekt auch der Einsatz einer LMA simuliert wurde. Es sind dies acht Hochschulliegenschaften und vier Verwaltungsgebäude büroähnlicher Nutzung. Die Hochschulliegenschaften werden stets von einer größeren Anzahl Gebäude gebildet. Davon sind aber im Rahmen des Projekts „Insel“ meist nicht alle berücksichtigt worden, sondern nur die, in denen bereits Anlagen auf eine LMA aufgeschaltet waren oder wo nach Erkenntnissen damaliger Begehungen für eine LMA potenziell interessante Anlagen vorhanden waren. Entsprechend wurden nur diese Gebäude zur Verifizierung herangezogen.

Im Folgenden werden jeweils die bei den Liegenschaftsbegehungen real ermittelten Anschlussleistungen für LuK mit den Leistungswerten verglichen, die mithilfe der oben beschriebenen Methode zur Voranalyse berechnet wurden. Dies wird zunächst für die Hochschulliegenschaften dargestellt und daran anschließend für die Verwaltungsgebäude büroähnlicher Nutzung. Dabei ist zu beachten, dass die Voranalyse ein theoretisches Potenzial ermittelt, während die in „Insel“ ausgemachten Leistungen dem wirtschaftlichen Potenzial entsprechen, also nur die Anlagen beinhalten, die wirtschaftlich an eine LMA angeschlossen wurden oder unter damaligen Bedingungen wirtschaftlich hätten angeschlossen werden können. Das bedeutet, dass in der Realität stets eine Reihe von vorhandenen Anlagen keine Berücksichtigung findet, z. B. weil der Aufwand für die zur Anbindung zusätzlich notwendige LuK-Technik in keinem positiven Verhältnis zum Leistungszuwachs durch diese Anlagen steht. Ein klassisches Beispiel sind Abluftanlagen in WCs. Diese sind i. d. R. nicht in LMA integriert. Auch eine Integration von Lüftungsanlagen in weiter entfernten Gebäudeteilen kann wegen des erhöhten Installationsaufwands schnell unattraktiv werden, Gleiches gilt für dezentrale Kältesysteme (mehrere Split-Klimaanlagen statt zentraler Kälteanlage).

Eine gute Untersuchung der bei einer Realisierung von DSI-Potenzialen abnehmend zur Verfügung stehen Leistung entstand im E-Energy-Projekt „Modellstadt Mannheim“. Grein et al. [2009] analysieren in ihrer Studie das theoretische Potenzial aus Kälteanlagen für die Stadt Mannheim und schränken dessen Verfügbarkeit über das wirtschaftlich-technische Potenzial bis zum realisierbaren Potenzial, das auch nicht-technische Hemmnisse bei der Realisierung berücksichtigt, immer weiter ein [Grein et al. 2009, S. 101 ff.].

Das mit der hier vorgestellten Methode zur Voranalyse ermittelte Potenzial stellt in diesem Sinne ein theoretisches Potenzial dar. Die realisierte Leistung in den LMA sollte in dieser Validierung idealerweise also etwas darunter liegen.

Im Folgenden werden für die Liegenschaften die Ergebnisse der Bedarfsklasse „Mittel“ als erwarteter Mittelwert angegeben. Die Ergebnisse für die Bedarfsklassen „Niedrig“ und „Hoch“ geben die untere bzw. obere Grenze der für die Liegenschaften zu erwartenden Ergebnisse wieder.

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Insel“ wurde den Liegenschaftsbetreibern eine Anonymisierung ihrer Daten zugesichert. Daher werden im Folgenden weder Adressen noch konkrete Bezeichnungen der Liegenschaften verwendet. Die Liegenschaften werden stellvertretend mit ihrer Identifikationsnummer aus dem Forschungsprojekt „Insel“ bezeichnet. Die Gebäudefunktion (insbesondere der Verwaltungsgebäude) wird anhand einer Umschreibung dargestellt.

5.1 Validierung für Hochschulgebäude

5.1.1 Validierung für „Insel“ ID 01a: Ein großer geisteswissenschaftlicher Universitätscampus

Die Liegenschaft mit der „Insel“ ID 01 ist ein großer zentraler Universitätscampus in Hamburg mit einer BGF von in Summe rund 312.000 m². Es ist dies die größte öffentliche Liegenschaft der Stadt. Der Campus teilt sich in zwei Bereiche 01a und 01b, die hier getrennt voneinander betrachtet werden sollen, da sie zwei separate Lastmanagementbereiche abbilden.

01a ist ein großer, hauptsächlich geisteswissenschaftlicher Campus mit 20 Gebäuden und einer BGF von rund 179.000 m². Der folgende Kartenausschnitt gibt einen Überblick über die Anordnung der Gebäude. Der Farbcode ordnet die Gebäude einer Leistungsklasse für die in der Voranalyse ermittelte Leistung für Lüftung bei mittlerem Bedarf zu.



Bild 5-1: Gebäude der Liegenschaft ID 01a – Einfärbung nach Leistungsklasse der installierten Leistung aus Lüftungsanlagen in der Bedarfsklasse „Mittel“ ($P_{vent, mittel}$)

Die folgende Tabelle enthält die Ergebnisse der Voranalyse für alle Gebäude der Liegenschaft im Detail. Anlagen aus zehn Gebäuden sind auf einer LMA aufgeschaltet. Die letzte Spalte weist auf diese Gebäude hin.

Gebäude Nr.	Anz. der oberirdischen Geschosse	Anzahl der unterirdischen Geschosse	BGF in m ²	GFK	Kategorie	Theoretische Leistung für Lüftung in kW für Bedarfsklasse			Theoretische Leistung für Kälte in kW für Bedarfsklasse			In „Insel“ berücksichtigt?
						Hoch	Mittel	Niedrig	Hoch	Mittel	Niedrig	
01	5	0	6.353	3023	B1	73	35	6	94	35	20	Nein
02	6	0	44.022	3023	A	504	241	38	648	245	137	Ja
03	3	0	2.562	3023	C	29	14	2	38	14	8	Nein
04	1	0	469	3023	C	5	3	0	7	3	1	Nein
05	1	0	1.232	3023	C	14	7	1	18	7	4	Ja
06	5	0	5.245	3023	B1	60	29	5	77	29	16	Nein
07	4	0	13.602	3023	A	156	74	12	200	76	42	Nein
08	4	0	4.248	3023	B1	46	22	3	59	22	12	Ja
09	4	0	11.224	3023	A	129	61	10	165	62	35	Ja
10	6	0	7.836	3023	B1	46	22	4	60	23	13	Ja
11	3	0	6.807	3023	B1	78	37	6	100	38	21	Ja
12	5	0	2.705	3023	C	31	15	2	40	15	8	Nein
13	15	0	28.485	3023	A	326	156	25	419	159	89	Ja
14	3	0	8.301	3023	B1	95	45	7	122	46	26	Nein
15	4	0	2.862	3023	C	33	16	2	42	16	9	Ja
16	1	0	488	3023	C	6	3	0	7	3	2	Nein
17	3	0	8.289	3023	B1	95	45	7	122	46	26	Nein
18	7	0	17.416	3023	A	199	95	15	256	97	54	Ja
19	6	0	5.933	3023	B1	68	32	5	87	33	19	Nein
20	1	0	969	3023	C	11	5	1	14	5	3	Ja
Summe			179.048			2.004	957	151	2.575	974	545	
Summe für die in „Insel“ betrachteten Gebäude			125.101			1.386	662	105	1.781	674	377	
Tatsächlich in „Insel“ identifizierte Leistung						751			710			
Absolute Differenz zur Bedarfsklasse „Mittel“ in kW						+89			+36			
Relative Differenz zur Bedarfsklasse „Mittel“						13,44 %			5,34 %			

Tabelle 5-1: Ergebnisse der Voranalyse und der Validierung für Liegenschaft ID 01a

Die gesamte in der Liegenschaft durch die Voranalyse ermittelte mittlere Leistung für alle Gebäude der Liegenschaft liegt bei 957 kW für Lüftung und 974 kW für Kälte. Die für die zehn in die LMA integrierten Gebäude ermittelte mittlere Leistung für Lüftung liegt bei 662 kW. Die tatsächlich installierte Leistung liegt 13,44 % darüber bei 751 kW, was einer absoluten Differenz von 89 kW entspricht. Die installierte

5 Validierung der DSI-Potenzialabschätzung

Leistung für Kälte liegt mit 710 kW um 36 kW über dem in der Voranalyse ermittelten Wert, was einer Abweichung von 5,34 % gleichkommt. Damit liegen die Ergebnisse der Voranalyse für die Bedarfsklasse „Mittel“ sehr nah an den tatsächlich gefundenen Werten. Die tatsächlichen Abweichungen liegen weit unter den durch die Bedarfsklassen „Niedrig“ und „Hoch“ gesetzten Grenzen der möglichen Streuung. Die folgende Grafik verdeutlicht die Ergebnisse. Die blauen Säulen beschreiben die in „Insel“ analysierte Leistung. Die roten Markierungen geben die in der Voranalyse für die Bedarfsklassen „Niedrig“, „Mittel“ und „Hoch“ ermittelten Werte für die installierte Leistung der zehn Gebäude wieder.

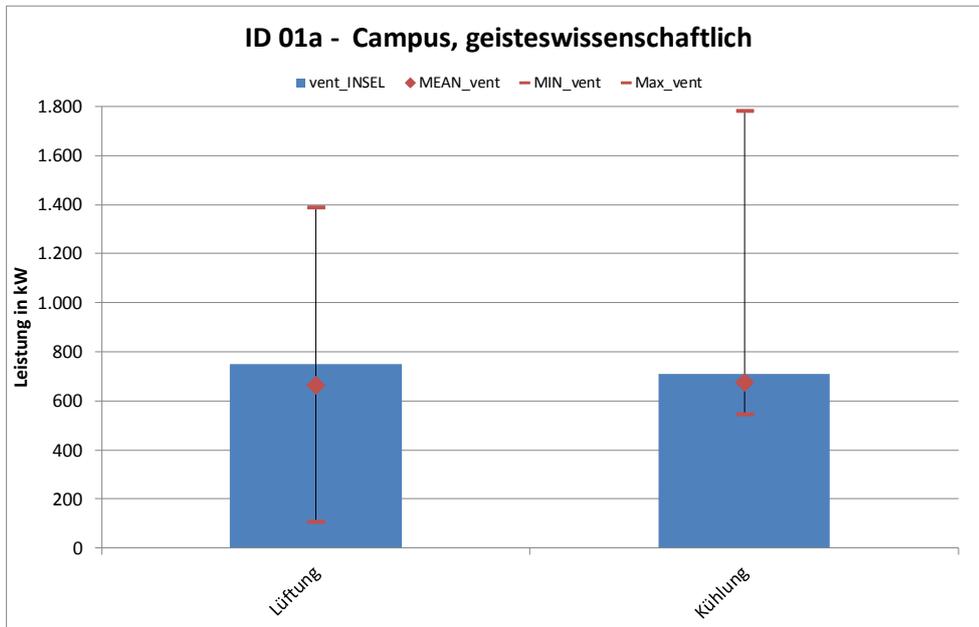


Bild 5-2: Ergebnisse der Validierung für Liegenschaft ID 01a

5.1.2 Validierung für „Insel“ ID 01b: Ein großer naturwissenschaftlicher Universitätscampus

01b ist der zweite Teil der Liegenschaft mit der ID 01. Es handelt sich um einen großen naturwissenschaftlichen Campus mit 15 Gebäuden und einer BGF von rund 133.000 m². Der folgende Kartenausschnitt zeigt einen Überblick der Gebäudeanordnung mit der Farbcodierung der Leistungsklassen. Die durch die Voranalyse ermittelten Leistungen beziehen sich auf Leistungen für Lüftung bei mittlerem Bedarf.

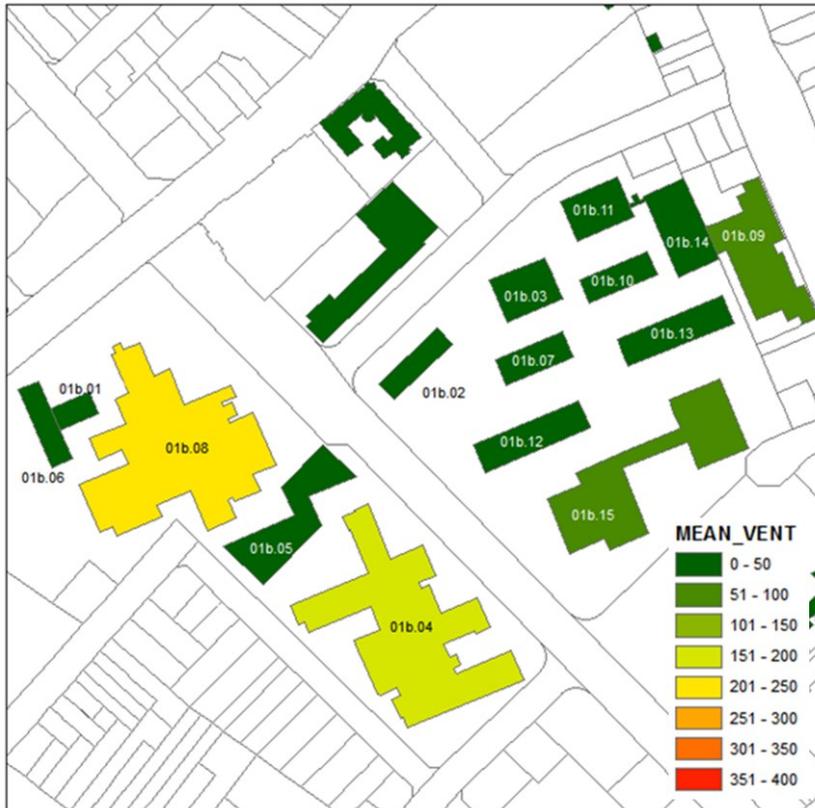


Bild 5-3: Gebäude der Liegenschaft ID 01b – Einfärbung nach Leistungsklasse der installierten Leistung aus Lüftungsanlagen in der Bedarfsklasse „Mittel“ ($P_{vent, mittel}$)

In diesem Fall sind nur Anlagen eines einzigen Gebäudes auf die LMA aufgeschaltet. Die folgende Tabelle enthält wieder die Ergebnisse der Voranalyse für alle Gebäude der Liegenschaft im Detail.

5 Validierung der DSI-Potenzialabschätzung

Gebäude Nr.	Anz. der oberirdischen Geschosse	Anzahl der unterirdischen Geschosse	BGF in m ²	GFK	Kategorie	Theoretische Leistung für Lüftung in kW für Bedarfsklasse			Theoretische Leistung für Kälte in kW für Bedarfsklasse			In „Insel“ berücksichtigt?
						Hoch	Mittel	Niedrig	Hoch	Mittel	Niedrig	
01	2	0	610	3024	C	7	3	1	9	3	2	Nein
02	1	0	561	3023	C	6	3	0	8	3	2	Nein
03	2	0	1.666	3023	C	19	9	1	25	9	5	Nein
04	7	1	28.277	3023	A	324	155	25	416	157	88	Nein
05	5	0	8.575	3023	A	98	47	7	126	48	27	Nein
06	2	0	1.128	3023	C	13	6	1	17	6	4	Nein
07	3	0	1.845	3023	C	21	10	2	27	10	6	Nein
08	21	0	39.068	3023	A	447	214	34	575	217	122	Ja
09	7	0	15.190	3023	A	174	83	13	224	85	47	Nein
10	3	0	1.707	3023	C	20	9	1	25	10	5	Nein
11	5	0	4.230	3023	B1	48	23	4	62	24	13	Nein
12	7	0	7.399	3023	B1	85	41	6	109	41	23	Nein
13	7	0	7.427	3023	B1	85	41	6	109	41	23	Nein
14	4	0	4.908	3023	B1	56	27	4	72	27	15	Nein
15	3	0	10.143	3023	A	116	56	9	149	56	32	Nein
Summe			132.734			1.519	727	114	1.953	737	414	
Summe für die in „Insel“ betrachteten Gebäude			39.068			447	214	34	575	217	122	
Tatsächlich in „Insel“ identifizierte Leistung						167			325			
Absolute Differenz zur Bedarfsklasse „Mittel“ in kW						-47			108			
Relative Differenz zur Bedarfsklasse „Mittel“						-21,96 %			49,77 %			

Tabelle 5-2: Ergebnisse der Voranalyse und der Validierung für Liegenschaft ID 01b

Insgesamt wären in dieser Liegenschaft bei mittlerem Bedarf etwa 727 kW aus Lüftungsanlagen und 737 kW aus Kälteanlagen zu erwarten. Allerdings liegen nur für das mit 21 Stockwerken größte Gebäude der Liegenschaft konkrete Werte vor. Dort sind 167 kW in Lüftungsanlagen installiert und 325 kW in Kälteanlagen. Nach der Voranalyse wären 214 kW für Lüftung zu erwarten gewesen, was einer absoluten Differenz von 47 kW bzw. rund 22 % entspricht. Für Kälte geht die Differenz interessanterweise in die andere Richtung: Zu erwarten gewesen wären bei mittlerem Bedarf nur 217 kW. Die Differenz liegt bei 108 kW bzw. rund 50 %. Offensichtlich ist der Kältebedarf in diesem Gebäude eher hoch. Allerdings ist dieser Bedarf immer noch deutlich niedriger als in der Voranalyse für die Bedarfsklasse „Hoch“ ermittelt (obere Grenze der Streuung). Die folgende Grafik verdeutlicht die Ergebnisse (reale Werte aus „Insel“: blaue Säulen. Werte der Voranalyse für die Bedarfsklassen „Niedrig“, „Mittel“ und „Hoch“: rote Markierungen).

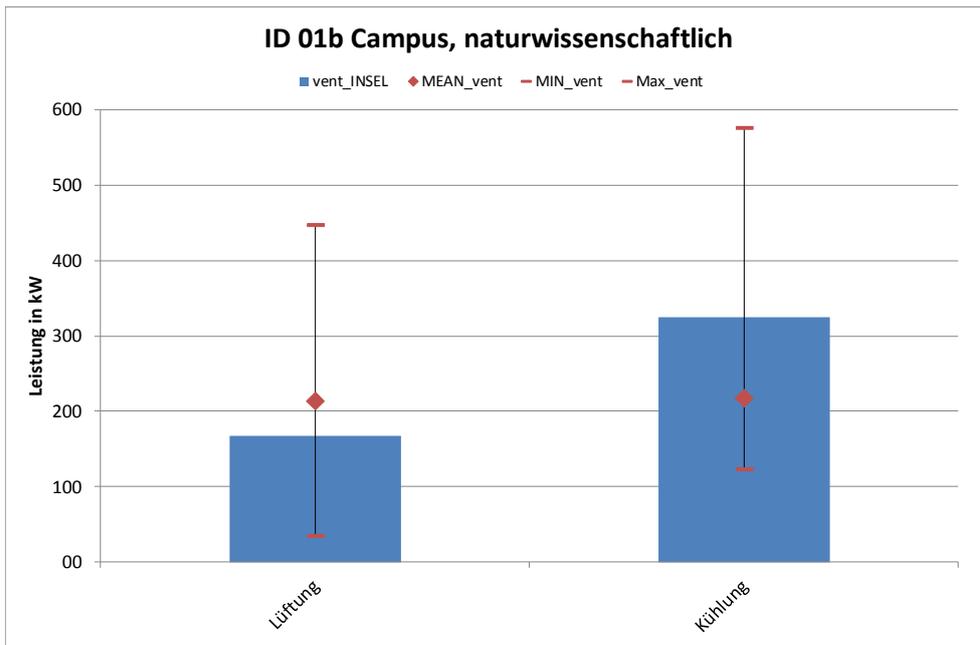


Bild 5-4: Ergebnisse der Validierung für Liegenschaft ID 01b

5.1.3 Validierung für „Insel“ ID 06: Ingenieurwissenschaftlicher Campus der Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW)

Die Liegenschaft mit der ID 06 ist ein vorwiegend ingenieurwissenschaftlicher Campus der Hochschule für Angewandte Wissenschaften. Er besteht aus insgesamt sechs Gebäuden mit einer Fläche von in der Summe rund 90.000 m² BGF. Die folgende Grafik gibt einen Überblick über die Liegenschaft.



Bild 5-5: Gebäude der Liegenschaft ID 06 – Einfärbung nach Leistungsklasse der installierten Leistung aus Lüftungsanlagen in der Bedarfsklasse „Mittel“ ($P_{vent, mittel}$)

Vier Gebäude enthalten Anlagen, die auf eine LMA aufgeschaltet sind. Die folgende Tabelle gibt die aus der Voranalyse resultierenden Ergebnisse wieder.

Gebäude Nr.	Anz. der oberirdischen Geschosse	Anzahl der unterirdischen Geschosse	BGF in m ²	GFK	Kategorie	Theoretische Leistung für Lüftung in kW für Bedarfsklasse			Theoretische Leistung für Kälte in kW für Bedarfsklasse			In „Insel“ berücksichtigt?
						Hoch	Mittel	Niedrig	Hoch	Mittel	Niedrig	
01	17	0	27.574	3023	A	316	151	24	406	153	86	Ja
02	10	0	16.670	3023	A	191	91	15	245	93	52	Nein
03	8	0	20.200	3023	A	231	111	18	297	112	63	Ja
04	6	0	18.366	3023	A	210	101	16	270	102	57	Ja
05	3	0	5.151	3023	B1	59	28	4	76	29	16	Ja
06	2	0	2.316	3023	C	27	13	2	34	13	7	Nein
Summe			90.277			1.034	495	79	1.328	502	281	
Summe für die in „Insel“ betrachteten Gebäude			71.291			816	391	62	1.049	396	222	
Tatsächlich in „Insel“ identifizierte Leistung						446			600			
Absolute Differenz zur Bedarfsklasse „Mittel“ in kW						+55			+204			
Relative Differenz zur Bedarfsklasse „Mittel“						14,07 %			51,52 %			

Tabelle 5-3: Ergebnisse der Voranalyse und der Validierung für Liegenschaft ID 06

Zu erwarten gewesen wären laut Voranalyse für die gesamte Liegenschaft etwa 495 kW aus Lüftungsanlagen und 502 kW aus Kälteanlagen. Für die Teilmenge der vier in die LMA integrierten Gebäude wären noch 391 kW bzw. 396 kW zu erwarten. Tatsächlich sind aber 446 kW für Lüftung und sogar 600 kW für Kälte installiert. Für Lüftung ist die Abweichung mit 55 kW bzw. 14,07 % relativ klein. Für Kälte ist sie mit 204 kW bzw. 51,52 % schon deutlich größer. Wie schon in der Liegenschaft 01b scheint der Kältebedarf an diesem Campus eher hoch. Allerdings gilt auch hier, dass der Bedarf immer noch deutlich niedriger ist als in der Voranalyse für die Bedarfsklasse „Hoch“ ermittelt (obere Grenze der Streuung). Die folgende Grafik verdeutlicht die Ergebnisse (reale Werte aus „Insel“: blaue Säulen. Werte der Voranalyse für die Bedarfsklassen „Niedrig“, „Mittel“ und „Hoch“: rote Markierungen).

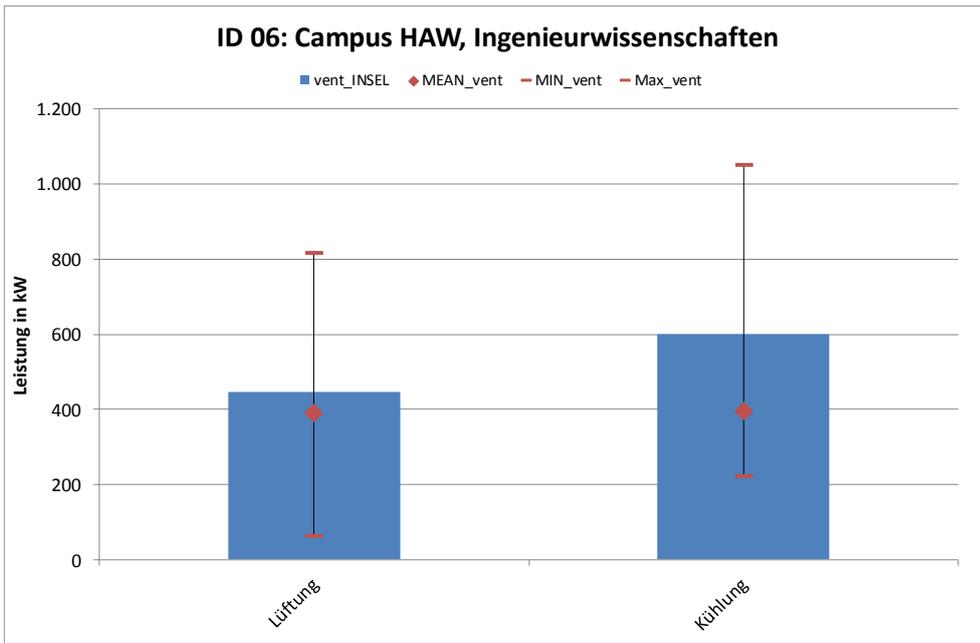


Bild 5-6: Ergebnisse der Validierung für Liegenschaft ID 06

**5.1.4 Validierung für „Insel“ ID 10:
Kleinerer naturwissenschaftlicher Campus der Universität**

Bei dieser Liegenschaft handelt es sich um einen kleineren naturwissenschaftlichen Campus der Universität mit drei Gebäuden und einer BGF von rund 34.000 m². Die folgende Grafik gibt einen Überblick über die Liegenschaft.

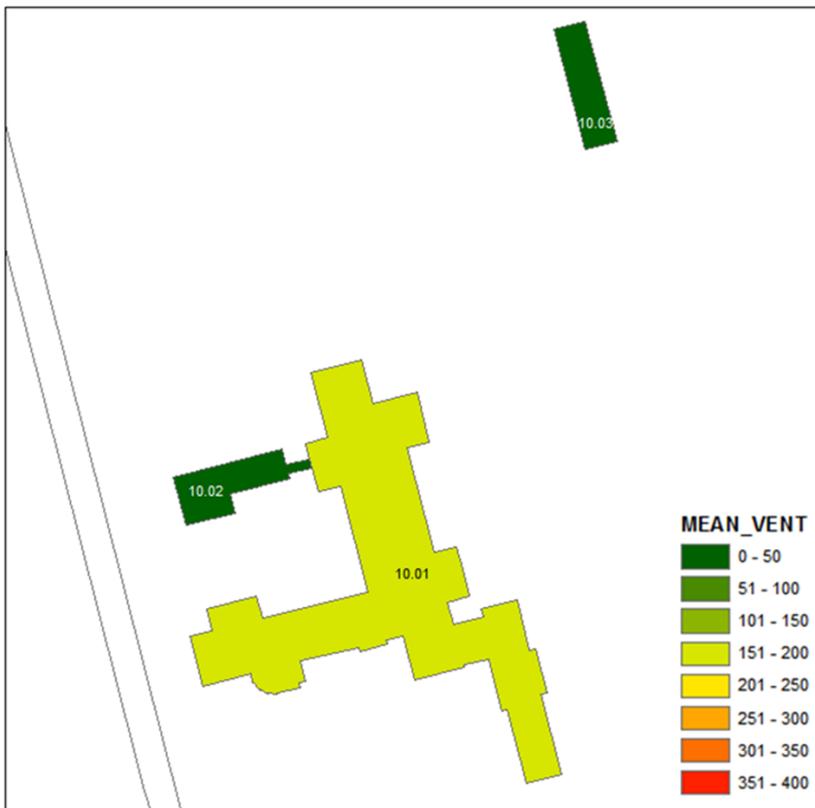


Bild 5-7: Gebäude der Liegenschaft ID 10 – Einfärbung nach Leistungsklasse der installierten Leistung aus Lüftungsanlagen in der Bedarfsklasse „Mittel“ ($P_{\text{vent, mittel}}$)

Ein Gebäude dominiert aufgrund seiner Größe die Liegenschaft. Es repräsentiert mit 31.000 m² den allergrößten Teil der Liegenschaft. Nur dieses Gebäude wurde in „Insel“ betrachtet. Die Ergebnisse der Voranalyse zeigt die folgende Tabelle.

Gebäude Nr.	Anz. der oberirdischen Geschosse	Anzahl der unterirdischen Geschosse	BGF in m ²	GFK	Kategorie	Theoretische Leistung für Lüftung in kW für Bedarfsklasse			Theoretische Leistung für Kälte in kW für Bedarfsklasse			In „Insel“ berücksichtigt?
						Hoch	Mittel	Niedrig	Hoch	Mittel	Niedrig	
01	5	0	30.985	3023	A	355	170	27	456	172	97	Ja
02	4	0	2.510	3023	C	29	14	2	37	14	8	Nein
03	1	0	558	2020	C	3	2	0	10	4	1	Nein
Summe			34.053			387	186	29	503	190	106	
Summe für die in „Insel“ betrachteten Gebäude			30.985			355	170	27	456	172	97	
Tatsächlich in „Insel“ identifizierte Leistung						143			78			
Absolute Differenz zur Bedarfsklasse „Mittel“ in kW						-27			-94			
Relative Differenz zur Bedarfsklasse „Mittel“						-15,88 %			54,65 %			

Tabelle 5-4: Ergebnisse der Voranalyse und der Validierung für Liegenschaft ID 10

Aus der Voranalyse zu erwarten waren 170 kW für Lüftung, gefunden wurden 143 kW. Die Abweichung beträgt rund 16 % bzw. 27 kW. Für Kälte ist die Abweichung wieder in der Größenordnung der vorher beschriebenen Liegenschaften 01b und 06. Allerdings weist sie diesmal in die entgegengesetzte Richtung: Statt der nach der Voranalyse zu erwartenden 172 kW wurden nur 78 kW gefunden. Die installierte Leistung für Kälte ist damit um 94 kW bzw. knapp 55 % niedriger als erwartet. Damit liegt sie noch unter dem Wert für die Bedarfsklasse „Niedrig“, wie die folgende Grafik verdeutlicht. Der Wert für die Lüftung ist wieder relativ nah an dem Wert für die Bedarfsklasse „Mittel“.

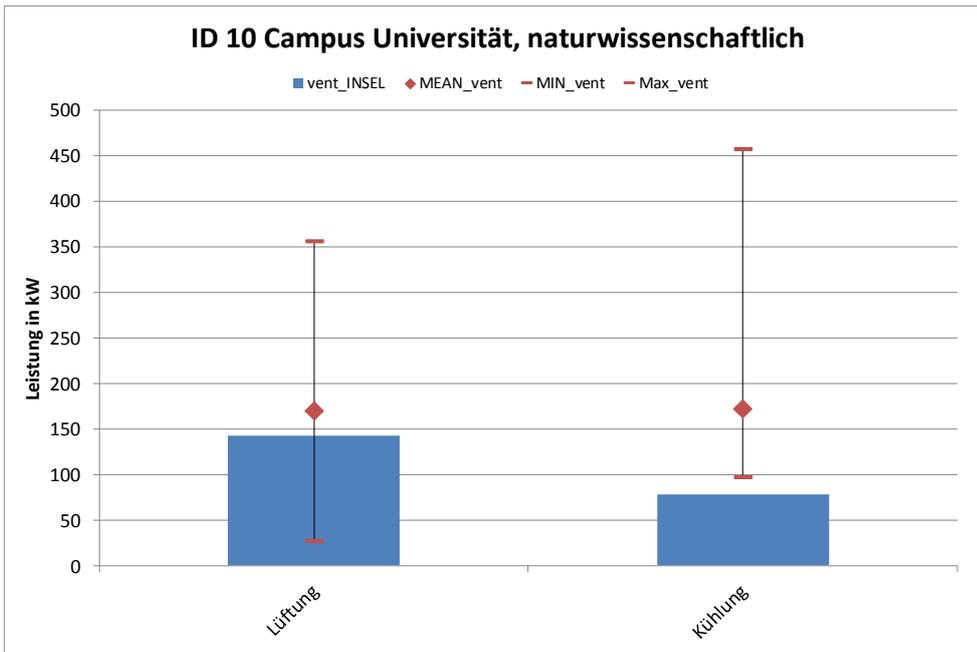


Bild 5-8: Ergebnisse der Validierung für Liegenschaft ID 10

5.1.5 Validierung für „Insel“ ID 16: Ingenieurwissenschaftlicher Campus der Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW)

Bei der Liegenschaft mit der ID 16 handelt es sich um einen weiteren ingenieurwissenschaftlichen Campus der HAW. Er besteht laut ALKIS aus zwei Gebäuden der GFK 3023 und einem Gebäude der GFK 9998, was für „nach Quellenlage nicht zu spezifizieren“ steht. Durch die Filterung im Algorithmus der Voranalyse wird dieses Gebäude aussortiert. Es verbleiben die zwei Gebäude der GFK 3023. Diese bilden in Wirklichkeit aber keine zwei separaten Gebäude. Vielmehr ist der in ALKIS als kleineres Gebäude markierte Gebäudeteil über die Längsseite direkt mit dem Hauptgebäude verbunden.

Die folgende Grafik gibt einen Überblick über diesen Campus.

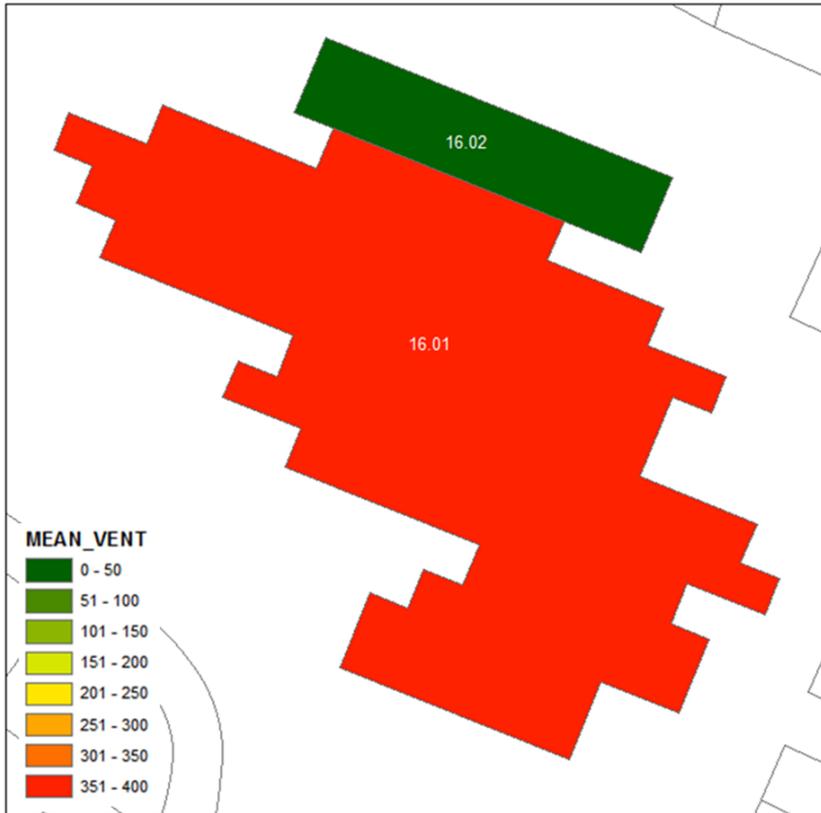


Bild 5-9: Gebäude der Liegenschaft ID 16 – Einfärbung nach Leistungsklasse der installierten Leistung aus Lüftungsanlagen in der Bedarfsklasse „Mittel“ ($P_{vent, mittel}$)

Insgesamt findet sich hier ein Gebäude mit einer BGF von rund 68.000 m². Die Ergebnisse der Voranalyse für diesen Campus gibt die folgende Tabelle wieder.

Gebäude Nr.	Anz. der oberirdischen Geschosse	Anzahl der unterirdischen Geschosse	BGF in m ²	GFK	Kategorie	Theoretische Leistung für Lüftung in kW für Bedarfsklasse			Theoretische Leistung für Kälte in kW für Bedarfsklasse			In „Insel“ berücksichtigt?
						Hoch	Mittel	Niedrig	Hoch	Mittel	Niedrig	
01	5	0	64.620	3023	A	740	354	56	951	360	202	Ja
02	2	0	3.620	3023	B2	41	20	3	53	20	11	Ja
Summe			68.240			781	374	59	1.004	380	213	
Summe für die in „Insel“ betrachteten Gebäude			68.240			781	374	59	1.004	380	213	
Tatsächlich in „Insel“ identifizierte Leistung						305			130			
Absolute Differenz zur Bedarfsklasse „Mittel“ in kW						-69			-250			
Relative Differenz zur Bedarfsklasse „Mittel“						-18,45 %			-65,79 %			

Tabelle 5-5: Ergebnisse der Voranalyse und der Validierung für Liegenschaft ID 16

Es ergibt sich ein ähnliches Bild wie in der zuvor betrachteten Liegenschaft ID 10 der Universität. Die für Lüftung erwarteten Werte werden relativ gut getroffen. Für Kälte ist die Abweichung nach unten aber wieder so groß, dass sie nicht einmal mehr der Bedarfsklasse „Niedrig“ entspricht: Zu erwarten

waren 380 kW für Kälte, zu finden sind 130 kW. Die Abweichung beträgt 250 kW bzw. rund 66 %. Für Lüftung sind 305 kW installiert und 374 waren zu erwarten. Die Abweichung von 69 kW entspricht 18,45 %. Die folgende Grafik stellt die Ergebnisse dar.

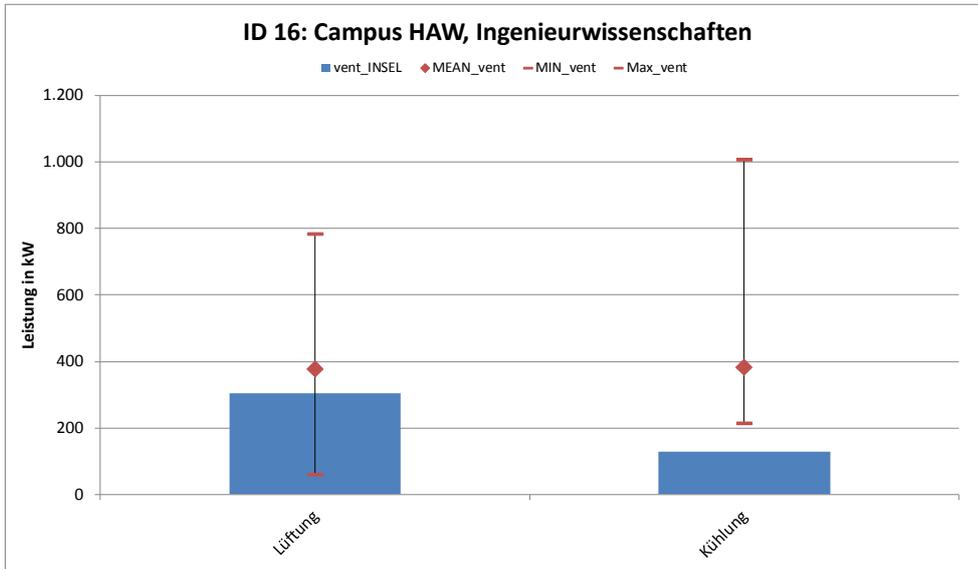


Bild 5-10: Ergebnisse der Validierung für Liegenschaft ID 16

5.1.6 Validierung für „Insel“ ID 23: Kleinerer naturwissenschaftlicher Campus der Universität

Bei der Liegenschaft ID 23 handelt es sich wieder um einen kleineren naturwissenschaftlichen Campus der Universität mit drei Gebäuden und einer Fläche von rund 19.000 m² BGF. Die folgende Grafik gibt einen Überblick über den Campus.



Bild 5-11: Gebäude der Liegenschaft ID 23 – Einfärbung nach Leistungsklasse der installierten Leistung aus Lüftungsanlagen in der Bedarfsklasse „Mittel“ ($P_{\text{vent, mittel}}$)

Interessanterweise ist in dieser Liegenschaft nur das Gebäude 23.01 für die LMA betrachtet worden. Die Ergebnistabelle gibt zunächst die Daten aus der Voranalyse für alle Gebäude wieder.

Gebäude Nr.	Anz. der oberirdischen Geschosse	Anzahl der unterirdischen Geschosse	BGF in m ²	GFK	Kategorie	Theoretische Leistung für Lüftung in kW für Bedarfsklasse			Theoretische Leistung für Kälte in kW für Bedarfsklasse			In „Insel“ berücksichtigt?
						Hoch	Mittel	Niedrig	Hoch	Mittel	Niedrig	
01	4	0	7.732	3023	B1	89	42	7	114	43	24	Ja
02	4	0	11.004	3023	A	126	60	10	162	61	34	Nein
03	1	0	189	3024	C	2	1	0	3	1	1	Nein
Summe			18.925			217	103	17	279	105	59	
Summe für die in „Insel“ betrachteten Gebäude			7.732			89	42	7	114	43	24	
Tatsächlich in „Insel“ identifizierte Leistung						0			37			
Absolute Differenz zur Bedarfsklasse „Mittel“ in kW						-42			-6			
Relative Differenz zur Bedarfsklasse „Mittel“						-100 %			-13,95 %			

Tabelle 5-6: Ergebnisse der Voranalyse und der Validierung für Liegenschaft ID 23

In Gebäude 23.01 befindet sich eine zentrale Kälteanlage, die insbesondere Kälte für die Laborgeräte bereitstellt. Insofern wird hier ein gänzlich anderer Kältebedarf bedient als der zur Gebäudeklimatisierung, den die Voranalyse berücksichtigt. Lüftungsanlagen finden sich laut Begehungsprotokoll des Projekts „Insel“ in diesem Gebäude gar nicht. Dieser Sachverhalt führt zu dem etwas kuriosen Ergebnis, dass der erwartete Leistungswert für Kälte (43 kW) zwar gut getroffen wird (tatsächlich installiert sind 37 kW, Abweichung rund 14 %), jedoch eine ganz andere Kältenutzung als erwartet vorliegt. Gleichzeitig ist die Abweichung beim erwarteten Leistungswert für Lüftung maximal (100 %): Es gibt gar keine Lüftungsanlagen.

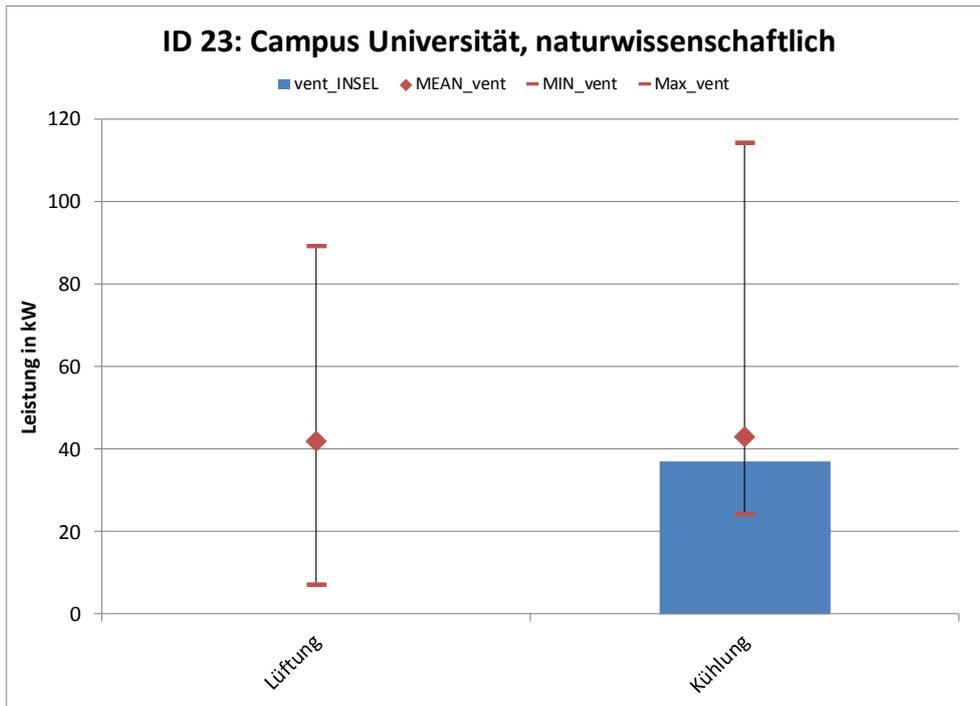


Bild 5-12: Ergebnisse der Validierung für Liegenschaft ID 23

5.1.7 Validierung für „Insel“ ID 28: Naturwissenschaftliches Experimental-Institut der Universität

Bei der Liegenschaft mit der ID 28 handelt es sich um einen weiteren naturwissenschaftlichen Campus der Universität. Neun Gebäude bilden hier eine Gesamtfläche von rund 29.000 m² BGF. Die folgende Grafik gibt zunächst wieder einen Überblick über die Liegenschaft.



Bild 5-13: Gebäude der Liegenschaft ID 28 – Einfärbung nach Leistungsklasse der installierten Leistung aus Lüftungsanlagen in der Bedarfsklasse „Mittel“ ($P_{\text{vent, mittel}}$)

In dieser Liegenschaft sind eine Reihe von Lüftungs- und Kälteanlagen in insgesamt vier der neun Gebäude auf eine LMA aufgeschaltet. Dabei machen diese vier Gebäude mit rund 7.200 m² BGF nur einen kleinen Teil der Gesamtfläche der Liegenschaft aus. Warum die anderen Gebäude nicht stärker integriert sind, ist nicht bekannt.

5 Validierung der DSI-Potenzialabschätzung

Gebäude Nr.	Anz. der oberirdischen Geschosse	Anzahl der unterirdischen Geschosse	BGF in m ²	GFK	Kategorie	Theoretische Leistung für Lüftung in kW für Bedarfsklasse			Theoretische Leistung für Kälte in kW für Bedarfsklasse			In „Insel“ berücksichtigt?
						Hoch	Mittel	Niedrig	Hoch	Mittel	Niedrig	
01	2	0	1.770	2160	C	20	10	2	26	10	6	Ja
02	1	0	619	3024	C	7	3	1	9	3	2	Nein
03	2	0	1.856	3024	C	21	10	2	27	10	6	Nein
04	1	0	1.774	3024	C	20	10	2	26	10	6	Ja
05	2	0	1.256	3024	C	14	7	1	18	7	4	Nein
06	1	0	864	3024	C	10	5	1	13	5	3	Ja
07	4	0	2.772	3024	C	32	15	2	41	15	9	Ja
08	1	1	2.998	2160	C	34	16	3	44	17	9	Nein
09	4	0	14.795	2160	B1	169	81	13	218	82	46	Nein
Summe			28.704			327	157	27	422	159	91	
Summe für die in „Insel“ betrachteten Gebäude			7.180			82	40	7	106	40	24	
Tatsächlich in „Insel“ identifizierte Leistung						34			27			
Absolute Differenz zur Bedarfsklasse „Mittel“ in kW						6			-13			
Relative Differenz zur Bedarfsklasse „Mittel“						-15 %			-32,5 %			

Tabelle 5-7: Ergebnisse der Voranalyse und der Validierung für Liegenschaft ID 28

Der für die vier integrierten Gebäude aus der Voranalyse zu erwartende Leistungswert für die Lüftung liegt bei 40 kW. Tatsächlich installiert sind aber 34 kW, was einer Abweichung von -6 kW bzw. -15 % entspricht.

Für Kälte wären ebenfalls 40 kW zu erwarten gewesen. Installiert sind aber nur 27 kW, was einer Abweichung von -13 kW bzw. -32,5 % entspricht. Diese installierte Leistung entspricht damit eher dem Wert für die Bedarfsklasse „Gering“.

Die folgende Grafik verdeutlicht erneut die Ergebnisse.

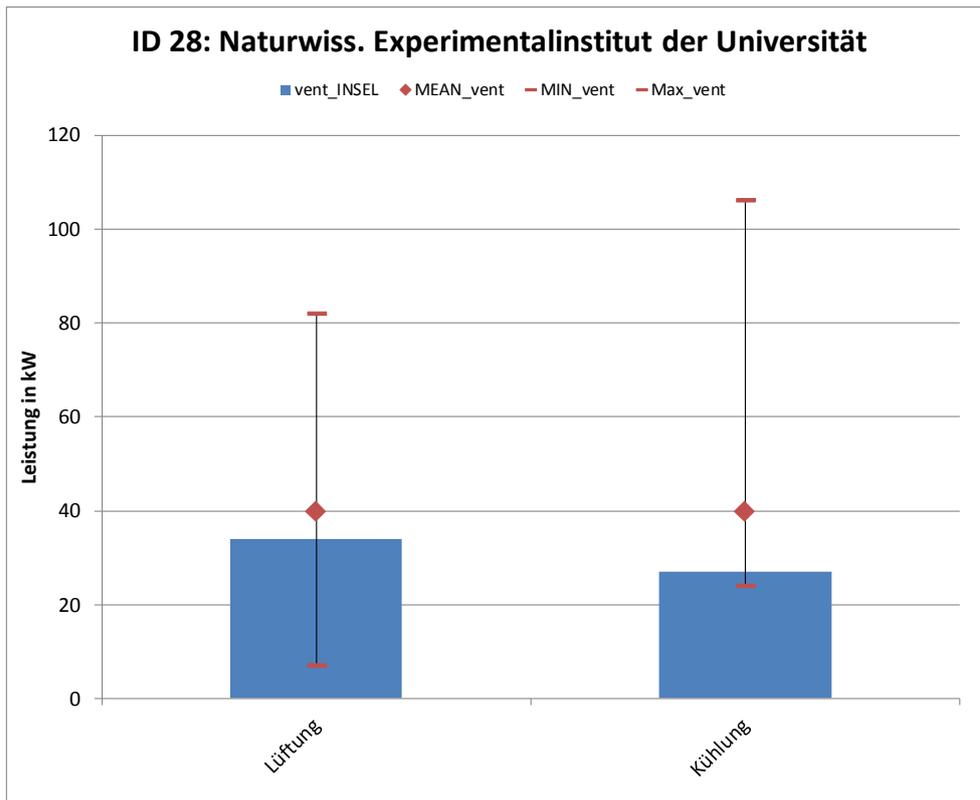


Bild 5-14: Ergebnisse der Validierung für Liegenschaft ID 28

5.1.8 Validierung für „Insel“ ID 31: Kleinerer naturwissenschaftlicher Campus der Universität, Fachrichtung Informatik

Die Hochschulliegenschaft mit der ID 31 ist ein weiterer kleinerer naturwissenschaftlicher Campus der Universität mit in der Summe zehn Gebäuden und einer Fläche von rund 29.000 m² BGF. Die folgende Grafik gibt einen Überblick.



Bild 5-15: Gebäude der Liegenschaft ID 31 – Einfärbung nach Leistungsklasse der installierten Leistung aus Lüftungsanlagen in der Bedarfsklasse „Mittel“ ($P_{vent, mittel}$)

Nur das Gebäude 31.03 ist an eine LMA angeschlossen. Die Tabelle gibt einen Überblick über die Ergebnisse für die Liegenschaft.

Gebäude Nr.	Anz. der oberirdischen Geschosse	Anzahl der unterirdischen Geschosse	BGF in m ²	GFK	Kategorie	Theoretische Leistung für Lüftung in kW für Bedarfsklasse			Theoretische Leistung für Kälte in kW für Bedarfsklasse			In „Insel“ berücksichtigt?
						Hoch	Mittel	Niedrig	Hoch	Mittel	Niedrig	
01	1	0	205	2020	C	1	1	0	4	1	0	Nein
02	2	0	616	3023	C	7	3	1	9	3	2	Nein
03	2	0	2.072	3023	C	24	11	2	31	12	6	Ja
04	2	0	1.222	3023	C	14	7	1	18	7	4	Nein
05	1	0	354	3023	C	4	2	0	5	2	1	Nein
06	2	0	342	3023	C	4	2	0	5	2	1	Nein
07	3	0	3.492	3023	B2	40	19	3	51	19	11	Nein
08	2	0	3.940	3023	B1	45	22	3	58	22	12	Nein
09	5	0	16.185	3023	A	185	89	14	238	90	51	Nein
10	2	0	518	3023	C	6	3	0	8	3	2	Nein
Summe			28.946			330	159	24	427	161	90	
Summe für die in „Insel“ betrachteten Gebäude			2.072			24	11	2	31	12	6	
Tatsächlich in „Insel“ identifizierte Leistung						30			28			
Absolute Differenz zur Bedarfsklasse „Mittel“ in kW						+19			+16			
Relative Differenz zur Bedarfsklasse „Mittel“						172,72 %			+133,33 %			

Tabelle 5-8: Ergebnisse der Voranalyse und der Validierung für Liegenschaft ID 31

Hier ergibt sich ein ähnlicher Effekt wie schon in Liegenschaft 23. Das eine Gebäude enthält die Mensa des Campus und hat damit in weiten Teilen seiner 2.072 m² BGF eine völlig andere Nutzungsstruktur als in der Voranalyse angenommen. Entsprechend hoch sind die sich ergebenden Abweichungen: Laut Voranalyse wären für das Gebäude 11 kW für Lüftungsanlagen und 12 kW für Klimakälte zu erwarten. Installiert ist aber ein Vielfaches: 30 kW für Lüftung und 28 kW für Kälte. Das entspricht Abweichungen von 172,72 bzw. 133,33 %. Diese ergeben sich allerdings aus der gänzlich anderen Nutzungsstruktur des Gebäudes als für die Voranalyse mit der abstrahierten Zonierung festgelegt. Die folgende Grafik zeigt die Ergebnisse. Für Lüftung liegt die Abweichung sogar noch deutlich über dem Wert für die Bedarfsklasse „Hoch“. Für Kälte wird dieser fast erreicht.

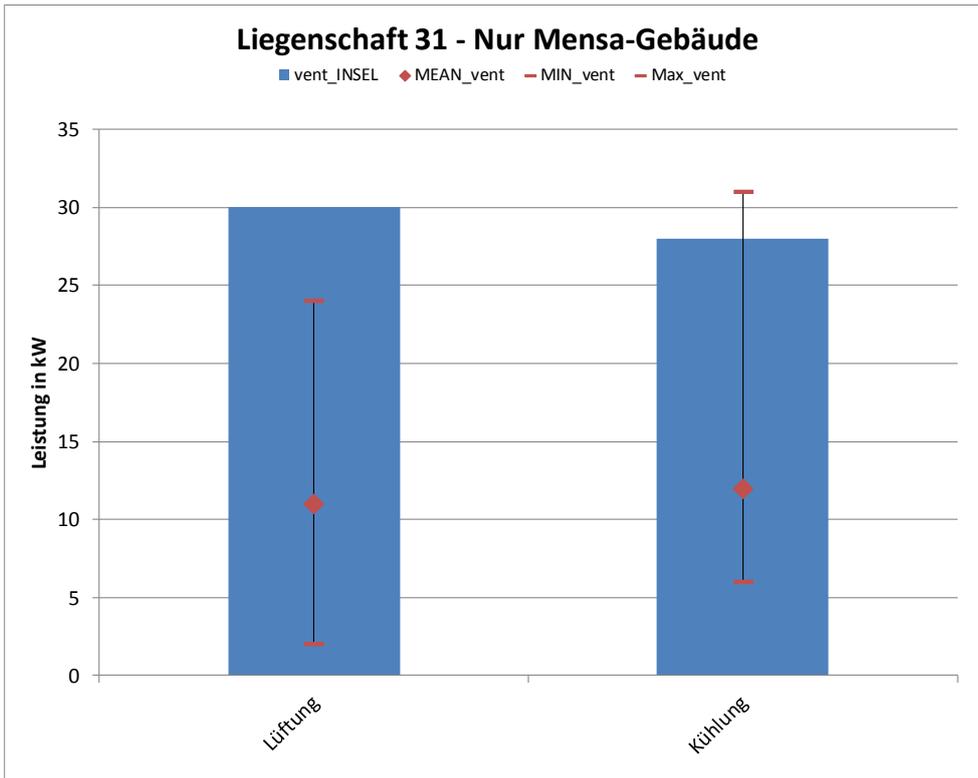


Bild 5-16: Ergebnisse der Validierung für Liegenschaft ID 31

5.1.9 Zusammenfassende Darstellung für alle Hochschulliegenschaften

Die folgende Grafik stellt die absoluten Abweichungen für alle Hochschulliegenschaften vergleichend nebeneinander dar.

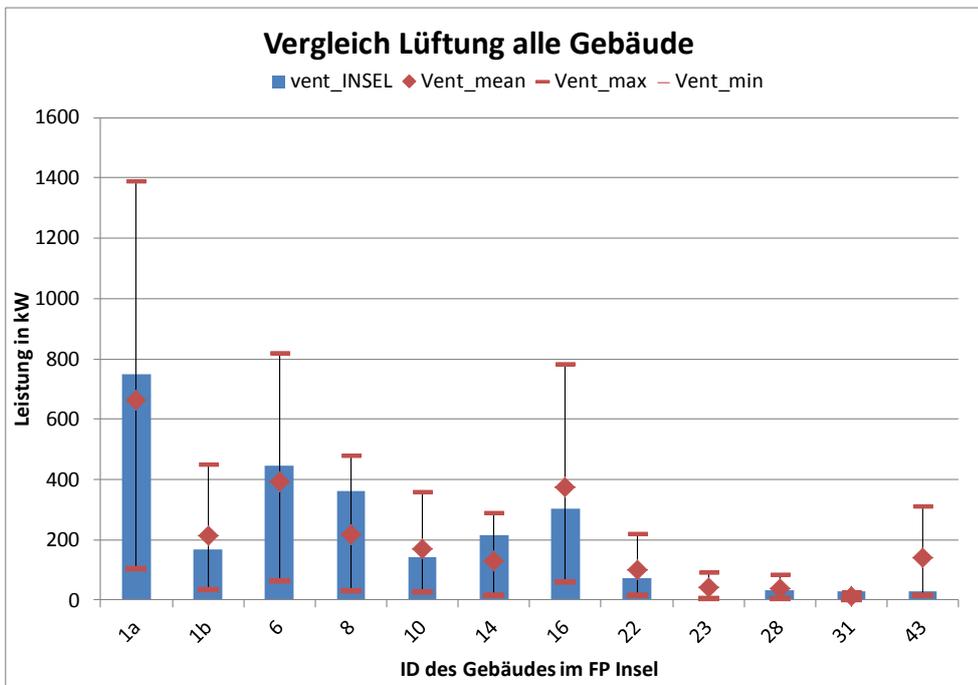


Bild 5-17: Vergleich der absoluten Abweichungen für P_{vent} bei allen Hochschulliegenschaften

Es zeigt sich, dass mit Ausnahme der Liegenschaft ID 23, in der keine Lüftungsanlagen identifiziert wurden, alle Ergebnisse relativ dicht an den Mittelwert heranreichen. Für die zusammenfassende

Darstellung der Ergebnisse macht es aber mehr Sinn, die Leistungen und die erhaltenen Abweichungen zu normieren, da wegen der sehr unterschiedlichen Größe der Liegenschaften die absoluten Werte (in kW) deutlich unterschiedliche Größenordnungen aufweisen. Im Folgenden wird daher der theoretische Wert für die Bedarfsklasse „Mittel“ zu 100 % gesetzt. Da ja die Flächenaufteilungen und auch die konditionierten Flächenanteile sowie die Leistungskennwerte nach VDI für Gebäude gleicher Funktion gleich angenommen werden, ergibt sich für alle Hochschulgebäude nun ein einheitlicher Streubereich: Die Bedarfsklassen „Hoch“ und „Niedrig“ weisen in allen Liegenschaften immer gleiche (normierte) Abstände zur Bedarfsklasse „Mittel“ auf. Die folgende Grafik verdeutlicht das. Sie stellt die Ergebnisse aus Tabelle 5-9 für die installierte Leistung aus Lüftung normiert dar.

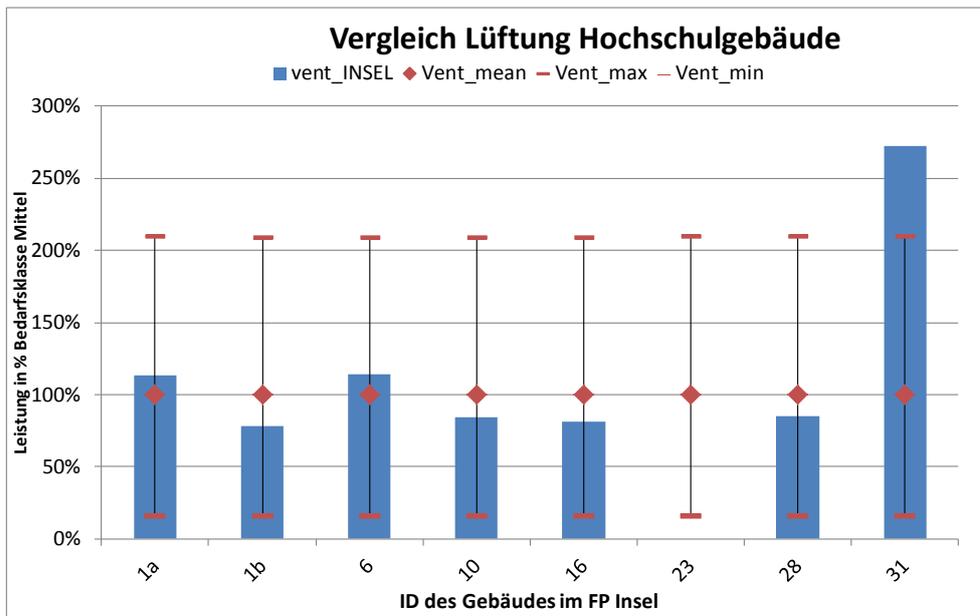


Bild 5-18: Vergleich der normierten Abweichungen für P_{vent} bei allen Hochschulliegenschaften

Der Streubereich liegt für Lüftung zwischen 16 % („Niedrig“) und 209 % („Hoch“) der Bedarfsklasse „Mittel“. Der Unterschied zwischen diesen randständigen Bedarfsklassen liegt damit bei etwa Faktor 13. Für die Fälle aus „Insel“ zeigt sich in der relativen Darstellung nun deutlicher, dass mit Ausnahme der Liegenschaften ID 23 (keine Lüftung) und ID 31 (Messagegebäude) die tatsächlichen Werte viel enger um den Mittelwert streuen als die Bedarfsklassen „Niedrig“ und „Hoch“.

Das gilt auch für die Kühlung in den Hochschulen, bei der die Abweichungen ja in den betrachteten Fällen stets größer waren als bei der Lüftung. Hier liegt die erwartete Streuung aus der Voranalyse bei 56 % („Niedrig“) bis 264 % („Hoch“) des Wertes für die Bedarfsklasse „Mittel“. Der resultierende Faktor zwischen den Bedarfsklassen „Niedrig“ und „Hoch“ liegt bei nur etwa fünf.

Interessant ist, dass für die Kühlung die Bedarfsklasse „Mittel“ nicht in der Mitte zwischen „Hoch“ und „Niedrig“ liegt (wie bei der Lüftung der Fall), sondern deutlich dichter beim Wert für die Bedarfsklasse „Niedrig“. Die beobachtete Streuung liegt für die Liegenschaften aus „Insel“ daher in zwei Fällen (ID 10 und ID 16) auch unter dem Wert der Bedarfsklasse „Niedrig“.

Die folgende Tabelle gibt die prozentualen Abweichungen für die beiden Fälle Lüftung und Kälte für alle Validierungsfälle wieder.

ID	Installierte Leistung für Lüftung in % $P_{vent,mittel}$	Abweichung von $P_{vent,mittel}$ in %	Installierte Leistung für Lüftung in % $P_{kühl,mittel}$	Abweichung von $P_{kühl,mittel}$ in %
1a	113,43 %	13,43 %	105,27 %	5,27%
1b	77,99 %	-22,01 %	149,77 %	49,77%
6	114,07 %	14,07 %	151,52 %	51,52%
10	84,12 %	-15,88 %	45,35 %	-54,65%
16	81,55 %	-18,45 %	34,21 %	-65,79%
23	0,00 %	-100,00 %	86,05 %	-13,95%
28	85,00 %	-15,00 %	67,5 %	-32,5%
31	272,73 %	172,73 %	233,33 %	133,33%
Mittlerer Fehler		46,45 %	Mittlerer Fehler	50,85%
Mittlerer Fehler ohne ID28 u. ID31		16,47 %	Mittlerer Fehler ohne ID 31	39,06%

Tabelle 5-9: Zusammenfassung der prozentualen Abweichungen der installierten Leistungen gegenüber den mittleren Bedarfsklassen für Hochschulgebäude

Der mittlere Fehler liegt für Lüftung bei ca. 46,5 %. Nimmt man die Sonderfälle ID 28 und ID 31 aus, so liegt er bei nur noch etwa 16,5 %. Für Kälte ist der mittlere Fehler deutlich größer und liegt bei etwa 51 %. Ohne den Sonderfall ID 31 liegt er immer noch bei 39 %. Die folgende Grafik verdeutlicht die Ergebnisse für den Bereich Kühlung.

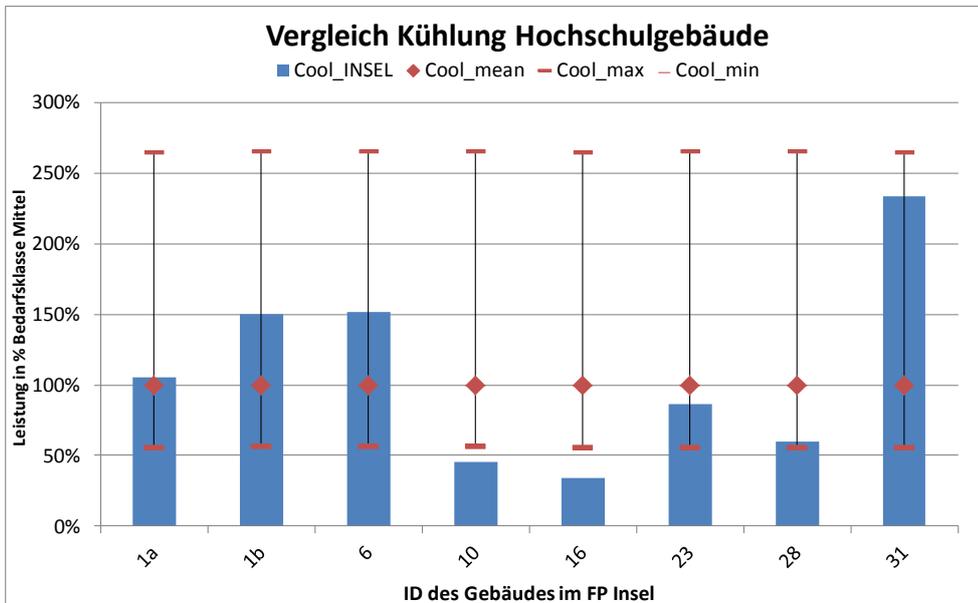


Bild 5-19: Vergleich der normierten Abweichungen für $P_{inst,kühl}$ bei allen Hochschulliegenschaften

Da die Abweichungen nicht systematisch sind, sondern um den Mittelwert streuen, ergibt sich für die summarische Betrachtung eine sehr geringe Abweichung vom Mittelwert (ca. +10 % für beide Fälle). Das bedeutet, dass die Aussage über die in Summe über alle Liegenschaften installierte Leistung mit der Methode der Voranalyse mit der Bedarfsklasse „Mittel“ recht genau abgeschätzt werden kann.

Während für den Einzelfall im Mittel eine Abweichung von +/-50 % vom mit der Bedarfsklasse „Mittel“ ermittelten Wert angenommen werden muss, die im Extremfall noch höher ausfällt, ist für die Summe der Hochschulgebäude nur mit einer Abweichung von etwa +24 % für Lüftung zu rechnen. Für die Kühlung wird der Mittelwert fast genau getroffen (97 %). Nimmt man das falsch eingeordnete Mensagebäude heraus, liegt der Mittelwert für Lüftung um 15 % niedriger als für die Bedarfsklasse „Mittel“ berechnet und bei der Kühlung um 32 % niedriger.

Die folgende Grafik verdeutlicht die Berechnung für alle Gebäude (inkl. Mensagebäude).

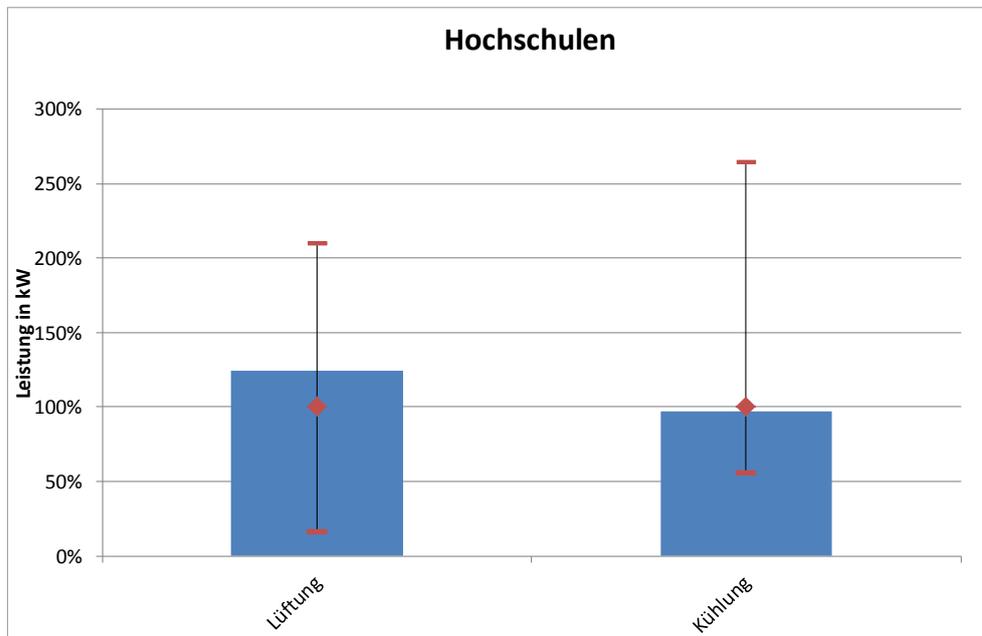


Bild 5-20: Vergleich der aufsummierten normierten Abweichungen für P_{vent} und $P_{kühl}$ für die Hochschulliegenschaften der Validierungsgruppe

5.2 Validierung der Ergebnisse für Bürogebäude

Für die Validierung der Methode mit Bezug zu Bürogebäuden stehen vier Liegenschaften aus „Insel“ zur Verfügung. Die Ergebnisse für diese Liegenschaften werden im Folgenden dargestellt.

5.2.1 Validierung für „Insel“ ID 08: Ein großes Verwaltungsgebäude der Behörde für Inneres

Bei der Liegenschaft mit der ID 08 handelt es sich um ein einzelnes großes Gebäude der Behörde für Inneres, von dem Teile einer Ganztagesnutzung unterliegen (Bereitschaftsdienst im Dreischichtbetrieb). Mit fast 79.000 m² BGF über acht Geschosse ist es zudem ein sehr großes Gebäude. Die folgende Grafik zeigt das Gebäude und seine Einordnung in die Leistungsklassifizierung für Lüftung.

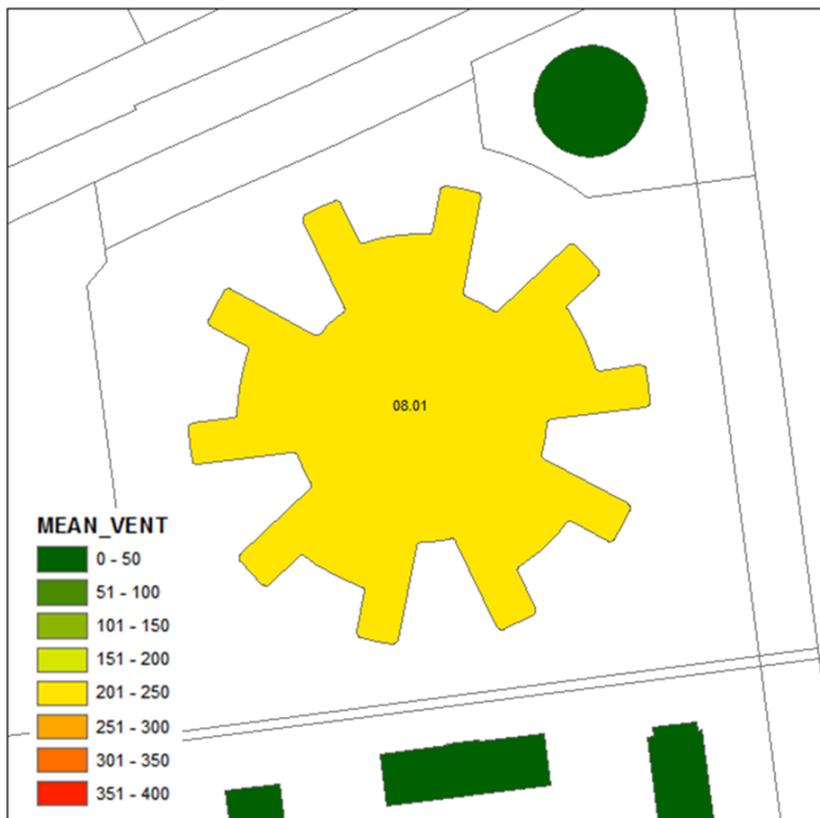


Bild 5-21: Gebäude der Liegenschaft ID 08 – Einfärbung nach Leistungsklasse der installierten Leistung aus Lüftungsanlagen in der Bedarfsklasse „Mittel“ ($P_{vent, mittel}$)

Die Tabelle beinhaltet hier nur die Ergebnisse für das eine Gebäude aus der Voranalyse im Vergleich zu den in „Insel“ ermittelten Werten.

Gebäude Nr.	Anz. der oberirdischen Geschosse	Anzahl der unterirdischen Geschosse	BGF in m ²	GFK	Kategorie	Theoretische Leistung für Lüftung in kW für Bedarfsklasse			Theoretische Leistung für Kälte in kW für Bedarfsklasse			In „Insel“ berücksichtigt?
						Hoch	Mittel	Niedrig	Hoch	Mittel	Niedrig	
01	8	1	78.662	3071	A	476	218	30	1413	513	131	Ja
Tatsächlich in „Insel“ identifizierte Leistung						361			474			
Absolute Differenz zur Bedarfsklasse „Mittel“ in kW						+143			-39			
Relative Differenz zur Bedarfsklasse „Mittel“						+65,6 %			-7,6 %			

Tabelle 5-10: Ergebnisse der Voranalyse und der Validierung für Liegenschaft ID 08.

Es zeigt sich, dass der für die Lüftungsleistung in der Bedarfsklasse „Mittel“ erwartete Wert von 218 kW deutlich zu niedrig ist: Installiert sind 361 kW, was einem Plus von 143 kW oder 65,6 % entspricht. Das entspricht etwas mehr als der Hälfte des Abstands der Bedarfsklassen „Mittel“ und „Hoch“. Die Leistung für Kälte wird hingegen recht gut von der Bedarfsklasse „Mittel“ abgebildet. Zu erwarten waren hier 513 kW, gefunden wurden 474 kW, was einer Abweichung von nur 7,6 % bzw. 37 kW entspricht. Die folgende Grafik verbildlicht den Sachverhalt wieder. Auffällig ist, dass für Bürogebäude die zwischen den Bedarfsklassen „Niedrig“ und „Hoch“ bestehende Streuung noch größer ist als bei den Hochschulgebäuden. In der Bedarfsklasse „Niedrig“ wäre zu erwarten gewesen, dass das Gebäude mit einer Leistung von 131 kW zur Kühlung auskommt. Die Bedarfsklasse „Hoch“ würde eine installierte Leistung von 1,4 MW, dem knapp 11-Fachen (!), erklären. Für Hochschulgebäude liegt der Faktor zwischen den Bedarfsklassen „Niedrig“ und „Hoch“ etwa bei knapp 5. Bei der Lüftung ist die Spreizung zwischen „Niedrig“ und „Hoch“ für Bürogebäude nur etwas größer als bei den Hochschulgebäuden. Der Faktor beträgt hier knapp 16, bei Hochschulgebäuden gut 13.

Die folgende Grafik verdeutlicht die Validierungsergebnisse für die Liegenschaft ID 08.

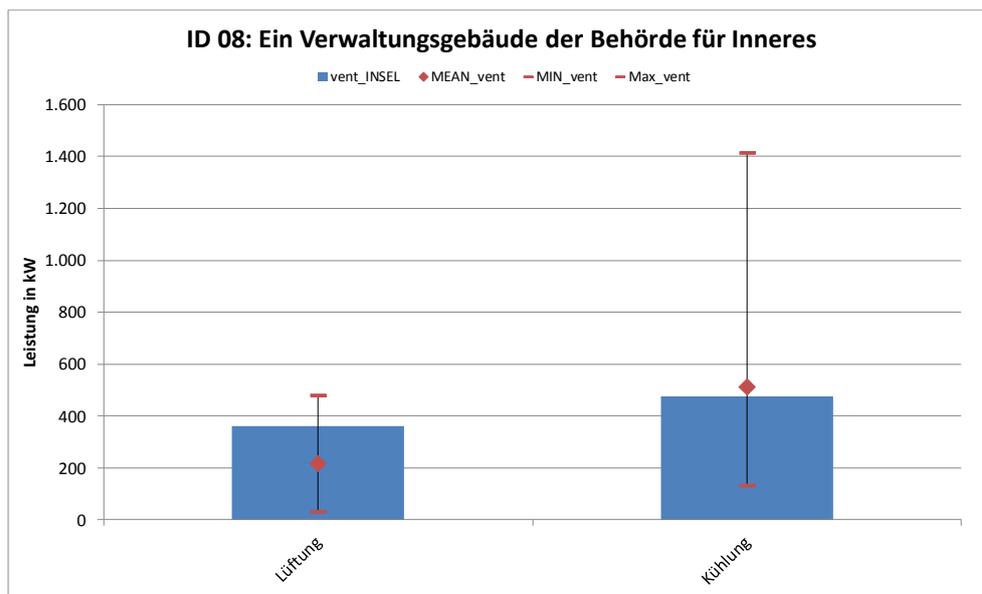


Bild 5-22: Ergebnisse der Validierung für Liegenschaft ID 08

**5.2.2 Validierung für „Insel“ ID 14:
Ein großes Verwaltungsgebäude einer Landesversicherung**

Mit ID 14 wird im FP „Insel“ ein großes Verwaltungsgebäude einer Landesversicherungsanstalt bezeichnet. Das Gebäude umfasst fünf Innenhöfe bei einer Größe von 46.700 m² BGF auf sechs Etagen und zwei Kellergeschossen. Die folgende Grafik beschreibt die Einteilung in die Leistungsklassifizierung und den Gebäudegrundriss.



Bild 5-23: Gebäude der Liegenschaft ID 14 – Einfärbung nach Leistungsklasse der installierten Leistung aus Lüftungsanlagen in der Bedarfsklasse „Mittel“ (P_{vent, mittel})

In der Bedarfsklasse „Mittel“ wären für dieses Gebäude 131 kW aus Lüftungsanlagen und 208 kW aus Kälteanlagen zu erwarten. Tatsächlich installiert sind 216 kW für Lüftung und 400 kW für Kälte. Das entspricht Abweichungen von 85 kW bzw. 92 kW. Für Lüftung entspricht das einer Abweichung von rund 65 %. Für Kälte ist die relative Abweichung mit rund 30 % deutlich geringer. Die folgende Tabelle enthält die Ergebnisse im Detail.

Gebäude Nr.	Anz. der oberirdischen Geschosse	Anzahl der unterirdischen Geschosse	BGF in m ²	GFK	Kategorie	Theoretische Leistung für Lüftung in kW für Bedarfsklasse			Theoretische Leistung für Kälte in kW für Bedarfsklasse			In „Insel“ berücksichtigt?
						Hoch	Mittel	Niedrig	Hoch	Mittel	Niedrig	
01	6	2	46.701	2020	A	286	131	18	849	308	79	Ja
Tatsächlich in „Insel“ identifizierte Leistung						216			400			
Absolute Differenz zur Bedarfsklasse „Mittel“ in kW						+85			+92			
Relative Differenz zur Bedarfsklasse „Mittel“						+64,89 %			+29,87 %			

Tabelle 5-11: Ergebnisse der Voranalyse und der Validierung für Liegenschaft ID 08

Dieses Gebäude liegt sowohl für Lüftung als auch für Kälte deutlich über den Erwartungswerten für die Bedarfsklasse „Mittel“. Als Versicherungsgebäude handelt es sich um ein Bürogebäude mit einer höheren Ausstattung und damit einem deutlich höheren Teilenergiebedarf für Lüftung und Kälte als bei einem Verwaltungsgebäude zu erwarten [Weber et al. 1999, S. 60]. Die folgende Grafik verdeutlicht dies.

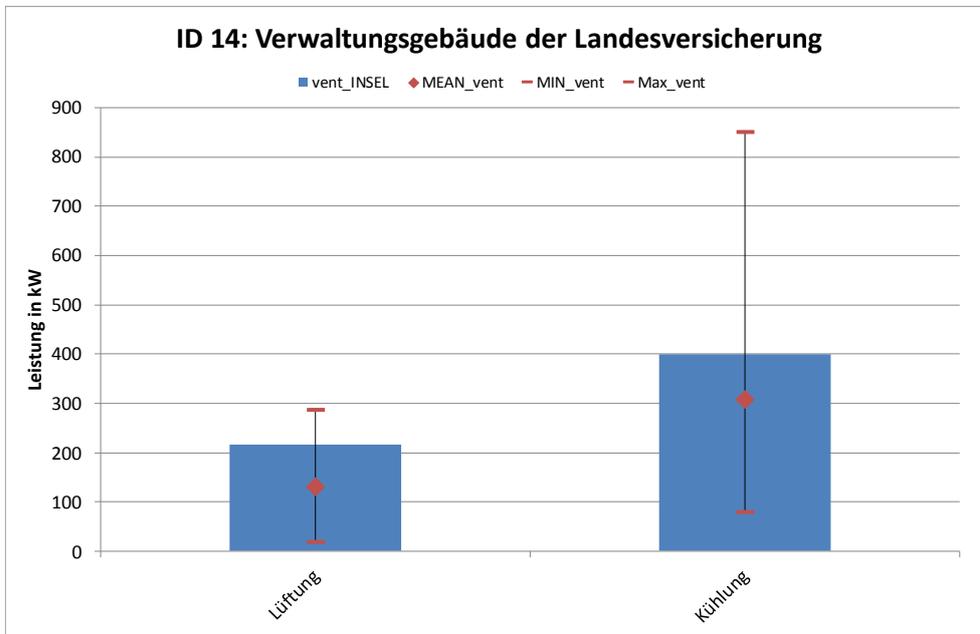


Bild 5-24: Ergebnisse der Validierung für Liegenschaft ID 14

5.2.3 Validierung für „Insel“ ID 22: Verwaltungsgebäude einer nautischen Behörde

ID 22 bezeichnet eine Liegenschaft einer nautischen Behörde. Sie besteht aus drei Gebäuden mit einer Gesamtfläche von rund 35.600 m² BGF. Das Gebäude 22.01 hat zehn Stockwerke, die beiden anderen Gebäude haben je sieben Stockwerke. Alle drei Gebäude wurden in „Insel“ berücksichtigt. Die folgende Grafik verdeutlicht wieder Lage und Klassifizierung der Liegenschaft.

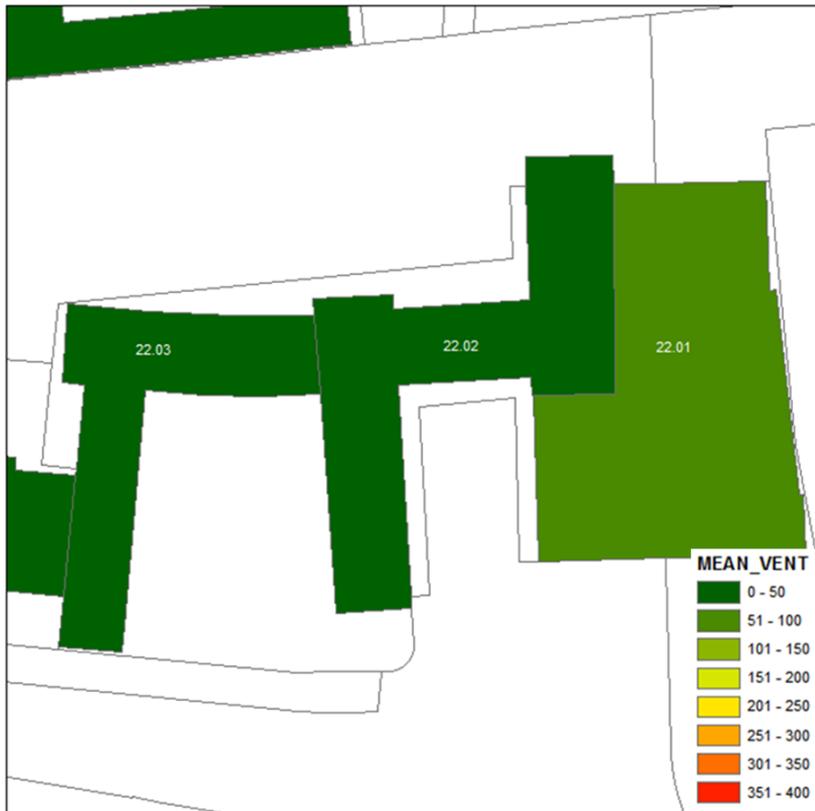


Bild 5-25: Gebäude der Liegenschaft ID 22 – Einfärbung nach Leistungsklasse der installierten Leistung aus Lüftungsanlagen in der Bedarfsklasse „Mittel“ ($P_{\text{vent, mittel}}$)

In dieser Liegenschaft werden weder für Lüftung noch für Kälte die Anschlussleistungen der Voranalyse für die Bedarfsklasse „Mittel“ voll erreicht. Allerdings sind die Differenzen relativ gering: Für Lüftung beträgt sie 26 kW, was auch genau 26 % der erwarteten Leistung entspricht. Bei der Kälte wurden 235 kW errechnet, erreicht werden 208 kW. Das entspricht einer relativen Abweichung von 11,5 %. Die Tabelle stellt die Ergebnisse detailliert dar.

Gebäude Nr.	Anz. der oberirdischen Geschosse	Anzahl der unterirdischen Geschosse	BGF in m ²	GFK	Kategorie	Theoretische Leistung für Lüftung in kW für Bedarfsklasse			Theoretische Leistung für Kälte in kW für Bedarfsklasse			In „Insel“ berücksichtigt?
						Hoch	Mittel	Niedrig	Hoch	Mittel	Niedrig	
01	10	0	19.550	3010	A	120	55	8	355	129	33	Ja
02	7	0	9.534	3010	B1	58	27	4	173	63	16	Ja
03	7	0	6.524	3010	B2	40	18	3	119	43	11	Ja
Summe			35.608			218	100	15	647	235	60	
Summe für die in „Insel“ betrachteten Gebäude			35.608			218	100	15	647	235	60	
Absolute Differenz zur Bedarfsklasse „Mittel“ in kW						74			208			
Relative Differenz zur Bedarfsklasse „Mittel“						-26			-27			
Relative Differenz						-26 %			-11,49 %			

Tabelle 5-12: Ergebnisse der Voranalyse und der Validierung für Liegenschaft ID 22

Die tatsächlichen Werte liegen damit recht nah an den für die Bedarfsklasse „Mittel“ errechneten. Die folgende Grafik verdeutlicht dies.

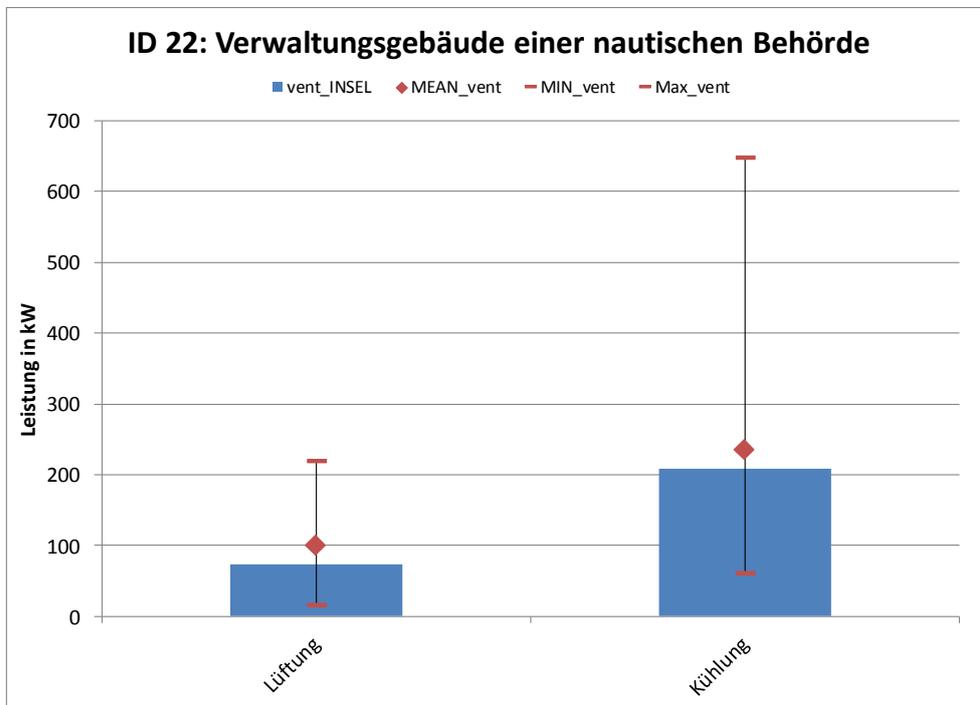


Bild 5-26: Ergebnisse der Validierung für Liegenschaft ID 22

5.2.4 Validierung für „Insel“ ID 43: Ein Verwaltungsgebäude einer Behörde für Stadtplanung

Bei der Liegenschaft ID 43 handelt es sich um ein großes Verwaltungsgebäude der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt. Rund 48.000 m² BGF verteilen sich über sechs Geschosse. Die folgende Grafik verdeutlicht wieder Grundriss und Klassifizierung.



Bild 5-27: Gebäude der Liegenschaft ID 43 – Einfärbung nach Leistungsklasse der installierten Leistung aus Lüftungsanlagen in der Bedarfsklasse „Mittel“ ($P_{vent, mittel}$)

Diese Liegenschaft ist ein gutes Beispiel für eine gering technisierte Verwaltungsliegenschaft. Das Gebäude ist nur in ausgewählten Bereichen (Sitzungssäle, repräsentative Räumlichkeiten der Behördenleitung) überhaupt belüftet und klimatisiert. Entsprechend niedrig sind die gefundenen installierten Leistungen. Sie entspricht für Lüftung mit 30 kW knapp weniger als dem Doppelten der für die Bedarfsklasse „Niedrig“ zu erwartenden Leistung von 17 kW. Für die Bedarfsklasse „Mittel“ wären 139 kW zu erwarten gewesen. Die Tabelle gibt einen Überblick über die Ergebnisse im Detail.

Gebäude Nr.	Anz. der oberirdischen Geschosse	Anzahl der unterirdischen Geschosse	BGF in m ²	GFK	Kategorie	Theoretische Leistung für Lüftung in kW für Bedarfsklasse			Theoretische Leistung für Kälte in kW für Bedarfsklasse			In „Insel“ berücksichtigt?
						Hoch	Mittel	Niedrig	Hoch	Mittel	Niedrig	
01	6	1	48022	3010	A	310	139	17	897	320	83	Ja
Tatsächlich in „Insel“ identifizierte Leistung						30			46			
Absolute Differenz zur Bedarfsklasse „Mittel“ in kW						-109			-274			
Relative Differenz zur Bedarfsklasse „Mittel“						-78,42 %			-85,63 %			

Bild 5-28: Ergebnisse der Voranalyse und der Validierung für Liegenschaft ID 43

Für Kälte liegt der Wert der installierten Leistung mit 46 kW sogar noch unter dem für die Bedarfsklasse „Niedrig“ zu erwartenden Wert von 83 kW. Für die Bedarfsklasse „Mittel“ wären hier sogar 320 kW zu erwarten gewesen.

Die folgende Grafik verdeutlicht die sich für diese Liegenschaft ergebenden Verhältnisse.

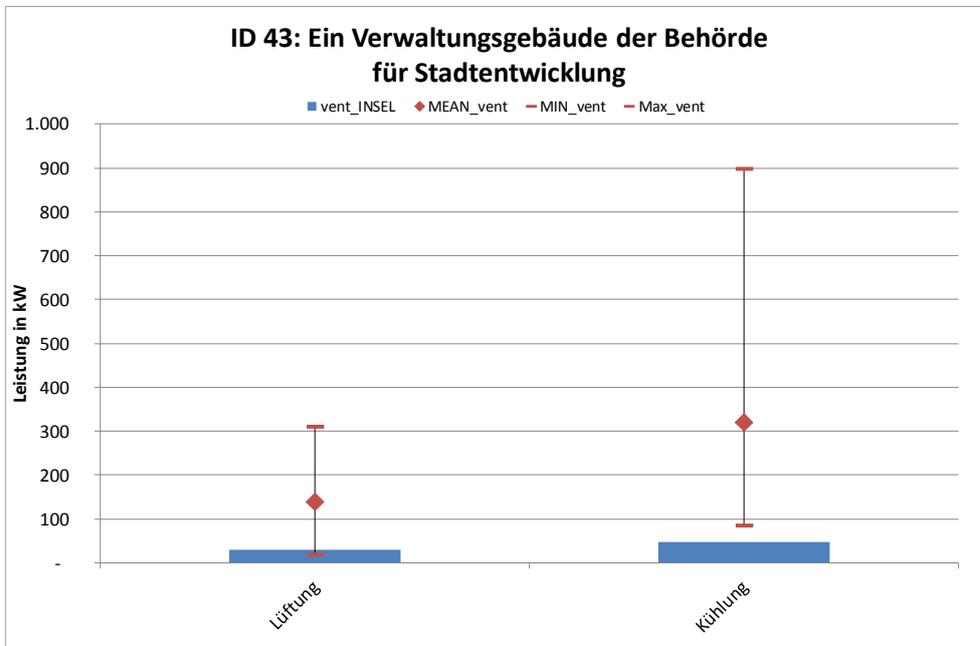


Bild 5-29: Ergebnisse der Validierung für Liegenschaft ID 22

5.2.5 Zusammenfassende Darstellung für alle Liegenschaften büroähnlicher Nutzung

Für die installierte Leistung aus Lüftung in den vier Bürogebäuden der Validierung zeigt sich ein differenziertes Bild. In zwei Fällen wird der Wert der Bedarfsklasse „Mittel“ deutlich übertroffen, ein Fall reicht relativ nah an die Bedarfsklasse „Mittel“ heran und in einem weiteren Fall wird nur die Bedarfsklasse „Niedrig“ erreicht. Die folgende Grafik gibt einen Überblick über die absoluten Verhältnisse.

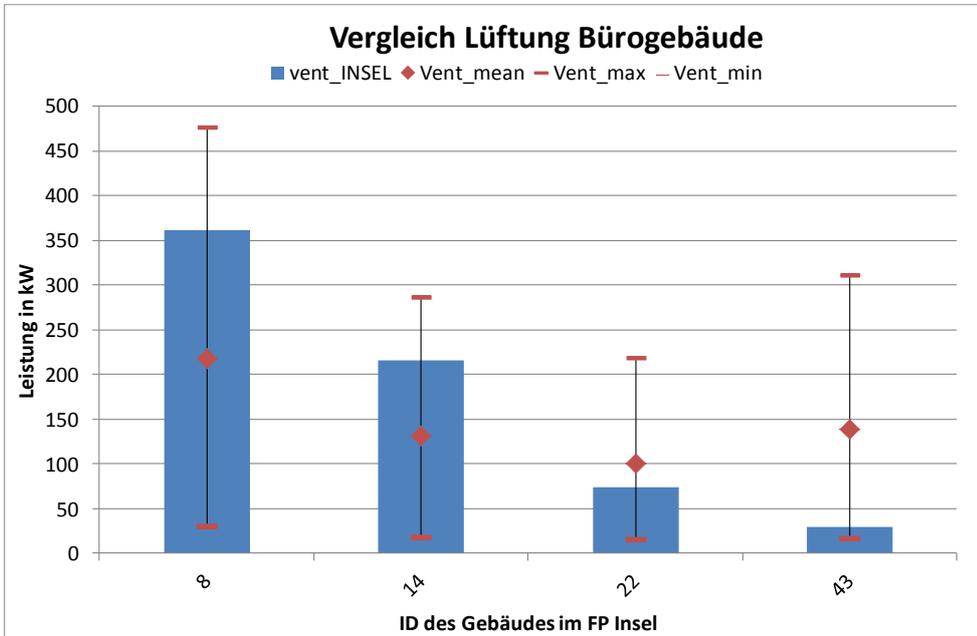
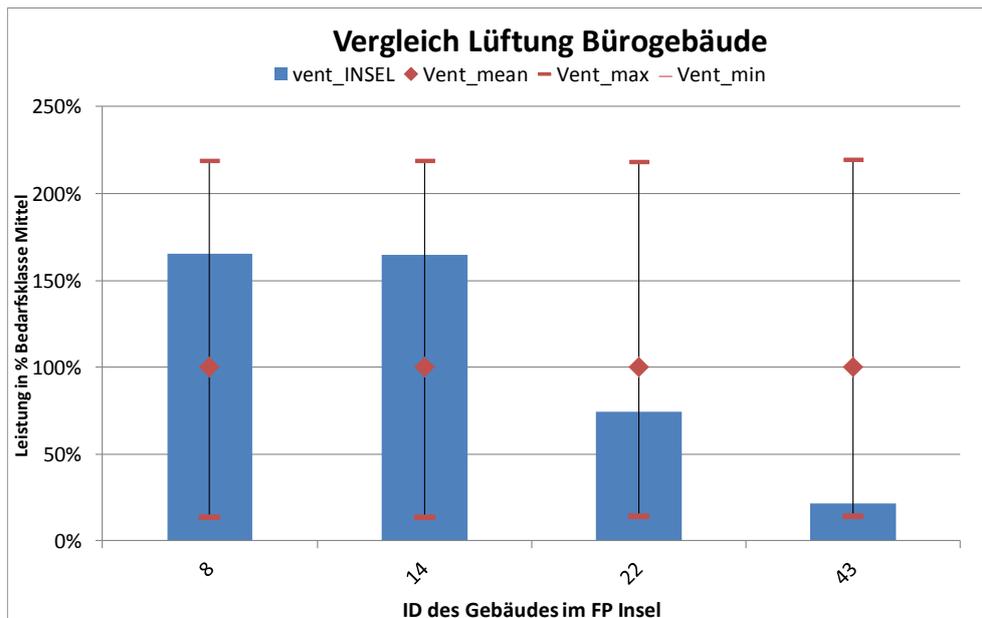


Bild 5-30: Vergleich der absoluten Abweichungen für P_{vent} bei den Büroliegenschaften

Auch hier hilft ein Blick auf die normierte Darstellung, die Relationen besser zu erkennen. So liegt die Abweichung bei den Liegenschaften ID 08 und ID 14 mit jeweils rund 65 % in einem sehr ähnlichen Bereich. Beide Gebäude sind stärker technisiert als der Durchschnitt. Dies liegt im Fall der Liegenschaft ID 08 an deren Nutzung in der 24-Stunden-Bereitschaft und als wesentliches Datenzentrum der Behörde für Inneres. Im Falle der Liegenschaft ID 14 ist der deutlich größere Technisierungsgrad von Versicherungsgebäuden und Banken im Vergleich zu durchschnittlichen Bürogebäuden verantwortlich. Die Abweichung nach unten bei der Liegenschaft ID 22 liegt mit 26 % noch recht nah am Erwartungswert. Die Liegenschaft ID 43 ist ein Beispiel für ein typisches gering technisiertes Verwaltungsgebäude. Die folgende Grafik verdeutlicht die relativen Abweichungen im Vergleich.

Bild 5-31: Vergleich der relativen Abweichungen für P_{vent} bei den Büroliegenschaften

Für Kälte sind die Abweichungen in drei von vier zur Validierung zur Verfügung stehenden Liegenschaften relativ gering. In der vierten Liegenschaft (ID 43) ist der Unterschied aufgrund des geringen Technisierungsgrades sehr groß. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die relativen Abweichungen der Bedarfsklasse „Mittel“ und die sich ergebenden mittleren Fehler zu dieser Bedarfsbestimmung.

ID	Installierte Leistung für Lüftung in % $P_{vent,mittel}$	Abweichung von $P_{vent,mittel}$ in %	Installierte Leistung für Lüftung in % $P_{kühl,mittel}$	Abweichung von $P_{kühl,mittel}$ in %
08	165,60 %	65,60 %	92,40 %	-7,60 %
14	164,58 %	64,58 %	129,87 %	29,87 %
22	74,00 %	-26,00 %	88,51 %	-11,49 %
43	21,73 %	-78,27 %	7,08 %	-92,93 %
Mittlerer Fehler		58,61 %	Mittlerer Fehler	35,47 %
Mittlerer Fehler ohne ID 43		30,80 %	Mittlerer Fehler ohne ID 43	16,32 %

Tabelle 5-13: Zusammenfassung der prozentualen Abweichungen der installierten Leistungen gegenüber den mittleren Bedarfsklassen für Bürogebäude

Für Kälte ergibt sich hier ein mittlerer Fehler von rund 35,5 %. Nimmt man die Liegenschaft ID 43 aus, so ergibt sich für die anderen drei Liegenschaften sogar eine relative Abweichung von nur rund 16 %. Für Lüftung ist der relative Fehler größer. Er liegt bei knapp 59 %. Ohne die Berücksichtigung der Liegenschaft ID 43 verbessert sich dieser Wert auf rund 31 %. Die folgende Grafik stellt die relativen Abweichungen vergleichend für Kälte dar.

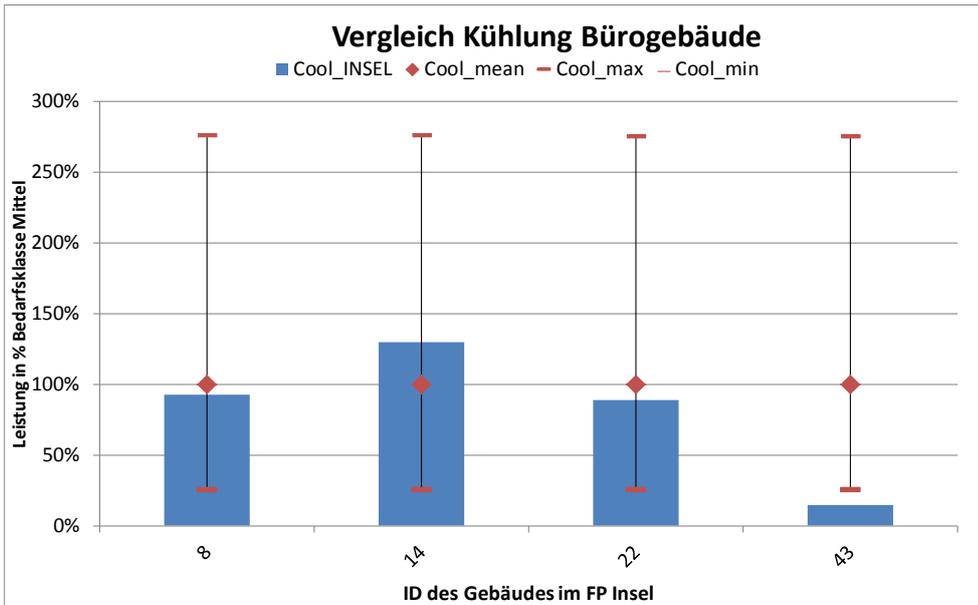


Bild 5-32: Vergleich der relativen Abweichungen für $P_{kühl}$ bei den Büroliegenschaften

Wie auch bei den Hochschulliegenschaften streuen die Abweichungen um die Werte für die Bedarfsklasse „Mittel“, sodass sich keine systematischen Abweichungen erkennen lassen und der durchschnittliche Wert der relativen Abweichungen mit 6 % für Lüftung und 21 % für Kälte deutlich unter denen der Einzelliegenschaften liegt. Auch hier lässt dies den Schluss zu, dass die Summenwerte für die Bedarfsklasse „Mittel“ den tatsächlichen Wert der gesamten in Hamburg installierten Leistungen für LuK in den Gebäuden büroähnlicher Nutzung relativ sicher abbilden. Für Kälte könnte der Wert knapp unter dem für die Bedarfsklasse „Mittel“ liegen. Jedoch ist hier zu erwarten, dass der Technisierungsgrad der nichtöffentlichen Bürogebäude über dem der öffentlichen Gebäude liegen dürfte [Weber et al. 1999, S. 60].

Die folgende Grafik verdeutlicht die Relation der summierten Abweichungen vom Wert für die Bedarfsklasse „Mittel“.

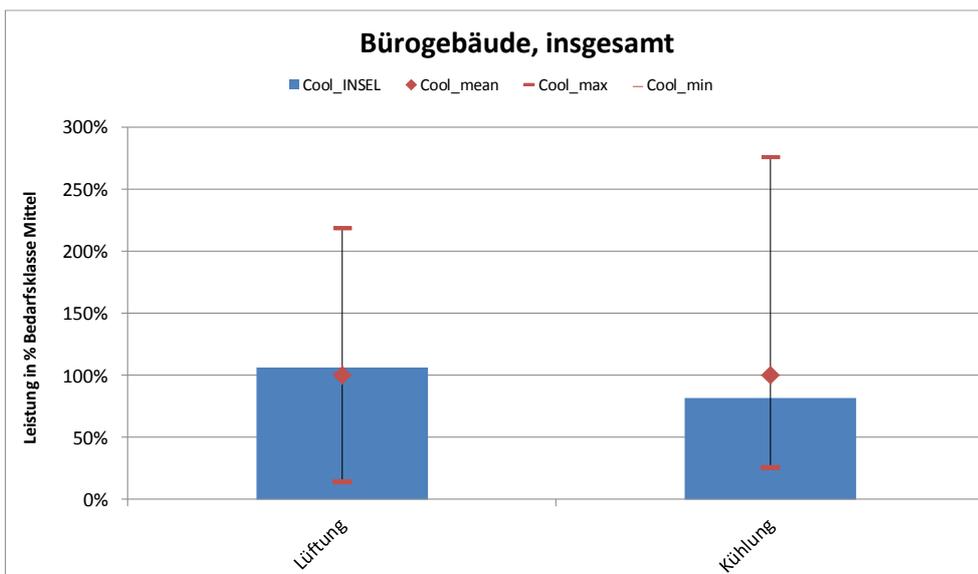


Bild 5-33: Vergleich der aufsummierten normierten Abweichungen für P_{vent} und $P_{kühl}$ für die Bürogebäude der Validierungsgruppe

5.3 Zusammenfassung der Validierungsergebnisse und Zwischenfazit

Die Ergebnisse der Validierung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Methode der Voranalyse, wie sie im Kapitel 4 beschrieben wurde, liefert für die Gruppe der Liegenschaften aus „Insel“, die zur Validierung dienen, Ergebnisse, die sich in der Tendenz den für die Bedarfsklasse „Mittel“ errechneten Werten annähern. Dabei ist die Streuung jedoch recht hoch.
- Abweichungen von den für die Bedarfsklasse „Mittel“ errechneten Werten liegen i. d. R. deutlich unter den als Grenzen der Streuung angenommenen Werten für die Bedarfsklassen „Niedrig“ und „Hoch“.
- Für Hochschulgebäude ist für die Lüftung mit Abweichungen von +/-20 % von der Bedarfsklasse „Mittel“ zu rechnen unter der Voraussetzung, dass a) das betrachtete Gebäude wirklich belüftet wird und b) keine funktionsbestimmende Sondernutzung (Mensa) vorliegt.
- Für Bürogebäude ist für Lüftung mit einer mittleren Abweichung von der Bedarfsklasse „Mittel“ von etwa 30 % zu rechnen. Aufgrund der geringen Anzahl der Gebäude in der Validierungsgruppe ist diese Aussage aber eingeschränkt gültig. So ist zu erwarten, dass für technisch höher ausgestattete Gebäude (Banken, Versicherungen etc.) grundsätzlich Abweichungen nach oben auftreten, die auch darüber hinausgehen können. Verwaltungsgebäude mit geringerer technischer Ausstattung lassen grundsätzlich eher Abweichungen nach unten erwarten. Für diese Gebäude könnte die Bedarfsklasse „Niedrig“ zutreffen.

Die folgende Grafik gibt einen Überblick über die relativen Abweichungen bei der installierten Leistung für Lüftung.

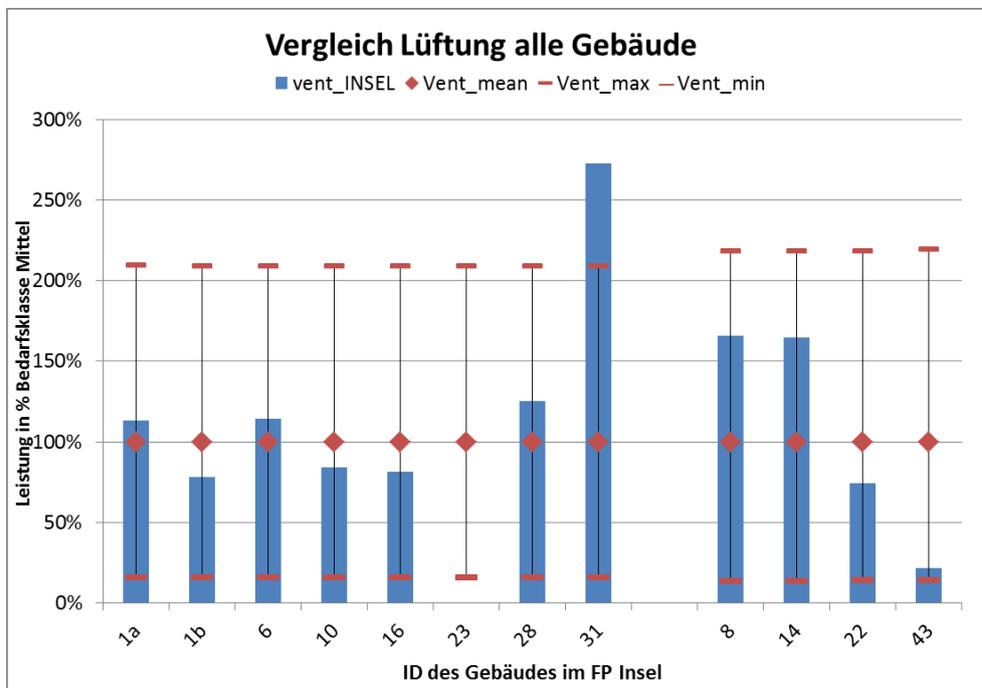


Bild 5-34: Überblick über die relativen Abweichungen bei der installierten Leistung für Lüftung – alle Gebäude der Validierungsgruppe im Vergleich

- Für Kälte lassen sich für Hochschulgebäude mittlere Abweichungen von etwa 40 % bis 50 % erwarten. Die Bedarfsklasse „Niedrig“ hat hier als Grenzwert eine reelle Bedeutung, ist in zwei von acht Fällen sogar noch zu hoch.
- Für Bürogebäude ergibt sich in drei von vier Fällen für die Bedarfsklasse „Mittel“ eine relative Abweichung von etwa 16 %. Die Anzahl der Gebäude ist für eine fundierte Validierung aber zu klein. Es ist wie bei der Lüftung davon auszugehen, dass technisch höher ausgestattete Bürogebäude (Banken, Versicherungen etc.) Abweichungen nach oben aufweisen, während technisch geringer ausgestattete Abweichungen nach unten zeigen.
- Für technisch gering ausgestattete Verwaltungsgebäude ist auch die Bedarfsklasse „Niedrig“ vielleicht noch zu hoch.
- Grundsätzlich ist die Bedarfsklasse „Hoch“ für Kälte, wie schon zuvor für Lüftung konstatiert, wohl als verallgemeinerbarer oberer Grenzwert zu hoch angesetzt. Die Bedarfsklasse „Niedrig“ scheint in diesem Fall aber ein brauchbarer unterer Wert zu sein.

Eine Übersicht über die relativen Abweichungen von der Bedarfsklasse „Mittel“ für Kälte wird in der folgenden Grafik dargestellt.

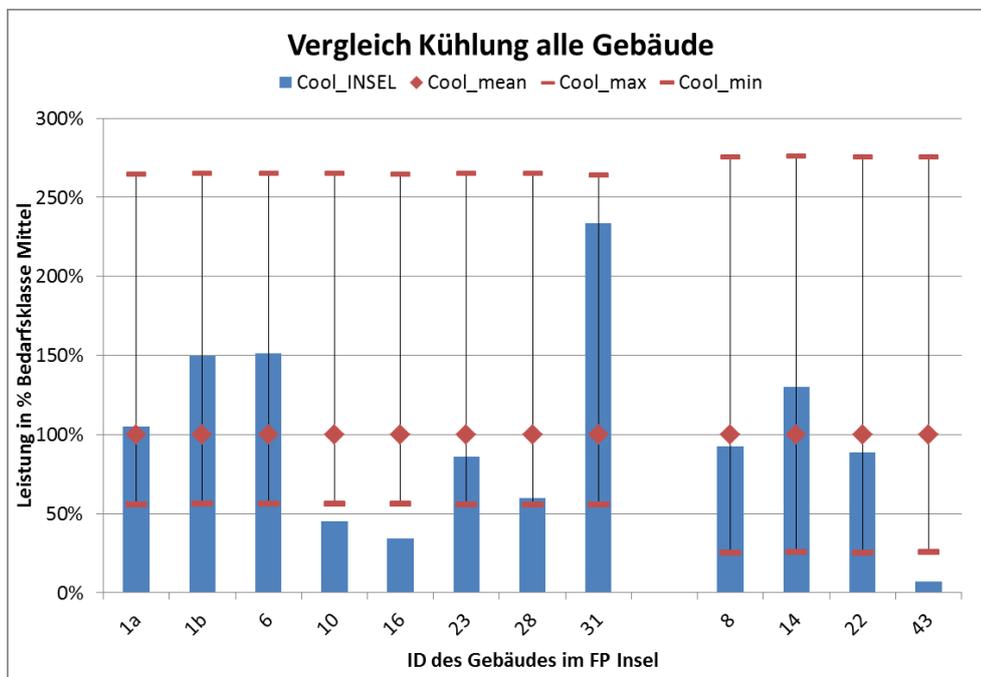


Bild 5-35: Überblick über die relativen Abweichungen bei der installierten Leistung für Kälte – alle Gebäude der Validierungsgruppe im Vergleich

Als Zwischenfazit lässt sich festhalten, dass

1. die Methode der Voranalyse valide gebäudespezifische Aussagen zu den dort anzunehmenden Anschlussleistungen für Lüftung und Kälte liefert und
2. die Bedarfsklasse „Mittel“ sowohl für Lüftung als auch für Kälte einen geeigneten Orientierungswert liefert, während
3. die Bedarfsklasse „Hoch“ als Orientierungswert keine Rolle zu spielen scheint und die Bedarfsklasse „Niedrig“ nur im Fall von Kälte für Hochschulliegenschaften bzw. generell bei gering technisierten Verwaltungsgebäuden als Orientierungswert relevant ist.

Es ist ebenso festzuhalten, dass

4. in allen individuellen Fällen mit deutlichen Abweichungen mindestens in Höhe der oben dargestellten Größenordnungen zu rechnen ist und
5. insbesondere die Ergebnisse für Bürogebäude aufgrund der reduzierten Zahl an Gebäuden zur Validierung u. U. nur eingeschränkte Gültigkeit haben. Hier sind weitere Validierungsuntersuchungen zur Überprüfung und Festigung bzw. ggf. Anpassung der gewonnenen Ergebnisse notwendig.

Für Aussagen über die Summe der installierten Leistung dürfte die Methode hingegen sehr valide sein, da sich die beobachteten Abweichungen gut ausmitteln. Gewichtet man die Ergebnisse der Validierungsgruppe dabei noch mit ihrem relativen Vorkommen in der Gesamtgruppe der aus ALKIS selektierten Gebäude, so ergibt sich, dass für alle Gebäude für Lüftung eine Abweichung von nur rund +6 % vom Summenwert der Bedarfsklasse „Mittel“ zu erwarten ist. Für Lüftung könnte der ermittelte Summenwert der Bedarfsklasse „Mittel“ um etwa 20 % zu hoch sein. Da das Verhältnis zwischen technisch höher und technisch geringer ausgestatteten Gebäuden nicht sicher abgeschätzt werden kann und der Umfang der Validierungsstichprobe so gering ist, ist diese Aussage allerdings mehr als Vermutung denn als Ergebnis zu verstehen.

Die folgende Grafik verdeutlicht die Relationen der gewichteten Summenwerte zu den Werten der Bedarfsklasse „Mittel“ für Lüftung und Kälte.

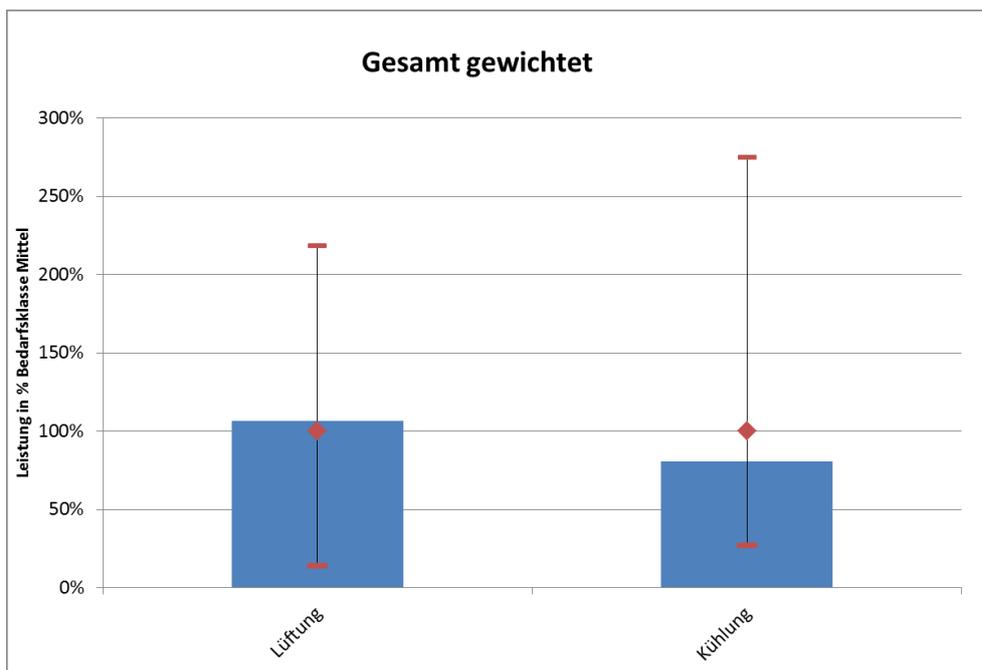


Bild 5-36: Relationen der gewichteten Summenwerte zu den Werten der Bedarfsklasse „Mittel“ für Lüftung und Kälte

6 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

Die Potenzialabschätzung im Rahmen der Voranalyse liefert für die 7.389 selektierten Gebäude folgendes Gesamtpotenzial für P_{vent} und $P_{kühl}$ bezogen auf die drei Bedarfsklassen „Niedrig“, „Mittel“ und „Hoch“:

	Bedarfsklasse		
	Niedrig	Mittel	Hoch
P_{vent}	8.208 kW	62.063 kW	135.714 kW
$P_{kühl}$	37.363 kW	140.218 kW	386.004 kW

Tabelle 6-1: Gesamtpotenzial für P_{vent} und $P_{kühl}$ bezogen auf die drei Bedarfsklassen „Niedrig“, „Mittel“ und „Hoch“

Diese kurze Übersicht ist insofern irreführend, als im vorangegangenen Abschnitt gezeigt wurde, dass die mittlere Bedarfsklasse für das Kollektiv der Gebäude maßgeblich ist. Die Bedarfsklasse „Mittel“ stellt insofern den vermutlich validen „Mittelwert“ dar. Die Bedarfsklasse „Niedrig“ ist in Einzelfällen für Gebäude relevant, jedoch nicht für das Kollektiv der Gebäude. Die Bedarfsklasse „Hoch“ ist in der Validierungsgruppe nicht einmal in Einzelfällen erreicht worden und vermutlich als obere Grenze auch in Einzelfällen nicht relevant.

Für die Interpretation dieser Ergebnisse ist es zudem notwendig, sie zu denen der qualitativen Potenzialanalyse, ABC-Analyse, in Bezug zu setzen. Zur Erinnerung: In Kategorie „A“ fallen die Gebäude, in denen sehr sicher mit einem DSI-Potenzial gerechnet werden kann. Über die Kategorien B1 und B2 nimmt diese Sicherheit ab und in Kategorie C liegen die Gebäude, für die das Vorhandensein von LuK sehr zweifelhaft ist. Zieht man nun das in der Kategorie C befindliche Potenzial vom Gesamtpotenzial ab, ergibt sich eine reduzierte Grundgesamtheit von dann nur noch 2.786 Gebäuden. In diesen lässt sich für die Bedarfsklasse „Mittel“ folgendes Potenzial verorten:

- $P_{vent,mittel}$: 55.983 kW, gerundet ca. 56 MW
- $P_{kühl,mittel}$: 126.190 kW, gerundet ca. 126 MW

Zur Einschätzung der Größenordnung sei angemerkt, dass die in Hamburg installierte Leistung aus PV- und Windkraftanlagen vom Netzbetreiber, der „Stromnetz Hamburg GmbH“, derzeit mit rund 82 MW angegeben wird (rund 53 MW aus Wind und rund 29 MW aus PV). Das DSI-Potenzial der Stadt sollte also – auch reduziert auf das realisierbare Potenzial – in der Lage sein, die sich für Hamburg ergebenden Fluktuationen der Residuallast auszugleichen.²¹

Auffällig ist, dass in nur 37,7 % der betrachteten Gebäude (2.786 von 7.389) das als gesichert zu betrachtende Potenzial vertreten ist und dieses etwa 90 % des theoretischen Potenzials inkl. der Gebäude der Kategorie C abbildet. Die Summenverteilung der Leistung ist für Kühlen und Lüften über alle Bedarfsklassen exponentiell, wie die folgenden Grafiken zunächst für die lineare Projektion und dann in der doppelt logarithmischen Darstellung zeigen.

²¹ Das ist interessant, aber für einen Stadtstaat wie Hamburg wohl zu erwarten. Wirklich spannend ist die Fragestellung, inwieweit das gesammelte DSI-Potenzial der Stadt Hamburg geeignet ist, um Fluktuationen und Netzengpässe der Windenergieerzeugung aus Schleswig-Holstein (insb. Off-Shore) auszugleichen. Der Autor hat als Vertreter der HAW gemeinsam mit Vertretern der Hochschulen des Hamburger Energieforschungsverbands (HEFV) und weiteren Projektpartnern aus der Wirtschaft einen entsprechenden Forschungsantrag gestellt.

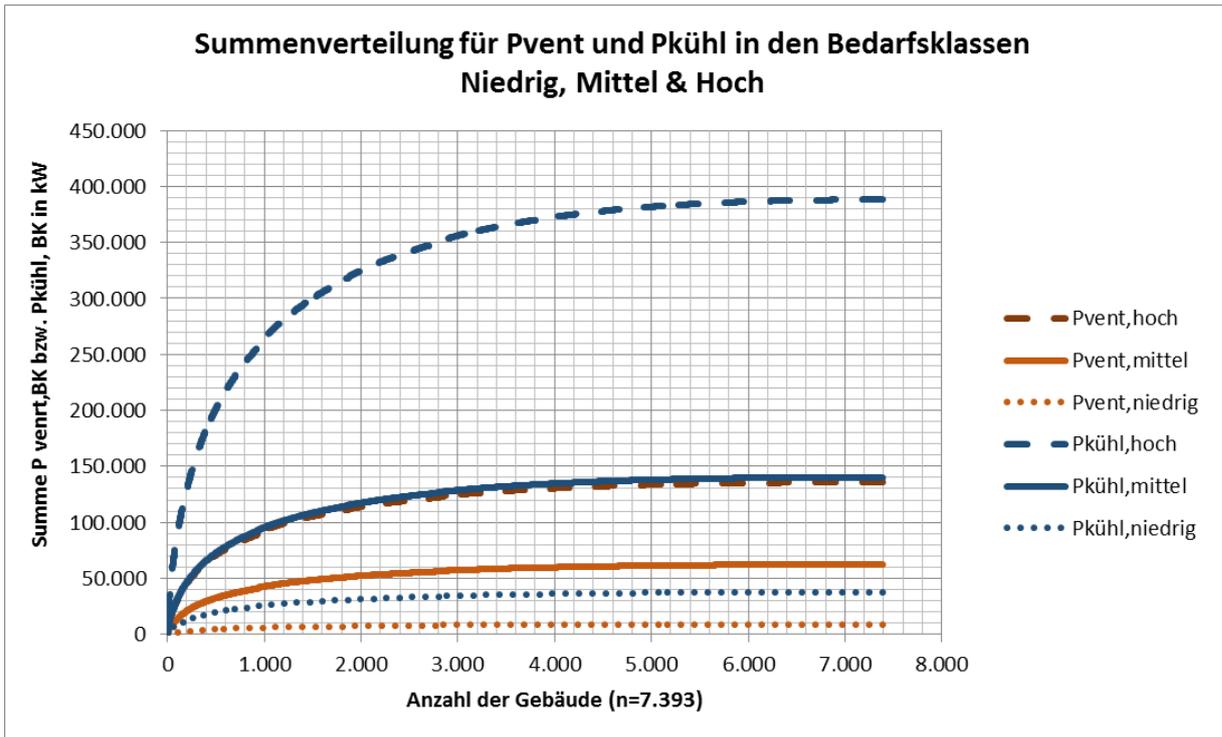


Bild 6-1: Summenverteilung der Anschlussleistung für P_{vent} und $P_{kühl}$ in den drei Bedarfsklassen (BK) – lineare Darstellung

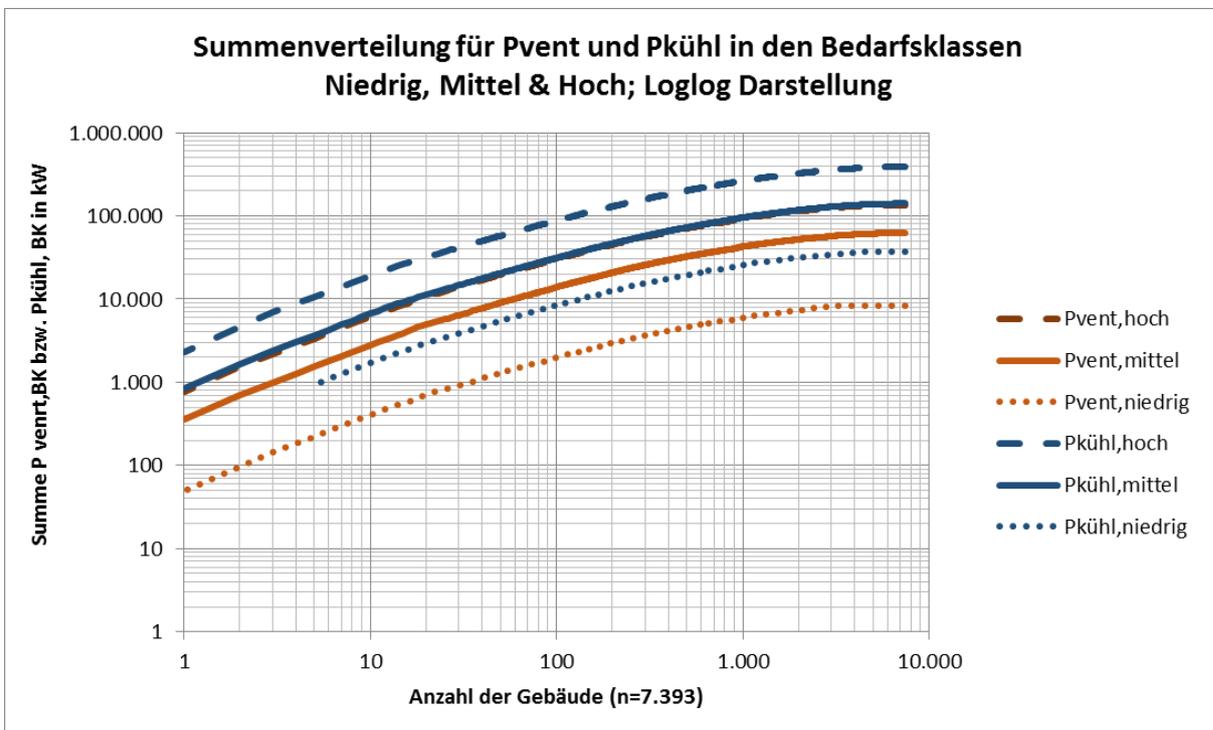


Bild 6-2: Summenverteilung der Anschlussleistung für P_{vent} und $P_{kühl}$ in den drei Bedarfsklassen (BK) – doppelt logarithmische Darstellung

Die leichte Abweichung von den zu erwartenden Geraden in der Loglog-Darstellung (bei exponentieller Verteilung) ergibt sich insbesondere aus den niedrigen (bzw. sehr unsicheren) Leistungsanteilen der Kategorien B2 und C.

Die folgenden Ausführungen stellen zunächst die Ergebnisse vor dem Hintergrund der ABC-Kategorisierung dar. Daran anschließend werden die Resultate kurz mit Bezug zu den Gebäudefunktionsgruppen diskutiert und anschließend der zeitliche Verlauf der Lasten über ein Jahr dargestellt (Dynamik). Die Ergebnisdarstellung schließt mit der Darstellung der Verortung der Leistungen in Karten.

6.1 Ergebnisse der ABC-Analyse

Die ABC-Analyse hat die „Trennung des Wichtigen vom Unwichtigen“ zum Ziel, wie in Abschnitt 4.3.2 dargestellt. Nach dem Ansatz von Pareto wäre die Definition, dass als „wichtig“ die 20 % der Gebäude einzustufen sind, in denen 80 % der installierten Leistung zu erwarten ist. Für die betrachteten Gebäude lässt sich tatsächlich 80 % der installierten Leistung in etwa 22 % der Gebäude lokalisieren. Die folgende Grafik stellt dies für die Summenverteilung der Lüftungsleistung dar.

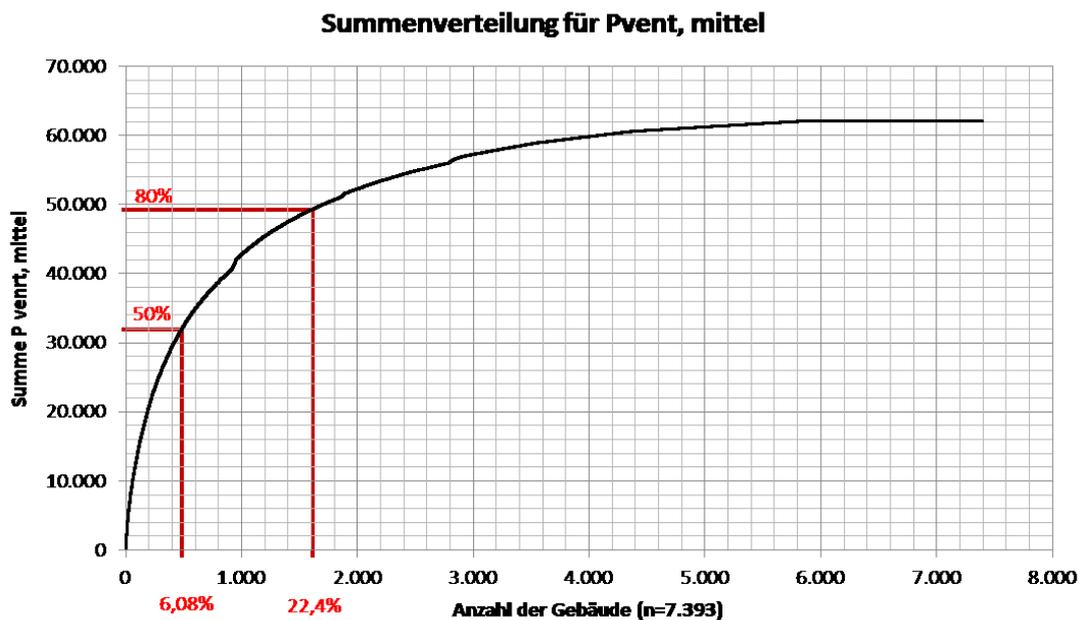


Bild 6-3: Darstellung der 50 % und 80 % Summenanteile für $P_{vent,mittel}$

Für die Summenverteilung der Kälteleistung ergeben sich sehr vergleichbare Werte (s. u.). Da die Berechnung der installierten Leistung linear von der NGF abhängt (vgl. Formel 4-17 und Formel 4-18) und sich diese, wie oben gezeigt, wie eine Pareto-Verteilung verhält, war dieses Ergebnis zu erwarten. Interessant ist an dieser Stelle aber, dass die ABC-Kategorisierung, die von der Leistungsberechnung unabhängig erfolgt, diese Einteilung in etwa nachvollzieht. Es zeigt sich, dass die 25 % der Gebäude in den Kategorien A und B1 rund 83 % der installierten Leistung ausmachen. Die folgende Grafik stellt den Zusammenhang für die installierte Leistung für Lüftungsanlagen in der Bedarfsklasse „Mittel“ dar. Die daran anschließende Tabelle gibt einen Überblick über die durchschnittlichen Verhältnisse für alle Bedarfsklassen. Sie gibt die Mittelwerte und die Standardabweichung für sechs Fälle (installierte Leistung für Lüftung und Kälte mit jeweils drei Bedarfsklassen) wieder. Diese sechs Fälle unterscheiden sich in ihren absoluten Werten erheblich. Die relativen Werte sind jedoch sehr vergleichbar und unterscheiden sich nur geringfügig. Einzige Ausnahme bilden die Werte für $P_{vent,mittel,KatC}$, $P_{vent,niedrig,KatC}$. Hier liegt eine Verschiebung hin zur Bedarfsklasse „Mittel“ vor.

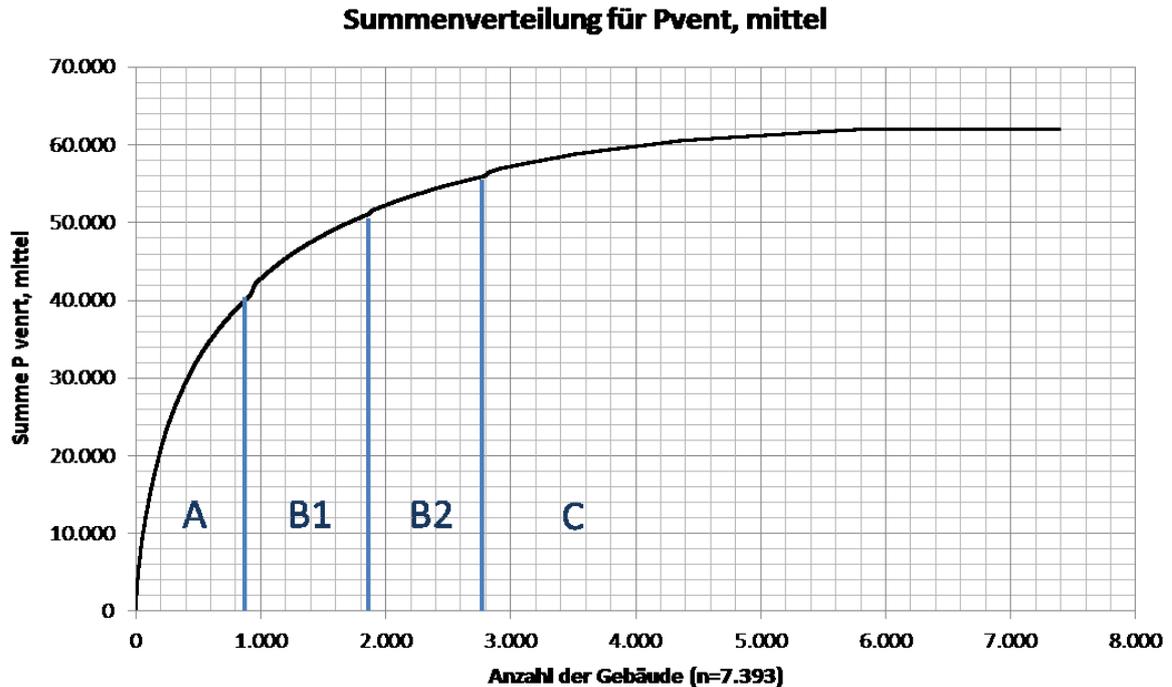


Bild 6-4: Darstellung der Mengen- und Summenanteile der Kategorien A bis C an der Summenverteilung $P_{vent, mittel}$

Die Grafik zeigt bereits anschaulich, dass sich in den Kategorien A bis B2 jeweils ungefähr gleich viele Gebäude befinden. Die folgende Tabelle hinterlegt dies mit Zahlenwerten.

Gebäude- kategorie	Anteil an Anzahl Gebäude		Anteil an installierter Leistung		Qualität der ermittelten Leistung
	absolut	relativ	Mittelwert des relativen Leistungsanteils für Lüftung bzw. Kälte	Standard- abweichung des relativen Leistungsanteils für Lüftung und Kälte	
A	916	12,39 %	65,99 %	0,84 %	Sehr sicher
B1	952	12,88 %	16,91 %	0,25 %	Sicher
B2	918	12,42 %	8,53 %	0,90 %	Unsicher
C	4.603	62,32 %	8,57 %	1,95 %	Sehr unsicher
Summen	7.389	100,00 %	100,00 %		

Tabelle 6-2: Mengen- und Summenanteile der Kategorien A bis C an den Summenverteilungen

Die Tabelle gibt auch eine Einordnung der Qualität der ermittelten Leistung wieder. So kann die den Kategorien A und B1 zuzuordnende Leistung als (sehr) sicher vorhanden angenommen werden. Diese Gebäude sind mit relativ hoher Wahrscheinlichkeit auf der Mittelspannungsebene angeschlossen und lassen eine entsprechende Gebäudeausstattung erwarten. Für die Gebäude der Kategorie B2 ist dieses bereits unsicher. Hier ist das Vorhandensein der Leistung möglich, aber unsicher. Die für die Gebäudekategorie C ermittelte Leistung muss als „sehr unsicher“ (bzw. unwahrscheinlich) eingestuft werden. Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass 83 % der ermittelten Leistung in den Bedarfsklassen A und B1 aus etwa 25 % der Gebäude stammen und als (sehr) sicher vorhanden eingestuft werden

können. Weitere jeweils 8,5 % der identifizierten Leistung sind als unsicher bzw. sehr unsicher einzustufen. Sie entstammen etwa 75 % der Gebäude. Damit kann die Methode der ABC-Analyse zur Identifizierung der für das DSI-Potenzial wesentlich wichtigen Gebäude als erfolgreich betrachtet werden.

An dieser Stelle sei noch einmal an das Gebäude „ID 43“ der Validierungsgruppe erinnert. Dies ist ein Gebäude der Kategorie A und auf Mittelspannungsebene angeschlossen. Aufgrund der geringen technischen Ausstattung liegt seine Anschlussleistung aber weit unter den für die Bedarfsklasse „Mittel“ zu erwartenden Werten. Für den Einzelfall ist die Aussage, dass ein Gebäude zur Kategorie „A“ gehört, noch keine Garantie dafür, dass die Anschlussleistungen der Bedarfsklasse „Mittel“ auch vorhanden sind. Dafür gilt es, stärker die Gruppenzugehörigkeit der Gebäude zu berücksichtigen (vgl. folgenden Abschnitt). Für die Summenleistung der Gebäude bleibt die oben getroffene Aussage aber gültig (vgl. Aussagen zu den Summenleistungen der Validierungsgruppe im vorangegangenen Abschnitt).

Die folgenden Grafiken verdeutlichen den Effekt der Kategorisierung mithilfe der ABC-Analyse. Sie geben eine Übersicht über die Verteilung der Gebäude in den vier Kategorien über die Leistungsklassen der installierten Leistung für Lüftung und Kälte. Dargestellt ist die Verteilung für die Bedarfsklasse „Mittel“, die Fehlerindikatoren markieren die Bereiche für die Streuung, die sich aus den Bedarfsklassen „Niedrig“ und „Hoch“ ergibt.

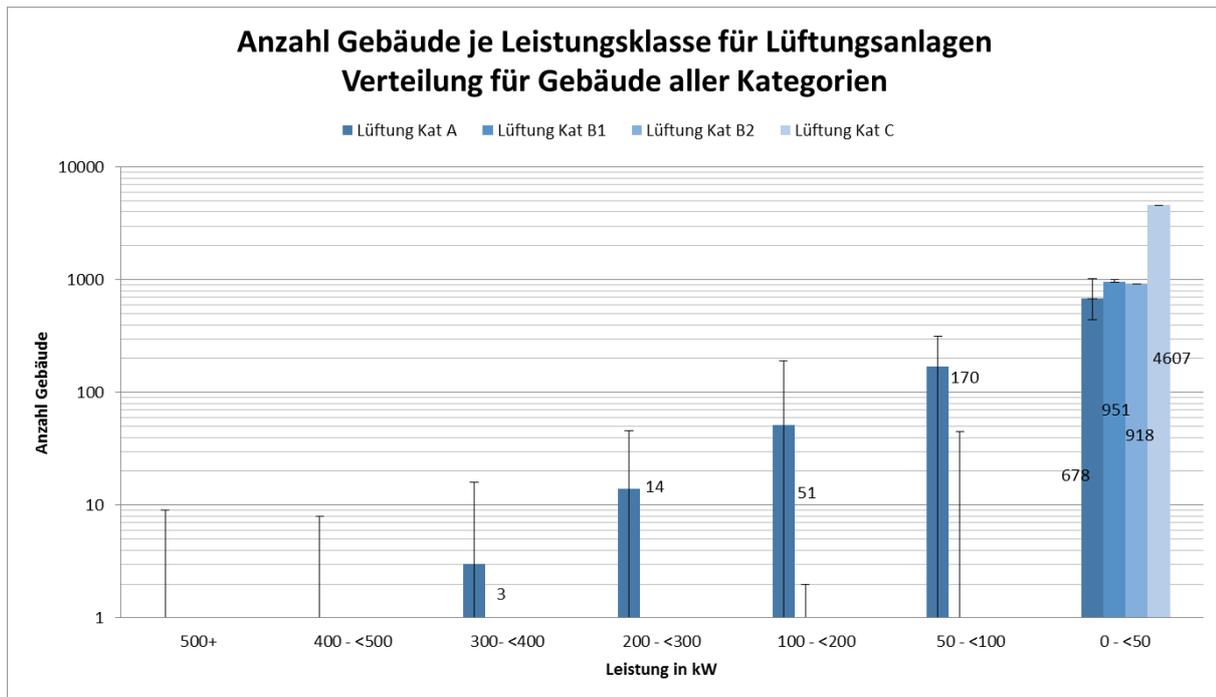


Bild 6-5: Verteilung der Gebäude nach Leistungsklassen und Kategorien A bis C für P_{vent}

Es zeigt sich, dass Gebäude der Kategorien B1 bis C für P_{vent} nur in der Klasse 0 bis < 50 kW auftauchen. Lediglich bei hohem Bedarf könnten zwei Gebäude der Kategorie B1 in der Klasse 100 bis < 200 kW bzw. 45 Gebäude in der Klasse 50 bis < 100 kW vertreten sein. Ein ähnliches Bild ergibt sich bei Betrachtung der installierten Leistung aus Kälteanlagen:

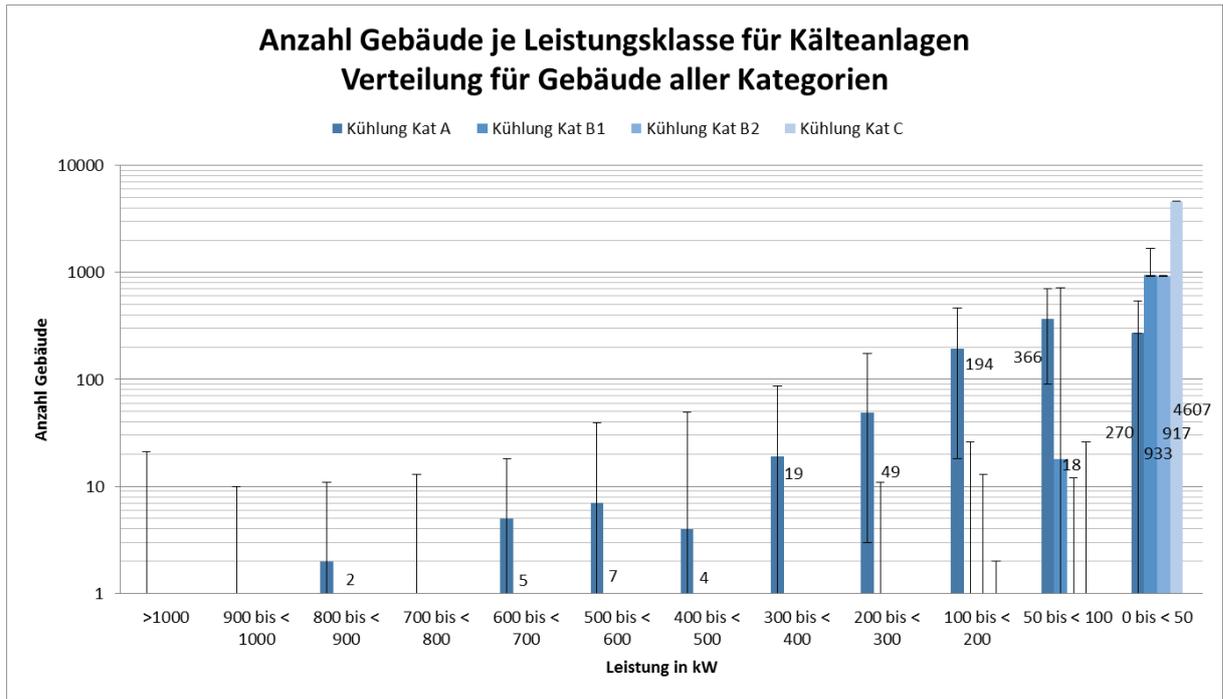


Bild 6-6: Verteilung der Gebäude nach Leistungsklassen und Kategorien A bis C für P_{vent}

Bei hohem Bedarf könnten etwa elf Gebäude der Kategorie B1 in der Klasse zwischen 200 bis < 300 kW liegen. Alle größeren Klassen werden ausschließlich von Gebäuden der Kategorie A besetzt. Bei mittlerem Bedarf tauchen Gebäude der Kategorien B2 und C erst in der Leistungsklasse 0 bis < 50 kW auf. Ziel der ABC-Analyse ist es aber insbesondere, in den unteren Leistungsbereichen eine Aussage darüber zu ermöglichen, in welchen Gebäuden mit welcher Sicherheit noch ein DSI-Potenzial aus LuK erwartet werden darf. Hier schafft die ABC-Analyse eine deutliche Aufgliederung, wie die folgenden Grafiken zeigen, die die Verteilung in den Leistungsklassen < 100 kW detaillierter darstellen.

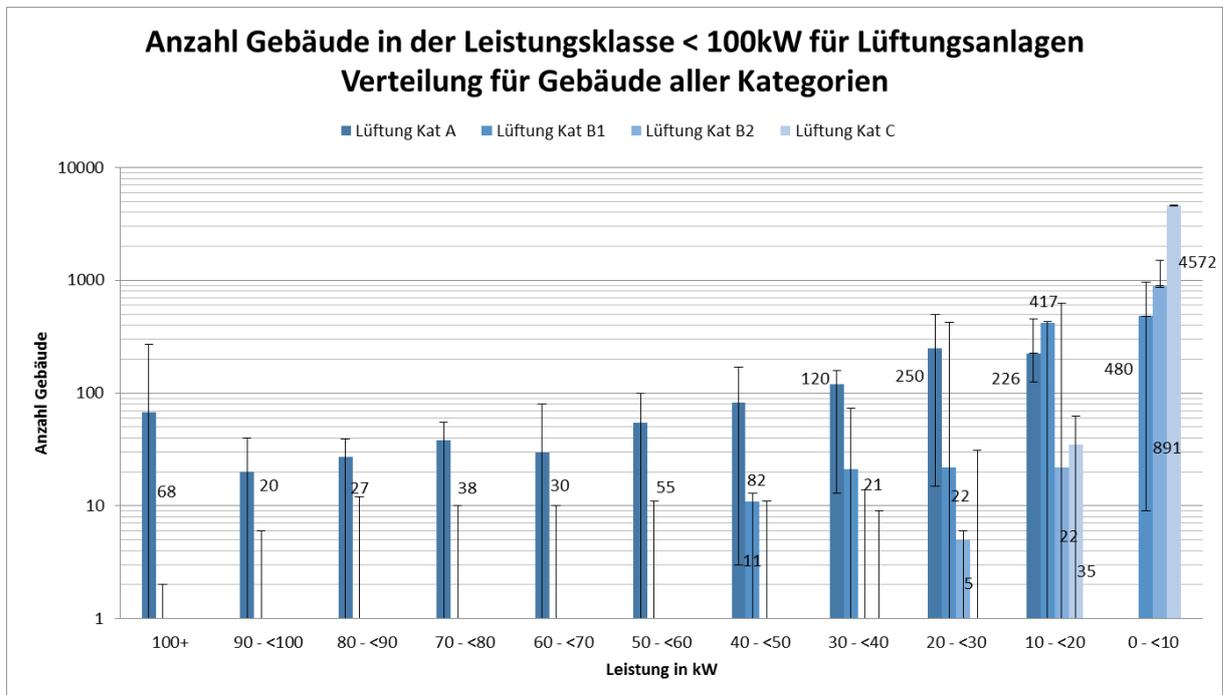


Bild 6-7: Verteilung der Gebäude nach Leistungsklassen < 100 kW und Kategorien A bis C für P_{vent}

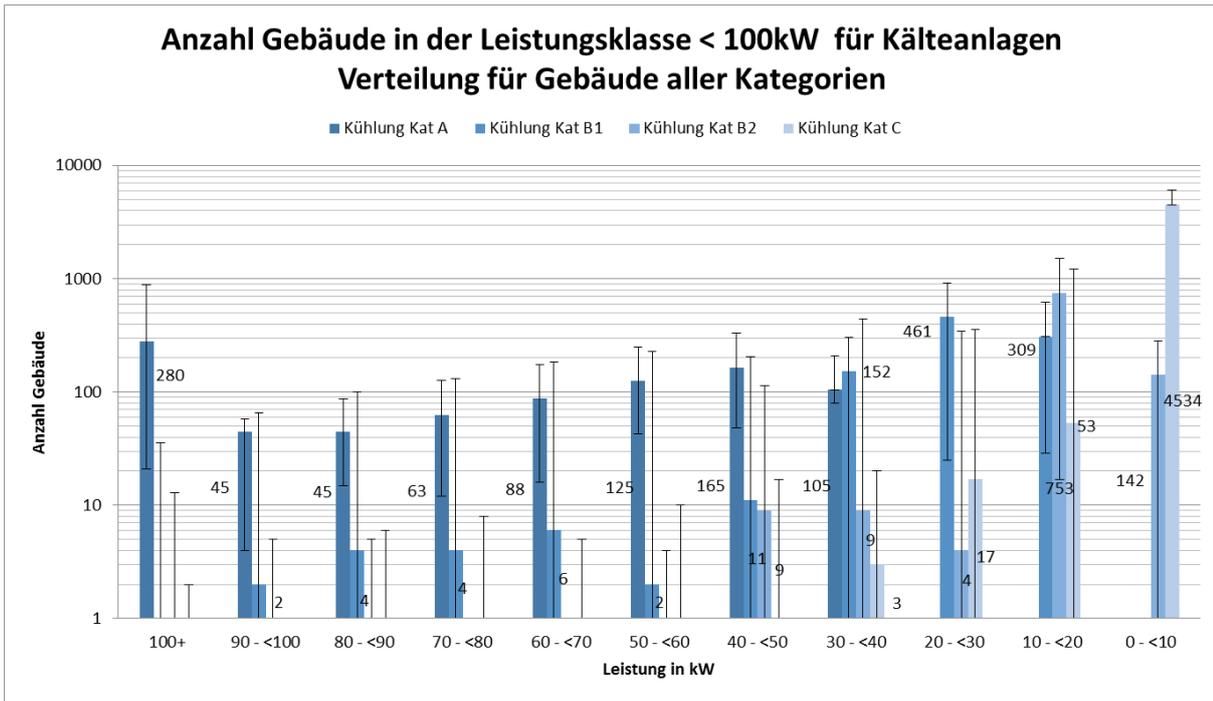


Bild 6-8: Verteilung der Gebäude nach Leistungsklassen < 100 kW und Kategorien A bis C für $P_{kühl}$

Es fällt auf, dass Gebäude der Kategorie C sogar erst in den Klassen < 20 kW (Lüftung) bzw. < 40 kW (Kälte) vertreten sind und sie in beiden Fällen ein ausgeprägtes Maximum der Verteilung im Bereich 0 bis < 10 kW haben. Dies dokumentiert noch einmal deutlich, dass Gebäude der Kategorie C für das DSI-Potenzial aus LuK mit großer Sicherheit keine Rolle spielen. Auch Gebäude der Kategorie B2 tauchen gehäuft erst in sehr niedrigen Leistungsklassen auf, während Gebäude der Kategorie A (insbesondere für Kälteanlagen) dort gar nicht mehr vertreten sind. Insgesamt fällt auf, dass mit abnehmender Leistung die Anzahl der Gebäude in jeder Kategorie ansteigt. So liegen auch für die Kategorie A die meisten Gebäude in einem Bereich unter 100 kW. Wegen der exponentiellen Verteilung der Leistung gilt dies aber nicht mehr im gleichen Maß, wenn man die Verteilung der Summe der installierten Leistung über die Leistungskategorien betrachtet. Der sich ergebende Anstieg ist dann deutlich weniger stark ausgeprägt, wie die folgenden Grafiken zeigen. Sie stellen die in jeder Leistungsklasse und Gebäudekategorie vertretene Summe der Anschlussleistung dar (bisher Summe der Gebäude).

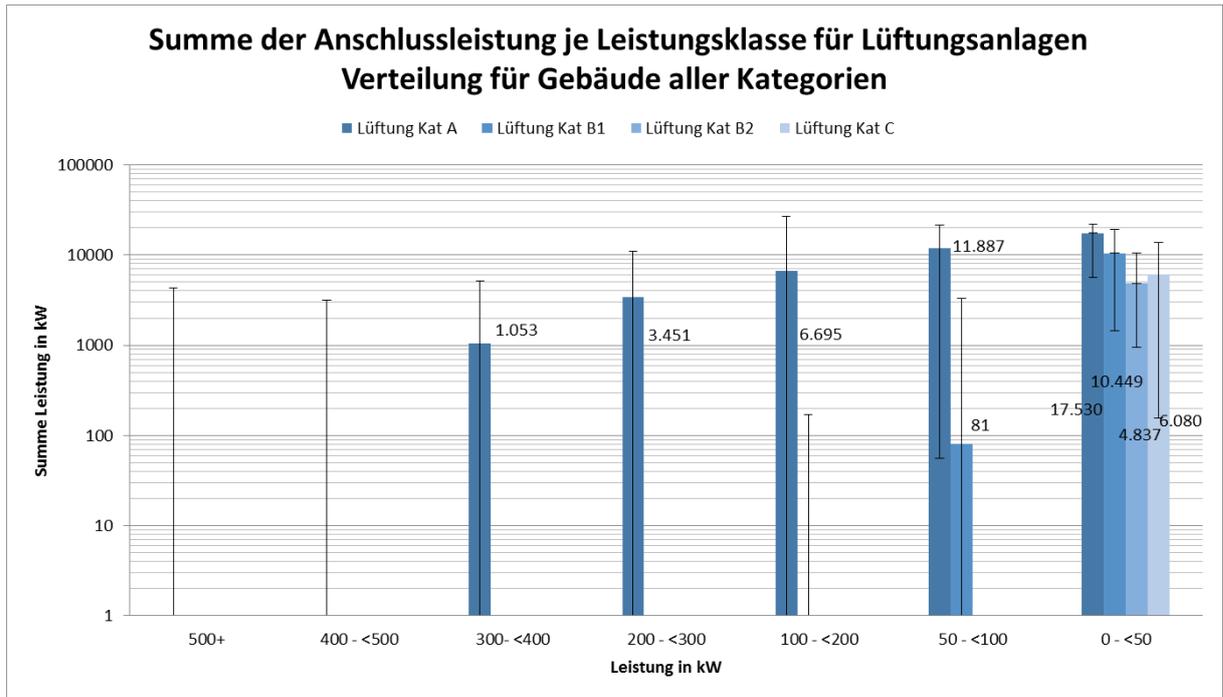


Bild 6-9: Verteilung der Anschlussleistung nach Leistungsklassen der Gebäude und Kategorien A bis C für P_{vent}

Es zeigt sich, dass bei mittlerem Bedarf 68 Gebäude der Kategorie A, die in den Leistungsklassen > 100 kW vertreten sind, zusammen eine Anschlussleistung für Lüftung von 11.200 kW repräsentieren. Das entspricht 18 % der gesamten für die Lüftung gefundenen Leistung in 0,6 % der Gebäude. Für Kälteanlagen ergibt sich ein ähnliches Bild.

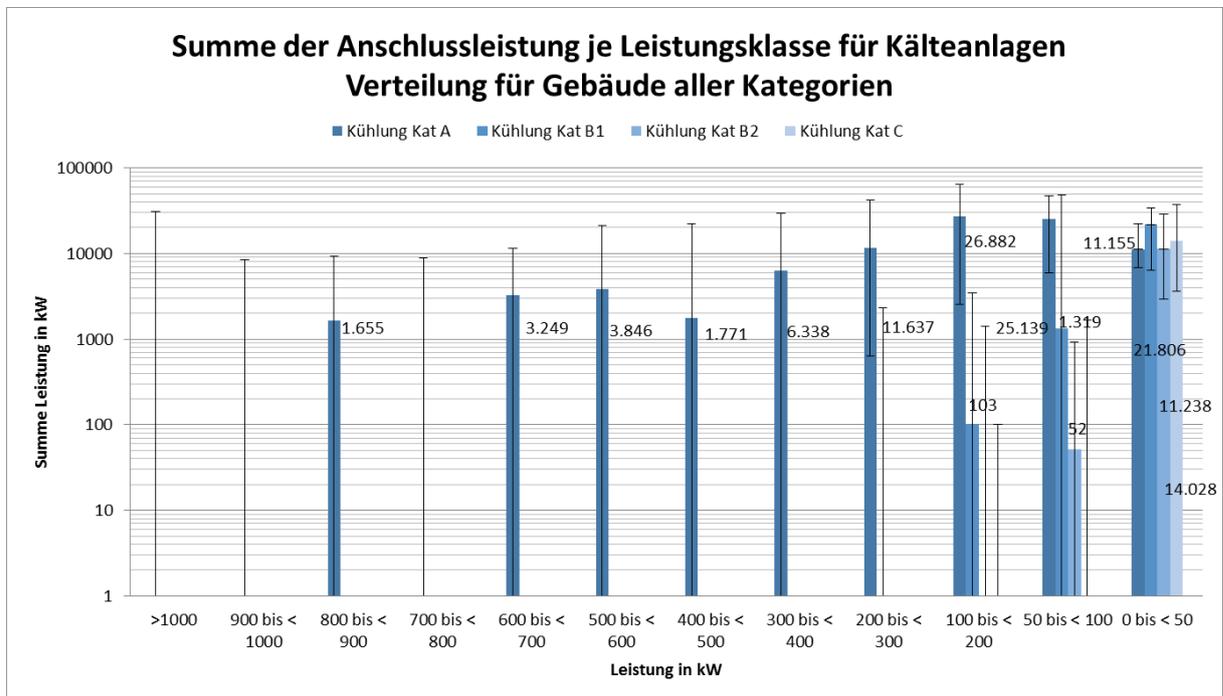


Bild 6-10: Verteilung der Anschlussleistung nach Leistungsklassen und Kategorien A bis C für $P_{kühl}$

Hier sind in den 86 Gebäuden der Kategorie A, die den Leistungsklassen > 200 kW angehören, in Summe 28,5 MW Leistung installiert. Das entspricht 20 % der Leistung für Kälte in 1,16 % der Gebäude.

6.2 Ergebnisse der Potenzialabschätzung für die einzelnen GFK

Im Rahmen der Voranalyse werden Gebäude unterschiedlicher Gebäudefunktionen (ALKIS GFK) zu den beiden Gruppen „Bürogebäude“ und „Hochschulgebäude“ zugeordnet. Ihre GFK-Zuordnung bleibt dabei erhalten und ermöglicht eine entsprechende spezifische Auswertung der Ergebnisse.

Dabei ist zunächst festzustellen, dass die Relation der gefundenen Anschlussleistung pro GFK weitgehend der Relation der Flächenanteile der GFK entspricht. Das zeigen die beiden folgenden Grafiken, die sehr vergleichbare Anteile zu Bild 4-6 in Abschnitt 4.2.4 ausweisen. Auch der Vergleich der Anteile der GFK an den Anschlussleistungen zeigt lediglich bei den Hochschulgebäuden einen signifikanten Unterschied: Für diese ist der Anteil an der Lüftungsleistung etwa doppelt so hoch wie der an der Kälteleistung.

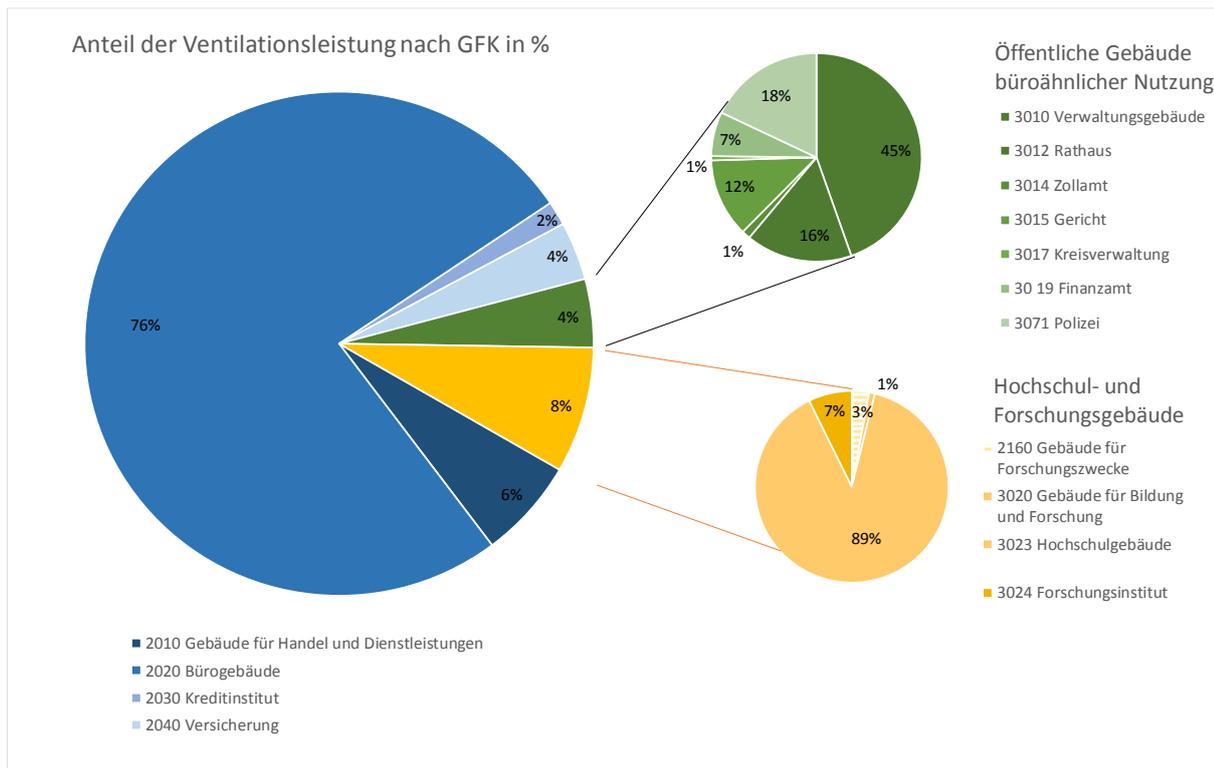


Bild 6-11: Prozentuale Anteile der Gebäudegruppen an der installierten Leistung für Lüftung

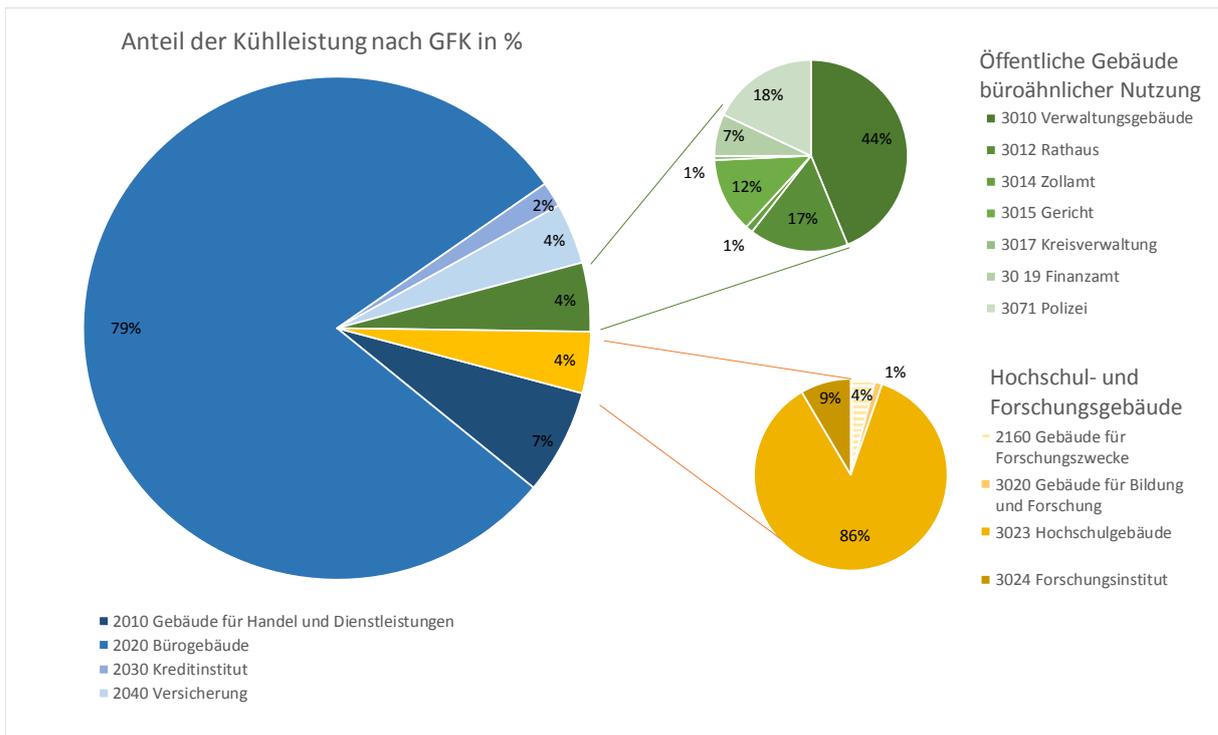


Bild 6-12: Prozentuale Anteile der Gebäudegruppen an der installierten Leistung für Kälte

Betrachtet man die Aufteilung der Leistung in den GFK genauer und vergleicht dies mit dem Anteil der Gebäude an den Kategorien A bis C für jede GFK, so lässt sich feststellen, dass für nahezu alle GFK die meisten Gebäude der Kategorie C angehören und in der Kategorie A eher wenig Gebäude vertreten sind. Dies deckt sich mit den Ergebnissen des vorangegangenen Abschnitts. Es zeigen sich allerdings einige Ausnahmen: So ist im Verhältnis der Anteil der Gebäude in Kategorie A für Versicherungsgebäude (2040) und Hochschulgebäude (3023) deutlich erhöht. Für Gerichte (3015) und Finanzämter (3019) ergibt sich ebenfalls eine Verschiebung hin zu den Kategorien A bis B2 mit wenig oder keinen Gebäuden in der Kategorie C. Diese Verteilung deutet darauf hin, dass in diesen GFK ein überproportionaler Anteil der Anschlussleistungen für LuK zu finden ist.

Im Gegensatz dazu haben Zollämter (3014) und Gebäude für Bildung und Forschung (3020) wenig bis gar keine Gebäude in den Kategorien A und B1. Hier dürfte ein unterproportionaler Anteil der Leistung für LuK zu finden sein.

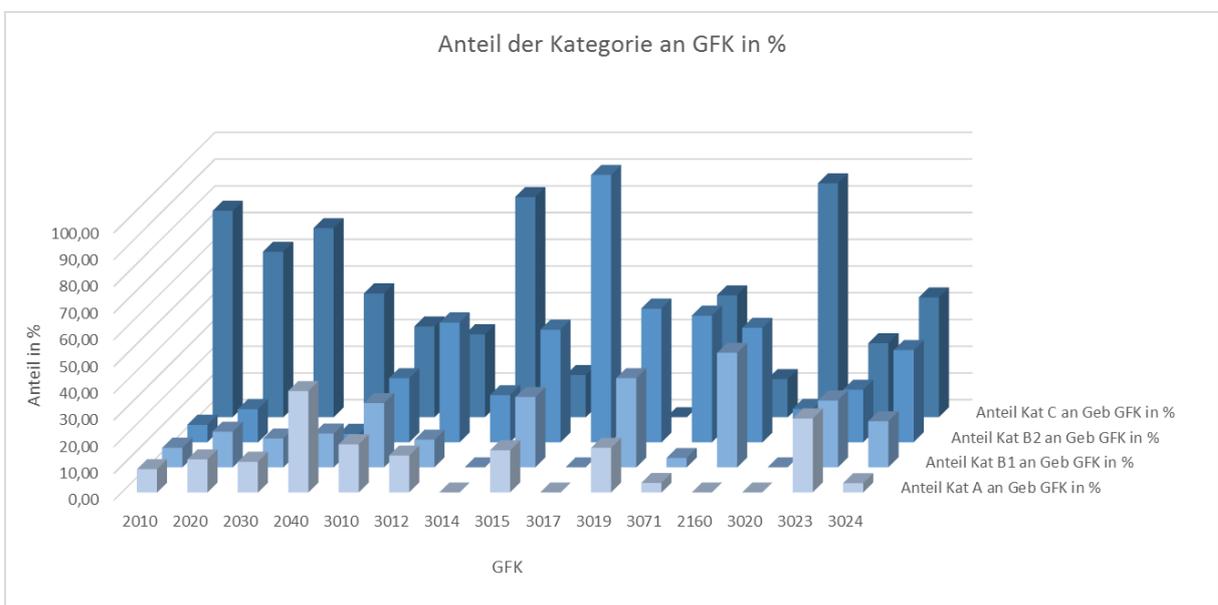


Bild 6-13: Relative Anteile der Kategorien A bis C an der Anzahl der Gebäude in den unterschiedlichen GFK-Gruppen

Dieselbe Betrachtung für die Anteile der installierten Leistung in den Kategorien A bis C für die einzelnen GFK bestätigt die Einschätzung: So findet sich die Anschlussleistung für Versicherungsgebäude (2040) zu fast 90 % in der Kategorie A, während die für Zollämter und Gebäude für Bildung und Forschung hauptsächlich der Kategorie C zuzurechnen ist und damit als insgesamt sehr unsicher eingestuft werden muss.

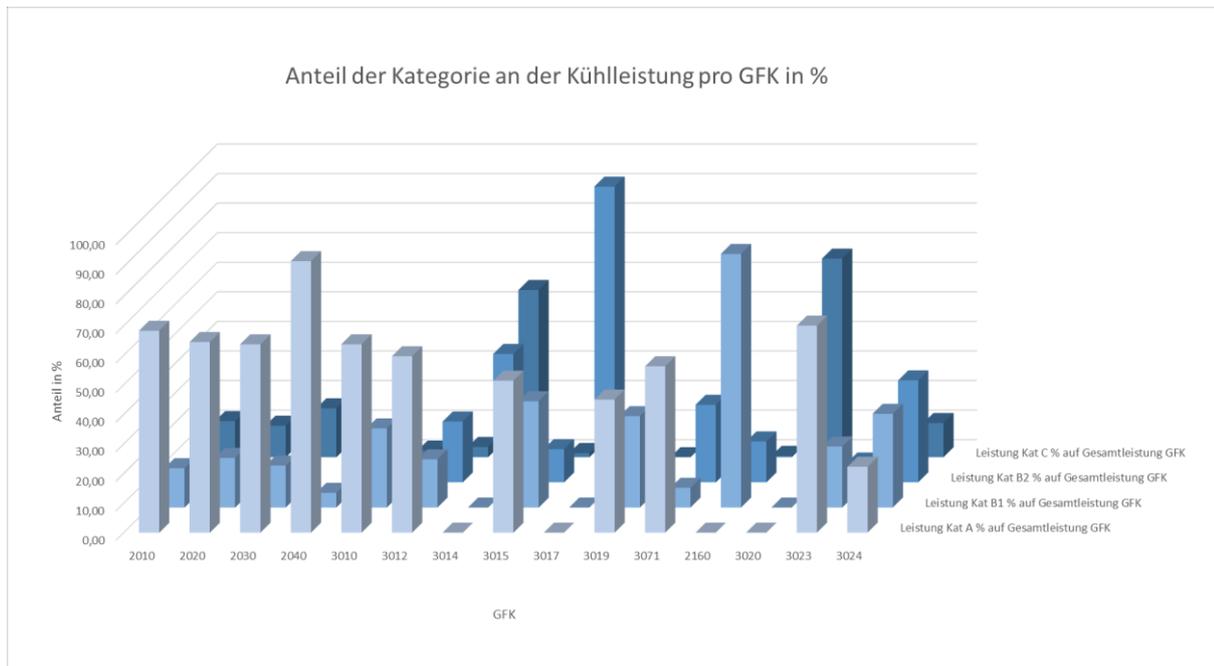


Bild 6-14: Relative Anteile der Kategorien A bis C an der installierten Leistung für Kälte in den unterschiedlichen GFK-Gruppen

Es zeigt sich, dass diese Art der Auswertung der Ergebnisse es ermöglicht, qualitative Aussagen über die Anschlussleistung in einzelnen GFK zu treffen.

6.3 Ergebnisse für die Abschätzung der Dynamik des DSI-Potenzials

Mit den in Abschnitt 4.4.3 getroffenen Annahmen lässt sich (grob) das dynamische Verhalten der ermittelten Leistung bestimmen. Dabei ist der Kälteleistungsbedarf abhängig sowohl von der Betriebszeit der verschiedenen Nutzungszonen der Gebäude als auch zusätzlich vom Verlauf der Außentemperatur. Daraus ergibt sich ein dynamischer Leistungsbedarf, der im Folgenden, gespiegelt an den Außentemperaturverläufen für 2013 in Hamburg (Wetterstation Fuhlsbüttel), wiedergegeben wird. Die folgende Grafik verdeutlicht, dass die ermittelte Anschlussleistung von 126 MW nur in einigen wenigen kurzen Perioden während des Jahres (und auch da nur näherungsweise vollständig) zeitgleich benötigt wird. Den größten Teil des Jahres werden nur Teilleistungen unterschiedlicher Größe aktiv. Interessant ist ebenfalls das insgesamt eher unharmonische Profil, das zahlreiche Ansätze für Möglichkeiten zur Lastgangglättung erkennen lässt. Dafür ist der Einsatz von Strategien des Vor- bzw. Nachkühlens in Lastmanagementkonzepten gut geeignet (s. Grein et al. 2009, S. 42). Dies bedeutet, dass aus dem Leistungspotenzial für Kälte sowohl Leistung zu- als auch abgeschaltet werden kann. Es ergibt sich in der Folge die Möglichkeit, dieses Potenzial sowohl für positive Regelenergie (durch Abschalten) als auch für negative (durch Zuschalten) zu nutzen. Die folgende Grafik zeigt das dynamische Verhalten der Kälteleistung.

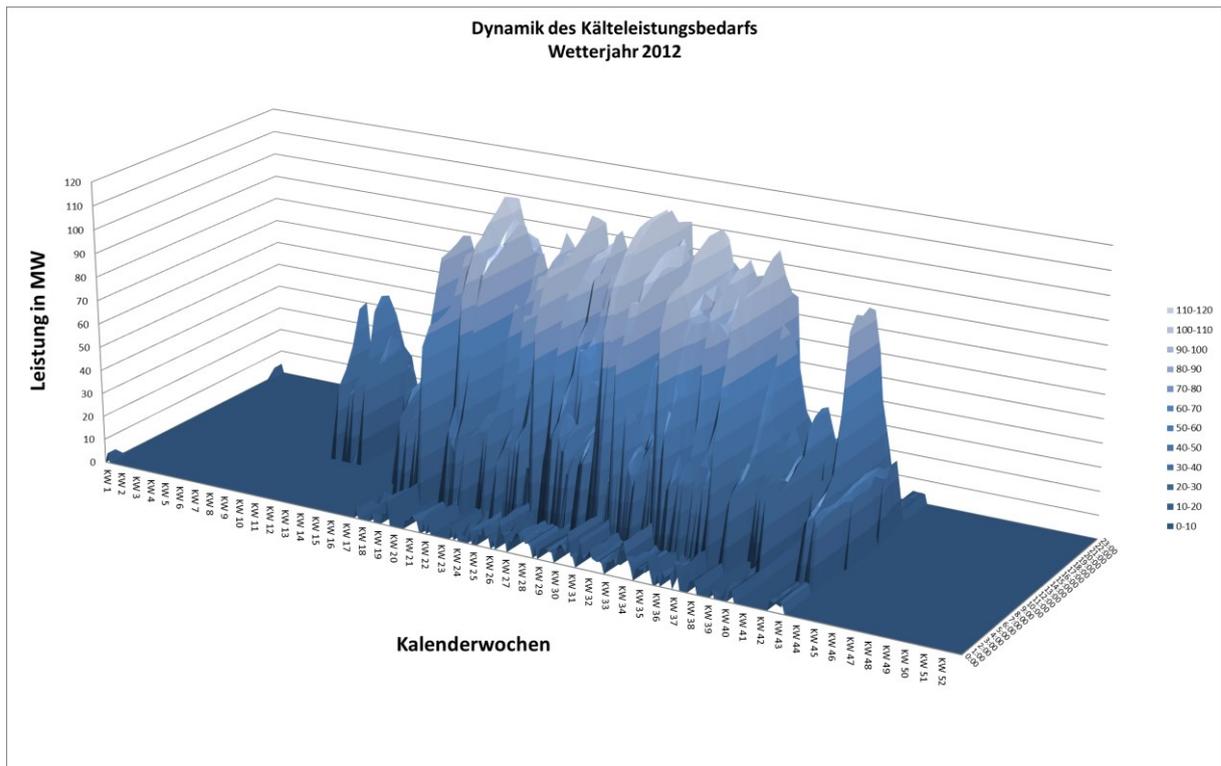


Bild 6-15: Dynamik des ermittelten Kälteleistungspotenzials für das Wetterjahr 2012

Die dargestellten Verhältnisse müssen als eine grobe Annäherung (eben im Rahmen einer Voranalyse) an die tatsächlichen Verhältnisse verstanden werden, da in jedem Einzelfall die Dynamik des Kältebedarfs der Gebäude natürlich stark von den individuellen thermischen Gegebenheiten des Gebäudes abhängt und auch die Abhängigkeit der Leistungsaufnahmen der installierten Geräte von der Außentemperatur stärker variiert. Für die Summe der Gebäude kann die hier dargestellte Dynamik aber näherungsweise Verwendung finden.

Im Verhältnis zur Kälte ist die Dynamik bei der Lüftungsleistung nur abhängig von den Betriebszeiten der Gebäudezonen und nicht von der Außentemperatur. Da für die Betriebszeiten der in den selektierten Gebäuden vorkommenden Zonen in der DIN 18599 aber keine großen Unterschiede festgelegt sind (Differenzen vom 5:00- bis 18:00-Uhr-Profil ergeben sich nur für Rechenzentren und Kantinen), ergibt sich insgesamt ein sehr homogenes Bild. In der folgenden Darstellung sind die Wochenenden und sogar die einzelnen Feiertage des Jahres gut erkennbar.

Daraus lässt sich der Schluss ableiten, dass Lüftungsanlagen im Wesentlichen nur für die Bereitstellung positiver Regelenergie verwendet werden können. Eine Ausnahme kann der Betrieb am sehr frühen Morgen sein, an dem dann ein vorgezogener (und später unterbrochener) Betriebsbeginn, z. B. um 4:00 Uhr anstatt regulär um 5:00 Uhr, erfolgen könnte.

Die folgende Grafik zeigt das dynamische Profil der Lüftungsleistung.

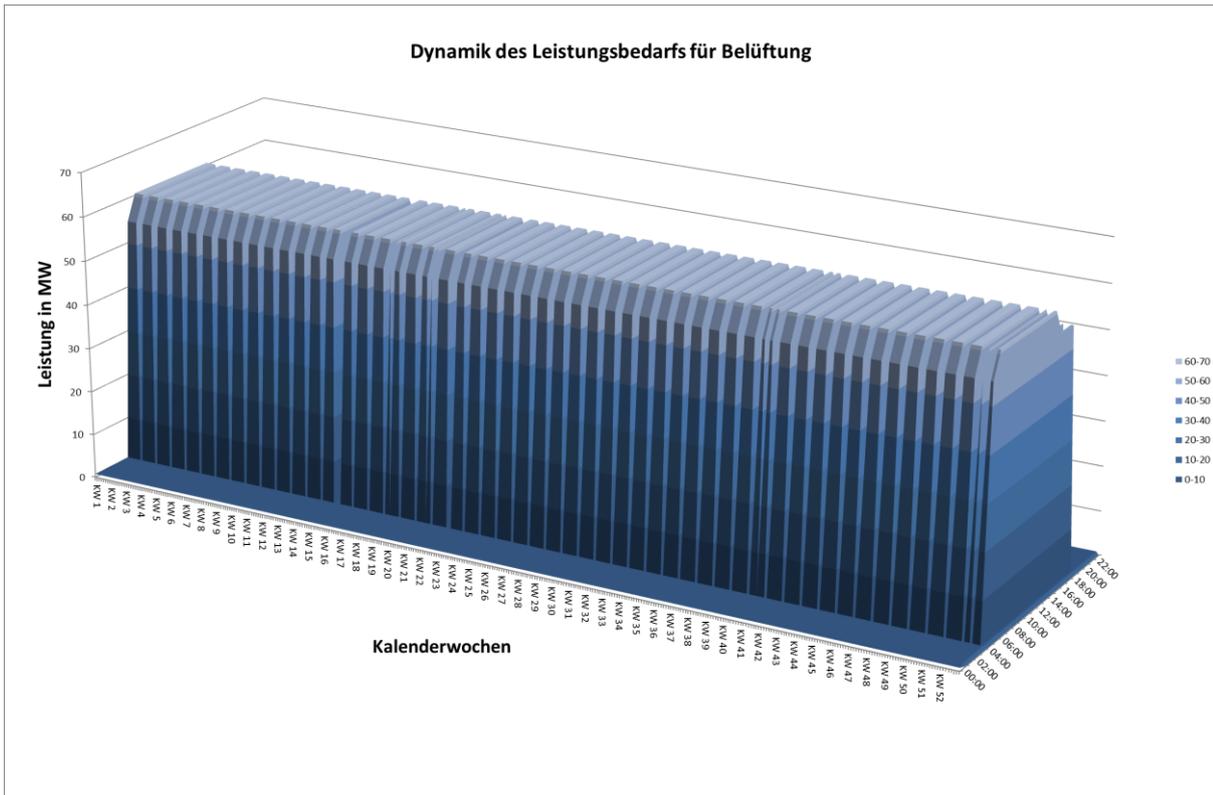


Bild 6-16: Dynamik des ermittelten Lüftungsleistungspotenzials

6.4 Ergebnisse für die Verortung des Potenzials/kartografische Darstellung

Ein wichtiger Aspekt der hier entwickelten Methode ist die Möglichkeit, die ermittelten DSI- Potenziale im städtischen Raum zu verorten. Dies kann technischen Zwecken (Netzbezug) dienen und/oder auch eine organisatorische Zielerreichung vereinfachen (Identifizierung des DSI-Potenzials für Energieleitplanungen im Quartier/Stadtteil oder zur Akquise des Potenzials).

Es wird auf einfache Weise möglich, die Liegenschaften zu lokalisieren, in denen eine hohe Anschlussleistung zu erwarten ist. Dies geschieht mit der hier beschriebenen Methode flächendeckend in wenigen Augenblicken für alle Gebäude einer Stadt. Dadurch wird es möglich, neben dem reinen „Rosinenpicken“ (Suche nach den Liegenschaften mit dem größten Potenzial zur Integration in bestehende Geschäftsmodelle zum DSI) auch räumliche Abhängigkeiten zu berücksichtigen, wie die Anordnung vieler Gebäude auf einem Flurstück einer Liegenschaft oder Nachbarschaften zu weiteren ähnlich interessanten Objekten.

Zum anderen ist es möglich, gezielt nach den Potenzialen zu suchen, die bei der Lösung von Ausgleichsproblemen mit begrenztem räumlichem Bezug helfen können. So liefert diese Studie z. B. konkrete Aussagen zum DSI-Potenzial im Hamburger Stadtteil Wilhelmsburg, für den es Pläne gibt, den Anteil erneuerbarer Energieerzeugung drastisch zu erhöhen, was wegen der starken Fluktuation aber nur mit Unterstützung durch DSI gelingen kann.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden daher Stadtkarten mit den DSI-Potenzialen für Lüftung und Kälte für das Stadtgebiet der Stadt Hamburg erstellt. Ein Atlas mit den Potenzialen aus Lüftungsanlagen befindet sich im Anhang zu dieser Arbeit.

Im Folgenden werden exemplarisch zwei Kartenausschnitte vorgestellt und an dieser Stelle kurz diskutiert. Die erste Karte zeigt die DSI-Potenziale aus Lüftungsanlagen (in Bürogebäuden) der Hamburger Innenstadt. Zur Darstellung wird eine Farbskala zur Einordnung in Leistungsklassen verwendet. Um eine gewisse Anonymisierung zu erreichen, werden nicht die Gebäudegrundrisse für die Farbskala eingefärbt, sondern die Flurstücke.

Atlas Lastverlagerungspotenziale Lüftung Bürogebäude Hamburg -Ausschnitt-

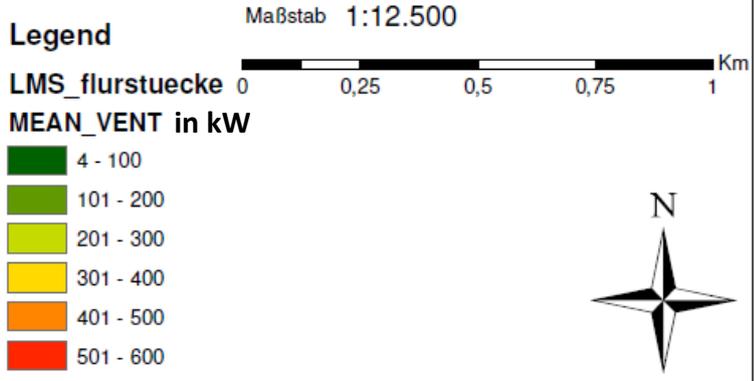


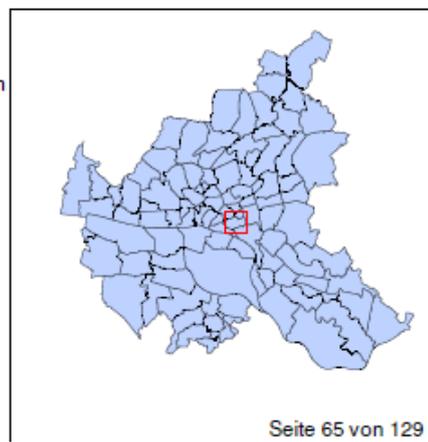
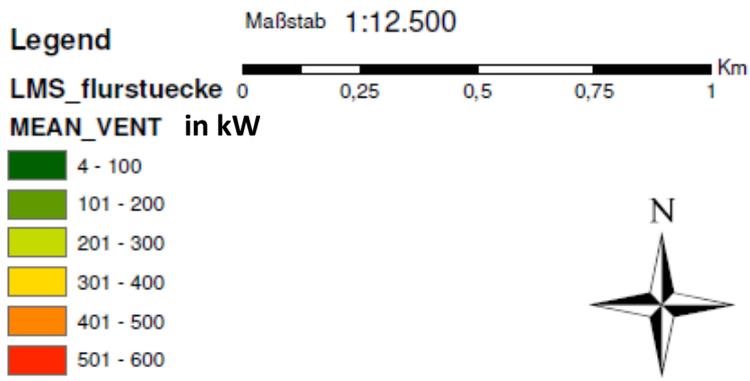
Bild 6-17: Kartenausschnitt mit den Lastverlagerungspotenzialen (in kW) aus Lüftungsanlagen in Bürogebäuden in der Hamburger Innenstadt

Die zweite Karte zeigt ein typisches Cluster von DSI-Potenzialen in einem Quartier, dessen Nutzung vor allem durch Bürogebäude bestimmt wird. Da die Flächennutzungspläne der Städte im Sinne der Raumordnung immer funktionalbezogenen Charakter haben (wofür soll/darf die Fläche genutzt werden?) und damit Bürogebäude bzw. Gebäude büroähnlicher Nutzung bestimmten Flächen zugewiesen sind, sind solche Clusterbildungen ein Resultat der Raumplanung. Die Methode der kartografischen Darstellung erlaubt nun die schnelle Identifizierung dieser Cluster.

Da sich die Frage nach Netzdienstleistungen im Stromverteilnetz auch immer verbunden mit dem Ort der Nachfrage dieser Dienstleistung, dem Verteilnetzabschnitt, stellt, bietet es sich an, die Möglichkeit der Verortung des DSI-Potenzials mit den geografischen Daten des Verteilnetzes in Bezug zu setzen und auf diese Weise zu ermitteln, in welchen Abschnitten des Verteilnetzes mit Netzdienstleistungen aus DSI in welcher Höhe (und welcher Leistungsrichtung) gerechnet werden kann.

Die folgende Grafik zeigt das DSI-Potenzial des Clusters „City Süd“. Zwar ist das individuelle Potenzial der Gebäude selten größer als 100 kW. In Summe über alle Gebäude verfügt dieses Quartier allerdings über ein Lastverlagerungspotenzial von rund 3 MW, lediglich aus Lüftungsanlagen.

Atlas Lastverlagerungspotenziale Lüftung Bürogebäude Hamburg -Ausschnitt-



Seite 65 von 129

Bild 6-18: Kartenausschnitt mit den Lastverlagerungspotenzialen (in kW) aus Lüftungsanlagen in Bürogebäuden in der City Süd

6.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die wesentlichen Ergebnisse sollen in diesem Abschnitt zur Übersicht noch einmal kurz zusammengefasst werden.

Im Rahmen der hier durchgeführten Voranalyse wurde für die Stadt Hamburg ein als relativ sicher anzusehendes DSI-Gesamtpotenzial von 56 MW aus installierten Lüftungsanlagen und 126 MW aus Kälteanlagen in Bürogebäuden, Verwaltungsgebäuden (büroähnlicher Nutzung) und Hochschulgebäuden identifiziert. Das entspricht in etwa dem Doppelten der in Hamburg derzeit in PV- und Windkraftanlagen installierten Leistung.

Diese installierte Leistung ist für jeden individuellen Fall insbesondere abhängig von der Gebäudegröße und bildet daher, ebenso wie die Gebäudegröße, eine Exponentialverteilung. Das heißt, es sind wenige große Gebäude vorhanden, in denen ein Großteil der installierten Leistung zu finden ist, und eine Vielzahl kleinerer Gebäude, die den verbleibenden Leistungsanteil hochdispers machen. So lassen sich in etwa 6 % der Gebäude 50 % der installierten Leistung finden. Die 25 % der Gebäude, die sich den Kategorien A und B1 zuordnen lassen, stehen sogar für 83 % der Leistung.

Die Einordnung der Gebäude in die Kategorien A, B1, B2 und C erlaubt auch im Bereich der flächenmäßig kleineren Gebäude eine Trennung in Gebäude, in denen mit guter Wahrscheinlichkeit (A und B1) bzw. nur mit geringer Wahrscheinlichkeit die im Rahmen der Voranalyse ermittelte Leistung zu finden ist.

Die Betrachtung der Ergebnisse für die einzelnen Gebäudefunktionsgruppen (ALKIS GFK) zeigt, dass aufgrund der Dominanz der Gebäudegruppe 2020 (Bürogebäude), in der sich 82 % der selektierten Gebäude befinden, diese auch das mit Abstand höchste DSI-Potenzial aufweist. Ebenso zeigen die Ergebnisse, dass es Gebäudegruppen gibt, die aufgrund ihrer Funktion entweder ein eher großes DSI-Potenzial vermuten lassen (Versicherungsgebäude (2040) und Hochschulgebäude (3023)) oder aufgrund ihrer Funktion ein eher geringes Potenzial aufweisen, z. B. Zollämter (3014) und Gebäude für Bildung und Forschung (3020).

Mit den aus der DIN 18599 zur Verfügung stehenden pauschalen Annahmen über die Betriebszeit einzelner Gebäudezonen und über eine pauschalierte Annahme des prozentualen Teilenergiebedarfs zur Gebäudekälteversorgung sowie einen Außentemperaturverlauf eines Beispielwetterjahres lassen sich dynamische Verläufe des gefundenen Potenzials darstellen. Es wird ersichtlich, dass Kälteanlagen durch den Einsatz von Vorkühl- oder Nachkühlstrategien eine größere Flexibilität zum Leistungsausgleich in positive und negative Richtung bieten. Diese ist in der Höhe allerdings erheblich von den Temperaturschwankungen des Wetters abhängig. Das DSI-Potenzial der Lüftungsanlagen unterliegt diesen Schwankungen nicht, verteilt sich (theoretisch) gleichmäßig über das Jahr und hat einen stärker unidirektionalen Charakter (Lastreduktion durch Abschaltung, Zuschaltung nur sehr eingeschränkt möglich).

Das wesentliche Ergebnis der Voranalyse, basierend auf den Daten der Hamburger ALKIS, ist jedoch die validierte Möglichkeit der individuellen Zuordnung ermittelter Leistungen zu einzelnen Gebäuden. Dadurch sind sowohl Aussagen darüber möglich, wo konkret sich die wenigen Gebäude mit hohem DSI-Potenzial befinden, als auch Aussagen über die Lage von interessanten Gebäudeclustern mit einem dann in Summe hohen DSI-Potenzial. Daraus lassen sich Aussagen über DSI-Potenziale zur Erbringung evtl. lokal im Verteilnetz notwendiger Netzdienstleistungen ableiten. Ebenfalls wird die Verwendung des Potenzials zum lokalen Energieausgleich im Rahmen von EE-Autarkie oder Microgrid-Ansätzen möglich.

6.6 Methodenkritik und Fazit

6.6.1 Fehlereinflüsse aus ALKIS

Die Daten im ALKIS werden von Mitarbeitern des Landesamtes für Geoinformation und Vermessungswesen (LGV) teils maschinell, teils manuell eingegeben (z. B. Gebäudenutzungen). Dabei entstehen Fehler und logische Brüche. Zudem ergeben sich bei der Datenerhebung im Feld offensichtlich unklare Situationen, die sich dann in den Daten des ALKIS wiederfinden. Diese Faktoren beeinträchtigen die Datenqualität und in der Folge die Qualität der gewonnenen Ergebnisse für die betroffenen Gebäude. So wurde z. B. in einem Fall eine relativ komplizierte Gebäudegeometrie im ALKIS so eingestellt, dass die Verrechnung der Geometrie der Bauteile in AX 31002 mit der Geometrie des Gebäudes in der AX 31001 zu einer negativen BGF führt.

Ein weiteres qualitatives Problem stellt die relativ hohe Anzahl (3.769) der Gebäude mit der GFK 9998 („nach Quellenlage nicht zu identifizierende Gebäudefunktion“) dar. Die Vergabe dieser GFK führt dazu, dass diese Gebäude nicht betrachtet werden können. In einem Fall der Validierungsgruppe traf dies ein Gebäude eines Hochschulcampus, das sehr prominent direkt neben einem weiteren großen Hochschulgebäude liegt. Die GFK ergibt sich sehr offensichtlich aus der Lage und vor Ort ohne Probleme aus der Beschilderung des Gebäudes. Die Eingruppierung in GFK 9998 ist an dieser Stelle nicht nachzuvollziehen.

Qualitativ problematisch ist zudem die Tatsache, dass „Gebäude“ in der AX 31001 auch sehr kleine Flächen haben können. In zwei Fällen sind Gebäude vermerkt, deren Grundflächen genauso groß sind wie die Abzugsflächen, die sich aus der Berücksichtigung der Bauteile ergeben. In der Folge resultiert für diese Gebäude eine BGF von 0 m²: Dabei handelt es sich um freistehende Arkaden, deren Funktion in einem Fall nachvollziehbar mit der GFK 2010 „Handel und Gewerbe“ bezeichnet wird. Im zweiten Fall wird die GFK aber mit 2020 (Bürogebäude) angegeben.

Insgesamt kommen in der Gruppe der selektierten Gebäude 425 Gebäude vor, deren BGF kleiner als 50 m² ist. Das entspricht immerhin 5,75 % der Gesamtanzahl. In 78 Fällen ist die BGF kleiner als 20 m², in 16 Fällen kleiner als 10 m². Das kleinste Gebäude, für das die Nutzung „Bürogebäude“ angegeben ist, hat eine Fläche von 5 m². Die Aussage zur Nutzung ist in diesen Fällen doch sehr zweifelhaft.

Das folgende Bild zeigt dieses kleinste Hamburger Bürogebäude: ein Pförtnerhäuschen. Zum Vergleich sofort im folgenden Bild: das größte Hamburger Bürogebäude, der Bürogebäudekomplex des Verlages Gruhner & Jahr. Beide Gebäude haben die GFK 2020.



Bild 6-19: Hamburgs kleinstes Bürogebäude



Bild 6-20: Hamburgs größtes Bürogebäude

Ebenfalls problematisch ist die Festlegung auf eine einzige (vorherrschende) Gebäudenutzung mit der GFK. Zwar sieht ALKIS die Möglichkeit vor, über das Attribut „Weitere Gebäudefunktion (WGF)“ nebenläufige Gebäudefunktionen zu definieren, jedoch ist wegen der begrenzten Auswahl (25 Attribute) der Nutzen eingeschränkt. In Hamburg wird dieses Attribut im Übrigen gar nicht geführt (LGV 2011, S. 5) (s. Abschnitt 3.2.1).

Aus den oben angeführten Aspekten ergibt sich, dass die Datenlage im ALKIS mit einer gewissen Vorsicht betrachtet werden muss und sich im Einzelfall durch fehlerhafte Datengrundlagen falsche Berechnungsergebnisse ergeben. Es bleiben dies aber Einzelfälle. Im Regelfall erweist sich das ALKIS als zuverlässige und umfassende Datengrundlage, wie die Validierung belegt.

6.6.2 Methodenimmanente Fehlereinflüsse

Die hier dargestellte Methode der Voranalyse ist auf eine Reihe von Annahmen, Abschätzungen und Kennwerte angewiesen, aus denen sich zahlreiche Fehlereinflüsse ergeben, deren Höhe für den Einzelfall als beliebig groß bezeichnet werden muss. Sie werden im Folgenden diskutiert.

- **ABC-Analyse:**

Ein erheblicher, sich vor allem auf den Einzelfall auswirkender Fehler ergibt sich aus der Annahme, dass jedes Gebäude der selektierten GFK mit LuK ausgestattet ist, sodass seine Anschlussleistung über 100 kW liegt. Gebäuden, die im Rahmen der ABC-Analyse eine Anschlussleistung von 100 kW (sehr) sicher erreichen (Kategorien A und B1), wird unterstellt, auch sicher über LuK zu verfügen. Dies ist als grundlegende Arbeitshypothese der Methode sicher für den Regelfall richtig, kann sich im Einzelfall jedoch völlig anders darstellen. Denkbar sind dabei insbesondere Varianten, in denen Lüftungsanlagen, aber keine Kälteanlagen eingesetzt werden und umgekehrt. Im letzten Fall kann die Übertragung der Kälte z. B. über thermisch aktivierte Bauteile erfolgen. Hinzu kommt, dass der Grenzwert von 100 kW zwar plausibel, aber weder zwingend bedingend noch bei Unterschreitung zwingend ausschließend ist. Das führt dazu, dass insbesondere das für die Kategorie B2 ermittelte Potenzial als schon relativ unsicher einzustufen ist. Die Algorithmik des Python-Programms erlaubt daher jedem Nutzer, diesen Grenzwert selbst anzupassen. Ein weiterer Fehlereinfluss bei der ABC-Analyse ist die angenommene Spreizung der Vollnutzungsstunden, die sich aus den relativ wenigen Gebäuden des FP „Insel“ ergibt. Zudem wird nur ein einziger Energieverbrauchskennwert verwendet und keine Streuung über Bedarfsklassen angenommen wie im weiteren Verlauf der Potenzialbestimmung.
- **Zonierung:**

Ein unverzichtbarer Bestandteil der Methodik ist die Aufteilung der Gebäude in Nutzungszonen, da die Leistungskennwerte der VDI 3807: 4 spezifisch für Nutzungszonen angenommen werden. Die vorgenommene Flächenzerlegung ist aber in der beschriebenen Methode für alle Gebäude büroähnlicher Nutzung bzw. für alle Hochschulgebäude gleich. In der Realität werden die jeweiligen Flächenanteile für jedes Gebäude relativ individuell von dieser pauschalen Annahme abweichen. Das geht so weit, dass als sicher anzunehmen ist, dass nicht immer alle Flächennutzungen, die im Rahmen der Zonenbildung unterstellt werden, überhaupt in den Gebäuden vorhanden sind. Dies betrifft vor allem die Zonen „Garagenstellplatz“, „Kantine“ und „Rechenzentrum“. Diese Zonen dürften realistisch erst ab einer gewissen Größe des betrachteten Gebäudes vorhanden sein und sicher nicht in einem Bürogebäude mit weniger als 50 m². Die Methode macht in ihrem pauschalen Ansatz an dieser Stelle aber keinen Unterschied. Für Hochschulgebäude kommt erschwerend hinzu, dass durch die pauschalierte Zonenbildung nur mit sehr wenigen Funktionsvariationen gerechnet wird. Gerade die sehr unterschiedliche Ausstattung und Nutzung von Hochschulgebäuden wird dadurch allenfalls im Mittel richtig getroffen. Im Einzelfall ist mit großen Abweichungen zu rechnen. Hier sei rückverwiesen auf die Schwierigkeit der Zonierung von Hochschulgebäuden (Abschnitt 4.4.1.3).
- **Abschätzung der konditionierten Gebäudefläche:**

Die Abschätzung des konditionierten Anteils an der gesamten NGF der Gebäude ist ein unverzichtbarer, aber qualitativ nur unzureichend gelöster Schritt in der dargestellten

Methode. Die verwendeten Daten stammen aus Neubauprojekten, die zur Kostenschätzung im BKI-Kennwertekatalog gelistet sind. Angewendet werden sie auf den Gebäudebestand. Die Gegebenheiten im Bestand können aber, insbesondere je nach Bauperiode, stark von diesen Werten abweichen (vgl. Beispiel der Validierungsgruppe Gebäude ID 43). Hinzu kommt für Hochschulgebäude, dass die Datengrundlage im BKI-Katalog, insbesondere für Kälte, auf einer sehr niedrigen Grundgesamtheit beruht, die zu Verallgemeinerung eigentlich nicht groß genug ist. In der Folge ergeben sich mittlere Fehler von 40 % bis 50 % für die für die Bedarfsklasse „Mittel“ ermittelten Anschlusswerte für Kälteanlagen in Hochschulgebäuden (vgl. Abschnitt 4.1.1.9).

- Kennwerte für die installierte Leistung nach VDI:
Die in der VDI 3807: 4 angegebenen Kennwerte für die installierten Leistungen für Lüftung und Kälte in den Nutzungszonen und Bedarfsklassen stellen die zentrale Datengrundlage für den finalen Rechenschritt in der hier vorgestellten Methode dar. Aber auch die Daten dieser Quelle resultierten letztlich aus einer sehr reduzierten Anzahl untersuchter Beispielgebäude. Die angegebenen Werte sind das Resultat der Studie „Methodik zur Erfassung, Beurteilung und Optimierung des Elektrizitätsbedarfs von Gebäuden“, die das IWU und das Büro DS Plan 2007 durchführten. Die Validierungsgruppe dieser Studie umfasste aber lediglich drei Gebäude [Knissel & Hörner 2007, S. 20].
Im Rahmen dieser Arbeit wird dabei der in der VDI für die Bedarfsklasse „Hoch“ angegebene Leistungswert mit einem hohen konditionierten Flächenanteil aus dem BKI-Kennwertekatalog verrechnet, um zu einem oberen denkbaren Grenzwert der installierten Leistung zu kommen. Diese Kombination führt zu Werten, die um den Faktor 2 bis 2,5 (Kälte) über den für die Bedarfsklasse „Mittel“ angenommenen Werten liegen. Die Validierung zeigt, dass diese Werte wohl zu hoch sind. Sie werden nur in einem Fall erreicht: bei einem Mensagebäude, dessen Gebäudefunktion mit Hochschulgebäude schlicht falsch beschrieben ist und dessen Flächen zu einem Großteil in die Nutzungszone „Kantine“ nach VDI gehören. Für die reale Situation ist daher zu erwarten, dass dieser obere Grenzwert nur in Ausnahmefällen erreicht werden wird. Auch der untere Grenzwert, der sich in der Methode aus geringer konditionierter Fläche und dem Leistungskennwert der Bedarfsklasse „Niedrig“ ergibt und bei etwa 50 % des Wertes für die Bedarfsklasse „Mittel“ liegt, wird insgesamt selten erreicht.
- Keine GFK-spezifischen Unterscheidungen bei der Höhe der vermuteten Anschlussleistung:
Die technische Ausstattung der Gebäude ist für einige GFK als deutlich abweichend vom Durchschnitt anzusehen. Dabei gibt es Abweichungen nach unten (Zollämter) und oben (Versicherungen). Bei der Annahme der Kennzahlen für die installierte Leistung wird dem aber nicht Rechnung getragen: Es werden die gleichen Kennzahlen angewandt. Die Bedarfsklasse „Mittel“ dürfte bei Versicherungsgebäuden eher unter dem tatsächlichen Bedarf liegen, während sie für Zollämter eher einem sehr hohen Bedarf entspricht. Entsprechend wäre eine Differenzierung bei der Anwendung der Kennwerte nach Gebäudekategorie wünschenswert.
- Dynamik:
Die dynamische Berechnung der DSI-Potenziale für Lüftung und Kälte erfolgte rein theoretisch und wurde nicht validiert. Dazu fehlte die notwendige Datengrundlage mit Aufzeichnungsdaten über die tatsächlichen Laufzeiten und Energieverbräuche der Anlagen. In

der Folge ergibt sich eine Darstellung, die auf plausiblen Vermutungen beruht, aber nicht überprüft wurde. Das wird auffällig in der Darstellung der Dynamik der zeitlichen Inanspruchnahme der installierten Leistung, denn diese leidet augenfällig unter der sehr pauschalen Annahme der Betriebszeiten aus der DIN 18599 Teil 10. In der Realität ist eine größere Streuung der Anlagenlaufzeiten, insbesondere bei den Lüftungsanlagen, zu erwarten. Diese Annahmen sind mit besseren individuellen gebäudespezifischen Daten aus Erhebungen im Rahmen von Grobanalysen aber leicht zu korrigieren. Allerdings hat sich z. B. das 5:00-Uhr- bis 18:00-Uhr-Betriebsprofil für Lüftungsanlagen in vielen Fällen der Validierungsgruppe als annähernd tatsächlich vorhanden herausgestellt. Dies trifft dennoch nicht für alle Gebäude zu. Für die Summendarstellung ist es daher u. U. sinnvoll, die Start- und Endzeiten etwas stärker zu individualisieren. Jedoch fehlt dafür die notwendige Datengrundlage. Weitere Untersuchungen wären notwendig.

- **Kartografische Darstellung:**
Die kartografische Darstellung schafft einen Überblick über die Dispersion der installierten Leistung über das Stadtgebiet und ihre Agglomeration in Gebieten, in denen entsprechend den Flächennutzungsplänen mehr Bürogebäude vorhanden sind. Die Übersicht stößt aber bei der individuellen Betrachtung von Gebäuden an Grenzen. So schaffen die Kategorien nur ein recht grobes Raster zur Darstellung der Leistungskategorie eines Gebäudes. Eine Angabe der individuellen Leistungswerte ist aus Platzgründen nicht möglich. Zudem kann farblich nur eine Leistung (Lüftung oder Kühlung) dargestellt werden, sodass zwei Karten notwendig werden. An dieser Stelle würde eine digitalisierte, webbasierte Darstellung mit Zoom- Möglichkeit, animierten Elementen (z. B. Einblenden von Werten bei Anwahl mit Maus) und der Möglichkeit, gemessene Werte einzupflegen, die Situation deutlich verbessern. Im Moment ist dies lizenzrechtlich aber nicht möglich.

Weitere Fehlerfaktoren

- **Leerstand:**
Leerstehende Gebäude werden im ALKIS für Hamburg nicht gesondert erfasst. Theoretisch sieht ALKIS die Möglichkeit vor, Angaben zum Zustand des Gebäudes zu machen (Attribut „Zustand“ in AX 31001). In Hamburg wird dieses Attribut allerdings nicht geführt. Werte, die derzeit noch aus der Migration der Daten eingetragen sind, werden sukzessive gelöscht. Insofern ist davon auszugehen, dass in einigen Fällen in Bürogebäuden zwar eine installierte Leistung aus LuK vorhanden ist, diese aber nicht oder nur teilweise (nur im vermieteten Flächenanteil) in Betrieb ist. Eine Möglichkeit der individuellen Prüfung ist die Recherche von Verzeichnissen mit als leerstehend gemeldeten Gebäuden. Ein solches steht für Hamburg z. B. im Internet unter <http://www.leerstandsmelder.de/hamburg> zur Verfügung. Diese Internetseite verzeichnet derzeit 754 Leerstände für Hamburg. Allerdings bezieht sich diese Zahl auf alle möglichen Gebäudenutzungen. Zudem sind die Einträge teilweise sehr alt und fehlerhaft.
- **Theoretisches Potenzial ist nicht das realisierbare Potenzial:**
Das im Rahmen der in dieser Arbeit vorgestellten Methode zur Voranalyse ermittelte Potenzial stellt das theoretisch zur Verfügung stehende DSI-Potenzial dar und vermittelt so einen falschen Eindruck. Das realisierbare Potenzial ist deutlich geringer: Es ist das wirtschaftlich zu erschließende Potenzial, das durch die Betreiber der Gebäude nach Überwindung auch der

nicht-technischen Hemmnisse den DSI-Potenzial-Aggregatoren bzw. Markt-Integratoren zur Verfügung stehen könnte. [Grein et al. 2009, S. 89] schätzen dieses realisierbare Potenzial für Gebäudekälteanlagen auf 10 % des theoretischen Potenzials. Die hier vorgestellte Methodik dürfte helfen, diesen Anteil deutlich zu verbessern, da das nicht-technische Hemmnis der Unklarheit um den Ort/die Adresse des Potenzials mit dieser Methode beseitigt werden kann. Damit ist die grundsätzlich zu erwartende hohe Diskrepanz zwischen theoretischem und realisierbarem Potenzial aber nur relativiert. Sie bleibt prinzipiell bestehen.

- Zu kleine Stichprobe zur Validierung: Die Validierungsstichprobe für Bürogebäude ist viel zu klein. Zudem sind in ihr nur Verwaltungsgebäude enthalten. Private Bürogebäude kommen nicht vor. Für eine bessere Validierung wäre ein deutlich größerer Stichprobenumfang notwendig. Sie müsste zudem für jede GFK repräsentativ sein, also neben der entsprechenden Anzahl auch die Größenverteilung der Gebäude in jeder GFK berücksichtigen.

6.6.3 Fazit

Wie oben gezeigt, gibt es bei der in dieser Arbeit dargestellten Methode zur Voranalyse des DSI-Potenzials einige Verbesserungsmöglichkeiten. Es sind mehrere Fehlereinflüsse identifiziert worden, deren Behebung bzw. Einflussreduzierung einen z. T. deutlichen zusätzlichen Forschungsbedarf mit sich bringen.

Bei Betrachtung der für die Gebäude der Validierungsgruppe gewonnenen Ergebnisse kann festgestellt werden, dass trotz der oben diskutierten Einschränkungen die Aussagen der Voranalyse recht robust sind. Die tatsächlich vor Ort installierten Leistungen werden in den meisten Fällen zwar mit einer z. T. erheblichen Abweichung vom Wert für die Bedarfsklasse „Mittel“ wiedergefunden. Jedoch ist diese Abweichung i. d. R. deutlich kleiner als die im Rahmen der Methode erlaubte Schwankungsbreite, die sich aus den Verhältnissen der Bedarfsklassen „Niedrig“ und „Hoch“ zur Bedarfsklasse „Mittel“ ergibt. Insbesondere konnte gezeigt werden, dass die Bedarfsklasse „Hoch“ in der Realität vermutlich nur in wenigen Ausnahmefällen eine Rolle spielt. Ein möglicher Verdachtsfall dafür wären große unsanierte Versicherungs- oder Bürogebäude mit hohem Glasflächenanteil und einem Baualter von mindestens 20 Jahren. Die gewonnenen Ergebnisse können trotz der kleinen Validierungsgrundgesamtheit als relativ verlässlich eingeschätzt werden. Im Einzelfall mag der sich einstellende Fehler hoch sein. Im Mittel der Einzelfälle ist dies nicht zu erwarten. Die Methode ist belastbar.

Noch sicherer sind die in dieser Vorstudie für die Gesamtheit aller Gebäude getroffenen Aussagen. Da es aus den Validierungsergebnissen keine Hinweise für systematische Fehler gibt, ist davon auszugehen, dass sich – wie schon in der Validierung gezeigt – die Abweichungen vom Mittelwert relativ gut ausgleichen. Diese Aussage gilt jedoch nur mit Bezug auf eine Grundgesamtheit, in der relativ sicher vom prinzipiellen Vorhandensein von LuK ausgegangen werden kann. Das bedeutet auch, dass die Aussagen nur für Gebäude einer gewissen Größe, Ausstattung und eines gewissen Mindestbedarfs an Konditionierung gelten. Ob die ABC-Analyse diese Trennung auch in den unteren Leistungskategorien richtig abbildet, konnte allerdings im Rahmen dieser Arbeit nicht hinreichend validiert werden. Jedoch gibt es aus der Verteilung der gefundenen Leistung über die Kategorien A bis C indirekte Hinweise, dass dies gelungen ist.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund des beständig wachsenden Anteils der Stromerzeugung aus Windkraft- und PV-Anlagen wird die Nutzung von Lastverlagerungsoptionen auf der Verbraucherseite, dem Demand Side Integration, immer bedeutender. DSI vermag u. a., einen wichtigen Beitrag zur Glättung der aus der schwankenden Einspeisung erwachsenden Fluktuation der Residuallast (= Stromverbrauch minus Einspeisung aus erneuerbarer Erzeugung) zu leisten. DSI hat darüber hinaus einen kostenreduzierenden Effekt bei Ausbau und Anpassung der Übertragungs- und Verteilnetze im Rahmen der Energiewende.

Zur Nutzbarmachung der DSI-Potenziale des tertiären Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen stellt sich die grundsätzliche Aufgabe, das Vorkommen des DSI-Potenzials nach Umfang, aber auch Ort des Vorkommens genauer zu bestimmen, will man nicht erratisch, sondern strategisch planvoll bei der Erschließung vorgehen. Im Gegensatz zum DSI-Potenzial in Industrieliegenschaften, das auf Basis der bekannten Standorte und der ebenfalls weitgehend bekannten Produktionszahlen relativ gut individuell abgeschätzt werden kann, ist eine Potenzialabschätzung für GHD-Standorte aufgrund ihrer hohen Anzahl nicht mehr individuell zu treffen. Da das DSI-Potenzial aber aufgrund der individuell unterschiedlichen Nutzung von Gebäuden dieses Sektors auch nicht pauschal angenommen werden kann, wie dies für Haushalte i. d. R. getan wird (relativ homogene Technisierung), muss ein alternativer Ansatz zur Bestimmung und Verortung des DSI-Potenzials im Sektor GHD besprochen werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird daher eine Methode entwickelt, um das theoretische DSI-Potenzial aus Lüftungs- und Kälteanlagen (LuK) in Nichtwohngebäuden des tertiären Sektors mithilfe amtlicher Liegenschaftskatasterinformationssysteme (ALKIS) zu bestimmen und im selben Zug zu verorten. Für eine Unterscheidung zwischen theoretischem, technischem, wirtschaftlichem und praktischem bzw. realisierbarem Potenzial sei auf Abschnitt 2.5 verwiesen.

Aus der Erkenntnis aus dem vom Autor geleiteten Forschungsprojekt „Insel“ („Internetbasiertes System eines erweiterbaren Lastmanagements zur Integration in virtuelle Kraftwerke“), dass das DSI-Potenzial nicht normalverteilt über die Gebäude des tertiären Sektors vorliegt, sondern in wenigen (großen) Gebäuden kumuliert auftritt, ergibt sich die Frage nach der Verortung: Es gilt, die für die Nutzbarmachung des DSI-Potenzials besonders wichtigen Gebäude zu identifizieren und ihre Standorte zu bestimmen. Neben der grundlegenden Erkenntnis der verschobenen Verteilung des DSI-Potenzials dienen die Daten der im Forschungsprojekt „Insel“ untersuchten Gebäude zur Validierung der hier entwickelten Methode. Das Vorgehen im Projekt sowie die wesentlichen Ergebnisse werden daher in einem eigenen Kapitel referiert.

Basis der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methode ist das amtliche Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS), in dem in einem bundeseinheitlich verwendeten Datenmodell die topografisch-kartografischen Daten mit den digitalisierten Liegenschaftsverzeichnissen der Städte zusammengeführt sind. So enthält das ALKIS für Hamburg Informationen über Lage, Größe (Grundfläche und Anzahl Geschosse) sowie Nutzung aller ca. 370.000 Gebäude Hamburgs.

Aus dieser Grundgesamtheit wurden 7.389 Gebäude aus 17 Nutzungsgruppen bestimmt, deren Nutzung büroähnlichen Charakter hat. Dazu gehören auch 157 Gebäude aus vier Nutzungsgruppen, die Hochschul- bzw. Forschungsgebäuden zugeordnet sind. Insgesamt entspricht die selektierte Gebäudegruppe damit etwa 27 % aller beheizten Nichtwohngebäude der Stadt Hamburg (und etwa 0,5 % der Nichtwohngebäude Deutschlands). Die Nutzung und Verarbeitung der Informationen des ALKIS zur DSI-Potenzialanalyse erfolgt im Rahmen einer Voranalyse (i. S. d. Terminologie der VDI-Richtlinie 3807), d. h. ohne Begehung der Gebäude und ohne ihre Energieverbrauchsdaten zu kennen. Das bedeutet, dass die zu den Einzelgebäuden getroffenen Aussagen zum DSI-Potenzial unscharf sind

und bei Bedarf durch Begehungen im Rahmen von Grobanalysen überprüft und ggf. korrigiert werden müssen.

Nach der Selektion der Gebäude erfolgt zunächst eine ABC-Analyse zur qualitativen Bestimmung des DSI-Potenzials aus LuK der Gebäude. Damit werden die Gebäude bestimmt, in denen sehr sicher (Kategorie A), relativ sicher (Kategorie B) und eher nicht (Kategorie C) ein DSI-Potenzial aus Lüftungs- und Kälteanlagen (LuK) vermutet werden darf. Zur Unterscheidung dient dabei eine kennwertgestützte Abschätzung des Leistungsbedarfs der Gebäude. Dabei wird untersucht, mit welcher Sicherheit ein Gebäude auch bei Annahme günstiger Kennwerte einen so hohen Leistungsbedarf hat, dass es auf Mittelspannungsebene an das Stromnetz angeschlossen ist. Solchen Gebäuden kann dann ein Technisierungsgrad unterstellt werden, der das Vorhandensein von LuK einschließt. Anhand von Beispieluntersuchungen zur technischen Ausstattung und zum Energieverbrauch von Bürogebäuden wird die Plausibilität dieses Vorgehens belegt. Die Ergebnisse der Gebäudeuntersuchungen aus dem FP „Insel“ dienen in diesem Schritt zur Plausibilisierung der zur ABC-Analyse angenommenen Kennwertbereiche.

Die ABC-Einteilung der Gruppe der selektierten Gebäude resultiert in einer starken Reduzierung der Grundgesamtheit: Rund 4.600 Gebäude fallen in die Kategorie C. Sie sind also (vermutlich) nicht oder in nur sehr geringem Umfang mit LuK ausgestattet und verfügen über kein oder nur ein sehr geringes DSI-Potenzial. Die verbleibenden rund 2.790 Gebäude fallen zu ca. einem Drittel in die Kategorie A und zu zwei Dritteln in die Kategorie B. Dabei lässt sich die Kategorie B noch einmal unterteilen in einen Bereich B1, für den das Vorhandensein von LuK noch recht sicher und einen Bereich B2, für den dies schon eher unsicher ist. Die Anzahl der Gebäude in diesen Kategorien ist interessanterweise etwa gleich groß. Es verbleiben also etwa 1.860 Gebäude in den Kategorien A und B1, für die ein DSI-Potenzial aus LuK (sehr) sicher angenommen werden kann.

Da die pro Flächeneinheit benötigte installierte Leistung von Lüftungs- und Kälteanlagen abhängig ist von der Art der Nutzung einer Gebäudezone, muss zur quantitativen Abschätzung des theoretischen DSI-Potenzials aus LuK zunächst die NGF der Gebäude in Zonen funktional gleicher Nutzung unterteilt werden. Dies geschieht mithilfe einer pauschalierten Zonierung auf Basis von Planwerten für den Bürogebäudebau aus [Neufert & Kister 2012]. Damit werden einem Bürogebäude oder Verwaltungsgebäude büroähnlicher Nutzung pauschale Flächenanteile bestimmter Nutzungszonen zugewiesen. Da diese pauschalierte Zuweisung nicht direkt auf Hochschulgebäude übertragen werden kann, wird sie zunächst abstrahiert und die abstrahierte Flächenzerlegung dann auf eine Erhebung der Hochschulinformationsservice GmbH (HIS) übertragen. Im Ergebnis liegt dann ein abstrahiertes Mehrzonenmodell auch für die Hochschulgebäude vor.

Nicht 100 % einer Gebäudenutzungszone sind konditioniert. Annahmen über den konditionierten Gebäudeanteil können aber auf Basis von Daten des Baukosteninformationszentrums der Deutschen Architektenkammern (BKI) getroffen werden. Dort werden detaillierte Daten zu Bauprojekten gesammelt und in regelmäßig aktualisierten Katalogen veröffentlicht. Eine Recherche der Ausgaben seit 2002 ermöglichte die Festlegung von drei Bedarfskategorien (BK) „Niedrig“, „Mittel“ und „Hoch“ mit entsprechenden prozentualen Anteilen der konditionierten Flächen für Lüftung und Klimatisierung.

Ebenso kann natürlich nicht pauschal von einem einzigen Wert für die zur Lüftung und Kältebereitstellung in den Gebäuden installierten elektrischen Leistungen ausgegangen werden. Daher wird auch hier eine Streuung für die drei Bedarfsklassen angenommen. Dazu werden die in der [VDI 3807-4: 2008] in den Tabellen 5 und 7 referenzierten Werte für die jeweiligen Nutzungszonen und die Bedarfsklassen „Niedrig“ (im Original dort „gering“), „Mittel“ und „Hoch“ verwendet. Die Werte für die Bedarfsklasse „Niedrig“ ergeben sich dann aus einer Kombination von niedrigem konditioniertem Flächenanteil und niedriger dazu installierter Leistung. Für die anderen Bedarfsklassen ergeben sich die Werte entsprechend.

Die Berechnung der installierten Leistung erfolgt für jede Nutzungszone jedes einzelnen der selektierten 7.389 Gebäude. Da dies nicht mehr sinnvoll manuell zu bewerkstelligen ist, wurden die

notwendigen Algorithmen (auch die zur Berechnung der NGF notwendigen Rechenschritte) in Python umgesetzt. Das entstandene Script kann separat oder auch direkt aus dem Programm Arc Map heraus gestartet werden, in dem auch der ALKIS-Datensatz angezeigt wird. Als Berechnungsergebnis werden zwei Shape Files erstellt. Das erste enthält das theoretische DSI-Potenzial für alle drei Bedarfsklassen getrennt nach Lüftung und Kälte für jedes der betrachteten Gebäude. Das zweite enthält die DSI-Potenziale aufsummiert für jedes Flurstück. Damit wird dem Aspekt Rechnung getragen, dass sich auf einem Flurstück mehrere zu einer Liegenschaft gehörende (und damit organisatorisch zusammenhängende) Gebäude befinden, die für Potenzialerschließungen sinnvollerweise zusammen betrachtet werden.

Die Ergebnisse werden zunächst validiert, indem die theoretischen Werte der Voranalyse verglichen werden mit den theoretischen Werten der Grobanalysen, die aus Gebäudebegehungen des FP „Insel“ vorliegen. Auf diese Weise konnten die Ergebnisse der Voranalyse für acht Hochschulliegenschaften und vier Verwaltungsliegenschaften büroähnlicher Nutzung konkret überprüft werden. Die Ergebnisse dieser Validierung zeigen, dass der gewählte methodische Ansatz belastbar ist. Die Resultate lassen sich wie folgt zusammenfassen: Die für die Bedarfsklasse „Mittel“ errechneten Werte passen für die Gebäude der Validierungsgruppe gut. Abweichungen von den für diese Bedarfsklasse errechneten Werten liegen i. d. R. erheblich unter den als Grenzen der Streuung angenommenen Werten für die Bedarfsklassen „Niedrig“ und „Hoch“. Für Hochschulgebäude ist für Lüftung mit Abweichungen von +/- 20 % von der Bedarfsklasse „Mittel“ zu rechnen. Für Bürogebäude ist für Lüftung mit einer mittleren Abweichung von der Bedarfsklasse „Mittel“ von etwa 30 % zu rechnen. Aufgrund der geringen Anzahl der Gebäude in der Validierungsgruppe „Bürogebäude“ ist diese Aussage aber eingeschränkt. So ist zu vermuten, dass für technisch höher ausgestattete Gebäude (Banken, Versicherungen etc.) Abweichungen nach oben auftreten, die auch darüber hinausgehen können. Verwaltungsgebäude mit geringerer technischer Ausstattung lassen grundsätzlich eher Abweichungen nach unten erwarten. Für diese Gebäude könnte die Bedarfsklasse „Niedrig“ zutreffen. Die Bedarfsklasse „Hoch“ spielt auf Basis der Validierungsergebnisse in der Realität vermutlich keine Rolle.

Im Rahmen der hier durchgeführten Voranalyse wurde für die Stadt Hamburg ein als relativ sicher anzusehendes DSI-Gesamtpotenzial von 56 MW aus installierten Lüftungsanlagen und 126 MW aus Kälteanlagen in Bürogebäuden, Verwaltungsgebäuden (büroähnlicher Nutzung) und Hochschulgebäuden identifiziert. Vergleicht man dies mit der in Hamburg installierten Leistung aus PV- und Windkraftanlagen, die vom Netzbetreiber, der „Stromnetz Hamburg GmbH“, derzeit mit rund 82 MW angegeben wird (rund 53 MW aus Wind und rund 29 MW aus PV), so ist zu konstatieren, dass auch das reduzierte realisierbare DSI-Potenzial aus LuK in Büro- und Hochschulgebäuden wohl in der Lage sein dürfte, die resultierenden Fluktuationen der Residuallast auszugleichen.

Dazu ist aber eine dynamische Betrachtung des DSI-Potenzials notwendig. Diese erfolgte im Rahmen der Arbeit ebenfalls unter Verwendung der in der DIN V18599: 10 angegebenen standardisierten Nutzungsrandbedingungen der Gebäudenutzungszonen sowie einem Außentemperaturverlauf eines Beispielwetterjahres (2012). So lassen sich dynamische Verläufe des gefundenen Potenzials darstellen. Dabei wird deutlich, dass das DSI-Potenzial aus Kälteanlagen durch den Einsatz von Vorkühl- oder Nachkühlstrategien eine größere Flexibilität zum Leistungsausgleich in positive und negative Richtung bietet als das der Lüftungsanlagen. Allerdings ist das Potenzial der Kälteanlagen auch erheblich von äußeren Temperaturschwankungen abhängig. Das DSI-Potenzial der Lüftungsanlagen unterliegt diesen Schwankungen nicht, verteilt sich (theoretisch) gleichmäßig über das Jahr und hat einen stärker unidirektionalen Charakter (Lastreduktion durch Abschaltung, Zuschaltung nur sehr eingeschränkt möglich).

Ein weiteres wichtiges Ergebnis ist, dass die Höhe des für die individuellen Gebäude gefundenen DSI-Potenzials direkt abhängig ist von der Gebäudegröße. Da diese sich Pareto-verteilt, bildet sich auch das DSI-Potenzial in einer Exponentialverteilung ab. Das heißt, es gibt wenige (große) Gebäude, in denen ein Großteil der installierten Leistung zu finden ist. Dem steht eine Vielzahl kleinerer Gebäude gegenüber, auf die sich der verbleibende kleinere Anteil des DSI-Potenzials verteilt. Vor diesem

Hintergrund lässt sich in etwa 6 % der Gebäude 50 % des ermittelten theoretischen DSI-Potenzials finden. Die 25 % aller Gebäude, die sich den Kategorien A und B1 zuordnen lassen, stehen für sogar 83 % der Leistung.

Die Ergebnisse der DSI-Potenzialanalyse für die einzelnen Gebäudedefunktionsgruppen zeigen, dass aufgrund der Dominanz der Gebäudegruppe „Bürogebäude“, in der sich 82 % der selektierten Gebäude befinden, diese Gebäudegruppe auch das mit Abstand höchste DSI-Potenzial aufweist. Darüber hinaus gibt es Gebäudegruppen, die aufgrund ihrer Funktion entweder ein eher großes DSI-Potenzial (Versicherungs- und Hochschulgebäude) oder ein eher geringes Potenzial vermuten lassen (Zollämter und Gebäude für Bildung und Forschung).

Das wesentliche Ergebnis der Voranalyse basierend auf den Daten der Hamburger ALKIS ist jedoch die validierte Möglichkeit der individuellen Zuordnung der ermittelten Leistungen zu einzelnen Gebäuden. Dadurch sind sowohl Aussagen darüber möglich, wo konkret sich die wenigen Gebäude mit hohem DSI-Potenzial befinden, als auch Aussagen über die Lage von interessanten Gebäudeclustern mit einem dann in Summe hohen DSI-Potenzial. Diese Informationen lassen sich kartografisch darstellen, was die Wahrnehmbarkeit und Auseinandersetzung mit den Ergebnissen fördert. Zur kartografischen Darstellung wurden daher im Rahmen dieser Arbeit zwei Stadtpläne im Format 1:30.000 angefertigt, die die Flurstücke der Stadt Hamburg eingefärbt nach der Höhe des für sie errechneten theoretischen DSI-Potenzials darstellen. Eine Karte enthält die DSI-Potenziale aus Lüftungsanlagen, die zweite die aus Kälteanlagen. Die Bildung der Cluster aus Bürogebäuden ist darauf in einigen Bereichen, insbesondere in den eher randständigen Lagen der Stadt und (natürlich) in den Bürovierteln („City Nord“, „City Süd“) sowie den Geschäftszentren der Innenstadt, gut zu erkennen. Die wenigen Flurstücke, für die ein wirklich hohes DSI-Potenzial von > 400 kW erwartet werden darf, sind leicht identifizierbar.

Grundsätzlich gibt es aber einige Kritikpunkte an der hier entwickelten Methodik, die im Abschnitt „Methodenkritik“ detailliert besprochen werden und Ansatzpunkte für Verbesserungen und weitere Forschungsarbeit geben. Dies wird im folgenden Abschnitt aufgegriffen.

7.2 Ausblick

Für die in dieser Arbeit dargestellte Methode zur Voranalyse des DSI-Potenzials gibt es eine Reihe von Ansatzpunkten, die weiteren Forschungsbedarf aufwerfen.

7.2.1 Erweiterung und Übertragung der Methode

Die Methode berücksichtigt bisher nur Gebäude im ALKIS, die ein büroähnliches Nutzungsprofil aufweisen (sowie auch Hochschulgebäude) und einer entsprechenden Gebäudedefunktion (GFK) zugeordnet sind (vgl. 4.2.4). Hier stellt sich die Aufgabe der Erweiterung auf zusätzliche Gebäudedefunktionen, insbesondere vor dem Hintergrund, dass bestimmte Nutzungsgruppen, wie z. B. Einzelhandel und Gastgewerbe, vergleichsweise hohe DSI-Potenziale vermuten lassen (vgl. 2.5.2).

Um dies zu ermöglichen, wurde bei der Umsetzung der Algorithmen in Python versucht, eine maximale Erweiterbarkeit zu gewährleisten. Die Methode verwendet den gesamten Gebäudebestand des ALKIS als Input und berechnet das DSI-Potenzial für alle GFK, zu denen eine Anweisung für die notwendige Flächenzerlegung (Zonierung) und Korrekturfaktoren für den konditionierten Flächenanteil vorhanden sind. Für die Integration jeder weiteren GFK gilt es also lediglich, die beiden Teilfragen „Zonierung“ und „konditionierte Flächenanteile“ valide zu lösen. Dabei bietet die Verwendung der BKI-Kennwerte noch ein relativ breites Angebot für die benötigten Korrekturfaktoren zur konditionierten Fläche. Diese sind jedoch z. T. leider nur mit geringer Fallzahl belegt, sodass hier z. T. ein größerer Validierungsaufwand besteht. Die Zonierung dürfte mit einigem Rechercheaufwand und im Austausch mit Fachplanern für viele Fälle lösbar sein, da hierbei sich wiederholende Ansätze zur Flächenaufteilung vermutet werden dürfen (Standardbauten bei Einzelhandel, Hotels etc.). Andere Fälle werden relativ individuell bleiben,

insbesondere solche Gebäude, die über historisch gewachsene Gebäudesubstanz verfügen (z. B. Theater).

Darüber hinaus gilt es, die Palette der berücksichtigten Gebäudetechnik zu erweitern. Die bisher berücksichtigten LuK bilden zwar nach den Erfahrungen des Projekts „Insel“ einen Großteil der zur Verfügung stehenden DSI-Potenziale ab, allerdings ließen sich relativ leicht z. B. Komponenten der Heizungstechnik (Pumpen) und ggf. auch der Großküchentechnik zusätzlich berücksichtigen. Insbesondere Letztere stellte im Projekt „Insel“ stets einen deutlichen Anteil am realisierten Potenzial, da Küchentechnik oft auf LMA aufgeschaltet wird. Demgegenüber dürfte sie sehr selten Bestandteil von GLT-Systemen sein.

Grundsätzlich bietet das ALKIS die Datengrundlage, um das spezifische DSI-Potenzial jedes einzelnen Gebäudes einer Stadt zu bestimmen und zu verorten. Nicht in allen Fällen wird dabei die hier entwickelte Methodik zur Potenzialabschätzung anwendbar sein. Gegebenenfalls müsste dafür ein Modell zur Kombination mehrerer Methoden (je nach GFK) entwickelt werden. Dies stellt zwar eine Herausforderung, aber kein prinzipielles Problem dar.

Interessant dürfte in diesem Zusammenhang die Kombination dieser Methode mit den ähnlich operierenden Modellen zur Erstellung von Solaratlanten sein. So ließe sich aus der Kombination dieser beiden Ansätze für jedes Gebäude ein Modell zur optimierten Eigenstromnutzung unter Verwendung der gebäudespezifischen DSI-Potenziale erstellen. Dies wäre ein auch für jene Gebäude interessanter Ansatz, die zwar nur über ein kleineres DSI-Potenzial verfügen, aber eben auch einen kleineren Strombedarf und kleinere Dachflächen, also einen geringeren PV-Ertrag, haben. Zusammen mit den Geoinformationen des Netzinformationssystems (NIS) könnten dabei auch Netzurückwirkungen betrachtet werden.

Zusätzlich gilt es, die hier aufgestellte These der leichten Übertragbarkeit auf die ALKIS anderer Städte an einem oder mehreren Fallbeispielen zu überprüfen. Zwar handelt es sich beim ALKIS um ein bundeseinheitliches Datenformat, dessen Aufbau von der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen relativ kleinteilig geregelt ist. Jedoch zeigte sich, dass für das Hamburger ALKIS vom Landesamt für Vermessungswesen eine Reihe von gesondert getroffenen Festsetzungen gelten, die die Führung einzelner für die Methodik relevanter Merkmale und Attribute (z. B. über Nebennutzungen von Gebäuden) betreffen (vgl. 4.1). Wird in anderen Städten ähnlich verfahren, könnte eine automatische Übertragbarkeit ggf. Schwierigkeiten bereiten, wobei dies primär Detailfragen der Attributführung bei den Bauteilen und den GFK betrifft. Die für die Gebäude verwendeten Attribute sind grundlegender Natur und dürfen (müssen) als identisch vorausgesetzt werden.

Eine weitere interessante Frage der Übertragbarkeit stellt sich mit Blick auf das (benachbarte) Ausland: Lässt sich die Methode auf andere Datenformate digitaler Stadtkarten und Liegenschaftskataster übertragen? Die Kataster müssten dazu nicht viele Informationen bereithalten. Verwendet werden Gebäudegrundrisse, Anzahl der Geschosse, Angaben über zugehörige Bauteile (zur Korrektur der BGF-Berechnung) sowie – und das ist unverzichtbar – Angaben über die Nutzung der Gebäude. Zusätzlich wäre für eine internationale Übertragbarkeit zu prüfen, ob die hier angesetzten Faktoren der Flächenzerlegung, der Flächenanteile der Konditionierung und der spezifischen installierten Leistung zur Konditionierung mit dann lokal validen Daten ersetzt werden können. Für die Übertragung nach Österreich und in die Schweiz (D-A-CH) dürfte das vermutlich wenig problematisch sein. Darüber hinaus wäre die Datenlage zu prüfen.

7.2.2 Anwendung im Rahmen dynamischer Simulationen für (Quartiers-) Energiekonzepte

Eine wesentliche Stärke der hier entwickelten Methode ist die automatische Verknüpfung der Aussagen zu DSI-Potenzialen mit den raumbezogenen Daten des GIS. Daraus erwächst für zukünftige

Projekte die Möglichkeit, die DSI-Daten mit den GIS-basierten Daten des Netzinformationssystems des Hamburger Verteilnetzes zu kombinieren. Dies würde belastbare konkrete Aussagen über Potenziale zur Erbringung evtl. lokal im Verteilnetz notwendiger Netzdienstleistungen ableiten. Dabei lassen sich die mithilfe dieser Methode anzusprechenden Netzanschlusskunden sofort identifizieren.

Ebenfalls wird die Verwendung des Potenzials zum lokalen Energieausgleich im Rahmen von EE-Autarkie oder Microgrid-Ansätzen möglich. Eine entsprechende Energieleitplanung fand in Hamburg kürzlich in größerem Maßstab im Rahmen der internationalen Bauausstellung (IBA) in Hamburg-Wilhelmsburg statt. Darin wurde die möglichst vollumfängliche Nutzung erneuerbarer Energie (100 %-Versorgung) im Stadtteil Wilhelmsburg im Rahmen des Konzepts „Erneuerbares Wilhelmsburg“ untersucht [IBA 2010]. In einer ersten Studie wurde ermittelt, dass es denkbar ist, bis 2025 den Strombedarf dieses Stadtteils aus erneuerbaren Energien zu decken (ebd., S. 9). Diese Einschätzung bezieht sich aber auf die energetische Jahresbilanz und berücksichtigt nicht die resultierenden dynamischen Schwankungen und die sich daraus zwingend ergebenden Fragen nach Stromimporten, -exporten und sich ggf. einstellenden Netzengpässen. Die IBA ließ diese Aspekte in einer weiteren Studie untersuchen [Peter & Lutzenberger 2013]. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass bei einer angestrebten (jahresbilanziellen) Energieautarkie in Wilhelmsburg mit zeitweisen Defiziten von rund 25 MW und Stromüberschüssen von 158 MW bzw. unter Einsatz von Batteriespeichern an den PV-Anlagen noch 132 MW zu rechnen ist und schlägt vor, Optionen des Lastmanagements zu untersuchen und zum Ausgleich der Schwankungen soweit möglich nutzbar zu machen, um netzengpassbedingte Abregelungen der EE-Erzeuger zu vermeiden (ebd., S. K1-1).

Die Ergebnisse dieser Arbeit liefern die benötigten Informationen zumindest teilweise und ergänzen so das Energiekonzept „Erneuerbares Wilhelmsburg“ um eine wichtige Komponente. Nun sind Bürogebäude im Stadtteil Wilhelmsburg bisher nicht besonders häufig vertreten (Stand des hier verwendeten ALKIS, in dem einige IBA-Projekte noch nicht verzeichnet sind). Entsprechend ist das in den erstellten Karten für Wilhelmsburg ausgewiesene DSI-Potenzial vergleichsweise gering. Diese Lücke sollte gerade für diesen Stadtteil aber zu schließen sein, wenn man das DSI-Potenzial der dort vorhandenen Industrie- und Gewerbestandorte ermittelt. Dazu wäre eine entsprechende Erweiterung dieser Methode notwendig. Damit ergibt sich bereits heute ein interessantes Anwendungsbeispiel für die hier erstellte Methode zur Verwendung in der Energieleitplanung bzw. energetischen Quartiersplanung.

Für die Verwendung der Daten in dynamischen Simulationen wäre der methodische Teil der dynamischen Teillastbestimmung des DSI-Potenzials aber zunächst zu validieren. Dies wird zukünftig mindestens am Beispiel des neuen Energiecampus der HAW geschehen, den der Autor und seine Arbeitsgruppe, das Center for Demand Side Integration (C4DSI) der HAW Hamburg, Ende 2014 beziehen werden und dessen gesamte gebäudetechnische Anlagen netzreaktiv betrieben werden sollen. „Netzreaktiv“ bezeichnet dabei ein Betriebskonzept, bei dem das Gebäude seine Nutzenergiebedarfe so deckt, dass bei Strommangel im Netz die benötigte Energie dezentral autark (aus KWK und PV) gedeckt wird und Überschüsse eingespeist werden. Bei Stromüberschuss im Netz werden Einspeisungen vermieden und die Nutzenergiebedarfe durch Strombezug aus dem Netz gedeckt. Dabei sind die LuK ein wichtiger Bestandteil. Ihr Teillastverhalten und die sich aus Teillast ergebenden Nutzenergielieferungen werden ausführlich vermessen werden.

7.2.3 Methodische Verbesserungen

Aus den in der Methodenkritik diskutierten Aspekten ergeben sich einige sehr konkrete Ansätze für weitere Arbeiten zur Verbesserung der Methode, insbesondere auch, um valide Erweiterungen und Übertragungen zu ermöglichen. Dazu zählt an erster Stelle der Bedarf einer erweiterten Validierung. Wünschenswert wäre eine umfassende Validierung, die repräsentative GFK-spezifische Stichproben mit Gebäuden aller Größen- und Baualtersklassen beinhaltet und diese entsprechend auswertet. Eine

solche umfassende Untersuchung wird vermutlich nur im Rahmen eines Teilprojekts eines größeren geförderten Vorhabens möglich werden. Dabei könnten auch Aspekte zur Präzisierung der ABC-Analyse hinsichtlich der angenommenen Streuungen der Vollnutzungsstunden und des MSP-Anschlusses ab 100 kW und ein Datensatz zur besseren Abschätzung des konditionierten Flächenanteils erfolgen. Eine Verbesserung wäre auch eine differenziertere Zonierung, die die Aspekte der Gebäudegröße und des Baualters berücksichtigt. Aus einer insgesamt besseren Datengrundlage ließe sich auch eine verbesserte Definition der randständigen Bedarfsklassen „Niedrig“ und „Hoch“ ableiten. Insbesondere die Bedarfsklasse „Hoch“ spielt zumindest für die Gebäude der betrachteten Validierungsgruppe keine signifikante Rolle. Sie ist vermutlich neu zu definieren bzw. differenzierter zu verwenden. Es bleibt die Vermutung, dass sie für intensiv konditionierte repräsentative Gebäude älterer Baualtersklasse (Banken, Versicherungen, Konzernzentralen) zutreffen kann.

Die bessere Datengrundlage würde ggf. auch helfen, GFK-spezifische Leistungskennwerte aus den Werten der [VDI 3807-4: 2008] zu differenzieren.

Eine weitere methodische Verbesserung ergäbe sich aus einer mit heutigen Mitteln leicht erstellbaren webbasierten kartografischen Ansicht der Gebäude. Diese könnte zahlreiche nützliche Merkmale enthalten, die mit der statischen Darstellungsweise einer Karte nicht abbildbar sind. Dazu zählt zunächst die simple, aber wichtige Funktion der Ausschnittvergrößerung (Zoom). Darüber hinaus könnten Darstellungen animiert werden, wie z. B. die benutzerdefinierte flächenbezogene Zusammenfassung von DSI-Potenzialen (in Clustern, Quartieren, Stadtteilen etc.), der zeitliche Verlauf des DSI-Potenzials, bereits erfolgreich in das System integrierte DSI-Potenziale u. a. m. Derzeit ist eine solche Anwendung lizenzrechtlich schwierig. Allerdings gibt es Überlegungen, die Daten des Hamburger ALKIS frei verfügbar zu machen. Dieser Schritt wäre aus wissenschaftlicher Sicht sehr zu begrüßen. Es wäre dann auch möglich, die Daten interaktiv aufzubereiten und zu präzisieren. Dazu könnten die Gebäudebetreiber ihre tatsächlichen Daten mit den im Rahmen der Voranalyse ermittelten Werten vergleichen und ggf. korrigieren. Zudem könnte eine solche Webseite als ein möglicher Eintrittspunkt für die Gebäudebetreiber fungieren, ihr DSI-Potenzial einem Aggregator zur Vermarktung anzubieten. Ein ähnliches Portal wird derzeit im Rahmen des Forschungsprojekts „Smart Power Hamburg“ für BHKW-Betreiber erstellt. Das Projekt wird vom lokalen Energieversorger Hamburg Energie geleitet, der als Aggregator das flexible Lastpotenzial der BHKW erschließen möchte. Wissenschaftliche Projektpartner sind die RWTH Aachen und das oben erwähnte C4DSI der HAW.

7.2.4 Abschließendes Fazit

Die in dieser Arbeit erstellte Methode zur Voranalyse des DSI-Potenzials aus LuK in Büro- und Hochschulgebäuden liefert belastbare Erstannahmen für die gebäudespezifischen und damit örtlich festgelegten DSI-Potenziale des Gebäudebestands einer Stadt. Das ALKIS der Stadt Hamburg hat sich dafür als Datengrundlage bewährt. Insbesondere kann die Methode durch den Aspekt der Verortung helfen, die in vorangegangenen Analysen als sehr hoch eingeschätzte Diskrepanz zwischen dem theoretischen und dem praktischen/realisierbaren DSI-Potenzial zu verringern, da ein nicht-technisches Hemmnis auf Seiten potenzieller Aggregatoren ausgeräumt werden kann: die Unklarheit bezüglich des Ortes/der Adresse des Potenzials und der konkreten Höhe, die an dieser Adresse vermutet werden darf.

Darüber hinaus bietet die Methode interessante Anknüpfungspunkte für weitere Untersuchungen. Teile davon könnten insbesondere in dem voraussichtlich in Kürze beginnenden Forschungsprojekt „Gewiss“ weiterverfolgt werden, an dem das C4DSI gemeinsam mit Wissenschaftlern der HCU (und weiteren Partnern) arbeiten wird. Zudem ist eine Veröffentlichung und Freigabe des erstellten Python-Programms über die Webseite des C4DSI geplant, sodass für interessierte Kollegen die Möglichkeit der kreativen Verwendung und Weiterentwicklung besteht.

8 Literatur

- [2002/91/EU 2002] *Europäisches Parlament: Richtlinie 2002/91/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2002 On The Energy Performance Of Buildings: 2002/91/EU, Brüssel, Belgien, 2002.*
- [1228/2003/EU 2006] *Europäisches Parlament: Verordnung 1228/2003/EU vom 26. Juni 2003 über die Netzzugangsbedingungen für den grenzüberschreitenden Stromhandel. Brüssel, Belgien, 2006.*
- [2012/27/EU 2012] *Europäisches Parlament: Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates zur Energieeffizienz, zur Änderung der Richtlinien 2009/125/EG und 2010/30/EU und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EG und 2006/32/EG vom 25. Oktober 2012, Brüssel, Belgien, 2012.*
- [AbLaV 2012] *AbLaV: Verordnung über Vereinbarungen zu abschaltbaren Lasten. 28. Dezember 2012, Fundstellennachweis 752-6-16.*
- [AdV 2013a] *AdV: Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen – ADV – Online: GeoInfoDok Objektartenkatalog, 2013, <http://www.adv-online.de/AAA-Modell/broker.jsp?uMen=4b370024-769d-8801-e1f3-351ec0023010>; Zugriff am 12.09.2013.*
- [AdV 2013b] *AdV: Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen – ADV – Online: Das AAA-Modell, 2013, <http://www.adv-online.de/AAA-Modell/>; Zugriff am 12.09.2013.*
- [AdV 2013c] *AdV: Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen – ADV – Online: Sachstand der Migration, 2013, <http://www.adv-online.de/AAA-Modell/broker.jsp?uMen=02160975-2461-5b11-a3b2-1718a438ad1b>; Zugriff am 12.09.2013.*
- [AdV 2013d] *AdV: Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen – ADV – Online: Amtliches Festpunktinformationssystem (AFIS), 2013, <http://www.adv-online.de/icc/extdeu/broker.jsp?uMen=46160361-ab30-8d01-3bbc-251ec0023010>; Zugriff am 12.09.2013.*
- [AdV 2013e] *AdV: Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen – ADV – Online: GeoInfoDok Hauptdokument, 2013, <http://www.adv-online.de/AAA-Modell/broker.jsp?uMen=4b370024-769d-8801-e1f3-351ec0023010>; Zugriff am 12.09.2013.*
- [Aiulfi et al. 2010] *Aiulfi, D.; Maschio, V.; Dellsperger, V.; Brunet, L.; Primas, A.; Hagel, M.; Benz-Karlström, P.; Jakob, M.; Honegger-Ott, A.; Grodofzig Fürst B.: Energieverbrauch von Bürogebäuden und Großverteilern: Erhebung des Strom- und Wärmeverbrauchs, der Verbrauchsanteile,*

der Entwicklung der letzten 10 Jahre und Identifizierung der Optimierungspotenziale, Bern, Schweiz, 2010.

- [Apel et al. 2012] *Apel, Rolf et al.*: Demand Side Integration: Lastverschiebungspotenziale in Deutschland; ein notwendiger Baustein der Energiewende; Gesamttext. VDE-ETG, Frankfurt am Main, 2012.
- [Arge Benchmark 2009] *Arge Benchmark*: Benchmarks für die Energieeffizienz von Nichtwohngebäuden: Vergleichswerte für Energieausweise, Anlage zum Endbericht. BBSR-Online-Publikation 09/2009, Hrsg.: BMVBS/BBSR, März 2009, ISSN 1868-0097.
- [Arge Benchmark 2010] *Arge Benchmark: Konferenz der für den Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren der Länder (ARGEBAU)*: Bauwerkszuordnungskatalog, 2010, <https://senstadtfmts.stadt-berlin.de/intelliform/forms/abau/berlin/anlagen/aII/aII09/index>; Zugriff am 04.10.2013.
- [Arndt et al. 2006] *Arndt, U.; Roon, S. von; Wagner, U.*: Virtuelle Kraftwerke: Theorie oder Realität?. In: BWK, 2006, S. 52–58.
- [ASUE 2010] *ASUE: Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V.*: Das virtuelle Kraftwerk, Essen, 2010, <http://asue.de/cms/upload/broschueren/2011/virtuelle-kraftwerke/asue-virtuelle-kraftwerke-0211.pdf>; Zugriff am 12.12.2013.
- [Atabay et al. 2013] *Atabay, D.; Herzog, S.; Säger, F.; Jungwirth, J.; Milkulovic, V.*: Self-Adapting Building Models and Optimized HVAC Scheduling for Demand Side Management, Stockholm, 2013.
- [AtomG 2013] *Deutscher Bundestag*: Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren, Atomgesetz, Fundstellennachweis 751-1.
- [Auer 2006] *Auer, H. e. a.*: Faire Wettbewerbsbedingungen für virtuelle Kraftwerke. In: BMVIT (Hrsg.): Berichte aus Energie- und Umweltforschung, Wien, Österreich, 2006.
- [Aydin et al. 2013] *Aydin, N. Y.; Kentel, E.; Duzgun, H.*: GIS-based site selection methodology for hybrid renewable energy systems: A case study from western Turkey. In: Energy Conversion and Management, Vol. 70 (2013), pp. 90-106, Elsevier, Amsterdam, 2013.
- [B.A.U.M. 2012] *B.A.U.M.: B.A.U.M. Consult GmbH*: Smart Energy made in Germany: Zwischenergebnisse der E-Energy-Modellprojekte auf dem Weg zum

Internet der Energie, München, 2012, http://www.e-energy.de/documents/E-Energy_Erkenntnisse_2012_6_2b_web.pdf; Zugriff am 13.12.2013.

- [BBE 2009] *BBE: Wege in die moderne Energiewirtschaft: Ausbauprognose der Erneuerbare-Energien-Branche Teil 1: Stromversorgung 2020*, Berlin, 2009, http://www.bee-ev.de/_downloads/publikationen/studien/2009/091015_BEE-Branchenprognose_Strom2020_kurz.pdf; Zugriff am 12.12.2013.
- [BBSR 2009] *BBSR: Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung: Benchmarks für die Energieeffizienz von Nichtwohngebäuden: Vergleichswerte für Energieausweise*, 2009, http://www.bbsr.bund.de/cln_007/nn_23582/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BBSROnline/2009/DL__ON092009,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/DL_ON092009.pdf, Zugriff am 13.12.2013.
- [BDEW 2013] *BDEW: Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V.: Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken (2013): Anlagen, installierte Leistung, Stromerzeugung, Marktintegration der erneuerbaren Energien, EEG-Auszahlungen und regionale Verteilung der EEG-induzierten Zahlungsströme. Foliensatz zur Energie-Info*, Berlin, 2013, [http://www.bdew.de/internet.nsf/id/17DF3FA36BF264EBC1257B0A003EE8B8/\\$file/Foliensatz_Energie-Info-EE-und-das-EEG2013_31.01.2013.pdf](http://www.bdew.de/internet.nsf/id/17DF3FA36BF264EBC1257B0A003EE8B8/$file/Foliensatz_Energie-Info-EE-und-das-EEG2013_31.01.2013.pdf); Zugriff am 12.12.2013.
- [Berkel 2013] *Berkel, M.: Dossier Energiepolitik: Ausbau des Stromnetzes Notwendigkeit der Energiewende*, Bonn, 2013, <http://www.bpb.de/politik/wirtschaft/energiepolitik/148524/ausbau-des-stromnetzes>; Zugriff am 12.12.2013.
- [Berndt 2007] *Berndt, H. e. a.: TransmissionCode 2007: Netz- und Systemregeln der deutschen Übertragungsnetzbetreiber*, 2007; Zugriff am 14.07.2013.
- [Beschlusskammer 6 der Bundesnetzagentur 2011] *Beschlusskammer 6 der Bundesnetzagentur: Verwaltungsverfahren wegen der Festlegung zu Verfahren zur Ausschreibung von Regelenergie in Gestalt der Primärregelung, insbesondere zu Mindestangebotsgrößen, Ausschreibungszeiträumen und Ausschreibungszeitscheiben, zum technisch notwendigen Anteil nach § 6 Abs. 2 StromNZV und zu den einheitlichen Bedingungen, die Anbieter von Regelenergie erfüllen müssen, sowie zu den zu veröffentlichenden Daten nach § 27 Abs. 2 StromNZV*, 2011, <http://www.bundesnetzagentur.de/DE/Service-Funktionen/Beschlusskammern/1BK-Geschaeftszeichen-Datenbank/BK6-GZ/2010/BK6-10-000bis100/BK6-10-097bis-099/BK6->

10-097_Beschluss_2011_04_12.pdf?__blob=publicationFile&v=2;
Zugriff am 10.12.2013.

- [BKI 2013] *BKI (Hrsg.): Baukosten Gebäude // Statistische Kostenkennwerte Gebäude; Statistische Kostenkennwerte Bauelemente; Statistische Kostenkennwerte Positionen, BKI Baukosten 2013: Statistische Kennwerte. BKI; Verlagsges. Müller, Stuttgart, 2013.*
- [BMU 2013] *BMU: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Erneuerbare Energien 2012: Daten des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2012 auf der Grundlage der Angaben der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien – Statistik, 2013, http://www.erneuerbare-energien.de/fileadmin/Daten_EE/Bilder_Startseite/Bilder_Datenservice/PDFs__XLS/hintergrundpapier_ee_2012.pdf; Zugriff am 06.12.2013.*
- [BMVBS 2009] *BMVBS: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchskennwerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand, Berlin, 2009.*
- [BMVBS 2011] *BMVBS: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Strategische Einbindung regenerativer Energien in regionale Energiekonzepte: Wertschöpfung auf regionaler Ebene, 2011, http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/Online/2011/DL_ON182011.pdf?__blob=publicationFile&v=2; Zugriff am 10.12.2013.*
- [BMVBS 2013] *BMVBS: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtplanung; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Regionale Energiekonzepte: Vorstellung Modellregionen – Ein MORO-Forschungsfeld, Bonn, 2013, http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVBS/MORO/11/moro11_1.pdf;jsessionid=39F22C16A896B9F2E2FDF22FD25DD797.live2051?__blob=publicationFile&v=2; Zugriff am 10.12.2013.*
- [BMW i 2013a] *BMW i: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: EnEff:Stadt und EnEff:Wärme – Forschung für Energieeffizienz, 2013, <http://www.eneff-stadt.info/de/>; Zugriff am 08.12.2013.*
- [BMW i 2013b] *BMW i: Energiedaten und -analysen: Energiegewinnung und Energieverbrauch: Ausgewählte Grafiken zu Energiegewinnung und Energieverbrauch, 2013, <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/energiestatistiken-energiegewinnung->*

energieverbrauch,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf; Zugriff am 12.12.2013.

- [Bonder & Bernsdorf 2013] *Bonder, B.; Bernsdorf, B.:* Geoinformation in der Energiewirtschaft: Wie Raumbezug die Prozesse der erneuerbaren Energien unterstützt, Herne, 2013, http://www.airverband.de/uploads/media/Geoinformation_in_der_Energiewirtschaft_Langfassung_01.pdf; Zugriff am 10.12.2013.
- [Brunner et al. 2013] *Brunner, M.; Braun, M.; Tenbohlen, S.:* Wärmepumpen als Möglichkeit zur Spannungsregelung in Niederspannungsnetzen, Berlin, 2013.
- [BSU 2007] *BSU: Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt:* Strombeschaffung für die Freie und Hansestadt Hamburg: Markterkundung. Unveröffentlichte Ausschreibungsunterlagen von Fichtner Consulting für die Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Hamburg, 2007.
- [Buchholz et al. 2012] *Buchholz, B. M.; Bühner, V.; Udo, B.; Fenn, B.; Styczynski, Z. A.:* Intelligentes Lastmanagement – Erfahrungen aus der Praxis, Stuttgart, 2012.
- [BGB] *Bundesministerium der Justiz:* Bürgerliches Gesetzbuch, Fundstellennachweis 400-2.
- [BauGB] *Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS):* Baugesetzbuch, Fundstellenachweis 213-1
- [Bundesregierung 2010] *Bundesregierung:* Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung, 2010, http://www.bundesregierung.de/Content/DE/_Anlagen/2012/02/energiekonzept-final.pdf?__blob=publicationFile&v=5; Zugriff am 12.12.2013.
- [Clausnitzer & Dittrich 2005] *Clausnitzer, K.-D.; Dittrich, J.:* Potenzial an Fachleuten zur Umsetzung der GebäudeRL: Schlussbericht (Langfassung) zum Vorhaben 45/04 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit BMWA, 2005.
- [Cordts 1992] *Cordts, J.:* ABC-Analyse. Betriebswirtschaftlicher Verl. Gabler, Wiesbaden, 1992.
- [Dekking 2005] *Dekking, M.:* A modern introduction to probability and statistics. Springer, New York, 2005.
- [dena 2010] *dena: Deutsche Energie Agentur:* Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015 bis 2020 mit Ausblick 2025: dena-Netzstudie II, Berlin, Köln, 2010.

- [Destatis 2013] *Destatis: Statistisches Bundesamt: Zensus 2011 Gebäude und Wohnungen, 2013, https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressekonferenzen/2013/Zensus2011/gwz_zensus2011.pdf?__blob=publicationFile; Zugriff am 15.10.2013.*
- [Deutscher Bundestag 2002] *Deutscher Bundestag: Bericht der Enquete-Kommission "Nachhaltige Energieversorgung unter den Bedingungen der Globalisierung und der Liberalisierung". Bundesanzeiger, Berlin, 2002.*
- [DIN 1946-1: 1988] *Deutsches Institut für Normung: Raumluftechnik; Terminologie und graphische Symbole (VDI-Lüftungsregeln): DIN 1946-1: Raumluftechnik; Terminologie und graphische Symbole (VDI-Lüftungsregeln), Beuth, Berlin, 1988.*
- [DIN 277-1: 2005] *Deutsches Institut für Normung: Grundflächen und Rauminhalte von Bauwerken im Hochbau – Teil 1: Begriffe, Ermittlungsgrundlagen. Beuth, Berlin, 2005.*
- [DIN IEC 60050: 2012] *Deutsches Institut für Normung: Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch. Teil 351: Leittechnik – Entwurf: DIN IEC 60050: Beuth, Berlin, 2012.*
- [DIN V 18599-1: 2013] *Deutsches Institut für Normung: Energetische Bewertung von Gebäuden [Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung; Vornormenreihe]. Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger, Beuth, Berlin, 2013.*
- [DIN V 18599-10: 2013] *Deutsches Institut für Normung: Energetische Bewertung von Gebäuden [Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung; Vornormenreihe]. Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten. Beuth, Berlin, 2013.*
- [DIN EN 15603: 2013] *Deutsches Institut für Normung: Energieeffizienz von Gebäuden – Gesamtenergiebedarf und Festlegung der Energiekennwerte. Beuth, Berlin, 2013.*
- [Dirlich & Markfort 2011] *Dirlich, S.; Markfort, D.: Deutschland: Typologie und Bestand beheizter Nichtwohngebäude in Deutschland, 2011, <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-201109014801>.*
- [Dittmar & Pfeiffer 2004] *Dittmar, R.; Pfeiffer, B.: Modellbasierte prädiktive Regelung. R. Oldenbourg Verlag, München, 2004.*
- [Domschke & Drexl 2005] *Domschke, W.; Drexl, A.: Einführung in Operations Research. Springer, Berlin [u. a.] 2005.*

- [Drzymalla 2013] *Drzymalla, T.: Hochschule für Angewandte Wissenschaften: Design und Simulation einer Frequenzregelung für ein übergeordnetes Lastmanagement und Kommunikation über Gebäudeleittechnik: Masterthesis im Studiengang "Nachhaltige Energiesysteme im Maschinenbau", HAW Hamburg, Hamburg, 2013.*
- [DWD 2013] *DWD: Deutscher Wetterdienst: Webbased Weather Request and Distribution System / Internetportal des Deutschen Wetterdienstes zur Veröffentlichung meteorologischer Zeitreihen ausgewählter Wetterstationen in Deutschland, Offenbach, 2013, https://werdis.dwd.de/werdis/start_js_JSP.do; Zugriff am 21.11.2013.*
- [e-control 2013] *e-control: Kriterien für Zuordnung zu einer Netzebene, 2013, <http://www.e-control.at/de/industrie/service-beratung/schwerpunkt-kmu/faq-gewerbetreibende#1844>; Zugriff am 14.12.2013.*
- [EEG] *Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi): Erneuerbare-Energien-Gesetz, Fundstellennachweis 754-22.*
- [Enercity 2000] *Enercity: Stadtwerke Hannover: Grobanalyse des elektrischen Energieverbrauchs: Ergebnisbericht für den Niedersächsischen Sparkassen- und Giroverband, Hannover, 2000.*
- [EnEV] *Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi): Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV), Fundstellennachweis 754-4-10.*
- [ENTSO-E 2012] *ENTSO-E: European Network of Transmission System Operators for Electricity: Memo 2012, 2012; Zugriff am 13.07.2013.*
- [ENTSO-E 2013] *ENTSO-E: European Network of Transmission System Operators for Electricity: UCTE Union for the Coordination of the Transmission of Electricity a proud history, 2013, <https://www.entsoe.eu/about-entso-e/a-proud-history/ucte/>; Zugriff am 11.07.2013.*
- [EnWG] *Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi): Energiewirtschaftsgesetz, Fundstellennachweis 752-6*
- [Erhorn-Kluttig et al. 2011] *Erhorn-Kluttig, H.; Jank, R.; Schrempf, L.; Dütz, A.; Rumperl, F.; Schrader, J.; Erhorn, H.; Beier, C.; Sager, C.; Schmidt, D.: Energetische Quartiersplanung: Methoden – Technologien – Praxisbeispiele. Fraunhofer-IRB-Verl., Stuttgart, 2011.*
- [Ernesti & Kaiser 2009] *Ernesti, J.; Kaiser, P.: Python 3: Das umfassende Handbuch [Migration von Python 2.x auf 3; Einstieg, Praxis, Referenz; Sprachgrundlagen, Objektorientierung, Modularisierung; Migration, Debugging,*

- Interoperabilität mit C, GUIs, Netzwerkkommunikation u. v. m.]. Galileo Press, Bonn, 2009.
- [Focken et al. 2011] *Focken, U.; Bümmerstede, J.; Klobasa, M.*: Kurz- bis mittelfristig realisierbare Marktpotenziale für die Anwendung von Demand Response im gewerblichen Sektor: Öffentlicher Abschlussbericht, 2011, <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb12/726677981.pdf>.
- [Foosnaes et al.] *Foosnaes, J. A.; Tonne, E.; Gjerde, J. O.; Hyde, V.*: Demand Side Management (DSM). What Are The Potential Benefits?: 22nd International Conference on Electricity, Stockholm June 2013.
- [Gabler 2013] *Gabler: Springer Gabler Verlag*: Gabler Wirtschaftslexikon: Stichwort Liegenschaft, 2013, <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/11578/liegenschaft-v7.html>; Zugriff am 27.10.2013.
- [GG] *Bundesministerium der Justiz*: Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland. Fundstellennachweis 100-1.
- [GI Geoinformatik 2012] *GI Geoinformatik*: ArcGIS 10.1 und 10.0: Das deutschsprachige Handbuch für ArcGIS for Desktop Basic & Standard. Wichmann, Berlin, 2012.
- [Gils et al. 2013] *Gils, H. C.; Cofala, J.; Wagner, F.; Schöpp, W.*: GIS-based assessment of the district heating potential in the USA. In: Energy 58 (2013), S. 318-329, Elsevier, Amsterdam, 2013.
- [Grein et al. 2009] *Grein, A.; Pehnt, M.; Duscha, M.; Kellerbauer, H.*: Nutzung von thermischen Speichern als Energiespeicher: Projektbericht im EEnergy Projekt "Modellstadt Mannheim", 2009, http://www.ifeu.de/energie/pdf/AP1_AS1_06_Studie_ThermischeSpeicher_20090731a.pdf; Zugriff am 26.11.2013.
- [Günther et al. 2013] *Günther, D.; Althammer, J.; Miara, M.; Walper, J.*: Simulation und Analyse der Auswirkungen von Laststeuerung auf die Betriebsweise und Effizienz von Wärmepumpensystemen, ETG Kongress Proceedings, VDE Verlag, Berlin, 2013.
- [Guo 2013] *Guo, P.*: Product Standardization – A Case Study of Asak Miljøstein AS. Master Thesis, Molde, Norwegen, 2013.
- [Hamburg Energie 2013] *Hamburg Energie*: Hamburger Solaratlas, 2013, <http://www.hamburgenergiesolar.de/Solaratlas.116.0.html>; Zugriff am 08.12.2013.

- [Haubrich 2008] *Haubrich, H.-J.*: Gutachten zur Höhe des Regelenergiebedarfs: Gutachten im Auftrag der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, Aachen, 2008, <http://www.consentec.de/wp-content/uploads/2011/12/Gutachten-zur-H%C3%B6he-des-Regelenergiebedarfes.pdf>; Zugriff am 02.09.2013.
- [Hausladen et al. 2011] *Hausladen et al.*: Wärmebedarfsermittlung mit der Gemeindebilanzierungssoftware Gem-EB: Software-Entwicklung für die Energiebilanzierung von Gemeinden unter Nutzung von GIS. Erstellt im Rahmen des Förderprogramms EnEff: Stadt des BMWi, 2011, <http://www.eneff-stadt.info/de/publikationen/publikation/details/eneffwaerme-pilotprojekt-ismaning-energieleitplanung-und-gebauebilanzierungssoftware-gemeb-ve/>; Zugriff am 10.12.2013.
- [Hey 2012] *Hey, B.*: Power-to-Gas als Möglichkeit zur Speicherung eines Energieüberangebots und als Bestandteil eines flexiblen Demand Side Managements. Thesis zur Erlangung des Titels "Master of Science", HAW Hamburg, Hamburg, 2012.
- [IBA 2010] *IBA: Internationale Bauausstellung Hamburg*: Energieatlas: Zukunftskonzept Erneuerbares Wilhelmsburg, 2010, http://www.iba-hamburg.de/fileadmin/Mediathek/S10_klimaschutzkonzept/klimaschutzkonzept_2010_energieatlas.pdf; Zugriff am 08.12.2013.
- [IWU 2013a] *IWU: Institut für Wohnen und Umwelt (IWU)*: TEK – Teilenergiekennwerte für Nichtwohngebäude im Bestand: TEK tool, Darmstadt, 2013, [tektool.iwu.de](http://www.tektool.iwu.de); Zugriff am 13.11.2013.
- [IWU 2013b] *IWU: Institut für Wohnen und Umwelt (IWU)*: Typologiegestützte Analyseinstrumente für die energetische Bewertung bestehender Nichtwohngebäude, 2013, <http://www.iwu.de/forschung/energie/laufend/nichtwohngebauedeanalyse/>; Zugriff am 14.12.2013.
- [Jakob et al. 2008] *Jakob, M.; Aiulfi, D.; Mschio, I.; Primas, A.; Hagel, M.; Karlström, P.*: Stromverbrauch in Bürogebäuden – Erhebung und Analyse von Energiekennzahlen: Konferenzproceedings des 15. Schweizerischen Status-Seminars "Energie- und Umweltforschung im Bauwesen". September 2008 ETH Zürich, Zürich, Schweiz. 2008; Zugriff am 29.10.2013.
- [Jungwirth et al. 2012] *Jungwirth, J.; Rössel, T.; Sängler, F.; Schneegans, J.; Gravac, M.; Herzog, S.; Milkulovic, V.*: SmartBuildings – Implementierung von Lastmanagementsystemen, VDE Kongress 2012 Proceedings, VDE Verlag, Berlin, 2012.

- [Kamper 2009] *Kamper, A.*: Dezentrales Lastmanagement zum Ausgleich kurzfristiger Abweichungen im Stromnetz. Dissertation. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2009.
- [Kamphuis et al. 2004] *Kamphuis, R.; Carlson, P.; Kester, J.; Akkermans, H.*: Market-oriented online supply demand matching: deliverable D1.2 des FP "CRISP – Distributed intelligence in critical infrastructures for sustainable power". 2004, <http://www.crisp.ecn.nl/deliverables/D1.2.pdf>; Zugriff am 07.12.2013.
- [Keller 2005] *Keller, L.*: Leitfaden für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen: Grundlagen der Thermodynamik – Komponenten einer Vollklimaanlage – Normen und Vorschriften. Oldenbourg-Industrieverl., München, 2005.
- [Kempf 2011] *Kempf, H.*: Verbessertes Modell zur Berechnung des Energiebedarfs zur energetischen Bewertung von Nichtwohngebäuden. Universitätsbibliothek der Universität Siegen, Siegen, 2011.
- [Kerebel 2013] *Kerebel, C.*: Energiebinnenmarkt: FTU_4.13.2.pdf, 2013, http://www.europarl.europa.eu/ftu/pdf/de/FTU_4.13.2.pdf; Zugriff am 13.07.2013.
- [Klobasa 2009] *Klobasa, M.*: Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz. Fraunhofer-IRB-Verl., Stuttgart, 2009.
- [Knissel & Hörner 2007] *Knissel, J.; Hörner, M.*: Methodik zur Erfassung, Beurteilung und Optimierung des Elektrizitätsbedarfs von Gebäuden: MEG, Frankfurt am Main, 2007, <http://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-17923.pdf>; Zugriff am 12.11.2013.
- [Kreienberg 2008] *Kreienberg, M.*: VDE: etz-marktübersicht Spitzenlastbegrenzung/Energetarifüberwachungssysteme, 2008, http://www.etz.de/files/etz-markt_bersicht_spitzenlastbegrenzung_energetarif_berwachungssysteme.pdf; Zugriff am 11.03.2013.
- [Krengel et al. 2013] *Krengel, S.; Meinerzhagen, A.-K.; Falke, T.; Dietrich, C.; Witte, A.*: Planungsverfahren zur effizienten Energieversorgung in Mittelstädten, ETG Kongress 2013 Proceedings, VDE Verlag, Berlin, 2013.
- [Langhammer et al. 2012] *Langhammer, L.; Müller, C.; Kreutz, S.; Belitz H.-J.; König, D.; Kays, K.; Wietfeld, C.; Rehtanz, C.*: Zuverlässige Integration intelligenter Laststeuerung und dezentraler Energieerzeugung im E-Energy-Projekt E-DeMa, VDE Kongress 2012 Proceedings, VDE Verlag, Berlin, 2012.

- [LGV 2011] *LGV: Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung: Arbeitshinweise zur Führung des Objektartenbereichs "Gebäude" in ALKIS: Version 2.1, Hamburg, 2011.*
- [Libbe et al. 2010] *Libbe, J.; Köhler, H.; Beckmann, K. J.: Infrastruktur und Stadtentwicklung: Technische und soziale Infrastrukturen – Herausforderungen und Handlungsoptionen für Infrastruktur- und Stadtplanung. Deutsches Institut für Urbanistik, Berlin, 2010.*
- [Lichtmeß 2010] *Lichtmeß, M.: Vereinfachungen für die energetische Bewertung von Gebäuden. Dissertation, Universität Wuppertal, Wuppertal, 2010.*
- [Merz 2003] *Merz, L.: Grundkurs der Regelungstechnik: Einführung in die praktischen und theoretischen Methoden; mit 49 Tabellen. Oldenbourg, München, 2003.*
- [Müller et al. 2012] *Müller, S.; Wille-Hausmann, B.; Wittwer, C.: Potential von KWK- und Wärmepumpensystemen zum Ausgleich fluktuierender erneuerbarer Energien in Deutschland, VDE Kongress 2012 Proceedings, VDE Verlag, Berlin, 2012.*
- [Murto 1998] *Murto, P.: Neural network models for short-term load forecasting. Dissertation an der TU Helsinki, Helsinki, Finnland, 1998.*
- [Naimi 2008] *Naimi, F.: Java-basierte Lastprognose für eine geringe Anzahl von Liegenschaften. Diplomarbeit, HAW Hamburg, 2008.*
- [Neenan et al. 2003] *Neenan et al.: Neenan Associates, Lawrence Berkeley National Laboratory, Pacific Northwest National Laboratory: How and why costumers respond to electricity price variability: A Study of NYISO and NYSERDA 2002 PRL Program Performance, 2003, <http://emp.lbl.gov/sites/all/files/REPORT%20lbnl%20-%2052209.pdf>; Zugriff am 07.12.2013.*
- [Neubarth & Henle 2012] *Neubarth, J.; Henle, M.: Demand Response – Intelligentes Lastmanagement für den deutschen Regelleistungsmarkt, VDE Kongress 2012 Proceedings, VDE Verlag, Berlin, 2012.*
- [Neufert & Kister 2012] *Neufert, E.; Kister, J.: Bauentwurfslehre: Grundlagen, Normen, Vorschriften über Anlage, Bau, Gestaltung, Raumbedarf, Raumbeziehungen, Maße für Gebäude, Räume, Einrichtungen, Geräte mit dem Menschen als Maß und Ziel; Handbuch für den Baufachmann, Bauherrn, Lehrenden und Lernenden; mit Tabellen. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2012.*
- [Nga et al. 2012] *Nga, D. V.; See, O. H.; Quang Do Nguyet; Xuen, Chee Yung, Chee, Lai Lee: Visualization Techniques in Smart Grid. Smart Grid and*

- Renewable Energy (2012), 3, S. 175–185, Scientific Research, online, 2012.
- [Nielsen & Möller 2013] *Nielsen, S.; Möller, B.*: GIS based analysis of future district heating potential in Denmark. In: Energy 57 (2013), S. 458-468, Elsevier, Amsterdam, 2013.
- [Nitsch et al. 2010] *Nitsch, J.; Pregger, T.; Scholz, Y.; Naegler, T.; Sterner, M.; Gerhardt, N.; Oehsen v., A.; Pape, C.; Saint-Drenan, Y.-M.; Wenzel, B.*: Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global: Leitstudie 2010, 2010, http://www.fvee.de/fileadmin/politik/bmu_leitstudie2010.pdf; Zugriff am 01.08.2013.
- [Paulus & Borggreffe 2011] *Paulus, M.; Borggreffe, F.*: The Potential of Demand Side management in Energy Intensive Industries for Electricity Markets in Germany. Applied Energy (2011), 88, S. 432–441, Elsevier, Amsterdam, 2011.
- [Peter & Lutzenberger 2013] *Peter, S.; Lutzenberger, A.*: Inselstromstudie Hamburg Wilhelmsburg: Studie im Auftrag der internationalen Bauausstellung Hamburg (IBA), Hamburg, 2013, http://www.iba-hamburg.de/fileadmin/Mediathek/Whitepaper/Stromstudie_IBA_Hamburg_klein.pdf; Zugriff am 08.12.2013.
- [Pina et al. 2012] *Pina, A.; Silva, C.; Ferrão, P.*: The impact of demand side management strategies in the penetration of renewable electricity. Energy (2012), 41, S. 128–137, Elsevier, Amsterdam, 2012.
- [Preuß 2010] *Preuß, O.*: Regelungstechnische Optimierung des übergeordneten Reglers im Forschungsprojekt Insel. Diplomarbeit am Department Informations- und Elektrotechnik der HAW Hamburg, Hamburg, 2010.
- [Quinonez-Varela et al. 2007] *Quinonez-Varela, G.; Crudena, A.; Grahamb, C.; Punton, B.; Blair, L.; Thomson, J.*: A GIS/PSS planning tool for the initial grid connection assessment of renewable generation. In: Renewable Energy 32 (2007), Issue 6, S.727-737, Elsevier, Amsterdam, 2007.
- [Recknagel & Schramek 2007] *Recknagel, H.; Schramek, E.-R.*: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik: Einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik. Oldenbourg, München [u. a.] 2007.
- [Röhrig & Klein 1999] *Röhrig, M.; Klein, K.-H.*: Stadtwerke Hannover: Grobanalyse des elektrischen Energieverbrauchs des Wasserwerks Elze-Berkhof, Hannover, 1999.

- [Roon 2007] *Roon, S. v.: TU München: Der Markt für Regelleistung – technische und wirtschaftliche Aspekte. Energiewirtschaftliches Seminar, München, 2007.*
- [Roon et al. 2013] *Roon, S. von; Gruber, A.; Peraus, S.: Energieeffizienz und Lastflexibilisierung: Partner oder Gegenspieler? BWK – Das Energiefachmagazin (2013), 1/2, S. 56–61.*
- [Roon & Gobmaier 2011] *Roon, S. von; Gobmaier, T.: Konzepte der Lastreduktion in der deutschen Industrie. BWK – Das Energiefachmagazin 63 Nr. 3 (2011), Nr. 3, S. 57–62.*
- [Rotering & Moser 2013] *Rotering, N.; Moser, A.: Zielnetzplanung von Mittelspannungsnetzen unter Berücksichtigung von dezentralen Eispeisungen und steuerbaren Lasten, ETG Kongress 2013 Proceedings, VDE Verlag, Berlin, 2013.*
- [Schäfers 2005] *Schäfers, H.: sumbi Ingenieure: Überprüfung der Leistungsfähigkeit der Anlage zur Lastspitzenoptimierung (E-max Anlage) am Standort Bergedorf der Hochschule für Angewandte Wissenschaften: Gutachten im Auftrag der Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt (BSU) Hamburg, Hamburg, 2005.*
- [Schäfers et al. 2010] *Schäfers, H.; Schubert, F.; Borst, D.; Lüdemann, K.: Demand Side Management im tertiären Sektor: Ergebnisse des Forschungsprojekts "INSEL_ Internetbasiertes System eines erweiterbaren Lastmanagements zur Integration in virtuelle Kraftwerke", VDE Kongress 2010 Proceedings, VDE Verlag, Berlin, 2010.*
- [Schäfers et al. 2011] *Schäfers, H.; Vuthi, P.; Borst, D.; Lüdemann, K.; Schubert, F.: Hochschule für Angewandte Wissenschaften: Entwicklung eines internetbasierten Systems für ein erweiterbares Lastmanagement zur Integration in virtuelle Kraftwerke (INSEL): Laufzeit: 01.02.2006 bis 28.02.2010; Abschlussbericht, 2011, <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb11/675931797.pdf>.*
- [Schäfers & Schubert 2010] *Schäfers, H.; Schubert, F.: Demand side management (DSM) in Deutschland – Potenziale und Märkte. In: Fortschrittsberichte VDI Reihe 6 Band 593, VDI-Verl., Berlin, 2010.*
- [Scheven & Prella 2012] *Scheven, A. von; Prella, M.: Lastmanagement in der stromintensiven Industrie zur Maximierung des Anteils regenerativer Energien im bezogenen Strommix, VDE Kongress 2012 Proceedings, VDE Verlag, Berlin, 2012.*
- [Schlump & Malottki 2013] *Schlump, C.; Malottki, C. v. (Hrsg.): Anforderungen an energieeffiziente und klimaneutrale Quartiere (EQ). Bundesinstitut*

für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Bonn, 2013.

- [Schwarz 2009] *Schwarz, A.: HCU: Instrumente der Raumplanung für den Klimaschutz: Steuerungsmöglichkeiten in den Bereichen Energie, Verkehr, Siedlungsentwicklung und Freiraum. Diplomarbeit am Department Stadtplanung der Hafencity Universität Hamburg, Hamburg, 2009.*
- [Shaw et al. 2009] *Shaw, R.; Attree, M.; Jackson, M.; Kay, M.: The value of reducing distribution losses by domestic load-shifting: a network perspective. Energy Policy (2009), 37, S. 3159–3167, Elsevier, Amsterdam, 2009.*
- [Siemens 2013] *Siemens: Stetige Leistungsregelung im Kältekreislauf, Frankfurt, 2013, www.hqs.sbt.siemens.com/gip/general/dlc/data/assets/de/Stetige-Leistungsregelung-im-Kaeltekreislauf_A6V10327356_de-de.pdf; Zugriff am 20.11.2013.*
- [Silvestro et al. 2013] *Silvestro, F.; Baitech, A.; Pilo, F.; Bak Jensen, B.; Fan, Mingtian, Pisano, Giuditta; Georgilakis, P.; Hatziargyiou, N.; Petretto, G.: Demand Side Integration Aspects In Active Distribution Planning, 22nd CIRED Conference Proceedings Stockholm, IEEE, 2013.*
- [Stadler 2001] *Stadler, I.: Dialogfähige Energiemanagementsysteme im Kontext von Energieverbrauch und Nutzerverhalten. Dissertation. Berlin, Kassel, 2001.*
- [Stadler 2006] *Stadler, I.: Demand response: Nichtelektrische Speicher für Elektrizitätsversorgungssysteme mit hohem Anteil erneuerbarer Energien. Univ. Kassel, Habil.-Schrift, Kassel, 2006.*
- [Stadler et al. 2009] *Stadler, M.; Krause, W.; Sonnenschein, M.; Vogel, U.: Modelling and evaluation of control schemes for enhancing load shift of electricity demand for cooling devices. Environmental Modelling & Software 24 (2009), 2, S. 285–295, Elsevier, Amsterdam, 2009.*
- [Steudle & Witke 2012] *Steudle, G.; Witke, T.: Einrichtung von Alkis in Deutschland – Ziele und Erfahrungen Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement ZfV, Vol. 137, Jg. 4/2012 (2012), S. 217–223, Wißner-Verlag, Augsburg, 2012.*
- [Stötzer 2012] *Stötzer, M.: Demand Side Integration in elektrischen Verteilnetzen: Potenzialanalyse und Bewertung. Univ., Fak. für Elektrotechnik und Informationstechnik, Dissertation Otto-von-Guericke-Univ., Magdeburg, 2012.*
- [Strese 2003] *Strese, J.: Das virtuelle Regelkraftwerk. In: Zeitschrift für Energie, Markt und Wettbewerb E/M/W, Juni 2003, Energate, Essen, 2003.*

- Online unter http://power-saar.steag-saarenergie.de/de/02_Leistungen/pdf/Das-virtuelle-Regelkraftwerk_emw_062003.pdf; Zugriff am 09.09.2013.
- [Stromnetz HH 2013] *Stromnetz HH: Stromnetz Hamburg GmbH: Netzentgelte und weitere Entgeltbestandteile Entgelte für Lastprofilkunden, Hamburg, 2013. <http://www.stromnetz-hamburg.de/de/entgelte-netzzugang.htm>; Zugriff am 02.12.2013.*
- [StromNEV] *Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi): Stromnetzentgeltverordnung – Verordnung über die Entgelte für den Zugang zu Elektrizitätsversorgungsnetzen, Fundstellennachweis 752-6-3.*
- [StromNZV] *Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi): Verordnung über den Zugang zu Elektrizitätsversorgungsnetzen (Stromnetzzugangsverordnung), Fundstellennachweis 752-6-4.*
- [Swissgrid 2013] *Swissgrid: Die Netzfrequenz, 2013, <https://www.swissgrid.ch/content/swissgrid/de/home/experts/topics/frequency.html>; Zugriff am 12.07.2013.*
- [SysStabV 2012] *SysStbV: Verordnung zur Gewährleistung der technischen Sicherheit und Systemstabilität des Elektrizitätsversorgungsnetzes (Systemstabilitätsverordnung – SysStabV), 2012, Fundstellennachweis 752 - 6 - 15.*
- [Theobald et al. 2003] *Theobald, C.; Hummel, K.; Jung, C.; Müller-Kirchenbauer, J.; Nailis, D.; Zander, W.: Gutachten zu Kosten der Beschaffung und Abrechnung von Regel- und Ausgleichsenergie mit Blick auf die kartellrechtliche Angemessenheit der Netznutzungsentgelte der RWE Net AG: Gutachten im Auftrag der Stadtwerke Lippstadt, BET Aachen, Aachen, 2003.*
- [Tiba et al. 2010] *Tiba, C.; Candeias, A.; Fraidenraich, N.; de S. Barbosa, E.M.; de Carvalho Neto, P.B.: A GIS-based decision support tool for renewable energy management and planning in semi-arid rural environments of northeast of Brazil. In: Renewable Energy 35 (2010), S. 2921-2932, Elsevier, Amsterdam, 2010.*
- [Torriti et al. 2010] *Torriti, J.; Hassan, M. G.; Leach, M.: Demand response experience in Europe: Policies, programmes and implementation. Energy 35 (2010), 4, S. 1575–1583, Elsevier, Amsterdam, 2010.*
- [UCTE 2004a] *UCTE: Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity: Introduction to the UCTE Operation Handbook, 2004; https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/_library/publications*

/ce/oh/consultation/081120_UCTE_OH_Consultation_Introduction.pdf Zugriff am 11.07.2013.

- [UCTE 2004b] *UCTE: Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity: UCTE Operation Handbook, Appendix 1: Load Frequency Control and Performance, 2004;*
https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/_library/publications/entsoe/Operation_Handbook/Policy_1_Appendix%20_final.pdf,
Zugriff am 11.07.2013.
- [UCTE 2004c] *UCTE: Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity: UCTE Operation Handbook, Policy 1: Load Frequency Control and Performance, 2004;* <https://www.entsoe.eu/publications/system-operations-reports/operation-handbook/Pages/default.aspx>,
Zugriff am 27.01.2015.
- [Van Hoesen & Letendre 2010] *Van Hoesen, J.; Letendre, S.: Evaluating potential renewable energy resources in Poultney, Vermont: A GIS-based approach to supporting rural community energy planning. In: Renewable Energy 35 (2010), S.: 2114-2122, Elsevier, Amsterdam, 2010.*
- [VDN] *VDN: Verband der Netzbetreiber, et al.: Verbändevereinbarung über Kriterien zur Bestimmung von Netznutzungsentgelten für elektrische Energie und über Prinzipien der Netznutzung: VV II+, <http://www.iwr.de/re/eu/recht/VVIIplus.pdf>;*
Zugriff am 03.09.2013.
- [VDI 3807-2: 1998] *Verein Deutscher Ingenieure: Energie- und Verbrauchskennwerte für Gebäude – Heizenergie- und Stromverbrauchskennwerte: VDI 3807-2. Beuth, Berlin, 1998.*
- [VDI 3807-4: 2008] *Verein Deutscher Ingenieure: Energie- und Verbrauchskennwerte für Gebäude – Teilkennwerte elektrische Energie: VDI 3807-4. Beuth, Berlin, 2008.*
- [VDI 3807-1: 2013] *Verein Deutscher Ingenieure: Energie- und Verbrauchskennwerte für Gebäude – Grundlagen: VDI 3807-1. Beuth, Berlin, 2013.*
- [VIK 2004] *VIK: Verband der Industriellen Energie- und Kraftwerkswirtschaft: Statistik der Energiewirtschaft, Verlag Energieberatung, Essen, 2004.*
- [Vuthi 2010] *Vuthi, P. P.: Design und Implementierung eines übergeordneten Reglers für ein Modell eines Netzwerkes von Lastmanagement-Anlagen in MATLAB/Simulink. Diplomarbeit an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Hamburg, 2010.*
- [Walawalkar et al. 2010] *Walawalkar, R.; Fernands, S.; Thakur, N.; Chevva, K. R.: Evolution and current status of demand response (DR) in electricity markets:*

- Insights from PJM and NYISO. *Energy* 35 (2010), 4, S. 1553–1560, Elsevier, Amsterdam, 2010.
- [Walser & Wagner 2011] *Walser, M.; Wagner, F.: UCTE: The 50 Year Success Story – Evolution of a European Interconnected Grid*, Lenzburg, Schweiz, 2011, <https://www.entsoe.eu/publications/former-associations/ucte/>; Zugriff am 11.07.2013.
- [Weber et al. 1999] *Weber, L.; Menti, U.-P.; Keller, I.: Energieverbrauch von Bürogebäuden: Studie im Auftrag des Bundesamts für Energie der Schweiz*, Bern, 1999.
- [Witkowski & Wertz 2011] *Witkowski, C.; Wertz, I.: Ersteinrichtungskosten von Hochschul- und Forschungsgebäuden: Teil 1: Institutsgebäude für Geisteswissenschaften, Naturwissenschaften, Strukturwissenschaften und Maschinenbau sowie Hochschul-Verwaltungsgebäude*, Hochschul Informations System HIS, Hannover, 2011, http://www.his.de/pdf/pub_fh/fh-201120.pdf; Zugriff am 17.11.2013.
- [Yeo et al. 2013] *Yeo, I.-A.; Yoon, S.-H.; Yee, J.-J.: Development of an urban energy demand forecasting system to support environmentally friendly urban planning*. In: *Applied Energy* 110 (2013), S. 304.317, Elsevier, Amsterdam, 2013.
- [Yu et al. 2012] *Yu, D.; Tan, H.; Ruan, Y.: An improved two-step floating catchment area method for supporting district building energy planning: A case study of Yongding County city, China*. In: *Applied Energy* Vol. 95 (2012), S. 156-163, Elsevier, Amsterdam, 2013.
- [Zeine et al. 2000] *Zeine, C.; Gebhardt, M.; Sajonz, M.; Dufhues, H.; Letmathe, O.: Verbrauchskennwerte 1999: Energie- und Wasserverbrauchskennwerte in der Bundesrepublik Deutschland* Forschungsbericht der ages GmbH. Forschungsbericht der ages GmbH, gefördert durch die Bundesstiftung Umwelt, Münster, 2000.
- [Zeine et al. 2007] *Zeine, C.; Gebhardt, M.; Bockting, B.; Mantai, A.; Wei, J. P.: Energie- und Wasserverbrauchskennwerte in der Bundesrepublik Deutschland: Forschungsbericht der ages GmbH*. Gefördert durch die Bundesstiftung Umwelt, Münster, 2007.

9 Anhänge

9.1 Daten zu den Gebäuden in „Insel“

Insel ID 01a: Ein großer geisteswissenschaftlicher Universitätscampus

Beschreibung	Verbraucher-ID	Unterstation	Nennleistung	tat. Leistung	Einsparleistung	Priorität	min. Laufzeit	max. Auszeit	min. Auszeit	Betriebszeiten (Tag, Woche, Jahreszeiten)
			kW	kW			min.	min.	min.	
Küchengeräte	1.001.001	1	84	33,6	13,4	1	3	2	1	
Küchengeräte	1.001.002	1	76	30,4	7,6	1	3	1	1	
Lüftung	1.001.003	1	98	78,2	36,5	1	8	7	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Lüftung	1.001.004	1	4	3,0	1,6	2	7	8	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Lüftung	1.002.001	2	46	37,0	17,3	2	8	7	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Boiler	1.002.002	2	222	88,8	44,4	2	3	3	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Lüftung	1.002.003	2	26	20,8	13,9	3	5	10	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Lüftung	1.002.004	2	27	21,6	14,4	3	5	10	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Lüftung	1.003.001	3	12	9,5	6,3	3	5	10	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Lüftung	1.003.002	3	25	20,0	13,3	4	5	10	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Lüftung	1.003.003	3	40	32,0	21,3	4	5	10	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Lüftung	1.003.004	3	32	25,6	17,1	4	5	10	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Lüftung	1.004.001	4	30	23,6	15,7	5	5	10	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Lüftung	1.004.002	4	43	34,4	22,9	5	5	10	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Kältemaschinen	1.004.003	4	249	198,8	106,0	8	7	8	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00

9 Anhänge

Kälte- maschinen	1.004.004	4	331	264,8	141,2	8	7	8	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Lüftung	1.005.001	5	18	14,1	6,6	5	8	7	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Lüftung	1.005.001	5	77	61,8	12,4	6	12	3	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Lüftung	1.005.001	5	29	23,0	4,6	6	12	3	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Lüftung	1.005.001	5	41	33,0	6,6	6	12	3	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Lüftung	1.006.001	6	34	27,0	5,4	6	12	3	1	Mo. - Fr. 07:00 -15:00
Lüftung	1.006.002	6	72	57,3	11,5	7	12	3	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Lüftung	1.006.003	6	48	38,6	20,6	7	7	8	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Lüftung	1.006.004	6	50	40,2	21,4	7	7	8	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Küchengeräte	1.007.001	7	36	14,4	3,6	7	3	1	1	
Kühlgeräte	1.007.002	7	17	1,4	0,7	8	7	8	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Kälte- maschine	1.007.003	7	30	24,0	12,8	8	7	8	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Heizungs- pumpen	1.007.004	7	8	6,6	5,6	8	1	6	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Kühlgeräte	1.008.001	8	54	4,3	2,3	8	7	8	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Wärme- geräte	1.008.002	8	20	16,0	14,9	8	1	14	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Luft- kompressoren	1.008.003	8	15	12,0	5,6	8	8	7	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Kühlgeräte	1.008.004	8	59	4,7	2,5	8	7	8	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Heizungs- pumpen	1.009.001	9	14	11,0	5,9	1	7	8	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00

	Lüftung gesamt:	751
	Kühlung gesamt:	710

Tabelle 9-1: Auflistung der in Insel erhobenen Daten eines geisteswissenschaftlichen Universitätscampus (ID 01a).

9 Anhänge

Insel ID 01b: Ein großer naturwissenschaftlicher Universitätscampus

Beschreibung	Verbraucher-ID	Unterstation	Nennleistung	tat. Leistung	Einsparleistung	Priorität	min. Laufzeit	max. Auszeit	min. Auszeit	Betriebszeiten (Tag, Woche, Jahreszeiten)
			kW	kW			min.	min.	min.	
Luftbefeuchter	1.009.002	9	42	33,6	0,0	1	0	0	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Lüftung	1.009.003	9	6	5,0	3,3	1	5	10	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Kältem.	1.009.004	9	116	92,8	49,5	8	7	8	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Lüftung	1.010.001	10	9	6,8	4,5	2	5	10	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Lüftung	1.010.002	10	24	19,4	12,9	2	5	10	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Lüftung	1.010.003	10	8	6,4	4,3	2	5	10	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Lüftung	1.010.004	10	20	16,0	13,7	3	1	6	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Lüftung	1.011.001	11	18	14,0	9,3	3	5	10	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Boiler	1.011.002	11	18	7,2	0,0	3	1	0	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Trockenschr.	1.011.003	11	800	640,0	0,0	2	1	0	1	
Trockenschr.	1.011.004	11	252	201,6	0,0	2	1	0	1	
Kühlgeräte	1.012.001	12	29	2,3	1,5	8	5	10	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Lüftung	1.012.002	12	14	10,8	7,2	4	5	10	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Lüftung	1.012.003	12	10	7,7	5,1	4	5	10	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Lüftung	1.012.004	12	15	12,2	8,1	4	5	10	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Lüftung	1.013.001	13	12	9,6	6,4	5	5	10	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Lüftung	1.013.002	13	12	9,6	6,4	5	5	10	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00

9 Anhänge

Lüftung	1.013.003	13	9	7,2	4,8	6	5	10	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Lüftung	1.013.004	13	8	6,0	4,0	6	5	10	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Kältem.	1.014.001	14	89	71,2	38,0	8	7	8	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Kältem.	1.014.002	14	120	96,0	51,2	8	7	8	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Hebeanlagen	1.014.003	14	17	13,2	7,0	7	7	8	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
Lüftung	1.014.004	14	4	3,0	0,6	7	12	3	1	Mo. - So. 0:00 - 24:00
	Lüftung gesamt:		167							
	Kühlung gesamt:		325							

Tabelle 9-2: Auflistung der in Insel erhobenen Daten eines naturwissenschaftlichen Universitätscampus (ID 01b).

9 Anhänge

Insel ID 06: Ingenieurwissenschaftlicher Campus der Hochschule für angewandte Wissenschaften (HAW)

Beschreibung	Verbraucher-ID	Unterstation	Nennleistung	tat. Leistung	Einsparleistung	Priorität	min. Laufzeit	max. Auszeit	min. Auszeit	Betriebszeiten (Tag, Woche, Jahreszeiten)
			kW	kW			min.	min.	min.	
Kessel 1	DIO44 K1_3	1	36	28,8	14,4	1	2	2	1	Mo. - So. 08:00 - 24:00
Kessel 2	DIO44 K1_2	1	36	28,8	14,4	2	2	2	1	Mo. - So. 09:00 - 24:00
Kessel 3	DIO44 K1_1	1	14	10,8	5,4	1	2	2	1	Mo. - So. 10:00 - 24:00
Kessel 4	DIO44 K1_0	1	14	10,8	5,4	2	2	2	1	Mo. - So. 11:00 - 24:00
Kessel 5	DIO44 K2_2	2	48	38,4	19,2	1	2	2	1	Mo. - So. 12:00 - 24:00
Kessel 6	DIO44 K2_3	2	8	6,4	3,2	2	2	2	1	Mo. - So. 13:00 - 24:00
Elektro Herd	DIO44 K2_0	2	8	6,4	3,2	2	1	1	1	Mo. - So. 08:00 - 12:00
Kombi-dämpfer	DIO44 K2_1	2	46	36,8	9,2	6	3	1	1	Mo. - So. 08:00 - 12:00
Kippbratpfanne 1	DIO44 K3_0	3	14	10,8	5,4	2	2	2	1	Mo. - So. 08:00 - 12:00
Kippbratpfanne 2	DIO44 K3_1	3	14	10,8	5,4	3	2	2	1	Mo. - So. 08:00 - 12:00
Lüftung Küche 1	LSC Hub01 00	4	20	16,0	5,3	6	10	5	3	Mo. - So. 06:00 - 17:00
Lüftung Kaffeeshop 2	LSC Hub01 01	4	20	16,0	5,3	5	10	5	3	Mo. - So. 06:00 - 17:00
Lüftung Mensa 3	LSC Hub01 02	4	20	16,0	4,3	4	11	4	3	Mo. - So. 06:00 - 17:00

9 Anhänge

Lüftung Bibliothek	4	LSC Hub01 03	4	20	16,0	4,3	4	11	4	3	Mo. - So. 06:00 - 17:00
Lüftung Hauptlüftung	5a	LSC Hub01 04	4	55	44,0	14,7	3	10	5	3	Mo. - So. 06:00 - 17:00
Lüftung Hauptlüftung	5b	LSC Hub01 05	4	55	44,0	14,7	3	10	5	3	Mo. - So. 06:00 - 17:00
Lüftung Hauptlüftung	6a	LSC Hub01 06	4	37	29,6	7,9	5	11	4	3	Mo. - So. 06:00 - 17:00
Lüftung Hauptlüftung	6b	LSC Hub01 07	4	37	29,6	7,9	5	11	4	3	Mo. - So. 06:00 - 17:00
Lüftung Hauptlüftung	7a	LSC Hub02 00	5	75	60,0	20,0	4	10	5	3	Mo. - So. 06:00 - 17:00
Lüftung Hauptlüftung	7b	LSC Hub02 01	5	75	60,0	20,0	4	10	5	3	Mo. - So. 06:00 - 17:00
Lüftung Traforaum		LSC Hub02 02	5	10	8,0	2,1	8	11	4	3	Mo. - So. 06:00 - 17:00
Lüftung Umluftkühler	1165	LSC Hub02 03	5	4	3,2	0,9	3	11	4	3	Mo. - So. 06:00 - 17:00
Lüftung Umluftkühler	1105	LSC Hub02 04	5	4	3,2	1,1	3	10	5	3	Mo. - So. 06:00 - 17:00
Lüftung Umluftkühler	110G.	LSC Hub02 05	5	4	3,2	1,1	3	10	5	3	Mo. - So. 06:00 - 17:00
Kälte K2		LSC Hub02 06	5	600	480,0	128,0	5	11	4	3	Mo. - So. 06:00 - 17:00
Lüftung DG	Kälte	LSC Hub03 00	6	10	8,0	2,1	4	11	4	3	Mo. - So. 07:00 - 17:00

	Lüftung gesamt:	446
	Kühlung gesamt:	600

Tabelle 9-3: Auflistung der in Insel erhobenen Daten eines Ingenieurwissenschaftlichen Campus der Hochschule für angewandte Wissenschaften (HAW) (ID 06).

ID 10: Kleinerer naturwissenschaftlicher Campus der Universität

Beschreibung	Verbraucher-ID	Unterstation	Nennleistung	tat. Leistung	Einsparleistung	Priorität	min. Laufzeit	max. Auszeit	min. Auszeit	Betriebszeiten (Tag, Woche, Jahreszeiten)
			kW	kW			min.	min.	min.	
Küchengeräte	10.001.001	1	61	39,0	9,8	1	3	1	1	Mo. - Fr. 07:00 - 15:00
Küchengeräte	10.001.002	1	80	51,2	12,8	1	3	1	1	Mo. - Fr. 07:00 - 15:00
Küchengeräte	10.001.003	1	41	26,2	10,5	2	3	2	1	Mo. - Fr. 07:00 - 15:00
Küchengeräte	10.001.004	1	110	70,4	28,2	2	3	2	1	Mo. - Fr. 07:00 - 15:00
Küchengeräte	10.002.001	2	60	38,4	15,4	3	3	2	1	Mo. - Fr. 07:00 - 15:00
Küchengeräte	10.002.002	2	130	83,2	33,3	3	3	2	1	Mo. - Fr. 07:00 - 15:00
Kältemaschinen	10.002.003	2	41	32,8	20,2	8	5	8	4	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Kältemaschinen	10.002.004	2	37	29,6	18,2	8	5	8	4	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Heizungspumpen	10.003.001	3	50	40,0	20,0	4	3	3	1	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Luftkompressor	10.003.002	3	37	29,6	13,5	4	6	5	2	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Lüftung	10.003.003	3	19	15,2	9,1	5	4	6	2	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Lüftung	10.003.004	3	59	47,2	27,5	5	5	7	2	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Lüftung	10.004.001	4	27	21,6	13,0	6	4	6	2	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Lüftung	10.004.002	4	11	8,8	5,1	6	5	7	2	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Lüftung	10.004.003	4	12	9,6	5,5	7	6	8	2	Mo. - So. 00:00 - 24:00

9 Anhänge

Lüftung	10.004.004	4	15	12,0	6,9	7	6	8	2	Mo. - So. 00:00 - 24:00
	Lüftung gesamt:		143							
	Kühlung gesamt:		78							

Tabelle 9-4: Auflistung der in Insel erhobenen Daten eines kleinen naturwissenschaftlichen Universitätscampus (ID 10).

Insel ID 16: Ingenieurwissenschaftlicher Campus der Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW)

Beschreibung	Verbraucher-ID	Unterstation	Nennleistung	tat. Leistung	Einsparleistung	Priorität	min. Laufzeit	max. Auszeit	min. Auszeit	Betriebszeiten (Tag, Woche, Jahreszeiten)
			kW	kW			min.	min.	min.	
Grundwasser Pumpe1	16.001.001	1	10	2,3	1,8	1	3	12	5	0h-24h, 10 minuten je stunde, 5 minuten Laufzeit
Lüft. Halle 1	16.002.001	2	13	8,8	7,9	2	5	45	5	Mo. - Fr. 07:30 - 15:00
Lüft. Halle 2	16.002.002	2	13	8,8	7,9	2	5	45	5	Mo. - Fr. 07:30 - 15:00
Lüft. Halle 3	16.003.001	3	13	8,8	7,9	2	5	45	5	Mo. - Fr. 07:30 - 15:00
Lüft. Halle 4	16.003.002	3	3	8,8	7,9	2	5	45	5	Mo. - Fr. 07:30 - 15:00
Lüft. Seminarräume	16.004.001	4	9	2,4	1,6	4	5	10	5	Mo. - Fr. 07:30 - 15:00
Lüft. Hörsaal 20-22	16.003.003	3	18	16,0	10,7	4	5	10	5	Mo. - Fr. 07:30 - 15:00
Lüft. Hörsaal 22-24	16.003.004	3	10	8,8	5,9	4	5	10	5	Mo. - Fr. 07:30 - 15:00
Lüft. Hörsaal 0.70	n.v.	3	3	n.v.	n.v.	4	5	10	5	Mo. - Fr. 07:30 - 15:00
Lüft. Bibliothek EG	16.004.002	4	11	n.v.	n.v.	3	5	10	5	Mo. - Fr. 07:30 - 15:00
Lüft Bibliothek ZwG	16.004.003	4	16	6,4	4,3	3	5	10	5	Mo. - Fr. 07:30 - 15:00
Lüft. Mensa EG	16.005.001	5	15	4,0	2,7	4	5	10	5	Mo. - Fr. 07:30 - 15:00

9 Anhänge

Lüft. Mensa ZwG	16.005.002	5	15	4,0	2,7	4	5	10	5	Mo. - Fr. 07:30 - 15:00
Kälteanlage 1	16.006.001	6	65	52,0	26,0	30	15	15	5	Mo. - Fr. 07:30 - 15:00
Lüft Hörsaal 15- 17	16.004.004	4	8	10,4	6,9	4	5	10	5	Mo. - Fr. 07:30 - 15:00
Kälteanlage 2	16.006.002	6	65	52,0	26,0	30	15	15	5	Mo. - Fr. 07:30 - 15:00
Kochkessel 80l	16.007.001	7	14	11,2	2,2	3	4	1	1	Mo. - Fr. 09:00 - 14:00
Kochkessel 60l	16.007.002	7	14	11,2	2,2	3	4	1	1	Mo. - Fr. 09:00 - 14:00
Kochkessel 40l	16.007.003	7	14	11,2	2,2	3	4	1	1	Mo. - Fr. 09:00 - 14:00
Kochkessel 4	16.007.004	7	14	11,2	2,2	3	4	1	1	Mo. - Fr. 09:00 - 14:00
Kochkessel 5	16.008.001	8	14	11,2	2,2	3	4	1	1	Mo. - Fr. 09:00 - 14:00
6-Plattenherd	16.008.002	8	15	12,0	2,4	3	4	1	1	Mo. - Fr. 09:00 - 14:00
Kipp- bratpfannen	16.008.003	8	28	0,0	0,0	8	4	1	1	Mo. - Fr. 09:00 - 14:00
Kombi-dämpfer 1	16.008.004	8	61	0,0	0,0	8	3	2	1	Mo. - Fr. 09:00 - 14:00
Geschirrsp. 1	16.009.001	9	52	0,0	0,0	8	2	3	1	Mo. - Fr. 09:00 - 14:00
Tellerwärmer	16.009.002	9	7	5,6	1,1	3	4	1	1	Mo. - Fr. 09:00 - 14:00
Kombidämpfer	16.009.003	9	30	0,0	0,0	8	3	2	1	Mo. - Fr. 09:00 - 14:00
Geschirrsp. 2	16.009.004	9	36	0,0	0,0	8	4	1	1	Mo. - Fr. 09:00 - 14:00
Lüft . Küche	n.v.	n.v.	9	n.v.	n.v.	3	4	1	1	Mo. - Fr. 09:00 - 14:00
Lüft . Toiletten	n.v.	n.v.	3	n.v.	n.v.	3	4	1	1	Mo. - Fr. 09:00 - 14:00
Lüft . Werkstatt	n.v.	n.v.	9	n.v.	n.v.	3	5	10	5	Mo. - Fr. 07:30 - 15:00

9 Anhänge

Lüft . Garage	n.v.	n.v.	31	n.v.	n.v.	3	5	45	5	Mo. - Fr. 07:30 - 15:00
Lüft . Keller	n.v.	n.v.	7	n.v.	n.v.	3	5	45	5	Mo. - Fr. 07:30 - 15:00
Lüft Labore	n.v.	n.v.	100	n.v.	n.v.	4	5	10	5	Mo. - Fr. 07:30 - 15:00
	Lüftung gesamt:		305							
	Kühlung gesamt:		130							

Tabelle 9-5: Auflistung der in Insel erhobenen Daten eines Ingenieurwissenschaftlichen Campus der Hochschule für angewandte Wissenschaften (HAW) (ID 16).
n.v.: nicht vergeben

Insel ID 23: Kleinerer naturwissenschaftlicher Campus der Universität

Beschreibung	Verbraucher-ID	Unterstation	Nennleistung	tat. Leistung	Einsparleistung	Priorität	min. Laufzeit	max. Auszeit	min. Auszeit	Betriebszeiten (Tag, Woche, Jahreszeiten)
			kW	kW			min.	min.	min.	
Kälteanlage Geb. 11 B+C	23.001.001	1	37	29,6	19,7	5	5	10	3	Mo. - So. 07:00 - 17:00
Kompressor Druckluft	23.001.002	1	17	3,5	1,7	3	8	8	3	Mo. - So. 07:00 - 17:00
Kompressor Heliumbereitung	23.001.003	1	24	19,2	9,6	4	8	8	3	Mo. - So. 07:00 - 17:00
Kompressor Heliumbereitung	23.002.001	2	19	14,8	7,4	2	8	8	3	Mo. - So. 07:00 - 17:00
Kompressor Heliumbereitung	23.002.002	2	15	12,0	6,0	1	8	8	3	Mo. - So. 07:00 - 17:00
	Lüftung gesamt:		0							
	Kühlung gesamt:		37							

Tabelle 9-6: Auflistung der in Insel erhobenen Daten eines kleinen naturwissenschaftlichen Universitätscampus (ID 23).

Insel ID 28: Naturwissenschaftliches Experimental-Institut der Universität

Beschreibung	Verbraucher-ID	Unterstation	Nennleistung	tat. Leistung	Einsparleistung	Priorität	min. Laufzeit	max. Auszeit	min. Auszeit	Betriebszeiten (Tag, Woche, Jahreszeiten)
			kW	kW			min.	min.	min.	
Klimagerät f. Labore	28.001.001	1	8	6,6	4,1	5	5	8	4	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Klimagerät f. Erdgeschoss	28.002.002	2	5	4,1	2,5	1	6	9	3	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Kompressor Druckluft Werkstatt	28.003.001	3	11	2,1	0,7	7	10	5	3	
Kälteanlage (Kompressor)	28.004.001	4	1	1,2	0,5	2	9	6	3	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Lüftermotor Ab DUHM und UKE	28.004.002	4	4	3,2	1,9	1	4	6	2	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Lüftermotor Zu DUHM und UKE	28.004.003	4	1	0,6	0,4	1	4	6	2	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Nacherhitzer Lüftung	28.004.004	4	23	18,1	10,9	3	4	6	2	Mo. - So. 05:00 - 17:00
Kaltwasserpumpe	28.005.001	5	2	1,8	1,1	5	5	8	4	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Kompressor Druckluft UKE u. Werkstatt	28.005.002	5	15	2,9	1,0	7	10	5	3	

9 Anhänge

Lüftermotor Zu Kontrollraum UKE	28.005.003	5	1	0,6	0,2	3	9	6	3	Mo. - So. 06:00 - 17:00
Lüftermotor Ab Kontrollraum UKE	28.005.004	5	1	0,4	0,2	3	9	6	3	Mo. - So. 06:00 - 17:00
Lüftermotor Ab Gleichrichter- raum	28.006.001	6	1	0,9	0,4	1	6	6	2	Mo. - So. 06:00 - 17:00
Lüftermotor Zu Gleichrichter- raum	28.006.002	6	2	1,8	0,9	1	6	6	2	Mo. - So. 06:00 - 17:00
Trockner f. Kompressor	28.006.003	6	0	0,4	0,2	2	5	10	3	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Lüftermotor Zu Techn. Räume	28.006.004	6	3	2,4	1,4	3	4	6	2	Mo. - So. 05:00 - 17:00
Lüftermotor Ab Techn. Räume	28.007.001	7	1	0,6	0,4	3	4	6	2	Mo. - So. 05:00 - 17:00
Lüftermotor Zu Umkl. Räume	28.007.002	7	2	1,2	0,8	1	3	7	2	Mo. - So. 05:00 - 17:00
Lüftermotor Ab Umkl. Räume	28.007.003	7	1	0,6	0,4	1	3	7	2	Mo. - So. 05:00 - 17:00
Lüftermotor Zu Mediz. Räume	28.008.001	8	3	2,4	1,0	5	9	6	3	Mo. - So. 05:00 - 17:00
Lüftermotor Ab Mediz. Räume	28.008.002	8	2	1,8	0,7	5	9	6	3	Mo. - So. 05:00 - 17:00

9 Anhänge

Kälteanlage (Kompressor)	28.008.003	8	9	7,1	4,4	2	5	8	4	Nach Laborbedarf
Klimagerät f. Labore	28.009.001	9	0	0,3	0,1	6	11	4	3	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Umluftgerät f. Labore	28.010.001	10	2	1.8	0	5	11	4	3	Nach Laborbedarf
Umluftgerät f. Labore	28.010.002	10	2	1.8	0	5	11	4	3	Nach Laborbedarf
Umluftgerät f. Labore	28.010.003	10	4	3.6	0	5	11	4	3	Nach Laborbedarf
Umluftgerät f. Labore	28.010.004	10	4	3.6	0	5	11	4	3	Nach Laborbedarf
	Lüftung gesamt:		34							
	Kühlung gesamt:		27							

Tabelle 9-7: Auflistung der in Insel erhobenen Daten eines naturwissenschaftlichen Experimental-Institutes der Universität (ID 28).

Insel ID 31: Kleinerer Naturwissenschaftlicher Campus der Universität, Fachrichtung Informatik

Beschreibung	Verbraucher-ID	Unterstation	Nennleistung	tat. Leistung	Einsparleistung	Priorität	min. Laufzeit	max. Auszeit	min. Auszeit	Betriebszeiten (Tag, Woche, Jahreszeiten)
			kW	kW			min.	min.	min.	
Küchengeräte	31.001.001	1	30	19,2	7,7	1	3	2	1	Mo. - Fr. 07:00 - 15:00
Küchengeräte	31.001.002	1	24	15,4	6,1	2	3	2	1	Mo. - Fr. 07:00 - 15:00
Lüftermotoren	31.002.001	2	30	24,0	16,0	1	5	10	2	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Küchengeräte	31.002.002	2	12	7,7	1,9	3	3	1	1	Mo. - Fr. 07:00 - 15:00
Pumpstation	31.003.001	3	70	44,8	29,9	1	5	10	1	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Küchengeräte	31.003.002	3	18	11,5	2,9	4	3	1	1	Mo. - Fr. 07:00 - 15:00
Küchengeräte	31.004.001	4	18	11,5	2,9	3	3	1	1	Mo. - Fr. 07:00 - 15:00
Kälteanlage	31.004.002	4	28	22,4	14,9	4	5	10	1	Mo. - So. 00:00 - 24:00
	Lüftung gesamt:		30							
	Kühlung gesamt:		28							

Tabelle 9-8:Auflistung der in Insel erhobenen Daten eines kleinen naturwissenschaftlichen Universitätscampus, der Fachrichtung Informatik (ID 31).

9 Anhänge

Insel ID 08: Ein großes Verwaltungsgebäude der Behörde für Inneres

Beschreibung	Verbraucher-ID	Unterstation	Nennleistung	tat. Leistung	Einsparleistung	Priorität	min. Laufzeit	max. Auszeit	min. Auszeit	Betriebszeiten (Tag, Woche, Jahreszeiten)
			kW	kW			min.	min.	min.	
Kälte 1	8.001.001	1	158	126,4	77,8	4	5	8	4	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Kälte 2	8.001.002	1	158	126,4	77,8	3	5	8	4	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Kälte 3	8.001.003	1	158	126,4	77,8	2	5	8	4	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Lüftung 5 zu	8.002.001	2	15	12,0	7,2	2	4	6	2	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Lüftung 5 ab	8.002.002	2	11	8,8	5,3	2	4	6	2	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Lüftung 5 Dampf	8.002.003	2	38	30,4	0,0	2	4	0	2	
Lüftung 4 zu	8.003.001	3	15	12,0	7,0	3	5	7	2	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Lüftung 4 ab	8.003.002	3	11	8,8	5,1	3	5	7	2	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Lüftung 4 Dampf	8.003.003	3	38	30,4	0,0	3	5	0	3	
Lüftung 3 zu	8.004.001	4	15	12,0	6,9	4	6	8	2	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Lüftung 3 ab	8.004.002	4	11	8,8	5,0	4	6	8	2	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Lüftung 3 D.	8.004.003	4	38	30,4	0,0	4	6	0	2	
Lüftung 2 zu	8.005.001	5	15	12,0	7,2	1	4	6	2	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Lüftung 2 ab	8.005.002	5	11	8,8	5,3	1	4	6	2	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Lüftung 2 D.	8.005.003	5	38	30,4	0,0	1	4	0	2	
Lüftung 1 zu	8.006.001	6	15	12,0	7,2	6	8	12	2	Mo. - So. 00:00 - 24:00

9 Anhänge

Lüftung 1 ab	8.006.002	6	11	8,8	5,3	6	8	12	2	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Lüftung 1 D.	8.006.003	6	43	34,4	0,0	6	8	0	2	
Lüftung 6 zu	8.070.001	7	5	4,0	2,3	5	5	7	2	Mo. - So. 06:00 - 18:00
Lüftung 6 ab	8.070.002	7	5	4,0	2,3	5	5	7	2	Mo. - So. 06:00 - 18:00
Lüftung 7 zu	8.070.003	7	8	6,4	3,8	5	4	6	2	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Lüftung 7 ab	8.070.004	7	8	6,4	3,8	5	4	6	2	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Lüftung 8 zu	8.008.001	8	5	4,0	2,3	2	7	9	2	Mo. - So. 06:00 - 18:00
Lüftung 8 ab	8.008.002	8	5	4,0	2,3	2	7	9	2	Mo. - So. 06:00 - 18:00
div Heizungsp.	8.008.003	8	30	19,2	9,6	1	3	3	1	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Küchenzuluft	8.009.001	9	4	3,2	1,9	7	4	6	2	Mo. - So. 05:30 - 14:00
Küchenabluft	8.009.002	9	4	3,2	1,9	7	4	6	2	Mo. - So. 05:30 - 14:00
Druckbraiserie	8.010.001	10	18	7,4	1,2	7	10	2	2	Mo. - So. 06:30 - 12:00
Druckbraiserie	8.010.002	10	18	7,4	1,1	7	11	2	1	Mo. - So. 06:30 - 12:00
Wasserbad fahrbar	8.010.003	10	3	2,6	1,0	7	3	2	1	Mo. - So. 06:30 - 12:00
Herd Glask.	8.010.004	10	20	16,0	10,7	7	1	2	1	Mo. - So. 06:30 - 12:00
Grillplatte	8.011.001	11	8	3,2	2,1	7	1	2	1	Mo. - So. 06:30 - 12:00
Fritteuse	8.011.002	11	16	11,5	3,3	7	5	2	1	Mo. - So. 06:30 - 12:00
Fritteuse	8.011.003	11	16	11,5	3,3	7	5	2	1	Mo. - So. 06:30 - 12:00
Kochkessel 40l	8.011.004	11	13	10,4	6,9	7	1	2	1	Mo. - So. 06:30 - 12:00
Kochkessel 40l	8.012.001	12	13	10,4	6,9	7	1	2	1	Mo. - So. 06:30 - 12:00

9 Anhänge

Kochkessel 100l	8.012.002	12	16	12,8	8,5	7	1	2	1	Mo. - So. 06:30 - 12:00
Kochkessel 100l	8.012.003	12	16	12,8	8,5	7	1	2	1	Mo. - So. 06:30 - 12:00
Hochdruck- dämpfer	8.012.004	12	12	9,6	1,6	7	10	2	1	Mo. - So. 06:30 - 12:00
Hochdruck- dämpfer	8.013.001	13	12	9,6	1,6	7	10	2	1	Mo. - So. 06:30 - 12:00
Kombi-dämpfer	8.013.002	13	38	24,3	5,2	7	11	3	1	Mo. - So. 06:30 - 12:00
Kombi-dämpfer	8.013.003	13	38	24,3	5,2	7	11	3	1	Mo. - So. 06:30 - 12:00
Heißgetränke- automat	8.013.004	13	15	6,0	1,4	7	10	3	1	Mo. - So. 06:30 - 12:00
	Lüftung gesamt:		361							
	Kühlung gesamt:		474							

Tabelle 9-9: Auflistung der in Insel erhobenen Daten eines Verwaltungsgebäudes der Behörde für Inneres (ID 08)

Insel ID 14: Ein großes Verwaltungsgebäude einer Landesversicherung

Beschreibung	Verbraucher-ID	Unterstation	Nennleistung	tat. Leistung	Einsparleistung	Priorität	min. Laufzeit	max. Auszeit	min. Auszeit	Betriebszeiten (Tag, Woche, Jahreszeiten)
			kW	kW			min.	min.	min.	
Lüftung Zuluft L01	14.001.001	1	11	5,5	3,9	1	3	7	2	Mo. - Fr. 06:00 - 16:00
Lüftung Abluft L01	14.001.002	1	11	5,5	3,9	1	3	7	2	Mo. - Fr. 06:00 - 16:00
Lüftung Zuluft L02	14.002.001	2	15	7,5	5,6	2	3	9	2	Mo. - Fr. 06:00 - 16:00

9 Anhänge

Lüftung Abluft	L02	14.002.002	2	15	7,5	5,6	2	3	9	2	Mo. - Fr. 06:00 - 16:00
Lüftung Zuluft	L03	14.001.003	1	15	7,5	6,0	3	2	8	3	Mo. - Fr. 06:00 - 16:00
Lüftung Abluft	L03	14.001.004	1	15	7,5	6,0	3	2	8	3	Mo. - Fr. 06:00 - 16:00
Lüftung Zuluft	L04	14.005.001	5	2	0,9	0,6	4	3	7	2	Mo. - Fr. 06:00 - 16:00
Lüftung Zuluft	L04	14.005.002	5	2	0,9	0,6	4	3	7	2	Mo. - Fr. 06:00 - 16:00
Lüftung Abluft	L05	14.004.001	4	8	3,8	2,7	2	3	8	3	Mo. - Fr. 06:00 - 16:00
Lüftung Abluft	L05	14.004.002	4	8	3,8	2,7	2	3	8	3	Mo. - Fr. 06:00 - 16:00
Lüftung Abluft	L06	14.003.001	3	6	2,8	2,1	4	2	7	2	Mo. - Fr. 06:00 - 16:00
Lüftung Abluft	L06	14.003.002	3	6	2,8	2,1	4	2	7	2	Mo. - Fr. 06:00 - 16:00
Lüftung Abluft	L07	14.004.003	4	11	5,5	3,9	1	3	7	2	Mo. - Fr. 06:00 - 16:00
Lüftung Abluft	L07	14.004.004	4	11	5,5	3,9	1	3	7	2	Mo. - Fr. 06:00 - 16:00
Lüftung Abluft	L10	14.003.003	3	14	7,0	5,1	3	3	8	3	Mo. - Fr. 06:00 - 16:00

9 Anhänge

Lüftung L10 Abluft	14.003.004	3	14	7,0	5,1	3	3	8	3	Mo. - Fr. 06:00 - 16:00
Abgas-ventilator 1	14006001 (a+b)	6	27	21,6	16,2	2	3	9	2	Mo. - Fr. 07:00 - 08:45
Abgas-ventilator 2	14006002 (a+b)	6	27	21,6	16,2	2	3	9	2	Mo. - Fr. 14:30 - 16:00
Rampen-heizung	14007001 (a+b)	7	98	78,4	56,0	3	4	10	2	Mo. - Fr. 6:30 - 9:45 ; 12:45 - 16:00
Kälte-maschine 1	14.008.001	8	130	65,0	54,2	8	2	10	2	Mo. - Fr. 00:00 - 24:00
Kälte-maschine 2	14.008.002	8	130	65,0	54,2	8	2	10	2	Mo. - Fr. 00:00 - 24:00
Kälte-maschine 3	14.008.003	8	70	35,0	29,2	8	2	10	2	Mo. - Fr. 00:00 - 24:00
Kälte-maschine 4	14.008.004	8	70	35,0	29,2	8	2	10	2	Mo. - Fr. 00:00 - 24:00
Teichpumpe 1	14.009.001	9	6	4,4	4,1	1	1	14	1	Mo. - Fr. 00:00 - 24:00
Teichpumpe 2	14.009.002	9	3	2,4	2,2	1	1	14	1	Mo. - Fr. 00:00 - 24:00
Wäscher-pumpe	14.004.005	4	2	1,8	1,2	8	3	7	2	Mo. - Fr. 00:00 - 24:00
Kälte-maschine für Kühlräume 1	14.010.001	10	4	0,9	0,7	4	2	10	2	Mo. - Fr. 00:00 - 24:00

9 Anhänge

Kälte-maschine für Kühlräume 2	14.010.002	10	4	0,9	0,7	5	2	10	2	Mo. - Fr. 00:00 - 24:00
Kälte-maschine für Kühlräume 3	14.010.003	10	4	0,9	0,7	6	2	10	2	Mo. - Fr. 00:00 - 24:00
Kälte-maschine für Kühlräume 4	14.010.004	10	3	0,6	0,5	7	2	10	2	Mo. - Fr. 00:00 - 24:00
Schnell-kochtopf 1	14.011.001	11	30	21,6	10,8	1	1	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:30
Schnell-kochtopf 2	14.011.002	11	15	10,8	5,4	2	1	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:30
Schnell-kochtopf 3	14.011.003	11	14	10,2	5,1	3	1	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:30
Schnell-kochtopf 4	14.011.004	11	11	8,2	4,1	4	1	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:30
Kipp-bratpfanne 1	14.012.001	12	11	7,6	3,8	1	1	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:30
Kippbratpf. 2	14.012.002	12	16	11,7	5,8	2	1	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:30
Drucksteamer	14.012.003	12	15	10,8	5,4	3	1	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:30
Wärmestation 1	14.012.004	12	5	3,6	1,8	1	1	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:30
Wärmest. 2	14.013.001	13	5	3,6	1,8	2	1	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:30
Wärmest. 3	14.013.002	13	5	3,6	1,8	3	1	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:30

9 Anhänge

Kombi-dämpfer 1	14.013.003	13	37	26,4	13,2	4	1	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:30
Kombid. 2	14.013.004	13	19	13,7	6,8	5	1	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:30
Kombid. 3	14.014.001	14	19	13,7	6,8	8	1	1	1	
Warmhalte 1	14.014.002	14	2	1,4	0,7	1	1	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:30
Warmhalte 2	14.014.003	14	2	1,4	0,7	1	1	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:30
Warmhalte 3	14.014.004	14	2	1,4	0,7	1	1	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:30
Warmhalte 4	14.015.001	15	2	1,4	0,7	1	1	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:30
Warmhalte 5	14.015.002	15	2	1,4	0,7	1	1	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:30
Warmhalte 6	14.015.003	15	2	1,4	0,7	1	1	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:30
Friteuse 1	14.015.004	15	6	2,5	1,2	2	1	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:30
Friteuse 2	14.016.001	16	6	2,5	1,2	3	1	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:30
Friteuse 3	14.016.002	16	6	2,5	1,2	4	1	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:30
Friteuse 4	14.016.003	16	6	2,5	1,2	5	1	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:30
Band-spülmaschine	14.016.004	16	21	0,0	0,0	2	1	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:30
	Lüftung gesamt:		216							
	Kühlung gesamt:		400							

Tabelle 9-10: Auflistung der in Insel erhobenen Daten eines großen Verwaltungsgebäudes einer Landesversicherung(ID 14).

Insel ID 22: Verwaltungsgebäude einer nautischen Behörde

Beschreibung	Verbraucher-ID	Unterstation	Nennleistung	tat. Leistung	Einsparleistung	Priorität	min. Laufzeit	max. Auszeit	min. Auszeit	Betriebszeiten (Tag, Woche, Jahreszeiten)
--------------	----------------	--------------	--------------	---------------	-----------------	-----------	---------------	--------------	--------------	---

9 Anhänge

			kW	kW			min.	min.	min.	
Kältekompress or Kantine	22.001.001	1	15	12,0	8,6	7	2	5	1	Mo. - Fr. 07:00 - 17:00
Vario Streamer 1	22.001.001	1	15	9,6	6,4	5	1	2	1	Mo. - Fr. 07:00 - 17:00
Vario Streamer 2	22.001.001	1	15	9,6	6,4	6	1	2	1	Mo. - Fr. 07:00 - 17:00
Kombidämpf. Rational 1	22.001.001	1	18	11,8	5,9	5	1	1	1	Mo. - Fr. 07:00 - 17:00
Kombidämpf. Rational 2	22.002.001	2	18	11,8	5,9	6	1	1	1	Mo. - Fr. 07:00 - 17:00
Friteuse	22.002.002	2	12	7,7	5,1	8	1	2	1	Mo. - Fr. 07:00 - 17:00
Warmhalte- geräte, insgesamt 8 St.	22.003.001	3	2	1,6	1,3	5	1	5	1	Mo. - Fr. 07:00 - 17:00
Abluft Küche	22.004.001	4	11	8,8	5,3	4	2	3	1	Mo. - So. 07:00 - 17:00
Zuluft Küche	22.004.002	4	7	5,6	4,0	4	2	5	1	Mo. - So. 07:00 - 17:00
Abluft Speisesaal	22.005.001	5	2	1,6	1,1	2	2	4	1	Mo. - So. 07:00 - 17:00
Abluft Cafeteria	22.004.003	4	2	1,6	1,1	1	2	5	1	Mo. - So. 07:00 - 17:00
Zuluft Cafeteria	22.004.003	4	2	1,6	1,2	1	2	6	1	Mo. - So. 07:00 - 17:00
WILO Pumpe für RZ 1	22.006.001	6	6	4,4	2,7	3	5	8	4	Mo. - So. 00:00 - 24:00

9 Anhänge

WILO Pumpe für RZ 2	22.006.002	6	6	4,4	2,7	3	5	8	4	Mo. - So. 00:00 - 24:00
WILO Pumpe für RZ 3	22.006.003	6	6	4,4	1,8	2	10	7	4	Mo. - So. 00:00 - 24:00
WILO Pumpe für RZ 4	22.006.004	6	6	4,4	1,8	2	10	7	4	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Lüftung Rechenzentrum	22.007.001	7	50	40,0	16,5	3	10	7	4	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Kälte Rechenzentrum 1	22.003.001	7	64	51,2	31,5	3	5	8	4	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Kälte RZ 2	22.007.002	7	64	51,2	31,5	3	5	8	4	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Kälte Rechenzentrum 3	22.003.001	7	40	32,0	13,2	2	10	7	4	Mo. - So. 00:00 - 24:00
Kälte RZ 4	22.003.001	7	40	32,0	13,2	2	10	7	4	Mo. - So. 00:00 - 24:00
	Lüftung gesamt:		74							
	Kühlung gesamt:		208							

Tabelle 9-11: Auflistung der in Insel erhobenen Daten eines Verwaltungsgebäudes einer nautischen Behörde (ID 22).

9 Anhänge

Insel ID 43: Ein Verwaltungsgebäude einer Behörde für Stadtplanung

Beschreibung	Verbraucher-ID	Unterstation	Nennleistung	tat. Leistung	Einsparleistung	Priorität	min. Laufzeit	max. Auszeit	min. Auszeit	Betriebszeiten (Tag, Woche, Jahreszeiten)
			kW	kW			min.	min.	min.	
Kältekompressor	27.001.001	1	4	3,3	2,02	7	5	8	4	Mo. - Fr. 06:00 - 18:00
Kältekompressor	27.001.002	1	4	3,3	2,02	8	5	8	4	Mo. - Fr. 06:00 - 18:00
Kältekompressor	27.001.003	1	4	3,3	1,97	7	6	9	4	Mo. - Fr. 06:00 - 18:00
Lüft. Kopierer	27.002.001	2	5	3,7	2,21	1	4	6	2	Mo. - Fr. 06:00 - 18:00
Lüft. Kopierer	27.002.002	2	4	3,1	1,87	1	4	6	2	Mo. - Fr. 06:00 - 18:00
Lüftung Küche Zuluft	27.003.001	3	4	3,4	2,06	5	4	6	2	Mo. - Fr. 06:00 - 18:00 3 Stufen 1,4 / 2,3 / 6,6
Lüftung Küche Abluft	27.003.002	3	4	3,4	2,06	5	4	6	2	Mo. - Fr. 06:00 - 18:00 1,4 / 2,3 /
Kombidämpf. klein	27.004.001	4	10	6,4	2,13	7	2	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:00
Kombidämpf. mittel	27.004.002	4	19	12,2	4,05	7	2	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:00
Kippbratpfanne 3	27.001.018	4	14	9,2	3,07	5	2	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:00
Kombi-dämpfer groß	27.005.001	5	38	24,3	8,11	7	2	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:00

9 Anhänge

Wärmewagen 1	27.005.002	5	2	1,5	0,98	1	1	2	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:00
Wärmewagen 2	27.005.003	5	2	1,5	0,98	2	1	2	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:00
Wärmewagen 5	27.005.004	5	2	1,5	0,98	3	1	2	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:00
Wärmewagen 3	27.006.001	6	2	1,5	0,98	1	1	2	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:00
Wärmewagen 4	27.006.002	6	2	1,5	0,98	2	1	2	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:00
Tellerwagen 1	27.006.003	6	1	0,6	0,48	1	1	5	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:00
Tellerwagen 4	27.006.004	6	1	0,6	0,48	2	1	5	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:00
Friteuse 2	27.007.001	7	10	6,4	1,60	8	3	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:00
Tellerwagen 2	27.007.002	7	1	0,6	0,48	1	1	5	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:00
Tellerwagen 3	27.007.003	7	1	0,6	0,48	2	1	5	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:00
Mellita	27.007.004	7	10	6,1	2,43	2	3	2	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:00
E-Herd	27.008.001	8	19	12,4	4,14	5	2	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:00
Friteuse 1	27.008.002	8	10	6,4	1,60	8	3	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:00
Kipp- bratpfanne 1	27.009.001	9	14	9,2	3,07	4	2	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:00
Kipp- bratpfanne 2	27.009.002	9	14	9,2	3,07	5	2	1	1	Mo. - Fr. 06:00 - 13:00
Kälte- kompressor	27.010.001	10	4	1,6	0,68	7	10	7	4	Mo. - Fr. 06:00 - 18:00
Kältekomp.	27.010.002	10	4	1,6	0,68	7	10	7	4	Mo. - Fr. 06:00 - 18:00
Kältekomp...	27.010.003	10	4	1,6	0,68	8	10	7	4	Mo. - Fr. 06:00 - 18:00
Kältekomp.	27.010.004	10	4	1,6	0,68	8	10	7	4	Mo. - Fr. 06:00 - 18:00

9 Anhänge

Kältekomp.	27.011.001	11	2	0,8	0,33	8	10	7	4	Mo. - Fr. 06:00 - 18:00
Kältekomp.	27.012.001	12	8	6,4	3,94	4	5	8	4	Mo. - Fr. 06:00 - 18:00
Kältekomp.	2.701.202	12	8	6,4	3,94	4	5	8	4	Mo. - Fr. 06:00 - 18:00
Lüftung Keller	27.013.001	13	1	0,9	0,73	1	2	10	1	Mo. - Fr. 06:00 - 18:00
Lüftung großer Saal	27.013.002	13	4	3,2	2,62	1	2	9	1	Mo. - Fr. 06:00 - 18:00
Lüftung kleiner Saal	27.013.003	13	4	3,2	2,56	1	2	8	1	Mo. - Fr. 06:00 - 18:00
Lüftung Senatorin	27.013.004	13	4	3,2	2,49	1	2	7	1	Mo. - Fr. 06:00 - 18:00
	Lüftung gesamt:		30							
	Kühlung gesamt:		46							

Tabelle 9-12: Auflistung der in Insel erhobenen Daten eines Verwaltungsgebäudes einer Behörde für Stadtplanung (ID 43).

9.2 Karten

9.2.1 Kartografische Übersicht über das theoretische Lastverlagerungspotenzial für Bürogebäude und Gebäude büroähnlicher Nutzung aus Lüftungsanlagen in Hamburg

9.2.2 Kartografische Übersicht über das theoretische Lastverlagerungspotenzial für Bürogebäude und Gebäude büroähnlicher Nutzung aus Kälteanlagen zur Klimatisierung in Hamburg
