

Automatische Georeferenzierung von Altkarten

Vorgelegt von
Jonas F. LUFT, M.Sc.

An der HafenCity Universität
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -
genehmigte Dissertation.

Gutachter : Prof. Dr.-Ing. Jochen SCHIEWE
Professur Geoinformatik & Geovisualisierung
HafenCity Universität
Prof. (i. R.) Dr.-Ing. H. Siegfried STIEHL
Image Processing Research Group
Universität Hamburg

Impressum

Automatische Georeferenzierung von Altkarten

Jonas F. Luft

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Dr.-Ing.
an der HafenCity Universität Hamburg
Fachgebiet Geodäsie und Geoinformatik

Prüfungskommission:

Prof. Dr.-Ing. Anette Eicker (Vorsitzende)

Prof. Dr.-Ing. Jochen Schiewe

Prof. (i.R.) Dr.-Ing. H. Siegfried Stiehl

Prof. Dr.-Ing. Youness Dehbi

Veröffentlicht im Februar 2024

HafenCity Universität Hamburg
Henning-Voscherau-Platz 1
20457 Hamburg

DOI: 10.34712/142.48

Diese Dissertation steht unter der
Creative Commons Lizenz CC-BY-SA 3.0 DE
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>

Automatic Georeferencing of Historical Maps

Abstract: Historical Maps are of immense value to researchers of many disciplines to answer questions about the past, such as: How has the land cover changed? Where can we expect regions of archaeological interest? Where were the former settlements, roads and administrative boundaries and what were their names?

Archives and libraries are undertaking great effort to digitise their stock of maps, but scanning alone is not enough to make them easily available and to be able to access the geographical information within: The maps need to be georeferenced.

However, manual georeferencing of maps is very time consuming. Current approaches for automated map georeferencing using margin information, grid lines or toponyms are not applicable to a wide variety of map types or at least require detailed prior knowledge about map design and layout. Furthermore they use delicate algorithms with unclear generalisability and have not been evaluated on large data sets or complete map series with edge cases.

Here, the use of map symbols themselves is proposed to extract ground control points. To this end, tried-and-tested computer vision methods are applied for robust and scalable map image representation, matching and registration.

Geometry of map symbols is encoded by extracting image features from segmented map images. These can be matched efficiently to a large reference map by querying an approximate nearest neighbour index to obtain a reference map with known spatial reference which depicts the same area. After registration of the query map, it can be georeferenced by applying the spatial reference of the reference map.

The proposed approach is demonstrated to be feasible with a prototypical implementation and systematic validation on large datasets of synthetic and historical maps. With this approach 83% of the historical maps were successfully georeferenced with median georeferencing error of 105 m. The whole process runs in under 6 s per map on a consumer PC and therefore is viable for integration into desktop applications. While there is still some room for improvement with this approach, the detailed analysis of sources of errors highlights the most promising directions of future research and development. The most pressing improvements are UX for parameter settings and error correction, improved segmentation and reduction of the need for prior knowledge of map quadrangles.

Keywords: Georeferencing, GIS, historical map, topographic map, map content, hydrological symbols, computer vision, image retrieval, Map of the German Empire 1 : 100 000

Automatische Georeferenzierung von Altkarten

Zusammenfassung: Geographische Informationen aus vergangener Zeit sind auch heute noch eine wertvolle Informationsquelle für verschiedene Forschungsgebiete. Mit ihnen können die Entwicklung von Flächennutzung und Siedlungen analysiert werden, vielversprechende Orte für archäologische Grabungen gefunden oder historische administrative Grenzen nachvollzogen werden.

Durch zunehmende Digitalisierung von Beständen der Archive werden immer mehr Karten zugänglich gemacht, die aber ohne eine Georeferenzierung nicht gut identifiziert und verarbeitet werden können.

Eine manuelle Georeferenzierung ist den Archiven und Nutzern aber nicht zuzumuten. Bisherige automatische Verfahren sind in ihrer Anwendbarkeit und Robustheit stark eingeschränkt und erfordern viel Vorwissen über das verarbeitete Kartenmaterial. Außerdem wurden sie selten mit repräsentativen Datensätzen evaluiert.

Daher wird hier ein neuartiges Verfahren entwickelt, große Mengen an Altkarten automatisch zu georeferenzieren. Der vorgeschlagene Ansatz ist, die Geometrie der Signaturen selbst für eine Zuordnung mit Referenzkarten in der Bilddomäne zu ermöglichen. Dabei wird erstmals werden erstmals Gewässersignaturen mittels Bildmerkmalen repräsentiert, sodass in einem Image-Retrieval-Ansatz effizient korrespondierende Passpunkte in OpenStreetMap gefunden werden können.

Der vorgeschlagene Ansatz wird erst mit synthetischen Karten validiert und dann am Beispiel der *Karte des Deutschen Reiches 1:100 000* und weiteren topographischen Kartenwerken demonstriert. Dabei konnten 83% der Blätter erfolgreich mit einer mittleren Lagegenauigkeit von 105 m georeferenziert werden. Der Prozess benötigt dabei unter 6 s auf einem handelsüblichen PC. Damit ist das Verfahren geeignet, in Anwendungssoftware integriert zu werden und stellt eine erhebliche Zeitersparnis gegenüber manueller Georeferenzierung dar.

Mit einer detaillierten Fehleranalyse wurden die größten Herausforderungen für eine gute Anwendbarkeit ausgemacht: unzureichende Segmentierungsqualität, der Bedarf an Vorwissen über den Blattschnitt und die Entwicklung einer Nutzerschnittstelle für Parametrisierung und Fehlerkorrektur. Somit bildet Das entwickelte prototypische Verfahren eine vielversprechende Grundlage für die weitere Erforschung von robusten und generalisierbaren Verfahren für die automatische Georeferenzierung.

Keywords: Georeferenzierung, GIS, Altkarte, topographische Karte, Karteninhalt, Gewässersignaturen, Bildverarbeitung, Image Retrieval, Karte des Deutschen Reiches 1:100 000

Danksagung

Wissenschaft ist wie die gehobene Küche: Das Problem muss auf einen so kleinen Happen reduziert werden, dass man sich auf jede Komponente voll konzentrieren kann, ohne sich daran zu verschlucken. Und damit die übrig bleibende Portion nicht zu absurd konstruiert aussieht, richtet man sie auf einem möglichst großen Teller an.

Mein Dank gilt zuvorderst meinen Betreuern, Prof. Schiewe und Prof. Stiehl, die sich viel Zeit genommen haben, um mir wertvolles Feedback zu geben und so meinen Blick auf das Wesentliche zu lenken. Ferner möchte ich meinen lieben Kollegen vom g2lab für viele Inspirationen und anregende Gespräche danken. Natürlich muss ich auch dem sharing.city.college danken, ohne dessen Finanzierung diese Arbeit vielleicht nicht in einem angemessenen Zeitrahmen fertig geworden wäre.

Dank geht auch an die aufmerksamen LeserInnen: Marion, Ute und Viktor. Ganz besonders möchte ich Carina und Christina danken, die mich durch Höhen und Tiefen begleitet haben und mir Regelmäßigkeit gegeben haben, als in meinem Kopf alles chaotisch war. Und natürlich Danke an Edgar, der immer zu mir hält, während andere kommen und gehen.

Zu guter Letzt möchte ich mir selbst danken. Für all die harte Arbeit. Dafür, dass ich trotz allem immer weiter gemacht habe.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Anwendungsbeispiele	2
1.2.1	Aufgaben	3
1.2.2	Anforderungen an die Georeferenzierung	4
1.3	Problemstellung und Forschungsfragen	5
1.4	Forschungsbeiträge dieser Arbeit	7
1.5	Überblick über die Arbeit	8
1.6	Hinweis zur Terminologie	9
2	Stand der Forschung	11
2.1	Überblick	11
2.2	Georeferenzierung von Altkarten	12
2.2.1	Georeferenzierung mittels Gitterpunkten	12
2.2.2	Georeferenzierung mittels Beschriftungen	13
2.2.3	Georeferenzierung mittels Signaturen	14
2.3	Forschungslücke	15
2.4	Methoden zur Verarbeitung von Kartenbildern	18
2.4.1	Bestimmung von Passpunkten	18
2.4.1.1	Bildmerkmale	19
2.4.2	Zuordnung unter Unsicherheit und Registrierung	20
2.4.2.1	Merkmalbasierte Registrierung	21
2.4.2.2	Flächenbasierte Registrierung	22
2.4.3	Image Retrieval	23
2.5	Fazit	24
3	Kartenmaterial	27
3.1	Überblick	27
3.2	Eingrenzung der zu untersuchenden Karten	28
3.2.1	Bedarfe der NutzerInnen	28
3.2.2	Ungenauigkeiten in Karten und räumlichen Bezugssystemen	28
3.2.3	Einheitlichkeit der Gestaltung	29
3.2.4	Quellenbeschaffenheit	30
3.3	Für die Georeferenzierung geeignete Signaturen	31
3.4	Karte des Deutschen Reiches	32
3.4.1	Gestaltung	32
3.4.2	Erhaltungszustand, Digitalisierung	35
3.4.3	Kartennetzentwurf	35
3.5	Weitere Kartenwerke	36
3.5.1	Deutsche Karte 1:50 000	36

3.5.2	Topographische Übersichtskarte des Deutschen Reiches 1 : 200 000	37
4	Methode	39
4.1	Einführung	39
4.2	Überblick	40
4.3	Segmentierung	42
4.4	Repräsentation des Bildinhalts als Bildmerkmale	44
4.4.1	Markante Punkte	45
4.4.2	Deskriptoren	46
4.4.3	Experimentelle Ermittlung von geeigneten Bildmerkmalen . .	47
4.4.4	KAZE-Bildmerkmale	49
4.5	Referenzdaten	50
4.6	Suche	52
4.6.1	Ähnlichkeit	53
4.6.2	Indizierung der Referenzbilder	53
4.6.2.1	Indizierung mit <i>annoy</i>	54
4.6.3	Indexsuche	57
4.6.4	Hypothesenverifikation	58
4.6.4.1	Präemptionsheuristik	62
4.7	Registrierung	62
4.7.1	Rektifizierung	63
4.7.2	Raumbezug	65
5	Auswertung	67
5.1	Überblick	68
5.1.1	Aufgabenstellung	68
5.1.2	Experimentalstrategie	68
5.2	Verwendete Daten	70
5.2.1	Eingabekarten	70
5.2.2	Referenzkarten	71
5.3	Versuchsaufbau	71
5.3.1	Durchführung	71
5.3.2	Metriken und ihre Messung	73
5.4	Demonstration der Methode	76
5.4.1	Idealbedingungen	76
5.4.2	Andere Signaturklassen	77
5.4.3	Störungen	78
5.4.3.1	Rauschen	78
5.4.3.2	Verdeckung	80
5.4.3.3	Auflösung der Eingabebilder	80
5.5	Anwendung: Georeferenzierung der KDR100	82
5.6	Übertragbarkeit	84
5.6.1	DK50	84

5.6.2	TÜDR200	84
5.7	Nutzbarkeit	85
5.7.1	Laufzeit	85
5.7.1.1	Aufbau des Index	86
5.7.1.2	Lokalisierung	86
5.7.1.3	Registrierung	89
5.7.2	Konfidenz	89
5.7.2.1	Lokalisierung	89
5.7.2.2	Registrierung	91
5.8	Ergebnisse	92
6	Ergebnisdiskussion	95
6.1	Bewertung der Auswertungsergebnisse	95
6.2	Fehleranalyse	96
6.2.1	Qualitative Analyse	97
6.2.1.1	Blatt 388	97
6.2.1.2	Blatt 389	99
6.2.1.3	Blatt 413	99
6.2.1.4	Blatt 414	99
6.2.1.5	Blatt 553	100
6.2.1.6	Blatt 554	100
6.2.1.7	Blatt 568	102
6.2.1.8	Blatt 569	102
6.2.1.9	Zusammenfassung der qualitativen Analyse	102
6.2.2	Dichte und Verteilung von Signaturen	104
6.2.3	Ungenau Segmentierung	105
6.2.4	Transformationsklassen	107
6.2.5	Historische Veränderung	107
6.2.6	Ungenauigkeit im Originalmaterial	108
6.3	Einordnung der Praxistauglichkeit	109
6.3.1	Ergebnisqualität	110
6.3.2	Verarbeitungsgeschwindigkeit	111
6.3.3	Einfache Übertragbarkeit auf neue Kartenwerke	112
6.4	Vergleich der Ergebnisse mit der Literatur	112
6.4.1	Vorhergehende Arbeiten	114
6.4.2	Vergleich	116
7	Zusammenfassung & Ausblick	119
7.1	Fazit	119
7.2	Relevanz	121
7.3	Ausblick	121
7.3.1	Anwendung auf andere Karten(werke)	122
7.3.1.1	Anwendung auf ältere Karten	124
7.3.1.2	Transformationen und Verzerrungen	124

7.3.1.3	Bessere Referenzdaten	125
7.3.1.4	Unabhängigkeit vom Blattschnitt	126
7.3.2	Verbesserung der Lokalisierung	126
7.3.2.1	Merkmale	126
7.3.2.2	Geographischer Kontext	127
7.3.2.3	Verwendung anderer Signaturen	128
7.3.3	Verbesserung der Registrierung	128
7.3.4	Verbesserung der Segmentierung	130
7.3.5	Implementierung in einer Anwendungssoftware	130
7.3.6	Implikationen außerhalb von Altkarten	131
A	Verweis auf Quelltext der Implementierung	133
B	Experimentalparameter	135
B.1	Umgebungsparameter	135
B.2	Gleichbleibende Parameter	136
B.3	Parameter für die KDR100	141
B.3.1	Abweichende Parameter für Experimente unterschiedlicher Si- gnaturen	142
B.3.1.1	Eisenbahnen	142
B.3.1.2	Straßen	142
B.4	Parameter für die DK50	142
B.5	Parameter für die TÜDR200	143
	Literaturverzeichnis	145
	Abbildungsverzeichnis	159
	Tabellenverzeichnis	162
	Verzeichnis der Quelltexte	162
	Glossar	165

Einleitung

Inhaltsverzeichnis

1.1	Motivation	1
1.2	Anwendungsbeispiele	2
1.2.1	Aufgaben	3
1.2.2	Anforderungen an die Georeferenzierung	4
1.3	Problemstellung und Forschungsfragen	5
1.4	Forschungsbeiträge dieser Arbeit	7
1.5	Überblick über die Arbeit	8
1.6	Hinweis zur Terminologie	9

Alte Karten sind mehr als kunstvolle historische Artefakte – sie sind die einzige umfassende Quelle von räumlichen Informationen aus den vergangenen Jahrhunderten.

Aber ein riesiger Datenschatz liegt noch ungenutzt und schwer zugänglich in diversen Kartenarchiven vor: Allein die Staatsbibliothek Berlin (SBB) hat etwa 1,2 Millionen Altkarten im Bestand, die nach und nach digitalisiert werden¹.

Digitalbilder der Karten helfen ungemein, die Karten besser zugänglich zu machen und gleichzeitig vor Beschädigung zu schützen. Aber für eine maschinelle Verarbeitung der enthaltenen Geodaten müssen die Kartenbilder auch georeferenziert werden.

Altkarten nicht nur digitalisiert, sondern auch bereits in gesicherter Qualität georeferenziert zur Verfügung zu stellen, würde eine erhebliche Zeitersparnis und einen Mehrwert für viele NutzerInnen darstellen. Die Aufgabe der Georeferenzierung in der gewohnten manuellen Art durchzuführen, ist den Archiven nicht zuzumuten, weshalb der Bedarf für automatisierte Verfahren besteht [Christoph *et al.* 2016].

In der vorliegenden Arbeit soll der Prototyp für ein neuartiges Verfahren zur automatischen Georeferenzierung vorgestellt werden. Damit soll die Grundlage für die weitere Forschung nach einem generalisierten Verfahren geschaffen werden.

1.1 Motivation

Wenn ForscherInnen historische räumliche Daten untersuchen wollen, müssen sie sich für die Beschaffung von Altkarten an entsprechende Archive wenden. Die Alt-

¹<https://staatsbibliothek-berlin.de/die-staatsbibliothek/abteilungen/karten/aufgaben-profil>, März 2023

karten werden dann gescannt und digital zur Verfügung gestellt, aber in der Regel nicht georeferenziert. Die Suche nach geeigneten Karten für eine konkrete wissenschaftliche Fragestellung ist ohne kartographiehistorische Kenntnisse schwierig, da die Karten nur nach Metadaten (wie KartographIn, Herausgeber, Erscheinungsjahr und den heute teilweise schwer zu interpretierenden Titeln, wie z. B. „Das Frankenland“) katalogisiert werden. So entsteht für die Archive ein erheblicher Beratungsaufwand, um für ein bestimmtes Forschungsvorhaben geeignete Karten zu finden.

Anschließend erfolgt eine bisher händische Georeferenzierung: es werden in einem Geoinformationssystem (GIS) korrespondierende *Passpunkte* (engl. *ground control points*) für eine automatische Ausgleichsrechnung in der Karte und einer Referenzkarte ausgewählt. Dabei passieren immer wieder „zufällige und systematische Fehler“ [Kreßner 2008, S. 133], wenn Wissen über zuverlässige Passpunkte und das verwendete räumliche Bezugssystem fehlt. Außerdem ist die Georeferenzierung von Hand zeitaufwändig und kann je nach Übung und Verzerrung der Karte mehrere Stunden dauern. Diese Faktoren führen gegebenenfalls dazu, dass die Untersuchung nur auf einem reduzierten Kartensatz aufbaut, obwohl vielleicht noch mehr Karten geeignet und hilfreich gewesen wären.

Einige Archive, wie z. B. die des *Unites States Geological Survey*², gehen erste Schritte, selbst georeferenzierte Karten anzubieten. Dadurch wird die bestmögliche Passung sichergestellt und ForscherInnen können fehlerhafte Ergebnisse aufgrund von mangelhaft georeferenzierten Karten vermeiden.

Automatisierte Georeferenzierung erspart so sowohl den Archiven als auch den ForscherInnen viel Zeit und Mühe. Durch die Georeferenzierung wird auch eine räumliche Suche von relevanten Karten, z. B. in einem WebGIS [Buckley 2019, Fleet 2019], einfach und intuitiv.

Durch die Zeitersparnis können ForscherInnen z. B. einen viel größeren Untersuchungsbereich betrachten und damit validere und generalisierbare Ergebnisse produzieren.

Ferner wird die Arbeit mit historischen Karten auch für NutzerInnen mit wenigen kartographiehistorischen Kenntnissen möglich, was neue Forschungsfelder erwarten lässt.

1.2 Anwendungsbeispiele

Verschiedene Nutzergruppen haben ein Interesse an georeferenzierten Altkarten. In der ersten Linie sind es ForscherInnen diverser Disziplinen, die aus den enthaltenen Informationen Erkenntnisse ziehen. Dem gegenüber stehen die Archive und Bibliotheken mit ihrer Aufgabe, der „zeit- und ortsunabhängige[n] Bereitstellung von wissenschaftlichen Quellen“ [Crom 2016, S. 243] für eben diese ForscherInnen.

Um mögliche Anforderungen der NutzerInnen an die Qualität von Georeferenzierungen zu beleuchten, sollen hier einige Anwendungen vorgestellt werden:

²Deren Bestand an aktuellen und alten Karten ist in ihrem hervorragenden WebGIS namens „topoView“ zugänglich. Siehe <https://ngmdb.usgs.gov/topoview/>, Mai 2023.

1. Für bestimmte Forschung relevante Karten können anhand ihrer räumlichen Ausdehnung oder ihres Karteninhalts, wie z. B. abgebildeter Ortsnamen, ermittelt werden [Kowal & Pridal 2012, Christoph *et al.* 2016]. So kann beispielsweise nach allen Karten gesucht werden, deren Ausdehnung das heutige Stadtgebiet Hamburgs schneidet, anstatt nach allen inzwischen eingemeindeten Ortsnamen (etwa Altona) in den Metadaten zu suchen.
2. Die Georeferenzierung von Altkarten, wie dem *Schmettauschen Kartenwerk*, erlaubt den Vergleich von Ausmaß und Bestand der Waldflächen zwischen der frühen Neuzeit und heute. Dies hat einen hohen Wert, um die ökologischen und ökonomischen Folgen der veränderten Landnutzung einzuschätzen [Schröder 2013].
3. Karten wurden oft genutzt, um politischen Machtanspruch zu illustrieren. Daher sind sie eine gute Quelle historischer Verwaltungsgrenzen. Derer Extraktion ermöglicht, geopolitische Geschichte flächendeckend und feinkörnig nachzuvollziehen [Piechl 2020].
4. Der Vergleich des Inhalts von Karten unterschiedlichen Alters wird durch die oft deutlich unterschiedliche Gestaltung behindert. Mit einer erfolgreichen Georeferenzierung können Objekte, die in beiden Karten vorkommen, kongruent gemacht werden um ihre Semiotik besser zu deuten [Schlegel 2019].
5. Altkarten erlauben die Wiederherstellung von Informationen, die außerhalb von topographischen Karten nicht systematisch erfasst wurden, wie etwa die Höhe mancher Berggipfel [Arundel *et al.* 2022].
6. Georeferenzierte Altkarten werden genutzt, um vielversprechende Orte für archäologische Grabungen zu finden [White 2013].
7. Altkarten sind hilfreich für die Untersuchung der historischen Veränderung von Ortsnamen (Toponymen) in der Ortsnamenskunde und ermöglichen, flächendeckende Ortsnamensverzeichnisse für vergangene Zeiten anzulegen [Walter & Bill 2015, Ardanuy *et al.* 2019].
8. Die historische Entwicklung von Siedlungen kann anhand von miteinander in Passung gebrachten Karten verschiedenen Alters nachverfolgt werden [Uhl *et al.* 2021].

1.2.1 Aufgaben

Aus den oben genannten Beispielen lassen sich die folgenden grundlegenden Aufgaben ableiten, die mit georeferenzierten Karten gelöst werden:

1. Bestimmen des räumlichen Ausmaßes des Karteninhaltes (siehe Anwendungsbeispiele 1 und 6).

2. Vergleichen von Objekten in der Altkarte mit korrespondierenden Objekten in (modernen) Referenzkarten (Anwendungsbeispiele 2, 4, 7 und 8).
3. Bestimmen der Lage, der Geometrie und gegebenenfalls der Attribute von nicht mehr existenten, oder in modernen Karten nicht mehr auffindbaren, Objekten (Anwendungsbeispiele 3, 5 und 6).

1.2.2 Anforderungen an die Georeferenzierung

Die Anforderungen an die Georeferenzierung von Altkarten werden in der Forschung selten explizit gemacht. Die AnwenderInnen in den entsprechenden Disziplinen arbeiten mit den Daten, die ihnen zur Verfügung stehen bzw. mit der Georeferenzierung, die sie selber angefertigt haben. Da die AnwenderInnen in der Regel keinen kartographischen Hintergrund haben, fehlt ihnen möglicherweise die Sensibilität für potenzielle Unsicherheit in den verwendeten Daten. Insbesondere finden sich keine Angaben zu erwarteter oder notwendiger Lagegenauigkeit der georeferenzierten Karten (bei [White 2013] wird die Genauigkeit der zu verwendenden Karten zwar angesprochen, aber nicht quantifiziert). Daher wird in dieser Arbeit die erreichbare Genauigkeit von automatischer Georeferenzierung besonders diskutiert (siehe Abschnitt 6.2.6).

Für den Genauigkeitsanspruch ist die Art der Aufgabe zu differenzieren:

Aufgabe 1 hat den geringsten Anspruch an die geographische Genauigkeit: eine grobe Einschätzung des in der Karte abgebildeten Bereiches ist ausreichend. Lediglich stark verzerrte Karten oder solche mit komplexen Kartenabbildungen müssen zuerst entzerrt werden.

Aufgabe 2 kann je nach Vorkenntnissen der NutzerInnen auch mit leicht ungenauen oder verzerrten Georeferenzierungen gelöst werden, indem die Umgebung der Objekte betrachtet wird oder andere Quellen zurate gezogen werden.

Aufgabe 3 hat den höchsten Bedarf an geographischer Genauigkeit, da keine weiteren Kontextinformationen herangezogen werden können. Es ist insbesondere auch eine exakte Rektifizierung vonnöten, da die NutzerInnen im Nachhinein nicht entscheiden können, ob die Geometrie eines Objektes korrekt oder verzerrt dargestellt wird.

Diese Trennung in Stufen mit unterschiedlichem Genauigkeitsanspruch (eine grobe Verortung vor der vollen Georeferenzierung) deckt sich mit dem Vorgehen zur Verfügbarmachung von Karten in graphischen Recherchewerkzeugen [Christoph *et al.* 2016]. Auch in der vorliegenden Arbeit wird für die Karten zuerst der abgebildete Ort vorhergesagt (siehe Abschnitt 4.6) und im Anschluss vollständig rektifiziert (siehe Abschnitt 4.7).

Es lassen sich aus den Anwendungen auch Anforderungen für die Praxistauglichkeit einer automatischen Georeferenzierung ableiten: Die Kartenauswahl wird vor allem durch die thematische und inhaltliche Relevanz bestimmt [White 2013, Piechl 2020]. Dabei ist natürlich die grundsätzliche Voraussetzung, dass das Untersuchungsgebiet ausreichend feinkörnig abgebildet wird [Ardanuy *et al.* 2019,

Schlegel 2019, Piechl 2020]. Aber auch die Verfügbarkeit von weiteren Vergleichskarten, die den Ort darstellen, wird thematisiert [Uhl *et al.* 2021]. Eine weitere Anforderung ist, dass möglichst alte Karten verwendet werden können und benachbarte Kartenblätter nahtlos aneinandergesetzt werden können [Uhl *et al.* 2021]. Die meisten Anwendungen haben die Notwendigkeit gemein, die georeferenzierten Karten in gängigen Geoinformationssystemen zu verarbeiten [White 2013, Schlegel 2019, Piechl 2020].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es für die NutzerInnen vor allem wichtig ist, eine schnelle Georeferenzierung für unterschiedlichste Arten von Karten zu ermöglichen. Außerdem sollten die georeferenzierten Kartenbilder möglichst hochaufgelöst und wenig verzerrt sein, damit die abgebildeten Details noch erkennbar bleiben. Die Praxistauglichkeit des in dieser Arbeit vorgeschlagenen Verfahrens wird in Abschnitt 6.3 diskutiert.

1.3 Problemstellung und Forschungsfragen

Veränderungen der Topographie zwischen damals und heute machen die Zuordnung von Signaturen zwischen Altkarten und modernen Referenzdaten uneindeutig. Deshalb ist es eine große Herausforderung, zuverlässige Passpunkte für eine automatisierte Georeferenzierung zu finden.

Es gibt bereits einige Ansätze zur automatischen Georeferenzierung (siehe Abschnitt 2.2). So werden u. a. die Informationen auf dem Kartenrand, wie die Koordinatenangaben der Eckpunkte, genutzt, um Passpunkte auf den Gitterlinien zu finden [Burt *et al.* 2019, Heitzler & Hurni 2020]. Dieser Ansatz ist aber stark abhängig von der oft unzureichenden geographischen Zuverlässigkeit älterer Karten sowie von einer gewissen Einheitlichkeit der Kartenartefakte. Viele ältere Karten zeigen gar keine Gitterlinien und selbst bei topographischen Karten liegen die Artefakte oft nur mit abgeschnittenen Kartenrändern vor. So bieten diese Verfahren zwar eine sehr hohe erreichbare Genauigkeit der Georeferenzierung, erfordern aber viel Vorwissen über den vorliegenden Kartensatz und sind entsprechend schwer zu generalisieren.

Ein anderer wiederkehrender Ansatz ist die Verwendung von Toponymen [Weinman 2013, Weinman 2017, Luft 2020, Bahgat & Runfola 2021, Schlegel 2021]. Die Nutzung des Karteninhalts reduziert die notwendigen Annahmen über das Kartenlayout und erlaubt, Verzerrungen im Karteninhalt auszugleichen. Außerdem scheint das Vorgehen auf den ersten Blick für ein breites Spektrum von Karten anwendbar, da fast alle Karten textliche Ortsbezeichnungen beinhalten. Tatsächlich stellt sich die Texterkennung auf den hochgradig komplexen Kartenbildern aber als äußerst fehleranfällig dar. Auch die Zuordnung von alten mit modernen Toponymen ist gerade in Gegenden bewegter Geschichte ein offener Forschungsbereich, da sich die historische Schreibweise von Ortsnamen stark von der heutigen unterscheiden kann [Ardanuy *et al.* 2019].

Die Lösung für eine universelle Anwendbarkeit liegt in der Verwendung des we-

sentlichen Bestandteils aller Karten: den Signaturen. Insbesondere topographische Karten haben den Anspruch, die physische Wirklichkeit so genau wie möglich abzubilden. Der vorliegenden Arbeit liegt die Hypothese zugrunde, dass alleine aus der Geometrie der Signaturen Rückschlüsse auf den dargestellten Karteninhalt gezogen werden können. Anhand markanter geographischer Phänomene bzw. deren Darstellung als Signaturen kann eindeutig identifiziert werden, welchen Ort eine gegebene Karte darstellt.

In dieser Arbeit soll untersucht werden, wie die Geometrie von Signaturen genutzt werden kann, um Altkarten automatisch zu georeferenzieren. Hierbei wird der Fokus auf topographische Kartenwerke mittleren Maßstabs des späten 19. Jahrhunderts, am Beispiel der *Karte des Deutschen Reiches 1 : 100 000*, und die Verwendung von Gewässersignaturen gelegt. Um die Georeferenzierung dieser Karten zu ermöglichen, werden folgende Teilfragen untersucht:

- Wie können etablierte Bildverarbeitungsmethoden (vor allem Image Retrieval und Registrierung) genutzt werden, um topographische Altkarten zu georeferenzieren? Dabei ist besonderes Augenmerk darauf zu legen, dass Karten ein neuartiges Anwendungsgebiet dieser Methoden sind und so ggf. besondere Anforderungen haben (siehe dazu Kapitel 2 und 4).
- Was ist zu beachten, wenn geographische Daten in der Bilddomäne verarbeitet werden sollen (siehe dazu Kapitel 4)?
- Sind Gewässersignaturen geeignet, um die Karten eindeutig zu lokalisieren (d. h. um Aufgabe 1 zu lösen, siehe Abschnitt 1.2.1)? Die Eignung misst sich an der Quote der korrekten Verortungen (siehe dazu Kapitel 5).
- Wird eine Lagegenauigkeit erreicht, die den höheren Anforderungen aus Aufgabe 2 und 3 (siehe Abschnitt 1.2.1 oben) entspricht? Das Performanzkriterium ist hier die Registrierungsgenauigkeit in Metern (siehe dazu Kapitel 6).
- In welchem Rahmen erlaubt die automatisierte Georeferenzierung mit diesem Verfahren eine Zeitersparnis gegenüber manueller Georeferenzierung? Hierfür entscheidend sind die Laufzeit und der Parametrisierungsaufwand (siehe dazu die Kapitel 5 und 6).

Zur Untersuchung dieser Forschungsfragen präsentiert diese Arbeit eine prototypische Implementierung zur Georeferenzierung von Altkarten mittels bewährter Bildverarbeitungsmethoden. Dies soll einerseits als methodisch-experimenteller Beitrag zur Geoinformatik einen Grundstein für die weitere Erforschung der Anwendung von Bildverarbeitungsmethoden für die Georeferenzierung von Altkarten legen. Andererseits wird so die Basis für eine zukünftige Entwicklung eines Georeferenzierungswerkzeuges für die BereitstellerInnen und NutzerInnen von Altkarten geschaffen. In Kapitel 7 wird ein Ausblick auf diese weiteren Entwicklungen gegeben.

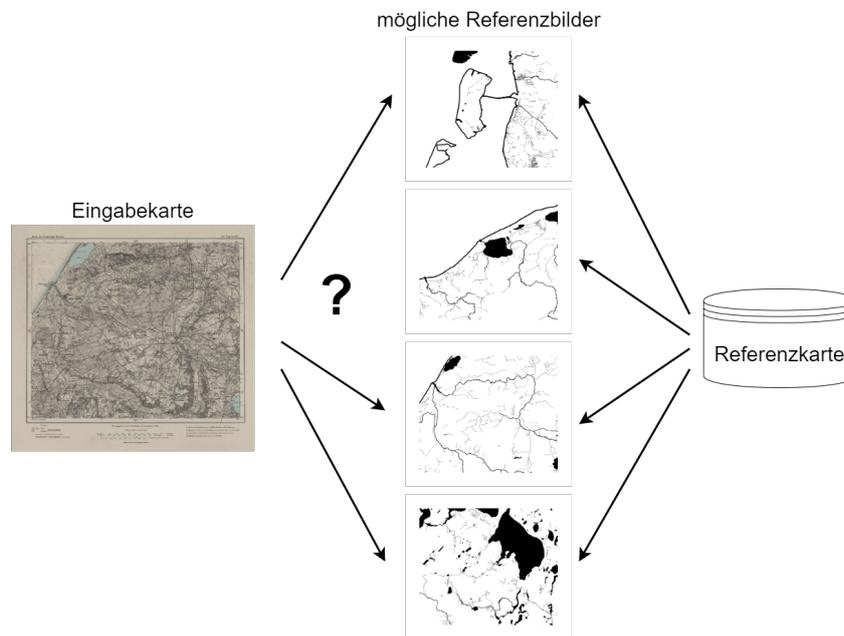


Abbildung 1.1: Wenn man die Referenzkarte als eine Datenbank von diskreten Bildausschnitten ansieht, wird die Georeferenzierung zum Image-Retrieval-Problem: Welcher Ausschnitt der Referenzkarte stellt den gleichen Inhalt dar wie die zu georeferenzierende Karte? Karten © Staatsbibliothek zu Berlin, Kartenabteilung; OpenStreetMap contributors

1.4 Forschungsbeiträge dieser Arbeit

In der vorliegenden Arbeit wird ein neuartiges Verfahren für die automatische Georeferenzierung von Altkarten entwickelt. Die wesentlichen Beiträge für die Forschung in diesem Bereich sind die folgenden:

- Es wird gezeigt, dass die Geometrie von Signaturen in Kartendigitalisaten für deren Georeferenzierung dienen kann.
- Es werden erstmals moderne Bildmerkmale verwendet, um Passpunkte in topographischen Altkarten zu gewinnen.
- Das Georeferenzierungsproblem wird durch die Formulierung als Image-Retrieval-Problem gelöst (siehe Abb. 1.1).
- Zu diesem Zweck wird eine effiziente Repräsentation des Karteninhalts der Referenzdaten entwickelt, womit eine effiziente Suche möglich wird.
- Dadurch können Passpunkte ohne Einschränkung des Suchraums performant einer großen Menge von Referenzdaten zugeordnet werden.

1.5 Überblick über die Arbeit

Im folgenden wird kurz die Struktur der Arbeit vorgestellt. Das junge Feld der automatischen Georeferenzierung von Altkarten wird in Kapitel 2, Abschnitt 2.2 beleuchtet. Aus der Betrachtung der bisherigen Arbeiten wird ersichtlich, dass die Entwicklung von generalisierbaren Verfahren notwendig ist (siehe Abschnitt 2.3). Die Georeferenzierung anhand der Signaturen erfordert die Verwendung robuster Bildverarbeitungsmethoden, die in Abschnitt 2.4 aufgezeigt werden. Das Kapitel schließt damit ab, die Methoden in der Literatur für die Eignung des in dieser Arbeit vorgeschlagenen Verfahrens zu bewerten (siehe Abschnitt 2.5).

Karten sind sehr heterogen und es gibt keine etablierten Datensätze, die eine vergleichbare Evaluation von Methoden zur automatischen Verarbeitung von Altkarten erlauben. Daher wird in Kapitel 3 der Forschungsgegenstand eingeschränkt und auf die besonderen Anforderungen verschiedener Karten eingegangen. Der Fokus auf topographische Kartenwerke wird in Abschnitt 3.2 begründet. Die Begründung der Auswahl von Gewässersignaturen erfolgt in Abschnitt 3.3. Anschließend werden in Abschnitt 3.4 und 3.5 im Detail die Kartenwerke vorgestellt, die in der vorliegenden Arbeit zur Validierung dienen sollen.

Das vorgeschlagene Georeferenzierungsverfahren wird in Kapitel 4 erläutert. Zu Beginn erfolgt eine allgemeine Herleitung des Lösungsansatzes in Abschnitt 4.2, gefolgt von der Vorbereitung der Eingabe- und Referenzkarten (siehe Abschnitt 4.3 bzw. 4.5).

Die größte Herausforderung für eine erfolgreiche Zuordnung von Passpunkten liegt darin, Karteninhalt und Referenzdaten effizient zu repräsentieren. Diese Repräsentation wird mit Bildmerkmalen gelöst (siehe Abschnitt 4.4).

Entsprechend der oben in Abschnitt 1.2.1 definierten Aufgaben mit georeferenzierten Karten werden zwei aufeinander aufbauende Teilaufgaben sequenziell betrachtet. Zuerst soll die Geolokalisierung gelöst werden, also die ungefähre Verortung des Kartenbildes, sodass die abgebildete Fläche bekannt wird. Dies geschieht mithilfe eines Image-Retrieval-Ansatzes, der in Abschnitt 4.6 erläutert wird.

An eine erfolgreiche (Geo-)Lokalisierung kann mittels Registrierung eine volle Georeferenzierung angeschlossen werden. Abschnitt 4.7 beschreibt das Verfahren hierfür.

Für alle Verfahrensschritte kommen bewährte Methoden aus den berührten Fachdisziplinen (Bildverarbeitung, Geoinformatik und Photogrammetrie) zur Anwendung. Sehr wohl sind für viele Teilschritte auch ausgeklügeltere Verfahren denkbar, in dieser Arbeit soll aber durch den Einsatz von Standardmethoden die Basis für eine gute Vergleichbarkeit mit zukünftigen Entwicklungen gelegt werden.

Die Validierung der vorgestellten Methode wird in Kapitel 5 durchgeführt. Dafür wird in Abschnitten 5.1–5.3 die zugrunde liegende Experimentalstrategie erläutert.

Die Machbarkeit der automatisierten Georeferenzierung anhand von Flusssignaturen wird im Experiment zuerst mit synthetischen Daten demonstriert (siehe Abschnitt 5.4.1). Danach wird der Einfluss von verschiedenen Störfaktoren untersucht (siehe Abschnitt 5.4.3), bevor die Anwendbarkeit des Verfahrens auf historische Kar-

ten an der *Karte des Deutschen Reiches 1 : 100 000* belegt wird (siehe Abschnitt 5.5).

Es soll aber nicht nur ein einzelnes Kartenwerk georeferenziert, sondern die Grundlage für ein allgemeines Verfahren geschaffen werden. In Abschnitt 5.6 wird beispielhaft die Übertragung auf andere topographische Kartenwerke mit anderem Maßstab untersucht.

Im Detail wird in den obigen Experimenten die Leistung des Verfahrens unter den Aspekten Trefferquote, Lagegenauigkeit, Laufzeit (siehe Abschnitt 5.7.1) und Konfidenz (siehe Abschnitt 5.7.2) untersucht.

In Kapitel 6 wird die Qualität der Ergebnisse bewertet. Um zu ermitteln, welche der vielfältigen Herausforderungen entscheidend für die Ergebnisqualität sind, werden einzelne Fehlerfälle qualitativ untersucht (siehe Abschnitt 6.2). Danach folgt ein Vergleich der Ergebnisse mit den bisher in der Literatur vorgestellten Ansätzen zur automatischen Georeferenzierung (siehe dazu Abschnitt 6.4).

Abschließend werden die Erkenntnisse der vorliegenden Dissertation in Abschnitt 7.1 zusammengefasst und die Stärken und Limitationen der vorgeschlagenen Methode resümiert. Zu guter Letzt wird in Abschnitt 7.3 ein Ausblick gegeben, mit welchen Schritten das vorgeschlagene und ähnliche Verfahren auf weitere Karten ausgeweitet werden können und welche Implikationen sich aus den hier gewonnenen Erkenntnissen für die Georeferenzierung und nahe Forschungsbereiche ergeben.

1.6 Hinweis zur Terminologie

Diese Arbeit behandelt einen Schnittstellenbereich zwischen Bildverarbeitung, Kartographie, Geoinformatik und Photogrammetrie. Je nach konkretem Forschungsbereich unterscheiden sich die in jeder Disziplin geläufigen Begriffe bei ähnlichen Aufgaben. So wird etwa das zu verarbeitende Bild im Image Retrieval mit *Suchanfrage* (engl. *Query Image*) und bei der Registrierung mit *Ursprungsbild* (engl. *Source Image*) bezeichnet. Im Sinne der Einheitlichkeit werden in dieser Arbeit für den Gesamtprozess eigene Begriffe definiert (z. B. ist *Eingabebild* (oder *-karte*) teilweise äquivalent zu Such- und Ursprungsbild) und nur bei den konkreten Teilschritten zu den dort geläufigen Begriffen Bezug genommen.

Für manche Fachbegriffe gibt es keine etablierte deutsche Terminologie, sodass ggf. auf die englischen Bezeichnungen zurückgegriffen werden muss. Der/m LeserIn wird auch die Nutzung des Glossars ab Seite 165 nahegelegt.

Stand der Forschung

Inhaltsverzeichnis

2.1	Überblick	11
2.2	Georeferenzierung von Altkarten	12
2.2.1	Georeferenzierung mittels Gitterpunkten	12
2.2.2	Georeferenzierung mittels Beschriftungen	13
2.2.3	Georeferenzierung mittels Signaturen	14
2.3	Forschungslücke	15
2.4	Methoden zur Verarbeitung von Kartenbildern	18
2.4.1	Bestimmung von Passpunkten	18
2.4.1.1	Bildmerkmale	19
2.4.2	Zuordnung unter Unsicherheit und Registrierung	20
2.4.2.1	Merkmalbasierte Registrierung	21
2.4.2.2	Flächenbasierte Registrierung	22
2.4.3	Image Retrieval	23
2.5	Fazit	24

2.1 Überblick

Die automatische Verarbeitung von Altkarten ist ein noch junges Forschungsgebiet an der Schnittstelle von Geoinformatik und Bildverarbeitung. Die meiste Beachtung fand bisher die automatische Vektorisierung von Signaturen auf Altkarten, wo in der Regel von einer bestehenden Georeferenzierung ausgegangen wird [Chiang *et al.* 2014, Liu *et al.* 2019, Jiao *et al.* 2021]. Die automatische Georeferenzierung selbst spielte bisher nur eine untergeordnete Rolle. Methoden, die versuchen, diese hochkomplexe Problemstellung zu lösen, müssen gleichzeitig verschiedene Fragestellungen der Kartographie, Geoinformatik, Dokumentenanalyse und Bildverarbeitung beantworten.

In Abschnitt 2.2 werden aktuelle Ansätze zur automatischen Georeferenzierung von Altkarten verglichen, um die verwendeten Methoden sowie deren Möglichkeiten und Schwächen zu beleuchten. Aus diesem bisherigen Forschungsstand zeichnet sich eine Forschungslücke ab (siehe Abschnitt 2.3): All diese Verfahren sind jeweils nur auf unterschiedliche Teilmengen von Altkarten anwendbar, die bestimmte Eigenschaften aufweisen. Aber da Karten – und insbesondere Altkarten – äußerst

heterogen sind, sollten sich die Verarbeitungsverfahren ohne größeren Aufwand auf verschiedenste Karten übertragen lassen. Außerdem sind Karten, wie auch andere historische Dokumente, eine „begrenzte Ressource“ – im Gegensatz zu etwa Fotos, wo einmal entwickelte Verfahren für eine stetig wachsende Menge von Daten angewendet werden können. Daher muss immer wieder hinterfragt werden, ob der Anpassungsaufwand eines automatischen Prozesses zur Zeitersparnis gegenüber einer manuellen Verarbeitung im Verhältnis steht.

Es sollten also robuste und gut übertragbare Methoden für die automatische Georeferenzierung von Altkarten eingesetzt werden, welche nicht zu viele Annahmen über die Eingabedaten erfordern. Dafür lohnt sich ein Blick in die Methoden der Bildverarbeitung, die ihre Übertragbarkeit auf neue Anwendungsgebiete immer wieder unter Beweis gestellt haben.

Denn das Problem der Verortung ist nicht auf Altkarten beschränkt. In anderen Kontexten, wie der Fernerkundung, gilt das Problem als weitgehend gelöst. In Abschnitt 2.4 wird ein Blick auf verschiedene Bildverarbeitungsmethoden geworfen, um zu erfahren, warum diese Methoden nicht ohne weiteres auf Altkarten übertragbar sind und welche Ansätze vielleicht doch als Blaupause dienen könnten. Dabei werden grundlegende Verfahren für die Erkennung von Bildmerkmalen, die Registrierung und die effiziente Suche von Bildern behandelt.

Abschnitt 2.5 fasst die derzeitige Forschung zusammen und stellt dar, welche Methoden als Grundlage für den eigenen Ansatz in der vorliegenden Arbeit dienen.

2.2 Georeferenzierung von Altkarten

Bisherige Ansätze zur automatischen Georeferenzierung von Altkarten unterscheiden sich in erster Linie darin, welche Kartenelemente sie nutzen, um Passpunkte zu finden: Gitterpunkte bzw. den Kartenrahmen, Beschriftungen oder Signaturen. Dafür werden jeweils unterschiedliche Verfahren der Bildverarbeitung eingesetzt. Die aktuelle Forschung zur automatischen Georeferenzierung wird hier anhand dieser drei Kategorien vorgestellt.

2.2.1 Georeferenzierung mittels Gitterpunkten

Wenn Gitterlinien auf einer Karte vorhanden sind, oder zumindest die Kartenränder Längen- und Breitenkreisen entsprechen, ist deren Verwendung zur Georeferenzierung naheliegend. Denn die Gitterlinien haben jeweils eine klar bestimmte geographische Länge und Breite und so ergeben deren Schnittpunkte äußerst genaue Passpunkte.

[Koldrack & Bill 2015] nutzen das Hough-Verfahren [Duda & Hart 1972], um die Kartenränder von Messtischblättern im Maßstab 1 : 25 000 zu erkennen. Die so gefundenen Punkte dienen dann mit den aus dem Blattschnitt bekannten Eckkoordinaten eines jeden Blattes zur Berechnung einer Ähnlichkeitsabbildung oder Affintransformation mittels Methode der kleinsten Fehlerquadrate.

[Heitzler *et al.* 2018] georeferenzieren Blätter der *Siegfriedkarte*, ein topographisches Kartenwerk der Schweiz im Maßstab 1:25 000 und 1:50 000 aus dem späten 19. Jahrhundert. Dies erfolgt in vier Schritten: Die Koordinatenlinien des Kartenrahmens werden mit dem Hough-Verfahren extrahiert; deren Schnittpunkte liefern die Bildkoordinaten für vier Passpunkte. Mittels eigens trainiertem Convolutional Neural Network (CNN) werden geographische Koordinatenangaben auf dem Kartenrand erkannt (*Marginalia*) und mittels Texterkennung (engl. *optical character recognition*, OCR) ausgelesen. Dies ergibt die korrespondierenden geographischen Koordinaten der Passpunkte. Zuletzt wird das Kartenbild über die vier Passpunkte linear rektifiziert.

Die von [Heitzler *et al.* 2018] verwendeten Bildinformationen sind wenig redundant und machen das Verfahren deshalb anfällig für Fehler in allen Prozessschritten. Ambiguitäten können nur durch Vorwissen über die Kartenausdehnung und die Gestaltung ausgeglichen werden: z. B. wird angenommen, dass die Koordinateninformationen immer zentral im Kartenrahmen angegeben sind.

Bei der Georeferenzierung von Kartenwerken nach Gitterlinien [Burt *et al.* 2019] werden Passpunkte an den Schnittpunkten der Gitterlinien im Kartenbild erkannt und einem entsprechend erzeugten Gitter aus geographischen Referenzpunkten zugeordnet. Durch die hohe Anzahl von Punkten kann eine sehr hohe Genauigkeit der Registrierung erreicht werden. Auch hier muss entweder der Kartenrand mit Beschriftung der Randkoordinaten bekannt sein oder die Teilung des Gitternetzes durch die NutzerInnen angegeben werden. Gitterlinien sind aber gerade in älteren Karten oft nicht abgedruckt. Dadurch ergibt sich eine eingeschränkte Anwendbarkeit.

Informationen vom Kartenrand zur Georeferenzierung zu nutzen, stellt sehr spezielle Anforderungen an die Karten: Es können nur Karten verarbeitet werden, deren Layout genau dem entspricht, was der Algorithmus erwartet. Abweichungen davon führen zu signifikant schlechteren Ergebnissen oder machen die Verarbeitung ganz unmöglich. Da aber insbesondere ältere Karten sehr heterogen in ihrer Gestaltung sind, ist sehr viel Vorwissen über Layout von Karte und Kartenrand notwendig und die Übertragung auf neue Karten technisch aufwändig. Aber auch für jüngere topographische Kartenwerke kann die Verwendung des Kartenrandes in Frage gestellt werden, weil die Kartenränder gelegentlich von den damaligen NutzerInnen abgeschnitten wurden, um sie mit den benachbarten Blättern zusammenlegen zu können.

2.2.2 Georeferenzierung mittels Beschriftungen

[Weinman 2013] verwendet Toponyme, mit denen Signaturen im Karteninhalt beschriftet sind, um räumliche Zuordnungen herzustellen. Konkret implementiert [Weinman 2013] ein iteratives stochastisches Verfahren, das er *gazetteer alignment* nennt. Darin werden die Resultate der OCR einem Ortslexikon zugeordnet und eine affine Transformation geschätzt. Diese Transformation dient im nächsten Schritt dazu, den Suchraum für die Zuordnungen einzugrenzen, beziehungsweise alternative

Toponymhypothesen zu wählen, die der Transformation besser entsprechen.

Später verbessert [Weinman 2017] die Zuordnung zwischen Beschriftungen und den dazugehörigen Signaturen. Dabei werden *style models* gelernt, die Zusammenhänge zwischen visuellen Variablen der Beschriftung und der damit abgebildeten semantischen Kategorisierung der Phänomene abbilden sollen. So können z. B. die unterschiedlichen Schriftarten von Siedlungen und Flüssen berücksichtigt werden, oder dass die Beschriftung seitlich versetzt steht statt entlang der Signatur.

Einen anderen Ansatz verfolgen [Arriaga-Varela & Takahashi 2019] auf 359 sehr heterogenen Karten: zuerst werden mit OCR so viele Toponyme wie möglich erkannt und deren Positionen im Bild bestimmt. Nach Zuordnung zu einem Ortslexikon werden alle Zuordnungsvektoren von Bild- zu Weltkoordinaten nach Betrag und Orientierung geclustert. Der Cluster mit der geringsten Varianz stellt die Georeferenz dar.

Auch [Bahgat & Runfola 2021] nutzen Toponyme, um eine große Menge von kleinmaßstäbigen Karten zu georeferenzieren. Diese sind aber überwiegend moderne Übersichtskarten. Sie zeigen wenige Stördaten und keine unkonventionellen Schriftarten oder Digitalisierungsartefakte. So konnte die Schrift durch ein einfaches Schwellwertverfahren extrahiert werden. Anschließend wurde die größtmögliche Gruppe von erkannten Toponympositionen einer Menge von Orten mit identischer relativer Anordnung in einem Ortslexikon zugeordnet (es ist unklar, ob dabei die Kartenabbildungen berücksichtigt wurden). Ein interessanter Beitrag dieser Arbeit ist, dass die Methode an einer großen Menge synthetischer Daten validiert wurde und so die Einflüsse verschiedener Karteneigenschaften auf die erreichbaren Genauigkeiten systematisch untersucht werden konnten.

Wie [Höhn *et al.* 2013] demonstrieren, können NutzerInnen Ambiguitäten auflösen, die durch fehlerhafte OCR entstehen. Sie führen ein human-in-the-loop-System ein, in dem die NutzerInnen Muster für Punktsignaturen anwählen kann, die anschließend durch Template Matching in der Karte wiedergefunden werden. Nach manueller Fehlerkorrektur stellen NutzerInnen in einem Ortsnamenverzeichnis erste Zuordnungen her, die dann vom System automatisch um passende Vorschläge für die anderen Punkte ergänzt werden. Leider wird keine quantitative Auswertung der Genauigkeit durchgeführt und es bleibt unklar, ob mit diesem Verfahren eine Zeitersparnis gegenüber konventioneller Georeferenzierung erreicht wird.

2.2.3 Georeferenzierung mittels Signaturen

[Howe *et al.* 2019] bauen auf der Arbeit von [Weinman 2017] auf. Sie verwenden Toponyme und deren Verortung laut Ortslexika als eine initiale grobe Zuordnung, die anschließend durch die Registrierung mit einer passenden Vektorkarte verbessert wird. Für die elastische Registrierung der Vektorkarten mit den Liniensignaturen der Kartendigitalisate kommt das sogenannte *Inkball*-Modell [Howe 2013, Howe 2015] zum Einsatz, das ursprünglich für die Erkennung von Handschriften entwickelt wurde. Mit dieser Feinregistrierung werden die Auswirkungen von Fehlzuordnungen weitestgehend minimiert. Dabei wurden die Referenzpolygone aber passend zum

Kartenausschnitt vorausgewählt. Das Verfahren scheint also nur mit einem eingegrenzten Suchraum zu funktionieren und ist wahrscheinlich nicht direkt auf eine große Mengen von Referenzdaten übertragbar.

[Duan *et al.* 2017] haben ein Verfahren entwickelt, Vektordaten an linienhafte Signaturen in topographischen Karten anzupassen. Dies dient dazu, präzise annotierte Trainingsdaten für Deep Learning auf Altkarten zu erzeugen. Dafür entwickeln sie ein iteratives Verfahren auf der Basis des Grabcut-Segmentierungsverfahrens [Rother *et al.* 2004], welches sie später um eine elastische Registrierung auf der Basis von bestärkendem Lernen erweitern [Duan *et al.* 2020], um eine sehr genaue Passung zu erreichen.

Wenn hohe Passung von Interesse ist, ist auch dieses Verfahren als ein nachgelagerter Schritt sehr vielversprechend. Diese Arbeit hatte aber die wesentliche Annahme, dass Vektordaten bereits recht gut zum Kartenausschnitt passen und grob registriert sind. Außerdem ist das Verfahren an die spezielle Gestaltung der untersuchten Karten angepasst, die zudem relativ modern sind.

2.3 Forschungslücke

Außer einem einzigen Wettbewerb im Rahmen der *International Conference on Document Analysis and Recognition* [Chazalon *et al.* 2021] gab es bislang keine Gelegenheiten für einen objektiven Vergleich von Verfahren für die Verarbeitung von Altkarten. Und auch bei diesem Wettbewerb war die für die Georeferenzierung relevante Aufgabe, den Kartenrand und Gitterlinien zu erkennen, sodass andersartige Verfahren von vornherein ausgeschlossen waren.

Es gibt für die Georeferenzierung noch keine etablierten Benchmark-Datensätze und nur wenige Untersuchungen veröffentlichen die von ihnen verwendeten Karten mit Ground Truth-Daten. Stattdessen nutzen die bisherigen Untersuchungen sehr unterschiedliche Karten, sodass deren Ergebnisse nicht direkt miteinander vergleichbar sind. Die Ergebnisse der bisherigen Methoden rein quantitativ anhand der erreichten Genauigkeiten zu bemessen, scheint beim derzeitigen Forschungsstand ohnehin wenig zielführend: alle oben vorgestellten Methoden müssen zuverlässiger werden, um in der Praxis von Archiven und Wissenschaft Anwendung finden zu können.

Aus den in Abschnitt 2.1 genannten Gründen ist es wesentlich interessanter, zu vergleichen, auf welcher Art von Karten die jeweiligen Methoden angewandt werden können. Denn die Verallgemeinerbarkeit der Methoden bleibt auch dann die größte Herausforderung bei der Automatisierung der Georeferenzierung, wenn die Genauigkeit mit weiterer Entwicklung zunehmend besser wird.

Die Methoden, die in Abschnitt 2.2.1 vorgestellt werden, sind nur sehr eingeschränkt nutzbar, da Gitterlinien und Kartenränder nicht immer in den Quellen vorhanden sind. Außerdem weisen Kartenränder eine sehr heterogene Gestaltung auf, weshalb jeder Algorithmus an Layout und Inhalt der konkreten zu georeferenzierenden Karte (*Eingabekarten*) angepasst werden muss.

Toponyme wiederum finden sich in fast allen Karten und können – nachdem sie korrekt extrahiert wurden – unabhängig von der Kartengestaltung mit einheitlichen Methoden verarbeitet werden. Aus diesem Grund nutzen auch die meisten Georeferenzierungsmethoden den Ansatz, aus den Beschriftungen Passpunkte zu erzeugen (siehe Abschnitt 2.2.2).

Die Disambiguierung und Lokalisierung von Ortsnamen ist eine der Hauptaufgaben des *Geographic Information Retrieval* und verhältnismäßig gut erforscht [Overell 2011, Ardanuy *et al.* 2019, Wang & Hu 2019], sodass schon ein einzelnes Toponym einen sehr spezifischen und zuverlässigen Raumbezug liefern kann, der durch eine größere Menge an Toponymen noch besser wird.

Die Zuordnung von Beschriftungen zu den dazugehörigen Signaturen wird schon teilweise gelöst [Budig *et al.* 2016, Weinman 2017, Lin & Chiang 2018]. Je nach Maßstab können dennoch große Abweichungen zwischen der Verortung des Textes und den im Ortslexikon hinterlegten Koordinaten auftreten [Ahlers 2013]. Die Genauigkeit der Lokalisierung hängt also letztendlich von der Ausdehnung der bezeichneten Phänomene und so vom Kartenmaßstab ab.

Die eigentliche Herausforderung ist jedoch, die Beschriftungen zuverlässig aus dem Kartenbild zu extrahieren. Die automatische Texterkennung ist in den vergangenen Jahren zwar weit vorangeschritten, aber gerade die kontrastreichen und stark überlagerten Signaturen in Karten stellen selbst die besten Systeme vor Herausforderungen [Chiang *et al.* 2016]. Außerdem finden die bei Karten besondere Schriftart und -stellung in den üblichen Trainingsdatensätzen keine Berücksichtigung. Deshalb liefern die OCR-Verfahren oft mit einer täuschend hohen Sicherheit stark fehlerhafte Texte zurück. Um nicht komplett abwegige Raumbezüge herzustellen, sind enorm fehlertolerante Zuordnungen mit dem Ortsnamensverzeichnis notwendig. Insbesondere in Gegenden, wo hohe kulturelle Heterogenität oder eine bewegte Geschichte für uneinheitliche Ortsnamen und deren Orthographie sorgt, wird die korrekte Zuordnung beinahe unmöglich. Andersherum sorgt die vielfache Verwendung häufiger Ortsnamen, etwa im englischsprachigen Raum, für hohe Unsicherheiten.

Tabelle 2.1 zeigt, dass viele der bestehenden Methoden, insbesondere die Toponym-basierten, nur auf überwiegend kleinmaßstäbigen Karten demonstriert wurden.

Unabhängig von den in Abschnitt 2.2.2 vorgestellten Arbeiten haben eigene Experimente gezeigt, dass Toponym-basierte Methoden je nach Kartentyp unterschiedlich gut abschneiden [Luft 2020]. Bei der Untersuchung einer kleinen Menge von topographischen Altkarten und modernen Äquivalenten wurde ein starker Einfluss von Schriftarten auf die Qualität der OCR-Ergebnisse festgemacht. Ferner wurde festgestellt, dass insbesondere großmaßstäbige Karten viel mehr Stördaten (z. B. Signaturen mit derselben Farbe wie die gesuchte Schrift, welche die Beschriftungen sogar teilweise überlagern) aufweisen. Außerdem traten viele doppelte Toponymteile (z. B. Straßen, Stadtteile und Landschaftselemente, die einen gemeinsamen Namen tragen) auf, was zu falschen Zuordnungen führte, weshalb häufig keine eindeutige Transformation gefunden werden konnte.

Nach der Publikation wurden weitere Experimente durchgeführt, für die

Verfahren	Anzahl Karten	Kartenalter	Maßstab	Referenzkarten eingeschränkt
Marginalia				
[1]	101	1949–1982	1 : 24 000–1 : 7 000 000	ja
[2]	20	1870–1926	1 : 25 000–1 : 50 000	nein
[3]	5742	1868–1965	1 : 25 000	ja
Toponyme				
[4]	359	?	?	nein
[5]	7580	1982–2007	1 : 2 500 000–1 : 25 000 000	nein
[6]	29	1909–2004	1 : 25 000–1 : 250 000	nein
[7]	20	1866–1927	1 : 443 000–1 : 7 500 000	nein
Signaturen				
[8]	20	1866–1927	1 : 443 000–1 : 7 500 000	ja

Tabelle 2.1: Vergleich der verarbeiteten Karten je Verfahren. Ohne Arbeiten, die nur auf einzelnen Karten demonstriert wurden. Die bisherigen Verfahren sind: [1], [Burt *et al.* 2019]; [2], [Heitzler & Hurni 2020]; [3], [Koldrack & Bill 2015]; [4], [Arriaga-Varela & Takahashi 2019]; [5], [Bahgat & Runfola 2021]; [6], [Luft 2020]; [7], [Weinman 2017]; [8], [Howe *et al.* 2019].

das auf Karten spezialisierte Deep Learning-basierte OCR-Verfahren aus [Weinman *et al.* 2019] getestet wurde. Aber auch dieses OCR-Verfahren war den häufigen Stördaten und ungewöhnlichen Schriftarten nicht gewachsen. Der erhebliche Trainingsaufwand des neuronalen Netzes war durch die geringen Verbesserungen in der Toponymerkennung kaum zu rechtfertigen.

[Howe *et al.* 2019] sind die einzigen, die Signaturen selbst für die Georeferenzierung von Altkarten nutzen. Aber hier musste erst eine initiale Georeferenzierung über Toponyme gefunden werden und es wurden passende Referenzkarten vorausgewählt.

Unter dieser Perspektive stellt sich unmittelbar die Frage, ob nicht direkt die Signaturen der Karten mit den Vektor-Referenzkarten registriert werden können. Immerhin werden auf ähnliche Weise auch schon Luftbilder anhand der in ihnen abgebildeten Straßen georeferenziert [Chen *et al.* 2004, Briggs & Li 2006, Chen *et al.* 2006, Wang *et al.* 2008, Li & Briggs 2012, Wang *et al.* 2012].

Ferner zeigt Tabelle 2.1 die überwiegend kleine Fallzahl der verarbeiteten Karten, was neben der oft intransparenten Auswahl der Karten (Wie homogen oder heterogen sind sie in Art und Gestaltung?) die Übertragbarkeit der Verfahren in Frage stellt. Die Idee der vorliegenden Arbeit ist, etablierte und robustere Bildverarbeitungsmethoden für die Repräsentation des Karteninhaltes einzusetzen. Damit soll die Georeferenzierung einer Vielzahl von Karten mit unterschiedlichen Gestaltungen und Maßstäben ohne großen Parametrisierungsaufwand möglich sein.

2.4 Methoden zur Verarbeitung von Kartenbildern

Wenn man Digitalisate von Altkarten als einen Spezialfall von beliebigen Bilddaten betrachtet, eröffnet sich für deren Verarbeitung eine Vielzahl an Methoden aus Fotogrammetrie und Bildverarbeitung. Allerdings wurden diese Methoden über die Jahre für die Verarbeitung von *natürlichen Bildern* (also Fotos von natürlichen Szenen) optimiert, weshalb deren Übertragbarkeit auf Kartendigitalisate nicht garantiert ist. Hier sollen einige Arbeiten vorgestellt werden, deren Methoden aber dennoch für bestimmte Schritte der automatischen Georeferenzierung in Frage kommen. Die entsprechenden Methoden sollen als Grundlage dienen, ein Verfahren zu entwickeln, Altkarten anhand der Signaturgeometrien zu georeferenzieren.

Die automatische Georeferenzierung läuft dabei analog zum manuellen Prozess ab. Zuerst müssen geeignete Passpunkte in der Karte gefunden werden. Verfahren zum Finden und Extrahieren von aussagekräftigen Punkten in Bildern werden in Abschnitt 2.4.1 vorgestellt.

Danach müssen die Passpunkte ihren Entsprechungen in einer geodätisch bekannten Referenzkarte zugeordnet werden. Dabei muss die Anordnung der Passpunkte zueinander erhalten bleiben. So kann der abgebildete Ort eindeutiger beschrieben werden als wenn die Punkte unabhängig voneinander betrachtet werden. Außerdem müssen dabei ungenau lokalisierte Punkte ausgeglichen und falsche Zuordnungen entfernt werden. Verschiedene Methoden zum Zuordnen von Passpunkten und Registrieren von Bildern werden in Abschnitt 2.4.2 aufgeführt.

Ferner kann die zu durchsuchende Referenzkarte enorm groß sein. Deshalb ist eine besonders performante Suche von relevanten Kartenbereichen notwendig. Hierzu werden bestehende Methoden in Abschnitt 2.4.3 aufgezeigt.

2.4.1 Bestimmung von Passpunkten

Eine häufige Methode, um Punktsignaturen im Kartenbild zu finden, ist die Verwendung von *Template Matching*. Dabei werden zuerst ein oder mehrere sogenannte *Templates* des gesuchten Musters definiert. Bei Karten können dies etwa kreisförmige Symbole oder auch komplexere Piktogramme sein. Dieses Template wird dann über den gesamten Bildbereich „geschoben“, um die Stellen mit der höchsten Korrelation zu finden. An den Stellen, an denen die Korrelation einen Schwellwert überschreitet, gilt das gesuchte Muster als gefunden. [Höhn *et al.* 2013, Höhn & Schommer 2017] nutzen dieses Verfahren, um Piktogramme zu finden, die Siedlungen darstellen. Aber es können auch Templates zur Erkennung der Kreuzungen von Straßen oder Gitterlinien definiert werden [Chiang & Knoblock 2009, Burt *et al.* 2019, Heitzler & Hurni 2020].

Template Matching ist recht empfindlich gegen schon leichte Variationen der Darstellung der Symbole. In [Höhn *et al.* 2013, Budig & van Dijk 2015, Budig & van Dijk 2017] wird vorgeschlagen, die Zuverlässigkeit mithilfe von Nutzerinteraktion zu verbessern. Template Matching bleibt aber für ein automatisches Verfahren zu unzuverlässig und ist auch in seiner alleinigen Verwendbarkeit für

Punktsignaturen oder einzelne Kreuzungspunkte zu eingeschränkt.

Um linienhafte Elemente aus Bildern zu entnehmen, wird indes *Kantenerkennung* verwendet. So dient etwa die klassische Canny-Kantenerkennung [Canny 1986] bei [Cléri *et al.* 2014] zur Erkennung markanter Linien wie Gebäudeumrissen in alten Luftbildern. Ein anderer Ansatz ist, homogene Bildregionen zu erkennen, deren Grenzen dann zur Registrierung genutzt werden können [Trias-Sanz *et al.* 2007]. Bei [Wolter *et al.* 2017] werden nach Segmentierung und morphologischen Operatoren auf einer Reliefkarte mittels *Graph Detection* Flussnetzwerke extrahiert, um anschließend deren Kreuzungen zu ermitteln. Bei [Heitzler & Hurni 2020] wurden die Gitterlinien in topographischen Altkarten mit dem Hough-Verfahren extrahiert, um deren Kreuzungspunkte als Passpunkte zu verwenden.

2.4.1.1 Bildmerkmale

In der Bildverarbeitung werden schon lange Methoden untersucht, um Objekte im Bild so zu repräsentieren, dass man sie in einem anderen Bild wiedererkennen kann. Als besonders robust haben sich Verfahren gezeigt, die Objekte nur anhand besonders markanter Punkte (auch *Interestpunkte*, engl. *keypoints*) beschreiben. Die lokalen Bildinformationen um diese Punkte herum werden mit einem sogenannten Merkmalsdeskriptor repräsentiert (engl. *feature descriptor*).

Zum Erkennen der markanten Punkte im Bild dienen sogenannte *Interest-Operatoren*, oder *Detektoren*. Dabei wird zumeist nach starken Gradienten gesucht, die auch in unterschiedlichen Skalierungen (etwa bei Verringerung der Auflösung) wiedererkennbar sind. Wegweisende Detektoren sind etwa der Förstner-Operator [Förstner & Gülch 1987] oder die Harris-Eckpunkterkennung [Harris & Stephens 1988].

Die heute üblichen Deskriptoren nutzen die Stärke und Orientierung der Gradienten, die um den jeweiligen Punkt herum auftreten, um einen Merkmalsvektor zu kodieren. Ein bekannter Vertreter davon ist z. B. der *Histogram of Oriented Gradients*-Deskriptor (HoG) [Dalal & Triggs 2005].

Inzwischen hat sich in der Literatur weitestgehend durchgesetzt, Verfahren zu nutzen, die Detektor und Deskriptor gemeinsam betrachten und aufeinander abstimmen. So sind auch die prominentesten Vertreter SIFT [Lowe 2004] und SURF [Bay *et al.* 2008] oder auch aktuellere Entwicklungen, wie z. B. ORB [Rublee *et al.* 2011], BRISK [Leutenegger *et al.* 2011], KAZE [Alcantarilla *et al.* 2012] und AKAZE [Alcantarilla *et al.* 2013] aufgebaut.

Die markanten Punkte in einem Bild in Kombination mit ihrer Beschreibung heißen *Bildmerkmale* (engl. *image features*). Die Beschreibung von Bildinhalten mit Bildmerkmalen zeigt sich robust gegen Veränderungen der Perspektive, gegen teilweise Verdeckung und gegen Bildrauschen. Deshalb werden Bildmerkmale auch in der Fotogrammetrie eingesetzt, um Überlappungen von mehreren Luftbildern für deren Registrierung zu finden [Chen *et al.* 2016, Liu *et al.* 2022]. Bei [Chiang *et al.* 2020] werden erstmals SURF-Bildmerkmale auf topographischen Karten angewandt, um relevante Bildbereiche für anschließendes Template Matching zu

erkennen.

In der vorliegenden Arbeit sollen Bildmerkmale zur Beschreibung des Karteninhalts Anwendung finden. Zwar ist nicht erwiesen, dass Bildmerkmale auf den stark schematisierten Altkarten genauso gut funktionieren wie auf den üblicherweise verarbeiteten natürlichen Bildern. Dennoch gelten sie aufgrund ihrer Robustheit und weit verbreiteten Verwendung als universell einsetzbar. Auch die erfolgreiche Verwendung bei historischen Dokumenten [Mohammed *et al.* 2018, Mohammed *et al.* 2021] legt nahe, dass Bildmerkmale auf ebenso kontrastreichen und gegebenenfalls schlecht erhaltenen Altkarten eingesetzt werden könnten.

Bildmerkmale haben gegenüber den anderen vorher aufgeführten Verfahren zur Kodierung von Karteninhalt den Vorteil, dass sie sehr performant berechnet werden können. Dadurch können im gesamten Bild erschöpfend eine große Zahl von Passpunkten gefunden werden.

2.4.2 Zuordnung unter Unsicherheit und Registrierung

Der nächste Schritt in der Georeferenzierung ist, die gefundenen Passpunkte im Eingebild ihren Entsprechungen in einer Referenzkarte zuzuordnen. In zwei Bildern die Punkte einander zuzuordnen, die den gleichen Inhalt darstellen, ist ein fundamentales Problem der Bildverarbeitung und heißt dort *Korrespondenzproblem*.

Bei der Georeferenzierung von Karten wird klassischerweise die Ausgleichsrechnung nach kleinsten Fehlerquadraten eingesetzt [Luhmann 2018a]. Dieses Verfahren ist gut geeignet, um Fehler durch ungenau platzierte Passpunkte auszugleichen (wenn man normalverteilte Fehler annimmt). Im Gegensatz zu den wenigen ausgewählten guten Passpunkten bei der manuellen Georeferenzierung, können bei der großen Menge von automatisch erkannten Bildmerkmalen aber auch viele schlechte Zuordnungen entstehen. Diese falsch zugeordneten Passpunkte können durch das Verfahren der kleinsten Fehlerquadrate nicht ausgeglichen werden. So sorgen schon einzelne Ausreißer für starke Verzerrungen [Cajthaml & Janata 2017, Luhmann 2018a]. Bei der manuellen Georeferenzierung wird dies verhindert, indem so lange mehr Passpunkte hinzugefügt bzw. fehlerhafte entfernt werden, bis nur noch ein akzeptabler Restfehler verbleibt.

Für die automatische Georeferenzierung muss also ein Zuordnungsverfahren genutzt werden, das nicht nur Ungenauigkeiten bestmöglich ausgleicht, sondern auch automatisch eine hohe Anzahl von Ausreißern verwerfen kann.

Ein bestehender Ansatz, um bei der automatischen Georeferenzierung von Karten Passpunkte zuzuordnen und gleichzeitig die Nachbarschaftsbeziehungen zu erhalten, ist, nur lokale Teilmengen von mindestens drei Punkten und deren relative Anordnung abzugleichen (ähnlich zu Cliques in der Graphentheorie, erweitert um geometrische Beziehungen) [Briggs & Li 2006, Li & Briggs 2012, Bahgat & Runfola 2021].

Um sicherzugehen, dass die Zuordnung korrekt ist und um Ungenauigkeiten auszugleichen, werden oft iterative Verfahren angewandt, die sukzessive mehr Punkte einbeziehen [Papakosta *et al.* 2012, Weinman 2013, Weinman 2017]. Dabei ist zu be-

achten, dass die Topologie der Signaturen (d. h. deren relative Anordnung zueinander) nicht verletzt wird. [Höhn & Schommer 2017] prüfen dafür die Äquivalenz der Delaunay-Triangulation der genutzten Punkte. Diese Verfahren lassen aber oft die unterschiedlichen Kartenabbildungen außer Betracht und haben durch die vielen Kombinationsmöglichkeiten von Punkten eine hohe Komplexität.

Wenn die zu georeferenzierende Karte und eine Referenzkarte als Bild betrachtet werden, eröffnet sich die Möglichkeit, die Georeferenzierung als Registrierungsproblem zu lösen.

Bei der Registrierung werden die Zuordnungen zwischen zwei Bildern genutzt, um eine Koordinatentransformation zu bestimmen. Mit dieser Transformation werden die Pixel des Eingabebildes (in der Registrierung *Ursprungsbild* oder *Source* genannt), derart verzerrt, dass eine möglichst gute Passung mit dem Referenzbild (*Zielbild* oder *Target* genannt) erreicht wird.

Die Registrierung wird in zwei Kategorien unterteilt: *merkmalbasierte Registrierung* (engl. *feature-based*, auch *sparse registration*, weil nur einzelne Punkte die Transformation bestimmen) und *flächenbasierte Registrierung* (engl. *intensity-based*, auch *dense registration*, weil alle Pixel mit in die Transformation einfließen).

Außerdem kann man Registrierungsverfahren danach unterscheiden, welche Arten von Verzerrungen sie ausgleichen können. Dies bestimmt die Anzahl der Freiheitsgrade der zu errechnenden Transformationsmodelle. Grundsätzlich wird unterschieden zwischen starrer Registrierung, bei der eine globale Transformation für das gesamte Bild angewendet wird, und elastischer Registrierung, bei der einzelne Bildbereiche mehr oder weniger unabhängig voneinander transformiert werden können.

2.4.2.1 Merkmalbasierte Registrierung

Die merkmalbasierte Registrierung nutzt die Zuordnung einer diskreten Menge an Punkten in Ursprungs- und Zielbild, um eine Transformation zu rechnen. Damit ist die merkmalbasierte Registrierung ähnlich zu der in der Georeferenzierung üblichen Passpunkt-basierten Zuordnung.

Die Komplexität der Verfahren ist nur von der Anzahl der Punkte abhängig und nicht der Größe der Bilder. So kann auch eine Transformation mit Zielbildern gefunden werden, die wesentlich größer sind als das Ursprungsbild.

Neben den grundlegenden Anforderungen an Registrierungsverfahren, robust gegenüber Rauschen und gewisse Veränderungen der Perspektive zu sein, müssen merkmalbasierte Registrierungsverfahren auch robust gegen fehlerhafte Zuordnungen sein. Fehlerhafte Zuordnungen sind solche, bei denen ein Bildmerkmal im Ursprungsbild fälschlicherweise einem Bildmerkmal im Zielbild zugeordnet wurde, das zwar ähnlich aussieht, aber einem komplett anderen Bildbereich entspringt und so die Registrierung nur durch übermäßig starke Verzerrung des Bildes aufgelöst werden könnte.

Der RANSAC-Algorithmus (*RANdom SAMpling Consensus*) ist eines der bekanntesten Verfahren, um Transformation aus vielen Korrespondenzen mit hoher Quote von Fehlzuordnungen zu schätzen [Fischler & Bolles 1981]. Er wird etwa für

das Zusammenfügen von Panoramabildern, 3D-Rekonstruktion und auch die Ortsbestimmung von natürlichen Bildern eingesetzt [Johns & Yang 2015, Tran *et al.* 2019]. Interessanterweise haben [Fischler & Bolles 1981] RANSAC schon damals für die Verwendung in „automated cartography“ vorgeschlagen. Das Verfahren wurde in der Forschung aber erst wieder in jüngerer Zeit für die Verwendung bei Luftbildern präsen- ter [Cléri *et al.* 2014, Chen *et al.* 2016].

Aufgrund der Robustheit gegenüber Ausreißern ist RANSAC der konventionel- len Ausgleichsrechnung nach kleinsten Fehlerquadraten bei der Georeferenzierung anhand von automatisch gefundenen Passpunkten überlegen.

RANSAC ist aber nur geeignet, ein globales Transformationsmodell für das gesamte Bild zu schätzen. Werden komplexere Entzerrungen verlangt, wird etwa mit *Thin Plate Splines (TPS)* [Duchon 1977] oder stückweisen Transformationen über eine Triangulation der Passpunkte (engl. *piecewise linear homeomorphism*, auch *rubber-sheeting*) gearbeitet [White & Griffin 1985, Shimizu & Fuse 2003, Chen *et al.* 2004, Chen *et al.* 2006]. Diese komplexen Transformationsklassen ha- ben viele Freiheitsgrade und erfordern so eine große Menge an guten Passpunk- ten [Kreßner 2008]. Gleichzeitig ist eine komplexe Entzerrung für viele jüngere Karten gar nicht notwendig und führt eher, ebenso wie die zur Georeferenzierung häufig eingesetzte polynomiale Transformation, bei fehlerhaften oder ungenau- en Zuordnungen insbesondere an den Kartenrändern zu störenden Verzerrungen [Cajthaml & Janata 2017]. In dieser Arbeit sollen nur globale starre Transformatio- nen eingesetzt werden. Die Berücksichtigung von komplexeren Transformationen bleibt vorerst offen und wird im Ausblick in Abschnitt 7.3.1.2 diskutiert.

2.4.2.2 Flächenbasierte Registrierung

Bei der flächenbasierten Registrierung werden die Werte der Pixel des gesamten Bildes genutzt, um die Qualität der Passung zu ermitteln. Dafür ist ein Maß der Ähnlichkeit zwischen Ursprungs- und Zielbild vonnöten, das zwar lokale Verschie- bungen zuverlässig erkennt, aber nicht stark von Rauschen und anderen Fehlern im Ursprungsbild beeinträchtigt wird.

Da diese Verfahren in jeder Iteration immer wieder alle Pixel verarbeiten müs- sen, ist die Registrierung von hochaufgelösten Bildern äußerst rechenaufwändig. Außerdem sind diese Verfahren anfällig dafür, zu lokalen Minima zu konvergieren [Zitová & Flusser 2003]. So kann es insbesondere bei wesentlich größerem Zielbild notwendig sein, die Registrierung mit einer grob passenden Transformation zu ini- tialisieren [Hwooi & Sabri 2017]. Daher scheinen diese Verfahren eher sinnvoll für eine Optimierung der Ergebnisse nach einer vorhergehenden merkmalsbasierten Re- gistrierung.

Die Forschung zu flächenbasierter Registrierung scheint sich in jüngerer Zeit vor allem auf elastische Transformationen für die medizinische Anwendung konzen- triert zu haben [Zitová & Flusser 2003, Wyawahare *et al.* 2009, Sotiras *et al.* 2013, Viergever *et al.* 2016].

Die Registrierung mit starren Transformationsmodellen hingegen scheint weit-

gehend zum Erliegen gekommen zu sein. Einer der prominentesten Vertreter dieser Klasse ist das sogenannte *Enhanced Correlation Coefficient*-basierte Verfahren (ECC) [Evangelidis & Psarakis 2008a, Evangelidis & Psarakis 2008b]. Das ECC-Verfahren vergleicht Gradienten zwischen Ursprungs- und Zielbild, um theoretisch subpixel-genaue Passung erreichen zu können. Der namensgebende ECC ist dabei das globale Ähnlichkeitsmaß, das im Verfahren iterativ maximiert wird.

2.4.3 Image Retrieval

Tabelle 2.1 zeigt, dass viele der bisher betrachteten Verfahren zur Georeferenzierung von Altkarten erfordern, dass der dargestellte Bereich zumindest grob bekannt ist bzw. ein passender Ausschnitt der Referenzkarte vorliegt [Duan *et al.* 2017, Höhn & Schommer 2017, Wolter *et al.* 2017, Burt *et al.* 2019, Howe *et al.* 2019, Duan *et al.* 2020]. Dasselbe gilt auch für Verfahren, die Luftbilder georeferenzieren [Chen *et al.* 2004, Chen *et al.* 2006, Wang *et al.* 2008, Papakosta *et al.* 2012, Wang *et al.* 2012].

Wenn kein Vorwissen über die grobe Lage einer Rasterkarte besteht, müsste quasi über die ganze Welt gesucht werden. Den dabei zu erwartenden Ambiguitäten und der hohen Komplexität sind diese Methoden vermutlich nicht gewachsen.

[Briggs & Li 2006, Li & Briggs 2012] versprechen bessere Skalierbarkeit bei der Georeferenzierung von Luftbildern zu einem Vektor-Straßennetzwerk, indem keine initiale Überlappung der beiden Karten vorliegen muss. Um dies zu ermöglichen, ist eine initiale Indizierung aller Punkte der Referenzkarte notwendig.

Das vorherige Anlegen eines Index, um hinterher eine wesentlich schnellere Suche zu erlauben, ist die Grundprämisse von *Information Retrieval*. Der spezielle Fall, von oder in Bildern zu suchen, nennt sich *Image Retrieval* (IR). Für die vorliegende Arbeit ist die Suche nach vom Inhalt her ähnlichen Bildern relevant (*Content-based Image Retrieval*, CBIR). Bei CBIR werden aus einer großen Datenbank jene Bilder ausgegeben, die am besten zur Anfrage (*Query*) der NutzerInnen passen, die also z. B. dasselbe Objekt wie ein Eingabebild darstellen. Es gibt mehrere Varianten, welche Form diese Anfrage haben kann. Am relevantesten ist hier *Query by Example*, wo ein Beispielbild als Anfrage dient und das Retrieval-System die ähnlichsten Bilder aus der Datenbank zurückgeben soll [Smeulders *et al.* 2000].

Traditionell sind die Forschungsobjekte natürliche Bilder; vermehrt finden sich aber auch Arbeiten, die spezielle Rücksicht auf den Raumbezug der abgebildeten Objekte nehmen. [Irschara *et al.* 2009, Floros *et al.* 2013, Sattler *et al.* 2012, Tran *et al.* 2019] nutzen Bildmerkmale auf natürlichen Bildern aus Straßenszenen und RANSAC, um in einer Referenzdatenbank Bilder zu finden, deren Ort bekannt ist. Damit erreichen sie eine Lokalisierung der Kamera, um z. B. ein autonomes Fahrzeug zu verorten.

Die Anwendung von IR auf Luftbildern liegt nicht fern. Die Grundlage liefern auch hier wieder Bildmerkmale, mit denen in einem *Bag of Words*-Ansatz (BoW) [Chui & Rangarajan 2003] der Inhalt von Luftbildern klassifiziert wird und so eine Datenbank nach bestimmten Landnutzungen durchsucht werden kann

[Yang & Newsam 2013]. Für verschiedene Stufen des CBIR-Prozesses, vom Erlernen von geeigneten Deskriptoren bis zur Zuordnung selbst, wurden inzwischen auch Deep-Learning-Ansätze vorgeschlagen [Dubey 2022, Sumbul *et al.* 2021].

Karten zeigen eine große visuelle Heterogenität und nutzen sehr viel kontrastreiche Darstellungen als bei natürlichen Szenen und Luftbilder üblich ist. Deshalb erfordern Karten besondere IR-Verfahren, wie auch [Michelson *et al.* 2008, Goel *et al.* 2011] zeigen, die mittels IR-Methoden Karten in großen unstrukturierten Datensätzen klassifizieren.

Mit IR wird bisher meist ein Klassifizierungsproblem gelöst. Eine Besonderheit stellt immer noch die Suche nach bestimmten Geometrien dar. Ein vergleichbarer Anwendungsfall zur Georeferenzierung von Altkarten ist der Versuch, den Ort einer handgezeichneten Kartenskizze (engl. *sketch map*) mithilfe von IR zu identifizieren [Eitz *et al.* 2011, Zardiny *et al.* 2020]. Diese multimodale Zuordnung erfordert, die dargestellte Geometrie zuerst in eine verwertbare Repräsentation zu bringen, um sie anschließend in einer großen Menge räumlicher Referenzdaten wiederzufinden.

2.5 Fazit

Für die automatische Georeferenzierung von Altkarten hat sich noch längst kein dominierendes Verfahren abgezeichnet. Im Gegenteil: die bestehenden Ansätze zeigen Mängel in der Verallgemeinerbarkeit, Genauigkeit und Komplexität.

In der vorliegenden Arbeit soll der Karteninhalt für die Gewinnung von Passpunkten genutzt werden. Dies ist vielversprechend, weil der Karteninhalt im Gegensatz zu Marginalia oder Metadaten für jede Karte verfügbar und zugänglich ist. Dabei sollen aber nicht Punktsignaturen (wie Toponyme) genutzt werden, sondern linien- und flächenhafte Signaturen. Die Geometrie von komplexen Signaturen erlaubt nämlich, die vielen markanten Punkte entlang ihres Verlaufs bzw. ihres Umrisses für Zuordnungen zu nutzen. [Wolter *et al.* 2017] und [Howe *et al.* 2019] haben zumindest für einen eingeschränkten Suchraum (vgl. Abschnitt 2.4.3) gezeigt, dass die Geometrie von Signaturen geeignet ist, eine eindeutige Zuordnung zu einem bekannten geographischen Phänomen zu finden.

Im vorhergehenden Abschnitt 2.4 wurden einige Standardmethoden der Bildverarbeitung vorgestellt, die für die Georeferenzierung von Altkarten relevant sein können.

Viele dieser Methoden sind aber nicht direkt auf diese spezielle Domäne von Bilddaten anwendbar. Dies zeigt sich auch daran, dass viele bestehende Arbeiten zur Verarbeitung von Karten nicht die etablierten Standardmethoden nutzen, sondern spezielle Anpassungen vornehmen oder ganz neue Algorithmen entwickelt haben.

In dieser Arbeit sollen aber bewusst bewährte Standardmethoden der Bildverarbeitung eingesetzt werden, um eine verlässliche und vergleichbare Grundlage für zukünftige Weiterentwicklungen zu bieten.

Da Karten stark schematisiert sind und die so entstehenden dichten und überlagerten Informationen bei vielen Verarbeitungsmethoden zu hoher Unsicherheit

führen, scheint es sinnvoll, zuerst die verschiedenen Signaturen in den Karten zu trennen [Chen *et al.* 2004, Chen *et al.* 2006, Wang *et al.* 2008, Wang *et al.* 2012, Wolter *et al.* 2017].

In der Bildverarbeitung heißt die Unterscheidung von Bildpixeln nach ihrer Zugehörigkeit zu verschiedenen Objekten *Segmentierung*. Im Speziellen ist für die Verarbeitung von Altkarten die *semantische Segmentierung* relevant. Dabei sollen die Pixel nicht nach einzelnen Objekten getrennt werden (was z. B. für vernetzte Liniensignaturen wie Flüsse und Straßen ohnehin nicht eindeutig zu bestimmen wäre), sondern nach ihren Kategorien: also etwa Straßen, Flüsse oder Gebäude untereinander und vom Hintergrund zu unterscheiden.

Die genaue Untersuchung von geeigneten Segmentierungsverfahren für Altkarten ist ein lebendiger Forschungsbereich [Chiang *et al.* 2014, Liu *et al.* 2019, Jiao *et al.* 2021], da sie oft als Grundlage für eine anschließende Vektorisierung dienen, welche die Weiterverarbeitung der in der Karte dargestellten Objekte erlauben soll.

In einfachen Fällen wird die Segmentierung mit Schwellwertmethoden gelöst. Dabei werden nach dem Entfernen von Rauschen und Kontrastunterschieden die Pixel nach ihrem Farbwert klassifiziert und so bestimmten Signaturklassen zugeordnet [Bucha *et al.* 2005, Leyk & Boesch 2010, Herrault *et al.* 2013]. Der Nachteil von Schwellwertmethoden ist, dass damit nicht alle Signaturen segmentiert werden können; z. B. werden Schraffuren und Flächenmuster in der Regel nicht korrekt erkannt.

Daneben wird die Segmentierung von Altkarten in den letzten Jahren vermehrt mit neuronalen Netzen durchgeführt [Mattyus *et al.* 2017, Uhl *et al.* 2017, Ignjatić *et al.* 2018, Heitzler & Hurni 2020, Chen *et al.* 2021]. Diese Verfahren sind im Prinzip sogar in der Lage, teilweise überlagerte Signaturen und Flächenmuster korrekt zu erkennen.

Jedoch ist die Eignung von Maschinenlernverfahren für die Verarbeitung von historischen Daten, wie auch Altkarten, grundsätzlich in Frage zu stellen. Es wäre eine äußerst große Menge an Trainingsdaten nötig, um die große Heterogenität von Altkarten abzubilden. Da noch keine geeigneten Trainingsdatensätze zur Verfügung stehen und die Herstellung derselben eine automatische Verarbeitung der Karten obsolet machen würde, wird in der vorliegenden Arbeit vollständig von maschinellem Lernen abgesehen.

Stattdessen wird pragmatischerweise ein Schwellwertverfahren zum Einsatz kommen. Obwohl CNN-Verfahren auch schon erfolgreich für die Segmentierung von Gewässersignaturen¹ angewandt wurden [Jiao *et al.* 2020, Wu *et al.* 2022b, Wu *et al.* 2022a, Wu *et al.* 2023], haben eigene Vorexperimente gezeigt, dass deren Übertragung auf neue Datensätze viele Herausforderungen mit sich bringen, die den Rahmen dieser Arbeit sprengen würden [Luft & Schiewe 2021b].

Alle Segmentierungsverfahren bringen verschiedene Fehler ein. So sind etwa die Kanten von Signaturen nach der Binarisierung von Bildrauschen und Farbverläufen

¹In Abschnitt 3.3 wird genauer begründet, warum in dieser Arbeit nur Gewässersignaturen genutzt werden, obwohl der Ansatz im Prinzip auch für andere Signaturklassen geeignet ist (wie in Abschnitt 5.4.2 gezeigt wird).

häufig ungenau. Die nachfolgenden Verarbeitungsschritte müssen daher eine gewisse Robustheit gegenüber ungenauen und unvollständigen Segmentierungen aufweisen.

Nachdem die Eingabe- und Referenzkartenbilder durch die Segmentierung in eine vergleichbare Repräsentation überführt werden, können die nachfolgenden Schritte der Georeferenzierung mit den bekannten Verfahren der Bildverarbeitung gelöst werden.

So können die Signaturen im segmentierten Bild durch Bildmerkmale repräsentiert werden. Bildmerkmale wurden zwar noch nicht für Altkarten verwendet, diese sind aber in der Bildverarbeitung und Fotogrammetrie der Standard zur Zuordnung von Bildern [Luhmann 2018b]. Ferner sind sie mit dem richtigen Zuordnungsverfahren geeignet, auch größere räumliche Zusammenhänge innerhalb des Bildes zu repräsentieren (siehe Abschnitt 2.4.2).

Nachdem geeignete Bildmerkmale in der zu georeferenzierenden Karte und einer Referenzkarte gefunden wurden, können mithilfe von RANSAC Korrespondenzen hergestellt werden, die anschließend für die Registrierung der Eingabekarte genutzt werden. Da gegebenenfalls nur wenige Korrespondenzen gefunden werden, wird mit dem ECC-Verfahren ein zweiter Registrierungsschritt zur Feinjustierung durchgeführt (wie auch bei [Howe *et al.* 2019]).

In der Literatur wurden auch schon unterschiedliche Bildverarbeitungsmethoden eingesetzt, um die Inhalte von Karten für die Georeferenzierung zu repräsentieren (siehe Abschnitt 2.4.1). Jedoch scheinen all diese Methoden nicht dazu geeignet zu sein, Korrespondenzen in einer wesentlich größeren Referenzkarte zu finden.

Um das Korrespondenzproblem bei großen Referenzkarten ohne Vorwissen über die ungefähre Lage der Eingabekarte zu lösen, ist eine effiziente Suche über den großen Suchraum der Referenzkarte notwendig. Die besondere Geschwindigkeit der Suche wird über die Indizierung der Referenzbilder erreicht. Dafür kommen CBIR-Methoden zum Einsatz, die schon sowohl für große Mengen von Karten, als auch für die Lokalisierung von Bildern demonstriert wurden (siehe Abschnitt 2.4.3).

Kartenmaterial

Inhaltsverzeichnis

3.1	Überblick	27
3.2	Eingrenzung der zu untersuchenden Karten	28
3.2.1	Bedarfe der NutzerInnen	28
3.2.2	Ungenauigkeiten in Karten und räumlichen Bezugssystemen	28
3.2.3	Einheitlichkeit der Gestaltung	29
3.2.4	Quellenbeschaffenheit	30
3.3	Für die Georeferenzierung geeignete Signaturen	31
3.4	Karte des Deutschen Reiches	32
3.4.1	Gestaltung	32
3.4.2	Erhaltungszustand, Digitalisierung	35
3.4.3	Kartennetzentwurf	35
3.5	Weitere Kartenwerke	36
3.5.1	Deutsche Karte 1:50 000	36
3.5.2	Topographische Übersichtskarte des Deutschen Reiches 1:200 000	37

3.1 Überblick

Aus der Betrachtung der bisherigen Arbeiten zur Georeferenzierung von Altkarten zeigt sich, dass kein Verfahren für alle Arten von Karten gleichermaßen gut geeignet ist. Grundsätzlich unterscheiden sich Karten sehr stark darin, welcher Inhalt dargestellt wird und auf welche Weise dieser gestaltet wird. Es ist quasi unmöglich, ein automatisches Verfahren zu entwickeln, das das gesamte Spektrum aller möglichen Kartentypen und -gestaltungen abbilden kann.

Dies liegt auch stark in der historischen Entwicklung der Kartographie begründet: Die heute übliche Kategorisierung von Kartentypen und der damit einhergehenden Gestaltungsregeln haben sich erst nach und nach durchgesetzt. Je weiter man in die Geschichte zurückblickt, desto uneinheitlicher und unterschiedlicher sind die Karten.

3.2 Eingrenzung der zu untersuchenden Karten

3.2.1 Bedarfe der NutzerInnen

Die Deutung von sehr alten Quellen bedarf für deren Interpretation erheblichen Expertenwissens. Daher beschäftigen sich viele Anwendungen vor allem mit topographischen Karten. Topographische Karten zeigen einerseits eine Vielzahl an Informationen und können so breite Verwendung finden. Andererseits werden sie am ehesten unserem modernen Anspruch gerecht, diese Informationen „unverfälscht“ darzustellen, d. h. die geographische Wirklichkeit so exakt wie möglich abzubilden. Dadurch ähneln sie am ehesten unseren modernen Karten und sind auch für Nicht-historikerInnen in der Regel gut zu lesen.

Aber auch aus technischen Gesichtspunkten sind topographische Karten zweckdienlich: Erstens gibt es einfach eine sehr große Menge von ihnen aus aller Welt. Zweitens erscheinen sie oft in großen *Kartenwerken* mit oft mehreren hundert Blättern gleicher Gestaltung, was eine einheitliche und vergleichbare Verarbeitung erlaubt. Drittens stellen sie eine große Auswahl an Signaturen zur Verfügung, die zur Georeferenzierung genutzt werden können.

Ein Blick auf die in Kapitel 1 aufgeführten Anwendungsfälle zeigt für alles darüber hinausgehende recht unterschiedliche Anforderungen: So wird teilweise eine sehr genaue Lokalisierung von Siedlungen gebraucht [White 2013], anderswo eine gute semantische Unterscheidbarkeit von flächenhaften Signaturen unterschiedlicher Farbe [Schröder 2013]. Zu starke Verzerrungen bei der Georeferenzierung stören die Lesbarkeit von feinen Signaturen und Schrift und sollten deshalb auch vermieden werden [Christoph *et al.* 2016, Piechl 2020, Arundel *et al.* 2022].

Allgemeiner gibt es neben der offensichtlichen Anforderung, dass das Forschungsobjekt im dargestellten Gebiet und Zeitpunkt enthalten sein muss, zwei weitere allgemeine Rahmenbedingungen: Erstens muss der Maßstab so groß sein, dass keine relevante Information der Generalisierung zum Opfer fallen. So wurden etwa die Landesaufnahmen in 1:25 000 oder größer ohne nennenswerte Generalisierung durchgeführt. Bei Karten in mittleren Maßstäben von 1:50 000 bis 1:200 000 wird die Generalisierung immer stärker, aber es können je nach technischer Herstellungsart und Genauigkeit noch alle Phänomene, wenn auch vereinfacht, abgebildet werden. Bei kleinmaßstäbigeren Karten ist fest davon auszugehen, dass kleine Phänomene verschwinden oder durch Punktsignaturen ersetzt werden.

Zweitens muss die Genauigkeit den Erfordernissen der geplanten Analysen entsprechen. Hierfür lassen sich keine allgemeingültigen Angaben treffen – Karten gelten als genauer, je großmaßstäbiger und moderner sie sind.

3.2.2 Ungenauigkeiten in Karten und räumlichen Bezugssystemen

Karten müssen ein gewisses Maß an geographischer „Korrektheit“ erfüllen, d. h. ausreichend gute Lagegenauigkeiten aufweisen, um sinnvoll mit modernen Kartendaten registriert zu werden. Aber die Genauigkeit der räumlichen Angaben in Karten genügt nicht immer den heutigen Ansprüchen.

Im Mittelalter wurden geodätische Bezugssysteme in der Regel nicht ausreichend genau definiert, um sie in heutige Bezugssysteme umzutransformieren. In der Mitte des 18. Jahrhunderts setzten sich im deutschsprachigen Raum die Fortschritte in der astronomischen Positionsbestimmung und der Entwicklung der trigonometrischen Vermessung mit der Preußischen Landesaufnahme durch [Kreßner 2010]. Damit wurden die topographischen Aufnahmen allmählich genau genug, um sie begrenzt mit aktuellen Karten vergleichen zu können. Vorher unterlag die Aufnahme-genauigkeit noch deutlichen Unsicherheiten durch die Benutzung von uneinheitlichen Maßeinheiten, unklarer Magnetabweichung und sogar abgenutzter Messketten [Kreßner 2008, Kreßner 2009, Kreßner 2010].

Zur selben Zeit waren die Entwicklungen der Geodäsie so weit fortgeschritten, dass Erdellipsoide berechnet wurden, die mit dem heutigen Verständnis des Erdkörpers vereinbar sind. Welches räumliche Bezugssystem einer Karte jener Zeit zugrunde liegt, ist dennoch häufig nicht mehr eindeutig zu ermitteln. Es erfordert aufwändige Recherche oder es müssen Annahmen aus Alter, Aussehen, usw. getroffen werden, um eine passende Näherung zu finden. Dies wird einfacher, nachdem sich einige Bezugssysteme durchgesetzt haben: Ab Mitte des 19. Jahrhunderts ergibt sich durch die Entwicklung des in Deutschland teilweise noch immer gebräuchlichen Bessel-Ellipsoides [Bessel 1841] und durch die Ausgleichsrechnung in der Geodäsie eine gute Vergleichbarkeit mit modernen Karten.

In jedem Fall ist es aber für die Verarbeitung von Karten notwendig, das verwendete räumliche Bezugssystem zu kennen. Während es bei modernen topographischen Karten üblich ist, alle Informationen zum Bezugssystem abzudrucken, wurde dieses Spezialwissen den Lesern früherer Karten vorenthalten und muss aufwendig aus historischer Begleitliteratur recherchiert oder fehleranfällig vom Erscheinungsbild und Alter der Karte abgeleitet werden.

In dieser Arbeit sollen vorerst die Herausforderungen von starken Verzerrungen außen vor bleiben. Die Anforderung an die zu verarbeitenden Karten ist also, dass keine nennenswerte nicht-lineare Deformation vorkommt. Außerdem müssen die Bezugsfläche und Kartenabbildung der Karten bekannt oder zumindest gut annäherbar sein, um sie in der zweidimensionalen Bildebene mit Referenzkarten vergleichen zu können. Dann können ebene Transformationen, wie etwa die Affintransformation, für die Entzerrung genutzt werden. Diese Anforderungen werden in der Regel von topographischen Kartenwerken des ausgehenden 19. Jahrhunderts erfüllt.

3.2.3 Einheitlichkeit der Gestaltung

Methoden des Maschinellen Sehens erfordern eine gewisse Einheitlichkeit der graphischen Eigenschaften innerhalb des Datensatzes. (Insbesondere alte) Karten gibt es in verschiedensten Ausführungen, was die Übertragbarkeit eines automatischen Verfahrens von einer Karte auf eine andere schwierig macht. Eine einheitliche Gestaltung über viele Karten hinweg reduziert den Parametrisierungs- und Anpassungsaufwand erheblich.

Besonders größere topographische Kartenwerke (Landesaufnahmen ab Mitte des

18. Jahrhunderts) eignen sich für die automatische Verarbeitung, weil für diese einheitliche Zeichenvorschriften über hunderte Blätter Anwendung fanden. Die Erfindung der Lithographie am Anfang des 19. Jahrhunderts erlaubte entsprechend sehr konsistente Gestaltung.

Während vorher vor allem von Hand nachkoloriert wurde, erlaubt die Drucktechnik eine höhere Genauigkeit und Farbvielfalt. Dadurch können mehr visuelle Variablen verwendet werden, um Signaturen zu unterscheiden. Dies macht es nicht nur für menschliche Leser, sondern auch für Bildverarbeitungsalgorithmen einfacher, einzelne Signaturen aus der Karte zu entnehmen.

Die früheste nachweisbare Zeichenvorschrift für eine einheitliche Gestaltung von topographischen Symbolen in Karten findet sich in [Schmidt 1783]. Diese Systematisierung der Gestaltung setzte sich in den Musterblättern der topographischen Landesaufnahmen fort. In diesen wurde für die beteiligten Kartographen einheitlich vorgeschrieben, welche Signaturen wie zu zeichnen sind, wodurch eine einheitliche Gestaltung über mehrere hundert Blätter erreicht wird. Es zeigt sich außerdem, dass sich viele dieser Gestaltungsregeln als „branchenüblich“ durchsetzten und in wesentlichen Punkten über verschiedene Kartenwerke und sogar Länder ähnlich sind. Dies ist eine ideale Situation für die automatische Verarbeitung mit Bildverarbeitungsmethoden, weil dadurch die Verfahren nur minimal zwischen verschiedenen Kartenwerken angepasst werden müssen.

Ab ca. den 1960er Jahren setzten sich GIS weit genug durch, dass sie die Grundlage für alle modernen Karten bilden. Weil Karten damit primär digital vorliegen und Kartenbilder daraus störungsfrei gezeichnet werden können, ist die Georeferenzierung und Verarbeitung eventueller Digitalisate jüngerer Datums unnötig. In der Regel liegen die ursprünglichen Daten noch vor und bilden eine wesentlich zuverlässigere Datengrundlage.

3.2.4 Quellenbeschaffenheit

Von der Art der Karten unabhängig, aber für die automatische Verarbeitung genauso wichtig, ist der Erhaltungszustand und die Qualität der Digitalisierung der Altkarten. Die Artefakte haben oft ein bewegtes Leben hinter sich. Beispiele für oft auftretende Veränderungen, die die Verarbeitung beeinflussen können sind: Ausbleichen der Farben, Vergilbung des Papiers, Risse und Knicke im Papier, nachträgliche Beschriftungen/Markierungen und Archivstempel.

Ferner gibt es einen unausweichlichen Präzisionsverlust in der Digitalisierung durch Digitalisierungsartefakte und die begrenzte Scanauflösung. Bei schlechtem Papier können außerdem benachbarte Farben miteinander verschwimmen (*colour bleeding*), was bei schlechter Scanqualität zu einem Verlust des Kontrastes führt und die Segmentierung anhand von Farbwerten erschwert.

Bei einer Karte im Maßstab 1:100 000 sind Linien von Straßen je nach Grad der Generalisierung ca. 0,2 mm bis 1 mm breit (20 m bis 100 m in der Natur). Bei einer Bildauflösung von 400 ppi entspräche das also einer Breite im Bild von 3 px bis 12 px. Daher wird eine Scanauflösung von 300 ppi bis 400 ppi im allgemeinen

als ausreichend für die Verwendung der wesentlichen Bildverarbeitungsmethoden bewertet [Chiang *et al.* 2016].

3.3 Für die Georeferenzierung geeignete Signaturen

In Kapitel 1 wurde angeführt, dass der Karteninhalt für die Georeferenzierung genutzt werden soll. Genauer gesagt dient die Geometrie der Signaturen zur Gewinnung von *Passpunkten*, also Punkten, durch deren Zuordnung mit homologen Punkten einer Referenzkarte der Raumbezug hergestellt werden kann. Der Einfachheit halber soll hier nur eine Klasse von Signaturen verwendet werden. Dies macht die Extraktion der Signaturen und Punkte sowie deren Zuordnung einfacher, obwohl die Verwendung aller zur Verfügung stehender Informationen gleichzeitig die Zuverlässigkeit womöglich verbessern würde (dies bleibt für den Ausblick in Abschnitt 7.3).

Wie bereits erwähnt, bilden topographische Karten eine Vielzahl von unterschiedlichen Signaturen ab. Im Prinzip sind die meisten davon geeignet, um mittels Passpunkten einen räumlichen Bezug darzustellen. Die Voraussetzungen dafür sind dass

1. sie in ausreichender Zahl auf jedem Kartenblatt verfügbar sind
2. sie zweifelsfrei aus der Karte ausgelesen werden können
3. sie eindeutig einem spezifischen Phänomen bzw. einer Signatur in einer Referenzkarte zugeordnet werden können und
4. dass sich ihre Lage seit Erstellung der Altkarte nicht verändert hat.

Es ist also nicht direkt offensichtlich, welche Signaturen am besten als Passpunkte geeignet sind. Bei der konventionellen manuellen Georeferenzierung werden Passpunkte oft an Kirchen, prominenten Straßenkreuzungen und seltener Flurgrenzen gesetzt [Kreßner 2008]. Der Grund dafür ist nicht unbedingt die einfache Auffindbarkeit der Punkte durch einen Menschen. Entscheidend ist vielmehr die Vorahnung, welche Phänomene ihre Position über die Geschichte erhalten haben bzw. ihrer moderner Entsprechung zugeordnet werden können. Kirchen wechseln selten ihren Ort und sind oft die ältesten erhaltenen Gebäude in heutigen Siedlungen. Selbst Straßen werden zwar immer wieder erneuert, aber folgen oft grob ihrem historischen Verlauf.

Bei der Georeferenzierung von Luftbildern werden oft Straßen verwendet [Chen *et al.* 2004, Chen *et al.* 2006, Wang *et al.* 2008, Wang *et al.* 2012]. Dies wiederum liegt wahrscheinlich vor allem daran, dass sie gut automatisch extrahiert werden können, da sie in der Regel hohen Kontrast und farblich homogene Flächen aufweisen.

Bei linienhaften Signaturen ist unklar, welche Punkte in der Karte eigens eingemessen wurden, welche von vorigen Karten oder Aufnahmen übernommen wurden und welche „a vue“ eingezeichnet wurden. Deshalb werden hier gerne Kreuzungspunkte für Passpunkte genommen. Aber dennoch sind Straßen schwierig, weil deren

Lagegenauigkeit aufgrund der starken Generalisierung in Frage steht. Wie oben erwähnt, entspricht die Breite der Signaturen in der Natur oft mehreren Metern, was für eine ungenaue Platzierung der Passpunkte sorgen würde. Außerdem hat die Menge an Straßen in den letzten Jahrhunderten stark zugenommen. Dies könnte die automatische Zuordnung erschweren oder zumindest sehr rechenintensiv und uneindeutig machen.

In der vorliegenden Arbeit ist der Entschluss auf die Verwendung von Gewässersignaturen gefallen, also Flüsse, Seen und das Meer. Flüsse werden schon länger vermessen und verzeichnet (etwa zu Kataster- und Steuerzwecken) als Straßen (die erst in Landesaufnahmen und topographischen Karten systematisch aufgenommen wurden) [Kreßner 2010]. [Pápay 1990] stellte fest, dass Flüsse schon im 16. Jahrhundert genauer kartiert wurden als zuweilen angenommen.

Ein heutiger Grundsatz der Kartographie ist, Flüsse zuerst einzuzichnen und bei der Generalisierung nicht an andere Signaturen anzupassen (z. B. in Bergtälern oder bei parallel verlaufenden Straßen) [Hake *et al.* 2013, S. 173]. Inwieweit dieser Grundsatz allerdings schon zu Zeiten der Preußischen Landesaufnahme galt, ist unbekannt. Jedenfalls kann angenommen werden, dass Gewässersignaturen einen geringen Generalisierungsfehler aufweisen.

Der Einfachheit halber werden hier die Signaturen über ihre Farbe segmentiert, um nicht den Rahmen dieser Arbeit mit der aufwendigen Segmentierungsproblematik von komplexen Signaturen zu sprengen (siehe Abschnitte 2.5 und 4.3). Damit sind Flüsse am einfachsten segmentierbar, da sie die einzigen Signaturen sind, die blaue Farbe benutzen. Im Gegensatz wären etwa Straßen nicht eindeutig von vielen anderen Signaturen wie Eisenbahnlinien oder Beschriftungen zu trennen, welche dieselbe Farbe teilen.

[Wolter *et al.* 2017] zeigen, dass Flüsse sehr deskriptiv sein können, das heißt, sie weisen einzigartige Geometrien auf, die sie eindeutig identifizierbar machen.

Es folgt die Auswahl der topographischen Karten, anhand derer das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren validiert werden soll.

3.4 Karte des Deutschen Reiches

Die *Karte des Deutschen Reiches* im Maßstab 1:100 000 (kurz: *KDR100*) ist das erste topographische Kartenwerk, das flächendeckend das gesamte Deutsche Reichsgebiet darstellt. Sie wurde in den Jahren 1868 bis 1909 von den vier Deutschen Staaten auf Grundlage der Messtischblätter der Preußischen Neuaufnahme hergestellt. Sie war das erste Kartenwerk, dessen Gestaltung von Anfang an mit einem einheitlichen *Musterblatt* festgelegt wurde.

3.4.1 Gestaltung

Es gab mehrere Auflagen der *KDR100*. Von Interesse hier sind nur die Auflage A (genau genommen A1 [Landesaufnahme 1931]) und die Auflage B, weil dies die

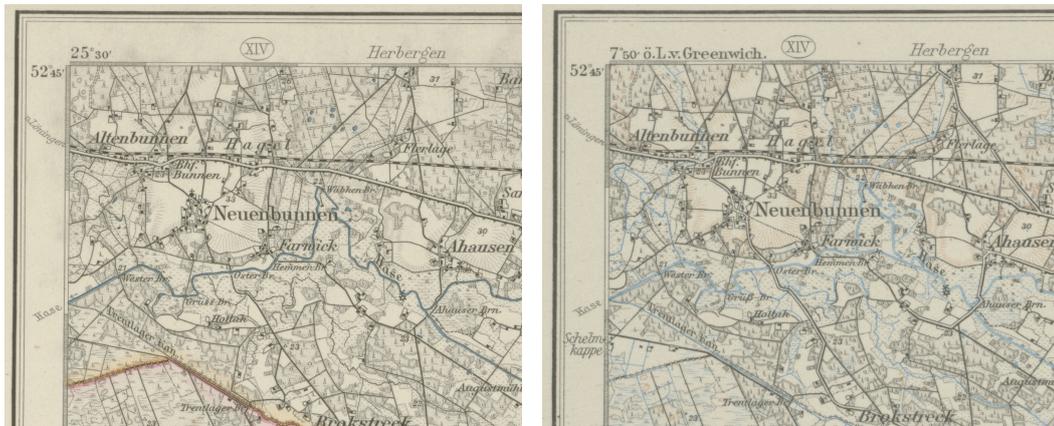


Abbildung 3.1: Unterschiede in Gestaltung und im Detailgrad der Gewässer in Blatt 258 der Karte des Deutschen Reiches: links in der Auflage A von 1902 mit nur größeren handkolorierten Flüssen, rechts in der Auflage B von 1925 mit gedruckten Gräben, Kanälen und Flüssen. Man beachte auch die Umstellung vom Ferro- auf den Greenwich-Meridian zwischen beiden Auflagen. © Staatsbibliothek zu Berlin, Kartenabteilung

einzigsten waren, die in Farbe ausgeführt wurden. Dabei wurde die Auflage A in einfarbigem Kupferstich gedruckt und anschließend die Gewässer und administrativen Grenzen von Hand farbig nachkoloriert (siehe Abb. 3.1 links). Die Auflage B wurde in dreifarbigem Kupferstich ausgeführt: Schrift, Straßen und Siedlungen in Schwarz, Gewässer in Blau und Höhenschraffen (in späten Karten Höhenlinien) in Braun (siehe Abb. 3.1 rechts). Die späteren *Umdruckausgaben* sollten aufgrund ihrer schlechten Druckqualität nicht verwendet werden.

Aufgrund der aufwendigen händischen Kolorierung wurden in Blättern der Auflage A manche Flüsse nicht eingefärbt, die in der Auflage B hingegen farblich abgedruckt wurden (siehe Abb. 3.1 und 3.2). Es ist aus der Legende und auch anderen Quellen nicht zu entnehmen, ob einer exakten Logik folgt, welche Flüsse zu kolorieren waren und welche nicht. Es scheinen aber Flüsse höherer Ordnung immer koloriert worden und kleinere eher nicht.

Eine weitere Besonderheit ist die unterschiedliche Darstellung der Nord- und Ostsee: bei der Auflage A wird nur der Wasserbereich in Küstennähe mit einem leichten blauen Farbverlauf versehen (vgl. Abb. 3.2 links), wohingegen bei der Auflage B das gesamte Meeresgebiet blau schraffiert ist (vgl. Abb. 3.2 rechts).

Bei Kartenblättern an den Rändern des Deutschen Reiches sind die Regionen in den Nachbarländern oft nur mit geringem Detailgrad eingezeichnet. Der Grund dafür geht aus der Begleitliteratur nicht hervor, es liegt aber nahe, dass dort entweder keine aktuellen Aufnahmen zur Verfügung standen oder die Kartierung schlicht nicht bezweckt war. Jedenfalls fehlen dort auch einige Kolorierungen, weshalb diese Regionen vermutlich weniger gut für die Georeferenzierung geeignet sind.

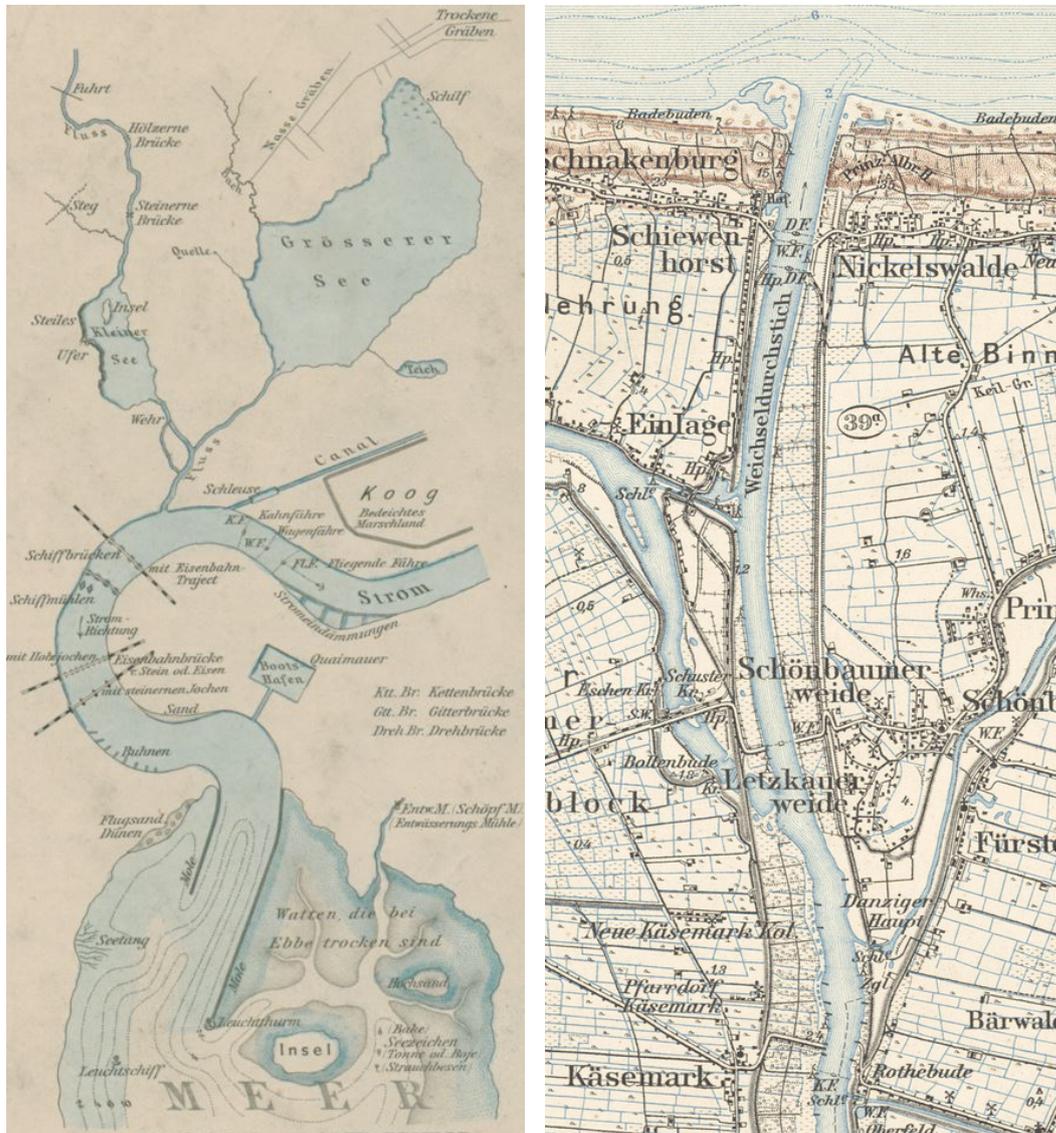


Abbildung 3.2: Unterschiedliche Gestaltung von Gewässern in der Karte des Deutschen Reiches: links die Legende der Auflage A, rechts ein Ausschnitt aus dem Blatt 71 in der Auflage B (leider ist keine Zeichenerklärung für die Auflage B überliefert). Man beachte die Kolorierung der küstennahen Gewässer in der Auflage A gegenüber der flächigen Schraffur in der Auflage B. © Staatsbibliothek zu Berlin, Kartenabteilung

3.4.2 Erhaltungszustand, Digitalisierung

Die in dieser Arbeit verwendeten Kartendigitalisate der KDR100 wurden von der Staatsbibliothek Berlin und der Staats- und Landesbibliothek in Dresden zur Verfügung gestellt. Die Karten wurden mit professionellen Scannern mit einer Auflösung von 440 ppi und Farbkorrektur digitalisiert. Da auf den Originalbildern noch die Scanunterlage und die Farbkorrekturkarten sichtbar waren, die bei der anschließenden Verarbeitung stören könnten, wurden diese digital abgeschnitten. Dabei wurde kein besonderer Wert darauf gelegt, eine einheitliche Bildgröße zu erhalten, d. h. es können je Bild unterschiedlich viel Kartenrand erhalten sein. In jedem Bild ist aber die komplette Randbeschriftung mit eventuell auftretenden Mängeln erhalten.

Diese Mängel umfassen u. a. Knicke und Faltstellen im Papier, Risse sowie Effekte der Archivierung. Letztere äußern sich durch einen blauen Archivstempel auf jedem Kartenblatt und häufigen Bleistiftbeschriftungen am Rand. Manche Kartenartefakte weisen sogar farbige handschriftliche Bemerkungen und Zeichnungen im Karteninhalt auf. Selten sind Wölbungen des Papiers oder Feuchtigkeitsschäden sichtbar.

3.4.3 Kartennetzentwurf

Das Kartenwerk besteht aus 674 Blättern in einheitlichem Blattschnitt, der bis 1945 um 236 Blätter für Polen und die „Ostmark“ erweitert wurde. Die Blätter sind jeweils 35 cm × 28 cm groß und stellen ein Gebiet von 30' Länge und 15' Breite dar, was etwa 1 000 m² entspricht. Nur 20 Blätter weichen von diesem regelmäßigen Blattschnitt ab, wo benachbarte Blätter zusammengefasst wurden, die sonst beinahe leer geblieben wären. Sechs davon fassen die benachbarten Regionen zu einem größeren rechteckigen Blatt zusammen, die anderen 14 Blätter haben eine leichte Überzeichnung.

Als Kartennetzentwurf dient die *Preußische Polyederprojektion* nach von Müffling [Landesaufnahme 1931]. Dabei wird die Erdoberfläche in ein vielseitiges Polyeder unterteilt, wobei jede der Oberflächen genau einem Kartenblatt entspricht. Dem zugrunde liegt die Auffassung, dass beim Maßstab 1 : 100 000 die Krümmung der Erdoberfläche (von theoretisch ca. 0,16 mm in der Mitte des Kartenblattes) vernachlässigbar ist und so als ebene Fläche annäherbar ist. Das Resultat sind leicht trapezförmige Kartenblätter, mit geraden Außenlinien entlang der Längen- und Breitenkreise. So hat die Preußische Polyederprojektion nur einen geringen Fehler an den Kartenrändern und erlaubt einen nahtlosen Blattschnitt ohne Überlappung oder nennenswerte Klaffung (unter 0,01 mm). Nur haben die Blätter, je nach geographischer Breite, unterschiedliche Größen: Die nördlichsten Blätter (z. B. Königsberg) sind am oberen Kartenrand 32,192 cm breit, was 32,192 km in der Natur entspricht. Wohingegen die südlichsten Blätter (z. B. Konstanz) am unteren Kartenrand 37,667 cm breit sind, also 37,667 km in der Natur [Landesaufnahme 1931].

Beim Maßstab 1 : 100 000 und der vorliegenden 440 ppi Scanauflösung sind die oberen Kartenränder nur um die 30 Pixel (ca. 2,5 mm) kürzer als die unteren (bei

Blatt 259 etwa in der Mitte). Man kann die Blätter also mit nur geringem Fehler als Rechtecke annähern. Obwohl die Blätter alle nordausgerichtet sind, muss eine leichte Rotation berücksichtigt werden, da die Artefakte bei der Digitalisierung nicht immer perfekt horizontal platziert wurden. In Summe werden also rechteckige Abschnitte der Erdoberfläche (gemäß Blattschnitt) auf beinahe rechteckige Kartenbilder abgebildet. Für die Rektifizierung genügt also eine Affintransformation. Wie stark diese Annahmen für Ungenauigkeiten sorgen, wird in Abschnitt 6.2.4 diskutiert.

Die Aufnahme der KDR100 basiert auf dem *Bessel-Ellipsoid* [Bessel 1841]. Das Bessel-Ellipsoid kommt der tatsächlichen Erdform schon so nahe, dass es seit dem späten 19. Jahrhundert den Quasi-Standard darstellte, bis es durch die Satellitengeodäsie abgelöst wurde. Als Datum dient das *Rauenberg-Datum* (manchmal auch *Potsdam-Datum* genannt), der Fundamentalpunkt des *Preußischen Hauptdreiecksnetzes* (der Vorgänger des immer noch verwendeten *Deutschen Hauptdreiecksnetzes*).

Vollständiges Wissen über das räumliche Bezugssystem ist elementar, wenn die Karten in Verbindung mit anderen Referenzkarten verwendet werden sollen, etwa um Passpunkte zuzuordnen (wie Referenzkarten in dieser Arbeit genutzt werden, wird in Abschnitt 4.5 beschrieben). Wenn das Ellipsoid und das Datum nicht berücksichtigt werden, treten bei der Übertragung eines Punktes mit Koordinaten im heute üblichen WGS84-Bezugssystem in die KDR100 Abweichungen von bis zu 200 m auf.

3.5 Weitere Kartenwerke

Um die Übertragbarkeit des Georeferenzierungsverfahrens zu untersuchen, wurden zwei weitere Kartenwerke hinzugezogen. Diese wurden explizit ausgewählt, da sie zwar eine ähnliche Gestaltung und räumliche bzw. zeitliche Ausdehnung haben wie die KDR100, aber andere Maßstäbe. Dadurch soll vor allem der Einfluss von Maßstab und Generalisierung untersucht werden, während die Segmentierung einfach gehalten wird. Die beiden Kartenwerke werden im Folgenden kurz vorgestellt.

3.5.1 Deutsche Karte 1 : 50 000

Die Deutsche Karte 1 : 50 000 (DK50) nutzt denselben Blattschnitt wie die KDR100. Dementsprechend stellen die einzelnen Blätter zwar denselben Bereich dar, haben aber größere physische Ausmaße. Die Karte wurde im Dreifarbendruck (schwarz, braun, blau) hergestellt, mit ähnlicher Gestaltung wie die Auflage B der KDR100, aber weist entsprechend dem größeren Maßstab einen höheren Detailgrad auf. Es konnten nur 28 geeignete Blätter aus den Jahren 1927 bis 1939 beschafft werden. Diese leiden teilweise unter sehr schlechtem Erhaltungszustand (insbesondere das Blatt 398 ist stark eingerissen und mit Klebefilm geflickt) und wenig professioneller Digitalisierung (Streifen mit deutlichem Farbunterschied im Scan, keine Farbkorrektur, schlechte Hintergründe, teilweise etwas verdreht, uneinheitliche Auflösung zwischen 300 ppi und 400 ppi).

Zur Vorbereitung der Verarbeitung wurde bei jedem Blatt die Legende und der Hintergrund außerhalb der Kartenartefakte manuell abgeschnitten.

3.5.2 Topographische Übersichtskarte des Deutschen Reiches 1 : 200 000

Die Topographische Übersichtskarte des Deutschen Reiches im Maßstab 1 : 200 000 (TÜDR200) wurde in unterschiedlichen Auflagen mit stark unterschiedlicher Gestaltung publiziert. Hier wurde eine Auflage der Preußischen Landesaufnahme ausgewählt, deren Gestaltung recht ähnlich zur KDR100 und DK50 ist. Es ist ein Vierfarbendruck mit Schwarz, Braun und Blau, ähnlich zur KDR100 Auflage B. Zusätzlich sind Feuchtgebiete und Moore in Türkis sowie nachkolorierte administrative Grenzen vertreten. Bemerkenswert an der Gestaltung der TÜDR200 ist, dass die Nachbarländer komplett weiß und ohne Inhalt dargestellt werden.

Davon konnten 41 Blätter aus den Jahren 1901 bis 1917 beschafft werden. Auch hier liegen die Blätter in teilweise schlechtem Erhaltungszustand mit passabler Digitalisierungsqualität (ohne Farbkorrektur) in 400 ppi vor. Der Blattschnitt umfasst 169 Blätter über die gleiche Fläche des Deutschen Reiches, wie bei der KDR100. Bei späteren Auflagen aus dem Zweiten Weltkrieg wurden nur die Namen der Blätter verändert, die Nummerierung blieb identisch. Die Kartenblätter erstrecken sich jeweils über einen ganzen Längengrad und einen halben Breitengrad.

Inhaltsverzeichnis

4.1	Einführung	39
4.2	Überblick	40
4.3	Segmentierung	42
4.4	Repräsentation des Bildinhalts als Bildmerkmale	44
4.4.1	Markante Punkte	45
4.4.2	Deskriptoren	46
4.4.3	Experimentelle Ermittlung von geeigneten Bildmerkmalen	47
4.4.4	KAZE-Bildmerkmale	49
4.5	Referenzdaten	50
4.6	Suche	52
4.6.1	Ähnlichkeit	53
4.6.2	Indizierung der Referenzbilder	53
4.6.2.1	Indizierung mit <i>annoy</i>	54
4.6.3	Indexsuche	57
4.6.4	Hypothesenverifikation	58
4.6.4.1	Präemptionsheuristik	62
4.7	Registrierung	62
4.7.1	Rektifizierung	63
4.7.2	Raumbezug	65

4.1 Einführung

Die Georeferenzierung von Altkarten hat zum Ziel, die *Eingabekarte* (das zu georeferenzierende Kartenblatt) mit einer Abbildungsvorschrift zu versehen, sodass für jeden Punkt im Kartendigitalisat die Realweltkoordinaten bestimmt sind.

In Abschnitt 2.3 wurde dargestellt, warum es sinnvoll ist, die Georeferenzierung anhand des Karteninhaltes durchzuführen – im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen über den Kartenrand oder Beschriftungen.

Explizit soll in der vorliegenden Arbeit untersucht werden, wie Gewässersignaturen genutzt werden können, um topographische Altkarten, vor allem des späten 19. Jahrhunderts (siehe Kapitel 3), automatisiert zu georeferenzieren.

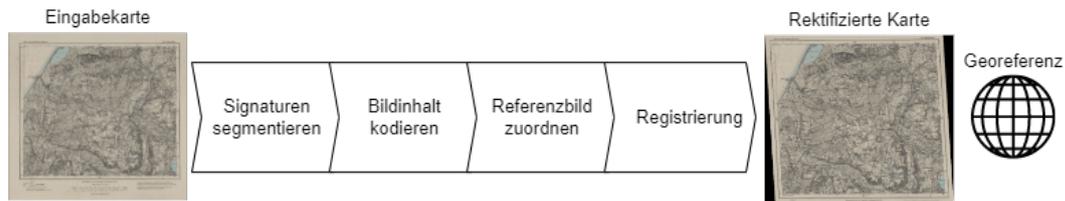


Abbildung 4.1: Übersicht über den gesamten Georeferenzierungsprozess: Das Eingabebild ganz links wird zuerst segmentiert. Dann wird der Inhalt mithilfe von Bildmerkmalen kodiert. Anschließend wird aus dem Index das passende Referenzbild gesucht. Das Eingabebild wird mit der Referenzkarte registriert und der Raumbezug übernommen. Das Resultat ist ein rektifiziertes und georeferenziertes Ausgabebild. Karte © Staatsbibliothek zu Berlin, Kartenabteilung

Hierfür ist wesentlich, Karten als Bilder zu verstehen, deren Inhalt mit anderen Kartenbildern verglichen werden kann. Die zu georeferenzierende Karte wird fortan auch *Eingabebild* genannt, um deutlich zu machen, dass sie als digitales Bild vorliegt, das als solches verarbeitet werden kann. Die zweite Karte, die als Referenz zur Herstellung des Raumbezuges dient, wird *Referenzkarte* genannt. Somit wird das Problem der Georeferenzierung in einen vierstufigen Bildverarbeitungsprozess übertragen (in Abbildung 4.1 überblicksweise dargestellt):

1. Die Segmentierung des Eingabebildes, um die relevanten Signaturen freizustellen und Stördaten auszuschalten.
2. Die Repräsentation der Signaturen als Bildmerkmale.
3. Die Suche nach dem ähnlichsten Bild in Ausschnitten der Referenzkarte.
4. Die Registrierung des Eingabebildes mit dem jeweiligen Ausschnitt der Referenzkarte.

Im folgenden Abschnitt soll das entwickelte Verfahren skizziert werden, bevor in den Abschnitten 4.3–4.7 die konkrete Umsetzung erläutert wird.

4.2 Überblick

Topographische Karten stellen sehr viele verschiedene Informationen gleichzeitig dar. Aufgrund dieser hohen Informationsdichte sind eine Vielzahl von Signaturen in verschiedenen Farben und Formen notwendig. Da viele verschiedene Signaturen dennoch dieselbe Farbe haben und sich auch überlagern können, scheitern viele automatische Bildverarbeitungsmethoden, die eine klare Abgrenzung der Objekte erfordern [Winstanley 2000, Keyes & Winstanley 2001, Peller 2018]. Um die Karten einfacher verarbeitbar zu machen, wird zuerst eine Segmentierung durchgeführt (siehe Abschnitt 4.3), um die relevanten Inhalte sichtbar zu machen. Aus den in Abschnitt 3.3 aufgeführten Gründen werden nur die Gewässersignaturen freigestellt.

Nachdem die Bilder auf die relevanten Signaturen reduziert wurden, kann der Bildinhalt mit Bildmerkmalen repräsentiert werden (siehe Abschnitt 2.4.1). Die Repräsentation des Karteninhalts wird in Abschnitt 4.4 behandelt. Da aus der Literatur keine Erkenntnisse vorliegen, welche Eigenschaften von Bildmerkmalen diese besonders geeignet für die Verarbeitung von Altkarten machen, wird in Abschnitt 4.4.3 die Eignung der gängigsten Algorithmen experimentell ermittelt.

Um den Inhalt des Eingabebildes in einer wesentlich größeren Referenzkarte wiederzufinden (in dem in Abschnitt 3.4 vorgestellten Kartensatz z. B. ist ein Kartenblatt von etwa $1\,000\text{ km}^2$ in einer Fläche von rund $541\,000\text{ km}^2$ zu verorten), muss diese Referenzkarte in viele Kartenausschnitte unterteilt werden. Außerdem liegt die Referenzkarte als Vektorkarte vor und muss daher zuerst durch Rasterung in Bilder umgewandelt werden. Die Vorbereitung der Referenzkarte wird in Abschnitt 4.5 behandelt. Die einzelnen rasterisierten Ausschnitte werden fortan *Referenzbilder* genannt.

Der Raumbezug der Eingabekarte wird über das Referenzbild mit dem gleichen Inhalt hergestellt. Gleicher Inhalt bedeutet bei Karten, dass der Ausschnitt der Referenzkarte zurückgeliefert wird, der denselben Bereich wie die Eingabekarte (Query) abdeckt, also die gleichen Phänomene darstellt. Das gewünschte Referenzbild zeigt also Signaturen mit identischer Geometrie wie das Eingabebild.

Ganz werden die Signaturen und damit die erkannten Bildmerkmale aber nicht übereinstimmen, da erstens die Generalisierung von Eingabe- und Referenzkarte leicht unterschiedlich sein kann und zweitens die Segmentierung Ungenauigkeiten einführt (siehe Abschnitt 4.3). Daher wird nicht nach gleichen, sondern möglichst ähnlichen Karten gesucht. Entscheidend für das Image Retrieval ist also, wie *Ähnlichkeit* definiert wird (dazu mehr in Abschnitt 4.6.1). Der Aufbau und die Abfrage des Index werden in Abschnitt 4.6.2, respektive Abschnitt 4.6.3 behandelt.

Wenn Bilder mittels Image Retrieval lokalisiert werden sollen, ist es anders als bei klassischem CBIR nicht genug, eine Menge an ähnlichen Bildern in der Referenzdatenbank zurückzugeben. Stattdessen muss genau das richtige Referenzbild gefunden werden, um die Registrierung zu ermöglichen (vgl. die Lokalisierung von natürlichen Bildern [Sattler *et al.* 2012]). Daher muss besonderes Augenmerk auf die Hypothesenverifikation (siehe Abschnitt 4.6.4) gelegt werden.

Wenn das richtige Referenzbild gefunden wurde, und damit der Kartenausschnitt, der mit dem Eingabebild deckungsgleich ist, wird das Eingabebild registriert. Da Karten aber einen Bereich auf der gekrümmten Erdoberfläche darstellen, können enthaltene Punkte komplexe, nicht-lineare räumliche Zusammenhänge haben. Lineare Transformationen auf den Bildern würden also die räumlichen Zusammenhänge verzerren. Die Lösung für dieses Problem findet sich in Kartenabbildungen. Die Kartenabbildung beschreibt in der Kartographie, wie die gekrümmte dreidimensionale Erdoberfläche auf einen zweidimensionalen kartesischen Raum (einer Karte) abgebildet werden soll. Dies wird oft als eine kompromissbehaftete Repräsentation von räumlichen Daten wahrgenommen, da die Wahl der Kartenabbildung verschiedene Operationen verbietet. Z. B. sind manche Abbildungen längentreu aber nicht winkeltreu, oder andersherum. (D. h. zwei in der Natur identische Strecken

bzw. Winkel sind nicht immer identisch, wenn sie an unterschiedlichen Orten in der Karte liegen.) Bei topographischen Karten kommt oft hinzu, dass nicht beliebig viele benachbarte Kartenblätter aneinander gelegt werden können, weil durch die zu den Rändern zunehmende Verzerrung Überlappung oder Klaffung entsteht.

Die Arbeitshypothese für die hier vorgeschlagene Methode ist, dass aber gerade durch die Abbildung der geographischen Informationen in die Ebene einfache geometrische Funktionen verwendbar werden, die auf der Erdoberfläche sehr komplex wären. Wenn also die Kartenabbildungen für Eingabe- und Referenzkarte bekannt sind, können komplexe nicht-lineare geographische Beziehungen als einfache starre Transformationen angenähert werden. Wenn Eingabebild und Referenzbild nur etwa ähnlich große Bereiche beinhalten, bleibt dabei der Fehler vernachlässigbar. (Den Beleg dafür soll die Auswertung bringen, insbesondere die Untersuchung der erreichbaren Georeferenzierungsgenauigkeit in den Abschnitten 5.4.1 und 5.5)

Mit angeglichenen Kartenabbildungen geschieht die Registrierung für höchstmögliche Genauigkeit zweistufig: Erst wird eine merkmalsbasierte Registrierung durchgeführt (vgl. Abschnitt 2.4.2.1), die quasi ein „Nebenprodukt“ der Hypothesenverifikation ist. Danach erfolgt eine flächenbasierte Registrierung (vgl. Abschnitt 2.4.2.2). Die Registrierung wird in Abschnitt 4.7 behandelt.

In der konventionellen Georeferenzierung wird die vollständige Transformationsvorschrift von Pixelkoordinaten in Weltkoordinaten direkt anhand der Passpunkte berechnet. Im hier vorgestellten Verfahren wird stattdessen der Raumbezug (also die Eckpunktkoordinaten und die Kartenabbildung) von dem jeweiligen Referenzbild auf das registrierte Eingabebild übertragen. Das Resultat ist ein georeferenziertes *Ausgabebild*.

Die vorliegende Arbeit ist der erste Versuch, die Georeferenzierung von Altkarten auf diese Weise zu lösen. Deshalb soll die hier vorgeschlagene Methode als „Proof of Concept“ verstanden werden. Die konkreten Verfahren wurden gewählt, weil sie in der Bildverarbeitung bewährt sind. Es wurden bewusst nicht besonders optimierte Erweiterungen der bewährten Verfahren implementiert, da davon auszugehen ist, dass diese zu stark für bestimmte Einsatzzwecke optimiert wurden, wohingegen die Basisverfahren als ausreichend generell gelten, um auf neuartige Anwendungsgebiete übertragen werden zu können. Außerdem soll der Anspruch nicht sein, die besten Verfahren zu ermitteln. Vielmehr soll der grundsätzliche Ansatz demonstriert werden um so der zukünftigen Forschung zu erlauben, bessere Methoden zu finden oder neuartige Optimierungen zu entwickeln (mehr dazu im Ausblick in Abschnitt 7.3). Die Eignung der vorgeschlagenen Methode wird anschließend in Kapitel 5 anhand der in Kapitel 3 vorgestellten Datensätze validiert.

4.3 Segmentierung

Karten werden auf unzählige Weisen gestaltet. Selbst modernere topographische Karten, die inzwischen relativ einheitlichen kartographischen Regeln folgen, nutzen je nach Zweck, Herkunft, Verlag und Auflage teils sehr unterschiedliche Farbgebung

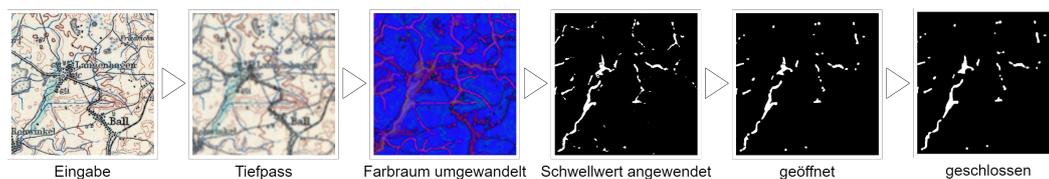


Abbildung 4.2: Der Segmentierungsprozess am Beispiel eines Ausschnittes der TÜDR200 (Blatt 63). Ganz links das Eingabebild im Original, daneben nach Gaußschem Tiefpassfilter. 3. Bild: Falschfarbendarstellung nach Umwandlung in den HSV-Farbraum: die blauen Signaturen erscheinen rot. 4. Bild: Anwendung der Schwellwerte; weiße Pixel sind der gewünschte Vordergrund, schwarze Pixel der Hintergrund. 5. und 6. Bild: Rauschen wird mithilfe der morphologischen Operationen Öffnen und Schließen entfernt. Man sieht, dass das Ergebnis keine perfekte Segmentierung darstellt, sondern feine Signaturen durch den Tiefpassfilter teils breiter werden und teils in der Nähe von andersfarbigen Signaturen nicht erkannt werden. Karte © Landkartenarchiv.de

und Signaturen für äquivalente Phänomene.

Für eine Verarbeitung der Signaturgeometrien müssen diese unterschiedlichen Gestaltungen erst vereinheitlicht werden. Um eine eindeutige Zuordnung von Bildbereichen zu Signaturen zu erreichen, werden die Eingabebilder *segmentiert*. D. h. es werden alle Pixel bestimmt, die eine der zu verarbeitenden Signaturen darstellt. Aus in Abschnitt 3.3 genannten Gründen werden hier nur Gewässersignaturen verarbeitet, es genügt also eine semantische Ein-Klassen-Segmentierung. Mit dieser Segmentierung werden auch die in der Verarbeitung von historischen Artefakten üblichen Störungen, wie Verfärbungen der Karten, störende Beschriftungen, etc., für die nachfolgende Verarbeitung ausgeschaltet. Das Ergebnis der Segmentierung ist ein Binärbild, die sogenannte *Segmentierungsmaske*, mit den gleichen Abmessungen wie das jeweilige Eingabebild aber bei der nur die Gewässer eingefärbt sind. Tatsächlich werden alle weiteren Verarbeitungsschritte nur auf den Segmentierungsmasken durchgeführt und das farbige Kartenbild erst am Ende transformiert.

Für die späteren Experimente müssen die Eingabebilder mit der zugehörigen Segmentierungsmaske der Gewässersignaturen vorliegen (siehe auch Abschnitt 5.2.1). Für die hier untersuchten Kartenwerke (siehe Abschnitte 3.4–3.5) wird eine einfache Schwellwert-basierte Farbsegmentierung der blauen Gewässersignaturen durchgeführt.

Die Schritte der Segmentierung werden im Folgenden vorgestellt. Die konkreten Parameter wurden so gewählt, dass möglichst alle Bilder des jeweiligen Datensatzes einigermaßen gut segmentiert werden konnten und wurden nicht einzeln evaluiert¹. Abbildung 4.2 zeigt zur Veranschaulichung die Zwischenergebnisse des Segmentierungsvorgangs.

- Weißabgleich: Aufgrund der unterschiedlich starken Vergilbung durch Alterung der Kartenartefakte, geht Kontrast in den Bildern verloren. Da die abso-

¹Alle für die Experimente in der Auswertung gewählten Parameter werden im Anhang B aufgelistet.

luten Farbwerte für den nachfolgenden Schwellwert sonst je nach Vergilbung angepasst werden müssten, ist es zweckdienlich, zuerst die Farbhistogramme der Bilder zu strecken. Hierzu werden die niedrigsten und höchsten 1 % (DK50, TÜDR200) bzw. 5 % (KDR100) der Werte je Farbkanal verworfen.

- Tiefpassfilter: Um Sensorrauschen zu minimieren und Schraffuren zu homogenen Flächen zu verschmieren, wird ein Gaußscher Tiefpassfilter angewendet. Die Filtergröße ist abhängig von der Scan-Auflösung: für die KDR100 wurden 19x19 Pixel gewählt, für die DK50 und TÜDR200 9x9 Pixel.
- Farbraum umwandeln: Digitalbilder werden im RGB-Farbraum gespeichert. Um den Wertebereich blauer Pixel besser bestimmen zu können, werden die Bilder in den CIELab- (KDR100) oder HSV-Farbraum (DK50, TÜDR200) umgewandelt.
- Schwellwert anwenden: Die eigentliche Erzeugung der Segmentierungsmaske geschieht, indem der Wertebereich für die blauen Pixel angegeben wird, mit dem die Vordergrund- von den Hintergrundpixeln getrennt werden. Die Ausgabe ist ein Binärbild, die Segmentierungsmaske. Im CIELab-Farbraum [Carter *et al.* 2018] (die Wertebereiche für a^* und b^* sind zwischen -128 und 128) sind Pixel mit negativem b^* -Wert blau. Zur Sicherheit werden nur Werte unter -25 akzeptiert. Außerdem werden a^* -Werte über -35 aussortiert, um eine bessere Unterscheidung gegenüber manchen violetten Signaturen zu erreichen. Im HSV-Farbraum (Wertebereiche zwischen 0 und 255) sind Farbwerte (Hue) zwischen 80 (DK50) bzw. 90 (TÜDR200) und 110 erwünscht. Außerdem werden Sättigungswerte (Saturation) auf das Intervall 25 bis 170 und Hellwerte (Value) auf das Intervall 100 bis 240 begrenzt, um besonders helle und besonders dunkle Pixel auszuschließen, die vermutlich nur aufgrund von Sensorrauschen einen blauen Farbwert haben.
- Bereinigung: Mit den morphologischen Operationen Öffnen und Schließen werden zuletzt einzelne störende Vordergrund- respektive Hintergrundpixel entfernt, die durch eine ungenaue Segmentierung oder Rauschen entstehen können. Das strukturierende Element ist für die Öffnung 5x5 Pixel und für das Schließen 11x11 Pixel groß.

4.4 Repräsentation des Bildinhalts als Bildmerkmale

Bei der manuellen Georeferenzierung übernimmt der Benutzer die Aufgabe, zu entscheiden, welche Punkte einerseits genau lokalisierbar sind und andererseits gut in der Referenzkarte wiederzuerkennen sind. Diese Punkte werden durch ihre Pixelkoordinaten beschrieben. Wenn die Entsprechung der Pixelkoordinaten in Weltkoordinaten bekannt ist, spricht man von Passpunkten. Theoretisch genügt schon eine geringe Menge von Passpunkten, um aus diesen eine Transformation zu berechnen, die anschließend auf alle anderen Pixel angewandt wird.

Aber nicht alle Punkte sind gleich gut als Passpunkte geeignet. Denn eine ungenaue Lokalisierung der Punkte kann die Transformation leicht verschieben, was durch Extrapolation zu Fehlern in einem größeren Bildbereich führen kann. Eine Überbestimmung mit höherer Anzahl von Passpunkten erlaubt einerseits, Abweichungen durch ungenau Platzierung zu minimieren, andererseits können einzelne schlechte Passpunkte verworfen werden [Luhmann 2018a].

Bei der automatischen Georeferenzierung müssen diese Punkte automatisch gefunden und zugeordnet werden können. Das erfordert, dass auch die Entscheidung, welche Punkte ausgewählt werden und wie deren Korrespondenzen gefunden werden, wohldefiniert sein muss. In der Bildverarbeitung dienen dazu Bildmerkmale (vgl. Abschnitt 2.4.1). Dabei haben Bildmerkmale zwei Komponenten: Zuerst müssen geeignete Punkte, die Interestpunkte, im Bild gefunden werden. Danach wird ein Deskriptor erzeugt, der den Bildinhalt in der direkten Umgebung um diese Punkte beschreibt. Um einen ähnlichen Punkte in einem zweiten Bild zu erkennen, müssen nur die Deskriptoren der Bildmerkmale aus beiden Bildern verglichen werden.

4.4.1 Markante Punkte

Die besten Punkte im Bild sind solche, die *wiederholbar* (engl. *repeatable*) sind, d. h. so markant sind, dass sie auch unter verschiedenen Einflüssen (etwa Verzerrung oder Farbunterschieden) bestehen bleiben und daher zuverlässig in anderen Bildern wiedergefunden werden können. In der Bildverarbeitung und Photogrammetrie werden diese Punkte *Interestpunkte* genannt.

Um zu entscheiden, welche Punkte in Karten diesen Anforderungen genügen, muss der kartographische Prozess berücksichtigt werden: Eine Karte entsteht, indem einzelne Punkte im Gelände eingemessen werden, welche anschließend zeichnerisch verbunden werden. Nur die tatsächlich eingemessenen Punkte sind also in ihrer Lage exakt bestimmt – die Linien und Flächen zwischen diesen Punkten sind interpoliert und weichen gegebenenfalls leicht von den tatsächlichen geographischen Gegebenheiten ab.

Da sich Signaturen je nach Kartengestaltung und Generalisierung zuweilen stark unterscheiden, kann außerdem ein und dasselbe geographische Phänomen in zwei verschiedenen Karten eine unterschiedliche Form haben. Die Punkte, die auf diesen veränderlichen Bereichen der Signaturen liegen, wären damit nicht wiederholbar.

Punkte in leeren Flächen oder innerhalb von homogenen Flächensignaturen erlauben nicht, Passpunkte zu entnehmen, weil sie nicht exakt einem anderen Punkt in der Welt zugeordnet werden können.

Lediglich an Kreuzungspunkten und starken Biegungen kann also davon ausgegangen werden, dass diese markante Merkmale des abgebildeten Phänomens sind und so auch zuverlässig kartiert wurden. Es sind also vor allem diese Punkte an Ecken von Signaturen, die besonders aussagekräftig sind. Außerdem können durch moderne Interest-Operatoren (vgl. Abschnitt 2.4.1) auch trotz Aliasing und Unschärfe sehr exakte Eckpunkte bestimmt werden. Abbildung 4.3 zeigt zur Illustration KAZE-Interestpunkte, die in Ausschnitten von binären Kartenbildern gefunden



Abbildung 4.3: Die farbigen Kreise stellen die markanten Punkte dar, die mit dem KAZE-Detektor in beispielhaften Kartenausschnitten gefunden wurden. Die unterschiedliche Größe der Kreise kennzeichnet die Skalierung des Interessenspunktes. Man erkennt, dass die Punkte vor allem an Kreuzungen und starken Biegungen der Signaturen liegen. Für die bessere Lesbarkeit wurden die Ausschnitte der Segmentierung invertiert: schwarz sind die Signaturpixel, weiß der Hintergrund.

wurden.

4.4.2 Deskriptoren

Eine intuitive Lösung, lokale Strukturen zu repräsentieren, ist die Verwendung von *Pixel Patches*, also einfachen rechteckigen Bildausschnitten in Vektorform. Die Verwendung von Pixel Patches für die Kodierung des Bildinhaltes zur Georeferenzierung hat sich zwar im Prinzip als geeignet herausgestellt [Luft & Schiewe 2021a], aber es zeigte sich auch, dass diese nicht gegenüber leichten Verschiebungen und Skalierungsunterschieden robust sind. Um eine bessere Übertragbarkeit der vorgeschlagenen Methode zu erreichen, soll also auf Merkmalsdeskriptoren zurückgegriffen werden, die sich in der Bildverarbeitung als robust bewährt haben (vgl. Abschnitt 2.4.1)

Die hier verwendeten Binärbilder haben spezielle Eigenschaften, die für die Wahl der konkreten Merkmalsdeskriptoren relevant sind:

1. Die Bilder weisen einen sehr hohen Kontrast, aber keine Textur auf.
2. Aufgrund des starken Kontrastes sind die auftretenden Gradienten recht ähnlich. So treten sich wiederholende Muster auf, die nicht eindeutig voneinander zu unterscheiden sind.
3. Es ist nicht möglich, einzelne Objekte abzugrenzen, da schwer zu entscheiden ist, etwa an welcher Abzweigung ein Zufluss endet und der Abfluss beginnt.
4. Eine leichte Verschiebung des Bildausschnittes sorgt für einen recht unterschiedlichen Bildinhalt.

Aufgrund dieser Rahmenbedingungen sind manche Deskriptoren auf den segmentierten Kartenbildern (bzw. rasterisierten Referenzkarten) schon konzeptionell nicht anzuwenden, da sie etwa abgrenzbare Objekte oder erkennbare Farbgradienten zwischen den Objekten erwarten (wie z. B. MSER [Matas *et al.* 2004]).

Denkbar sind hingegen Deskriptoren, die lokale Histogramme von Kanten oder Gradienten um den markanten Punkt abbilden (wie HoG, SIFT und SURF). Von diesen Deskriptoren ist zu erwarten, dass sie deskriptive Kanten und Ecken gut abbilden können.

Für diese Deskriptoren stellt sich dennoch die Frage, wie gut sie für binäre Kartenbilder geeignet sind, da sie eigentlich für die Anwendung auf natürlichen Bildern (d. h. Photos von natürlichen Szenen) optimiert sind.

4.4.3 Experimentelle Ermittlung von geeigneten Bildmerkmalen

Ein Vorexperiment soll zeigen, welches Verfahren zur Extraktion von Bildmerkmalen am besten für die hier vorliegenden Bilder geeignet ist. Dabei werden für segmentierte Eingabebilder der KDR100 Merkmale extrahiert und die Anzahl der Korrespondenzen mit dem Referenzbild, das den selben Bereich darstellt, gezählt (für eine ausführliche Beschreibung und Illustrationen der Bilder sei auf Abschnitt 5.2 verwiesen). Zum Vergleich werden auch die Korrespondenzen mit einem Referenzbild von einem anderen Ort gezählt. Danach werden die Korrespondenzen mit RANSAC verifiziert, um nur korrekte Korrespondenzen zu behalten (in Abschnitten 4.6.1 und 4.6.4 wird die Ähnlichkeit von Kartenbildern genauer erläutert). Für dieses Experiment wurden alle kombinierten Detektoren und Deskriptoren untersucht, die in OpenCV² implementiert sind: SIFT [Lowe 2004], ORB [Rublee *et al.* 2011], BRISK [Leutenegger *et al.* 2011], KAZE [Alcantarilla *et al.* 2012] und AKAZE [Alcantarilla *et al.* 2013]. Für alle wurden jeweils ihre Standardparameter übernommen³.

Das Ziel ist, einen Deskriptor zu finden, der eine hohe Anzahl von Korrespondenzen ausgibt, sodass eine hohe Trennschärfe zwischen korrektem Referenzbild (siehe Abb. 4.4 links) und falschen Referenzbildern (siehe Abb. 4.4 rechts) erreicht wird. Abbildung 4.4 zeigt, wie unterschiedlich gut die Merkmale beim korrekten Referenzbild zugeordnet werden können. Der KAZE- und der AKAZE-Deskriptor zeigen deutlich mehr Korrespondenzen nach RANSAC als die anderen Deskriptoren. Am besten schneidet die KAZE-Variante ohne Rotationsinvarianz ab (*kaze_u*). Dies ist damit zu erklären, dass es zur Beschreibung eines Flussverlaufs durchaus relevant ist, ob er sich nach einer Abzweigung etwa nach rechts oder links windet. Die Verwendung rotationsabhängiger Deskriptoren ermöglicht also mehr sichere Zuordnungen, setzt aber voraus, dass alle Eingabekarten mit Norden nach oben digitalisiert wurden.

Eine wichtige Erkenntnis für die Suche nach dem korrekten Referenzbild ist, dass auch bei unpassendem Referenzbild immer noch Korrespondenzen gefunden werden und einzelne auch nach RANSAC bestehen bleiben. Um also eine Unterscheidung zwischen korrektem und falschem Referenzbild zu ermöglichen, muss ein deutlicher Unterschied zwischen der Anzahl der Korrespondenzen beim korrekten Referenzbild

²<https://opencv.org>

³Aus OpenCV Version 4.6.0, https://docs.opencv.org/4.6.0/d0/d13/classcv_1_1Feature2D.html, Mai 2023

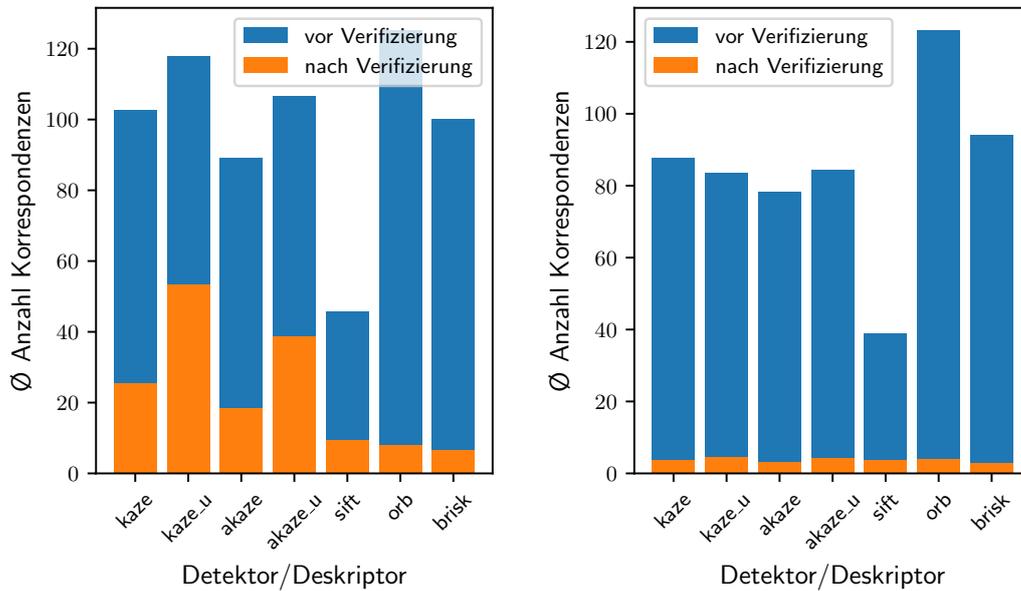


Abbildung 4.4: Vergleich der unterschiedlichen Merkmalsdeskriptoren. Links: Mittlere Anzahl der Korrespondenzen vor bzw. nach Verifikation mit RANSAC bei korrektem Referenzbild. Rechts: Mittlere Anzahl der Korrespondenzen vor bzw. nach RANSAC bei falschem Referenzbild.

gegenüber den falschen Referenzbildern sichtbar sein.

Die Trennschärfe zwischen Korrespondenzen vor der Verifikation mit RANSAC wäre bei den meisten Deskriptoren (außer denen ohne Rotationsvarianz) viel zu gering, um ein korrektes von einem falschen Referenzbild zu unterscheiden. Nach RANSAC hingegen zeigen alle Deskriptoren einen Unterschied in der Zahl der Korrespondenzen zwischen korrektem und falschem Referenzbild. Die größte mittlere Differenz tritt hier bei den rotationsabhängigen Deskriptoren KAZE (50 Korrespondenzen beim korrekten Referenzbild gegenüber vier Korrespondenzen beim falschen) und AKAZE (38 gegenüber fünf Korrespondenzen) auf.

Abbildung 4.5 zeigt die benötigte Rechenzeit für die verschiedenen Verfahren im Vergleich. Der wesentliche Unterschied in der Rechenzeit fällt auf den Interest-Operator und die Berechnung der Deskriptoren – dabei schneidet der KAZE-Deskriptor deutlich schlechter als die anderen ab. Inklusive Zuordnung und RANSAC ist die Rechenzeit bei allen Deskriptoren aber etwa gleich und ist daher im Kontext des gesamten Prozesses nicht ausschlaggebend (eine ausführliche Analyse der Laufzeit erfolgt in Abschnitt 5.7.1). Für die Bestimmung der Ähnlichkeit zweier Kartenbilder wird in allen folgenden Untersuchungen der KAZE-Deskriptor ohne Rotationsinvarianz verwendet⁴.

⁴Aus OpenCV Version 4.6.0, https://docs.opencv.org/4.6.0/d3/d61/classcv_1_1KAZE.html, Mai 2023

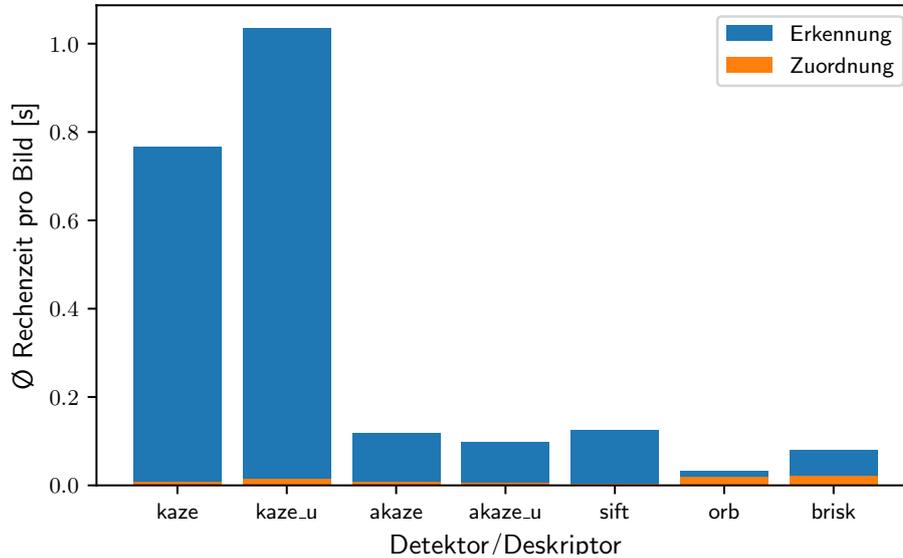


Abbildung 4.5: Vergleich der unterschiedlichen Merkmalsdeskriptoren. Vergleich des Zeitbedarfs für die Extraktion der Merkmale bzw. die Zuordnung (ohne RANSAC).

4.4.4 KAZE-Bildmerkmale

KAZE-Bildmerkmale wurden von [Alcantarilla *et al.* 2012] entworfen, um eine höhere Robustheit gegen perspektivische Verzerrungen zu erreichen als mit SIFT und SURF. Sie erreichten in ihren Experimenten eine bessere Wiederholbarkeit und Unterscheidbarkeit der Merkmale bei der 2D-Bildzuordnung. Laut [Mukherjee & Lall 2017] sind KAZE-Merkmale außerdem sehr gut geeignet, um Grenzlinien von Objekten zu finden und zu beschreiben.

Die KAZE werden Interessentpunkte auf ähnliche Weise wie bei vielen anderen Detektoren ermittelt. Die Hesse-Matrix H über ein Bild mit Grauwerten $f(x, y)$ beschreibt die zweiten partiellen Ableitungen ($\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial y_j}$) an einem gegebenen Punkt (x, y) im Bild:

$$H_f(x, y) = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial y_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial y_1} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial y_1} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial y_2} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial y_2} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial y_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial y_n} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial y_n} & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial y_n} \end{pmatrix}$$

Mit der Hesse-Matrix können die x- und y-Komponenten der Steigung der an jedem Punkt auftretenden Gradienten ermittelt werden. Über die Faltung des Bildsignal mit Gauss-Kernen unterschiedlicher Varianz t wird der sogenannte *Skalenraum* [Lindeberg 2009] erstellt. Um nun skalierungsinvariante Interessentpunkte zu finden, werden mithilfe einer um die Skalierung t normalisierte Determinante der Hesse-

Matrix die Krümmung der Bildregionen im Skalenraum berechnet. Extrema der daraus resultierenden „*Response*“ [Alcantarilla *et al.* 2012, S. 7] sind die Interesspunkte. Es kann dabei ein Grenzwert für die erwartete Stärke der „*Response*“ gesetzt werden, um die Sensitivität des Detektors zu beeinflussen.

KAZE ist damit ebenso wie die bekannteren SIFT- und SURF-Detektoren skalierungsinvariant und basiert auf im Bild enthaltenen Gradienteninformationen. Der Unterschied zu anderen bekannten skalierungsinvarianten Detektoren ist, dass bei KAZE nicht-lineare Glättung (abhängig vom Betrag des Gradienten) für die Erzeugung des Skalenraums verwendet wird. Der Vorteil ist, dass damit die Kanten weniger stark geglättet werden als Rauschen und so besser erhalten bleiben, als bei einer gewöhnlichen Glättung mit Gauss-Kernen, die bei SIFT und SURF zum Einsatz kommt.

Als Deskriptor wird M-SURF [Agrawal *et al.* 2008] verwendet. Der M-SURF-Deskriptor ermittelt die Gradienten in vier mal vier Regionen um den Interesspunkt durch Summierung der „Haar-Wavelets erster Ordnung in x- und y-Richtung“ [Bay *et al.* 2008, S. 6, übersetzt aus dem Englischen durch den Autor] (weder die ursprünglichen Entwickler von SURF, noch [Agrawal *et al.* 2008] geben Implementierungsdetails der gewählten Haar-Wavelets [Haar 1910] an, lediglich dass die „Gewichtung“ [Bay *et al.* 2008, ibd.] -1 bzw. $+1$ beträgt). Der Unterschied zum SURF-Deskriptor ist, dass sich diese Regionen überlappen und erst um ihren jeweiligen Mittelpunkt gemittelt werden, bevor sie um den Interesspunkt selbst gemittelt werden. Damit verändert sich der Deskriptor weniger abrupt, wenn sich der Bildinhalt um den Interesspunkt nur leicht verändert [Agrawal *et al.* 2008]. Der Deskriptor ist 64-dimensional, wovon jeweils vier Elemente den Mittelwert der Wavelet-Koeffizienten der vier Regionen darstellt (siehe Abb. 4.6).

Aufgrund der Erkenntnisse in Abschnitt 4.4.3, wird die nicht rotationsinvariante Variante von KAZE verwendet. Für alle anderen Parameter werden in dieser Arbeit die Standardwerte der OpenCV-Implementation übernommen⁵.

4.5 Referenzdaten

Idealerweise liegt die Referenzkarte flächendeckend und einheitlich als Vektorkarte vor. Vektordaten können schnell nach Objektart (i. e. Hydrologie) gefiltert werden und sie sind im Rahmen ihrer Aufnahme Genauigkeit maßstabsunabhängig.

Als Referenzkarte dienen in der vorliegenden Arbeit OpenStreetMap⁶-Vektordaten (OSM), da sie weltweit flächendeckend verfügbar sind sowie kostenlos und automatisiert bezogen werden können. Außerdem kann OSM nach Klassen von Objekten gefiltert werden. Die Filterung geschieht über das *Tag*-System mit *Overpass*⁷. Tags sind Attribute der in OSM erfassten Objekte, mit denen z. B. Flüsse und andere Gewässer als solche gekennzeichnet werden. Um gute Ergebnisse zu erzielen,

⁵siehe https://docs.opencv.org/4.7.0/d3/d61/classcv_1_1KAZE.html, März 2023

⁶<https://openstreetmap.com>

⁷Die API zum Abfragen von OSM-Inhalten. Siehe <https://overpass-api.de>

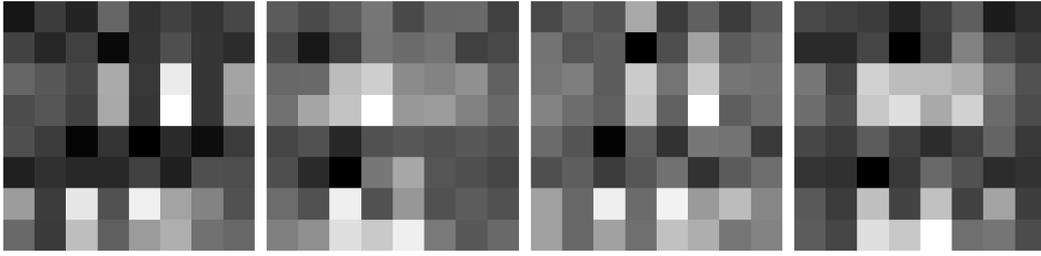


Abbildung 4.6: Visualisierung von KAZE-Deskriptoren, die aus dem ersten Ausschnitt in Abbildung 4.3 extrahiert wurden. Gruppen von jeweils vier Pixeln stellen das Ergebnis eines zweidimensionalen Haar-Wavelets dar: x-Komponente, y-Komponente, Betrag von x, Betrag von y. Über vier Regionen um den Interessentpunkt kommen so $4 \times 4 \times 4 = 64$ Werte pro Deskriptor zusammen, die hier als farbige Pixel dargestellt werden. Diese Visualisierung dient vornehmlich dazu, eine Illustration für Deskriptoren in späteren Abbildungen zu liefern.

sollten die Tags für die Filterung so gewählt werden, dass der resultierende Karteninhalt möglichst gut dem Generalisierungsniveau der Eingabekarten entspricht.

Wie eingangs in Abschnitt 4.2 erwähnt, ist für die effiziente und effektive Verarbeitung der Referenzkarte notwendig, diese in eine diskrete Menge von Ausschnitten zu unterteilen.

Die Wahl der Kartenausschnitte sollte dabei möglichst gut den tatsächlich abgebildeten Flächen der Eingabekarten entsprechen. Dies ist gut zu gewährleisten, wenn topographische Kartenwerke verarbeitet werden, zu denen ein bekannter Blattschnitt vorliegt. Dies ist bei den in dieser Arbeit untersuchten Kartenwerken der Fall (vgl. 3.4). Die Referenzkarte wird anhand dieses Blattschnitts in Ausschnitte unterteilt.

Die Ausschnitte der Referenzkarte müssen in ein vergleichbares Format zu den segmentierten Eingabebildern gebracht werden: dies ist trivial möglich durch Rasterung der Vektordaten in einfarbige Signaturen. So entsteht ein binäres Kartenbild analog zur Segmentierungsmaske der Eingabebilder: das *Referenzbild*. Abbildung 4.7 veranschaulicht den Ablauf.

Wenn der Blattschnitt nicht vorliegt, ist in der Regel zumindest die Gradabteilung der Karten bekannt. Die Blätter eines topographischen Kartenwerks haben zumeist auch identische Größen. Die Überzeichnung einzelner Blätter kann vernachlässigt werden. So können die Ausschnitte entlang eines regelmäßigen Gitters aus Längen- und Breitenlinien erstellt werden, das ausreichend groß ist, den gesamten Bereich des Kartenwerks zu umfassen.

Es können also deutlich mehr Referenzbilder vorliegen, als tatsächlich Eingabekarten georeferenziert werden sollen.

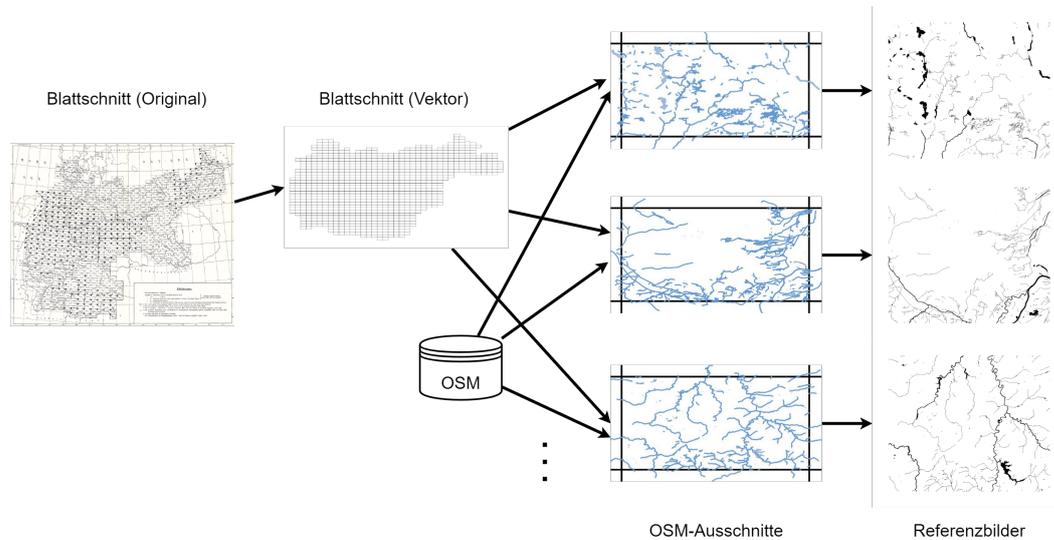


Abbildung 4.7: Erstellung der Referenzbilder: Zuerst muss vom Nutzer der Blattschnitt als Vektordaten aus eventuellen Vorlagen erstellt werden. Die Koordinaten im Blattschnitt bestimmen die Ausschnitte, in denen für jedes Blatt Vektordaten von OpenStreetMap (OSM) heruntergeladen werden. Zum Schluss werden die Vektordaten rasterisiert, um die fertigen binären Referenzbilder zu erzeugen (hier zur besseren Lesbarkeit invertiert). Karten © Staatsbibliothek zu Berlin, Kartenabteilung; OpenStreetMap contributors

4.6 Suche

Die wesentliche Herausforderung für die Georeferenzierung ist, genau den Ausschnitt der Referenzkarte zu finden, der denselben Bereich wie die Eingabekarte darstellt. Um alle möglichen Bereiche abzubilden ist je nach Kartenwerk eine riesige Menge an Referenzdaten nötig und somit eine hoch effiziente Suche erforderlich.

Um das richtige Referenzbild für eine Eingabekarte zu finden, wird zunächst die Ähnlichkeitsmetrik definiert (siehe Abschnitt 4.6.1). Der Aufbau des Index wird in Abschnitt 4.6.2 behandelt.

Mit der Indexsuche (im Information Retrieval heißt dieser Schritt *Search*) können sehr schnell Kandidaten grob geprüft werden. Die Abfrage des Index wird in Abschnitt 4.6.3 thematisiert.

Die Indexsuche ergibt eine totale Ähnlichkeitsordnung der Referenzbilder. Die ähnlichsten Referenzbilder, auch *Hypothesen* genannt, werden unter Berücksichtigung der räumlichen Zusammenhänge der Bildmerkmale verifiziert, um die beste Hypothese zu finden. Diese Hypothesenverifikation (auch *Ranking* genannt) wird in Abschnitt 4.6.4 behandelt. Die geographische Lage des Referenzbildes, auf die sich diese ähnlichste Hypothese bezieht, stellt die Vorhersage der geographischen Lage der Eingabekarte dar.

Erst danach kann das Eingabebild mit der ähnlichsten Referenzkarte registriert werden, was in Abschnitt 4.7 am Ende des Kapitels behandelt wird.

4.6.1 Ähnlichkeit

Entlang der Signaturen von Eingabe- und Referenzbild werden wie in Abschnitt 4.4 beschrieben Bildmerkmale extrahiert. Um die zwei Bilder als ähnlich bezeichnen zu können, müssen sie gleiche oder sehr ähnliche Bildmerkmale enthalten. Analog zum *Bag of Words*-Modell in der Kodierung von Text, wird diese Repräsentation auch *Bag of Visual Words* genannt [Csurka *et al.* 2004]. Je mehr Merkmale zwischen den zwei Bildern zugeordnet werden können, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass sie den gleichen Inhalt darstellen. Die Ähnlichkeit zwischen zwei Kartenbildern wird hier definiert als die Anzahl der enthaltenen korrespondierenden Bildmerkmale. (Diese Ähnlichkeitsdefinition wird für die Indexsuche in Abschnitt 4.6.3 und für die Hypothesenverifikation in Abschnitt 4.6.4 leicht angepasst.) Da jedes Kartenblatt unterschiedlich viele Signaturen enthält und so auch nur unterschiedlich viele Bildmerkmale gefunden werden können, ist dieses Ähnlichkeitsmaß kein absolutes, sondern nur geeignet, die Ähnlichkeit mehrere Referenzbilder zu einem Eingabebild zu vergleichen.

Die Zuordnung der Bildmerkmale soll robust gegen Unterschiede in der Skalierung, Rauschen und leichte Verschiebung der Interestpunkte sein. Da die Bildmerkmale also selten exakt gleich sind, wird für jedes Merkmal aus Bild A das ähnlichste Merkmal in Bild B gesucht. Um eine höhere Robustheit zu erreichen werden entweder nur die Zuordnungen gezählt, bei denen auch die Gegenprobe gelingt (d. h. das Merkmal aus Bild A muss auch das ähnlichste zum Merkmal in Bild B sein) oder *Lowe's Test Ratio* [Lowe 2004] angewandt (dabei muss das zweitähnlichste Merkmal in Bild B deutlich weniger ähnlich sein, als das ähnlichste).

Klassischerweise geschieht die Zuordnung (engl. *feature matching*) mit sogenanntem *Brute Force-Matching*, d. h. jedes Merkmal aus Bild A wird mit jedem Merkmal aus Bild B verglichen. Da dieser Vorgang eine recht hohe Zeitkomplexität hat, würde es zu lange dauern, alle Referenzbilder eines größeren Kartenwerkes sequentiell zu prüfen. Wenn viele Referenzbilder vorliegen, oder wenn viele Eingabekarten nacheinander georeferenziert werden sollen, steigt der Zeitbedarf stark an und es wäre erforderlich die Bildmerkmale der Referenzkarten immer wieder neu zu extrahieren.

4.6.2 Indizierung der Referenzbilder

Die Zuordnung der Merkmale zwischen Eingabe- und Referenzkarten kann wesentlich beschleunigt werden, indem die Merkmale der Referenzkarten vorab indiziert werden.

Wenn die Bildmerkmale in einem schnell durchsuchbaren *Index* abgelegt werden, kann verhindert werden, dass immer wieder ähnliche Berechnungen für wiederholt angefragte Referenzbilder neu durchgeführt werden müssen. Damit hat der Index denselben Zweck, wie die in der bildbasierten Lokalisierung auch übliche Quantisierung der Bildmerkmale in Wörterbüchern [Irschara *et al.* 2009, Sattler *et al.* 2012].

Um anschließend bei der Suche wieder das entsprechende Referenzbild zuzuordnen zu können, wird zu jedem im Index abgelegten Merkmal abgespeichert, aus

welchem Referenzbild dieses entstammt. Genau genommen handelt es sich also um einen *invertierten Index*, der für ein gesuchtes Bildmerkmal einen Verweis auf den entsprechenden Ausschnitt der Referenzkarte zurückgibt.

Die Aufteilung der Referenzkarte anhand eines Blattschnittes schränkt freilich die Verwendung des Index auf die zum Blattschnitt passenden Kartenwerke ein. Somit muss für jedes neue Kartenwerk mit anderem Blattschnitt ein neuer Index trainiert werden.

Für den Index kommen Suchbäume zum Einsatz, die den Merkmalsraum der Deskriptoren in möglichst gleich große Partitionen teilt. Das erlaubt die Suche eines abgelegten Bildmerkmals in logarithmischer Zeit. Die Zuordnung zu einem Bildmerkmal im Eingabebild geschieht, indem mit den Werten diesen Eingabemerkmals der Suchbaum traversiert wird, um das ähnlichste Referenzmerkmal zu finden.

Da die Zuordnungen selten exakt möglich sind, sollten stattdessen die im Merkmalsraum *k nächsten Nachbarn* eines Merkmals aus dem Eingabebild gesucht werden. Damit werden *k* Korrespondenzen zu maximal *k* Referenzbildern erreicht. Unter diesen *k* möglichen Korrespondenzen ist dann mit höherer Wahrscheinlichkeit die gewünschte Korrespondenz zum korrekten Referenzbild.

Bei der Abfrage von *n* Eingabemerkmalen, erhält man $n * k$ Zuordnungen zu Referenzmerkmalen. Wenn viele dieser Referenzmerkmale demselben Referenzbild entspringen, ist dies starke Evidenz dafür, das korrekte Referenzbild gefunden zu haben.

4.6.2.1 Indizierung mit *annoy*

Da eine exakte Zuordnung nicht nötig ist, kann auch eine *approximate nearest neighbour* Suche verwendet werden, die im Mittel noch effizienter ist [Indyk & Motwani 1998]. In dieser Arbeit kommt dabei als konkrete Implementierung aufgrund der guten Performanz und der einfachen Anwendung *annoy*⁸ zum Einsatz.

Der *annoy*-Index wird trainiert, indem für jedes Referenzkartenbild eine Anzahl an Bildmerkmalen extrahiert wird, die darin abgelegt werden. Nachdem alle Bildmerkmale abgelegt wurden, wird der hochdimensionalen Merkmalsraumes (entsprechend der Dimensionalität des Deskriptors, mit KAZE also 64-dimensional) zur schnelleren Durchsuchbarkeit inkrementell eine binäre Raumpartitionierung durchgeführt (siehe Abb. 4.8).

Zur Unterteilung werden zwei zufällige Merkmale ausgewählt und in deren Mitte eine Hyperebene eingezogen. Die beiden Merkmale, die danach auf den jeweiligen Seiten der Hyperebene liegen, ergeben ein neues Blatt des Suchbaumes. Jedes Blatt wird so weit weiter unterteilt, bis die Blätter höchstens *K* Merkmale enthalten. Abbildung 4.9 veranschaulicht die iterative Unterteilung des Merkmalsraumes. *K* wird dabei abhängig von der Größe der Deskriptoren und der Systemarchitektur automatisch ermittelt, um den Baum möglichst speichereffizient zu gestalten. Die

⁸*Approximate Nearest Neighbours Oh Yeah* Version 1.17.1, <https://github.com/spotify/annoy>, März 2023

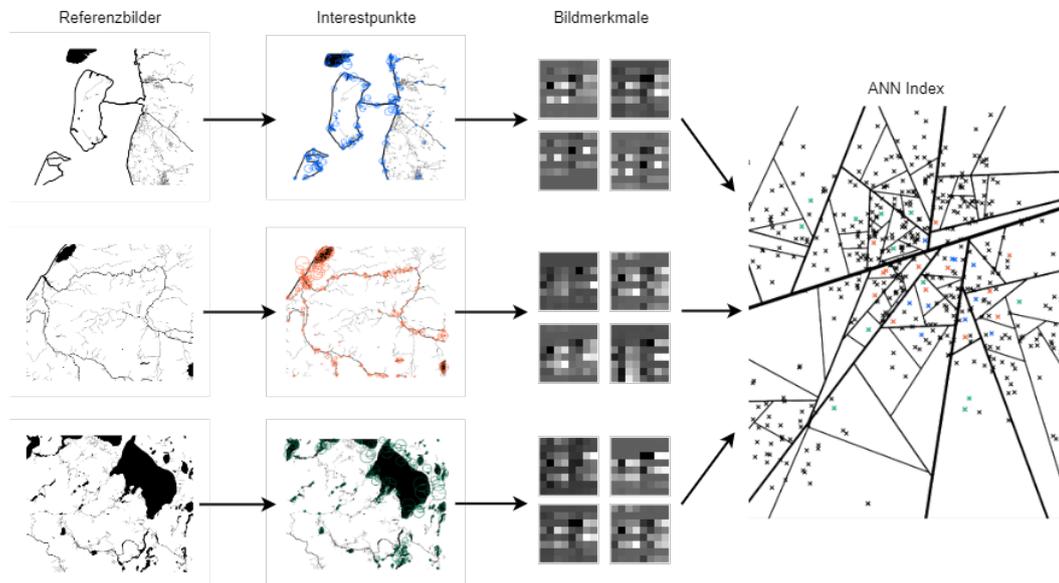


Abbildung 4.8: In allen Referenzbildern werden Interestpunkte detektiert, die entsprechenden Bildmerkmale extrahiert und im Approximate Nearest Neighbours-Index abgelegt (hier vereinfacht zweidimensional dargestellt). Dabei bleibt die Information über die Zugehörigkeit zum jeweiligen Referenzbild bestehen (hier illustriert über die Farbe der Punkte im Merkmalsraum). Karten © OpenStreetMap contributors

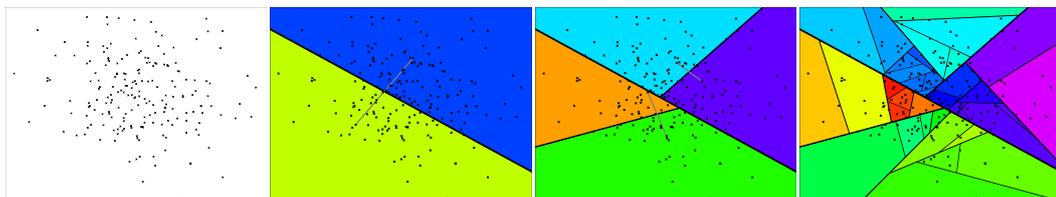


Abbildung 4.9: Visualisierung des Indexaufbaus mit *annoy*. Bildmerkmale werden vereinfacht als Punkte im zweidimensionalen Raum dargestellt. Mit jeder Iteration des Indexaufbaus wird der Merkmalsraum mit einer Hyperebene in der Mitte von zwei zufälligen Punkten aufgeteilt. So werden alle Teile des Merkmalsraumes weiter unterteilt, bis eine Maximalanzahl von Punkten je Teilbereich unterschritten wird. Abbildung erzeugt mithilfe von <https://github.com/erikbern/ann-presentation>

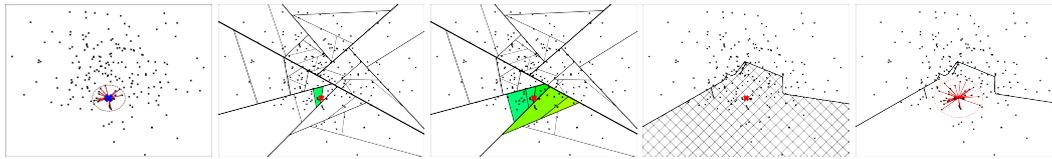


Abbildung 4.10: Visualisierung der Approximate Nearest Neighbour-Suche mit *annoy*. 1. Die Nachbarn (roter Kreis) eines bestimmten Punktes werden gesucht (blaues Kreuz). 2. Ein einzelnes Blatt des Suchbaums (farbige Fläche) genügt nicht, um die nächsten Nachbarn im Merkmalsraum zu finden. 3. Also werden auch benachbarte Blätter (farbige Flächen) mit einbezogen. 4. Die Vereinigung der geprüften Blätter (schraffiert) von mehreren Suchbäumen erlaubt, einen größeren Bereich des Merkmalsraumes einzubeziehen und so wahrscheinlicher die richtigen Bildmerkmale zu finden. 5. Zuletzt werden nur aus den Punkten der Vereinigung die nächsten Nachbarn gesucht. Abbildung erzeugt mithilfe von <https://github.com/erikbern/ann-presentation>

für die Experimente trainierten Indizes hatten höchstens 66 Merkmale in einem Blatt, im Durchschnitt aber nur 48.

Der fertige Baum hat die Eigenschaft, dass Merkmale, die im Merkmalsraum nahe beieinander liegen, auch im Baum in benachbarten Ästen bzw. Blättern des Baumes liegen. Um zu einem Eingabemerkmale also die nach L^2 -Norm (die Wahl der Norm ist abhängig vom Deskriptor) nächsten Nachbarn im Merkmalsraum zu finden, wird das Blatt gesucht, das den Teilraum beschreibt, in den das Eingabemerkmale fallen würde (siehe Abb. 4.10, 2. Bild). Wenn das Blatt mehr Merkmale enthält, als nächste Nachbarn gesucht werden, wird innerhalb des Blattes mittels *Brute Force* gesucht. Falls im Blatt zu wenige Merkmale enthalten sind, können auch die Nachbarblätter und -äste hinzugezogen werden (siehe Abb. 4.10, 3. Bild).

Da nicht immer garantiert ist, dass auch wirklich alle nächsten Nachbarn in diesen Blättern enthalten sind, wird ein Ensemble aus Bäumen trainiert, von dem bei einer Abfrage alle Bäume gleichzeitig traversiert werden und die jeweils gefundenen Blätter vereint werden (siehe Abb. 4.10, 4. Bild). So wird die Wahrscheinlichkeit reduziert, die im Merkmalsraum nahen Merkmale aufgrund einer ungünstigen Teilung der Bäume fälschlicherweise zu verwerfen. Für die Anzahl der Bäume muss zwischen Laufzeit und erreichbarer Genauigkeit (also ob die zurückgelieferten Nachbarn auch wirklich die nächsten Nachbarn sind) abgewogen werden. Für die vorliegende Arbeit wurden zehn Bäume gewählt, eine größere Anzahl hat keine merkliche Verbesserung ergeben, da in der Regel mehr Merkmale in den Blättern liegen, als gesucht werden.

Je nachdem, wie viele Gewässer in den Referenzbildern abgebildet sind, können unterschiedlich viele Bildmerkmale extrahiert werden. Daraus könnte ein Ungleichgewicht entstehen, so dass Referenzbilder mit mehr Merkmalen öfter im Index vertreten sind und so mehr Zuordnungen erlauben, als Referenzbilder mit nur wenigen Bildmerkmalen. Um dies zu vermeiden, wird die Anzahl der im Index abgelegten Merkmale je Referenzbild begrenzt. Die genaue Anzahl der Merkmale pro Bild ist nicht wesentlich, da ohnehin nur die besten Merkmale, also die mit dem stärksten Detektorsignal (siehe Abschnitt 4.4.4), auch zu guten Zuordnungen führen. Eine

Auswahl der 300 besten Merkmale erscheint ausreichend, da im obigen Vorexperiment in Abschnitt 4.4.3 nur bis zu 200 Korrespondenzen je Bilderpaar erreicht wurden.

4.6.3 Indexsuche

Für die Indexsuche werden Bildmerkmale aus dem Eingabebild extrahiert (siehe Abschnitt 4.4). Je nach Dichte der Signaturen im Eingabebild können das hunderte Bildmerkmale sein. Da aber darunter auch Deskriptoren sind, die wenig deskriptiv sind, genügt es, die 500 Bildmerkmale mit dem stärksten Detektorsignal zu verwenden (siehe Abb. 4.11 Mitte oben). Hier werden mehr Merkmale extrahiert, als für die Referenzbilder, weil Segmentierungsfehler eine schlechtere Qualität der Bildmerkmale vermuten lassen.

Für jedes Bildmerkmal des Eingabebildes werden die k ähnlichsten Merkmale aus dem Index abgefragt. Jedes dieser k Merkmale entspricht einer Korrespondenz in einem Referenzbild. So können bis zu $500 * k$ Korrespondenzen zu verschiedenen Referenzbildern gefunden werden. Um die Ähnlichkeit zu all diesen Referenzbildern zu berechnen, gibt jedes Merkmal eine *Stimme* für das Referenzbild ab, aus dem es entstammt.

Da Deskriptoren in weniger gefüllten Bereichen des Merkmalsraums relativ weit voneinander entfernt sein können und dennoch vom Index als nächste Nachbarn bestimmt werden, sind nicht alle Korrespondenzen gleich gut (siehe Abb. 4.11 rechts oben). Dadurch kommen fehlerhafte Stimmen zustande, was schlimmstenfalls dazu führt, das falsche Referenzbild zu bestimmen (eine verbreitete Schwäche von IR-Verfahren für die Lokalisierung [Sattler *et al.* 2012]).

Um ein robusteres Ähnlichkeitsmaß zu erreichen, werden die Stimmen der Referenzmerkmale unterschiedlich stark gewichtet. Dafür werden sie nach absteigender Distanz zum Eingabemerkmal sortiert und das Stimmgewicht nimmt proportional zur Stelle in dieser Ordnung ab. So bekommt der k nächste Nachbar nur ein Stimmgewicht von $1/k$ (siehe Abb. 4.11 rechts unten). Diese gewichtete Stimmabgabe der nächsten Nachbarn erlaubt, unterschiedlich gute Korrespondenzen unterschiedlich stark zu bewerten, ohne Annahmen über die Verteilung der Bildmerkmale im Merkmalsraum zu treffen.

Durch die abnehmende Gewichtung ist die genaue Wahl von k nicht ausschlaggebend, es sollte aber ausreichend groß sein, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit Zuordnungen zum korrekten Referenzbild hergestellt werden. In der vorliegenden Implementierung wurde $k = 50$ gewählt⁹, weil damit im Regelfall schon alle Merkmale in einem einzelnen Blatt des Suchbaums erreicht werden (vgl. Abschnitt 4.6.2.1).

Zuletzt werden für jedes Eingabebild die gewichteten Stimmen für jedes Referenzbild aufsummiert. Die Summe der Stimmen ergibt eine „ungefähre Ähnlichkeit“ der Eingabekarte zu diesem jeweiligen Referenzbild. Diese *Index-Ähnlichkeit* ist nicht ganz so aussagekräftig wie die Anzahl der Korrespondenzen bei einer vollständigen

⁹Alle konkret gewählten Parameter werden im Anhang B aufgelistet.

Zuordnungen aller Bildmerkmale, genügt aber, um für jede Eingabekarte die Referenzbilder nach Ähnlichkeit zu sortieren und die Referenzbilder mit der höchsten Ähnlichkeit zu bestimmen (siehe Abb. 4.11 Mitte unten).

4.6.4 Hypothesenverifikation

Die größte Limitation der Index-Ähnlichkeit ist, dass die räumlichen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Bildmerkmalen nicht berücksichtigt werden. Für die Geometrie der Signaturen ist aber essentiell, wie die Merkmale im Bild angeordnet sind. Rein lokale Strukturen (z. B. Verzweigungen und Biegungen), wie sie von einem Bildmerkmal kodiert werden, wiederholen sich wahrscheinlich oft an verschiedenen Orten und sind damit alleine nicht aussagekräftig genug. Wie Abbildung 4.12 veranschaulicht, kann z. B. ein Fluss erst durch die Betrachtung seines weiteren Verlaufs eindeutig identifiziert werden. Diese nicht-lokale Struktur wird dadurch bestimmt, in welchen Abständen und Winkeln die lokalen Merkmale zueinander liegen.

Die nicht-lokale Ähnlichkeit wird geprüft, indem die räumliche Anordnung der Bildmerkmale innerhalb eines Bildes mit der räumlichen Anordnung der Bildmerkmale im zweiten Bild verglichen wird. Wenn also die Bildmerkmale markante Punkte beschreiben, müssen die Positionen der korrespondierenden Merkmale eines zweiten Kartenbildes die gleiche relative Anordnung zueinander aufweisen (siehe Abb. 4.12). Dies wird sichergestellt, indem die Parameter eines Transformationsmodells geschätzt werden, mit dem die Bildmerkmale im Eingabebild auf die Bildmerkmale im Referenzbild unter Einhaltung der geometrischen Beziehungen abgebildet werden. Dieses Transformationsmodell kann in der Regel nicht exakt bestimmt werden, sondern muss die folgenden Freiheitsgrade zulassen:

- Leichte Ungenauigkeit in der Platzierung der Punkte.
- Skalierungstoleranz: Eingabe- und Referenzbilder können eine unterschiedliche Auflösung haben oder Karten mit unterschiedlichem Maßstab enthalten.
- Rotationstoleranz: Die Eingabekarten liegen zwar alle mit Norden nach oben vor, sind aber bei der Digitalisierung nicht immer perfekt ausgerichtet. Es sind also leichte Rotation um ein paar Grad hingegen zu erwarten.
- Translationstoleranz: Die Eingabekarten weisen häufig einen Kartenrand auf, teilweise ist dieser aber auch abgeschnitten. Daher liegt der Karteninhalt nicht immer an den Rändern des Bildes.

Ferner muss damit gerechnet werden, dass viele Zuordnungen zwischen Eingabe- und Referenzbild fehlerhaft sind (vgl. Abschnitt 4.6.1). Diese nennt man *Ausreißer* (engl. *Outliers*) und müssen automatisch aussortiert werden.

In der Bildverarbeitung hat sich für die Modellschätzung der *Random Sampling Consensus*-Algorithmus (RANSAC) durchgesetzt [Fischler & Bolles 1981]. RANSAC erlaubt im Prinzip beliebige Transformationsmodelle zur Wahrung der geometrischen Beziehungen, wird aber in der Regel mit ebenen Transformationen, also

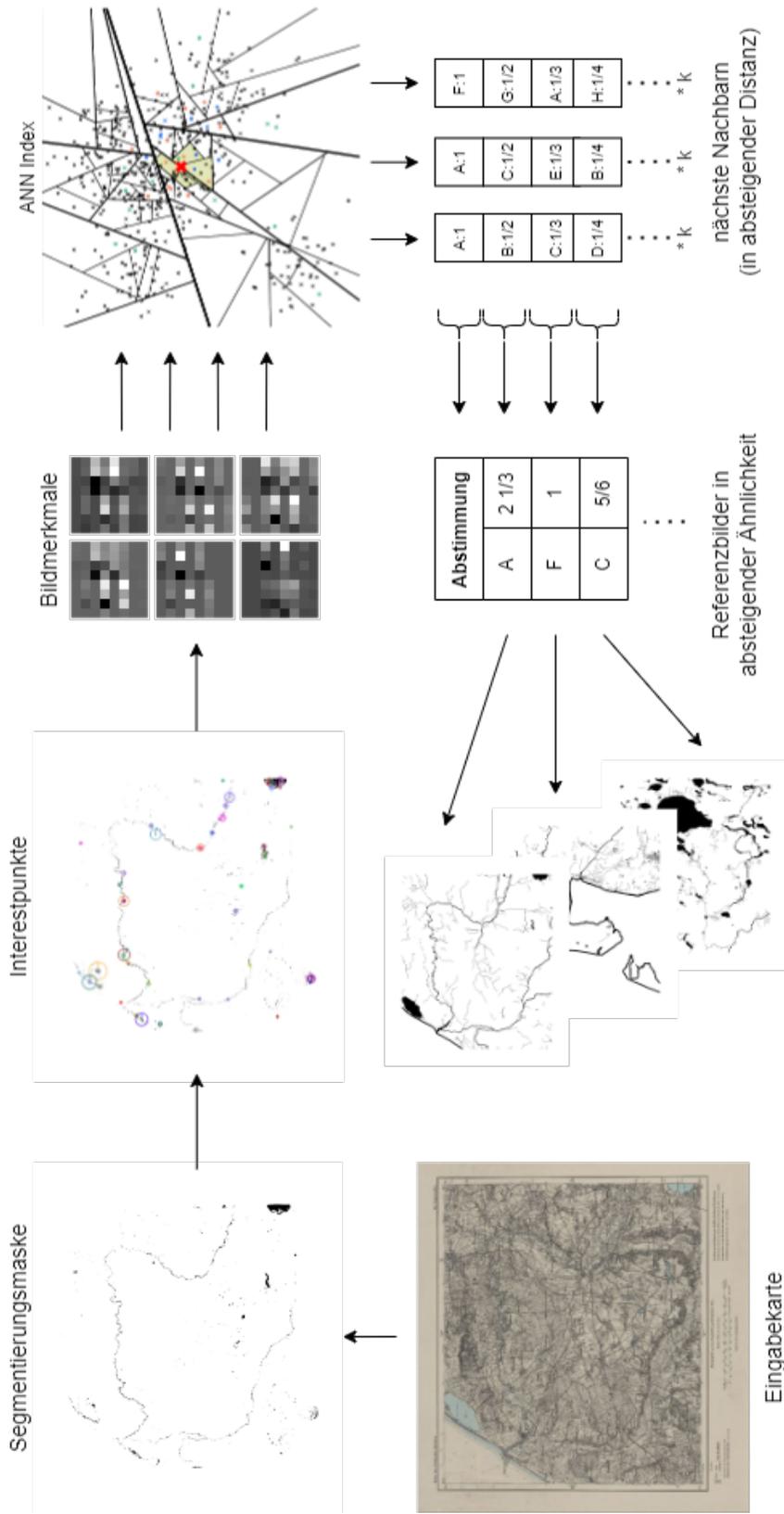


Abbildung 4.11: Überblick über den Prozess der Indexsuche. Aus dem segmentierten Eingabebild werden alle Bildmerkmale extrahiert. Für jedes Eingabemerkmale werden die k nächsten Nachbarn aus dem Index abgefragt (gelb hinterlegter Bereich). Durch die Information über die Zugehörigkeit der Referenzmerkmale im Index werden die Evidenzen für das jeweilige Referenzbild nach Merkmalsähnlichkeit gewichtet aufsummiert. Das Ergebnis ist eine Ähnlichkeitsordnung der Referenzbilder. Karten © Staatsbibliothek zu Berlin, Kartenabteilung; OpenStreetMap contributors



Abbildung 4.12: Lokale vs. nicht-lokale Struktur: Zwei hypothetische Kartenausschnitte mit gefundenen Interesspunkten (farbige Kreise). Wenn man nur die lokale Struktur um die Interesspunkte betrachten würde (wie es die Deskriptoren tun), könnte man die Ausschnitte für den selben Fluss halten. Erst durch die Berücksichtigung der räumlichen Anordnung der Bildmerkmale zueinander (rote Pfeile) wird klar, dass es sich um einen komplett anderen Flusslauf handelt.

Ähnlichkeits-, Affin- oder Perspektivtransformation, implementiert, was die allermeisten Anwendungsfälle in der Bildverarbeitung erlaubt.

Bei RANSAC wird iterativ aus zufälligen Teilmengen von Merkmalskorrespondenzen ein Transformationmodell errechnet, mit dem ein Schwellwert an Restfehler (engl. *Residual*) unterschritten werden muss. Nach einer gewissen Anzahl von Iterationen wird das Transformationmodell gewählt, das die meisten im Modell einbezogene Korrespondenzen (engl. *Inlier*) enthält. Die Anzahl der Iterationen bemisst sich entweder an einer Höchstzahl, einer zu unterschreitenden Wahrscheinlichkeit von Lösungen mit Ausreißern¹⁰ oder einer Schranke zu erreichender einbezogener Korrespondenzen.

Bei einer gewünschten Lösungswahrscheinlichkeit p und der Anzahl von notwendigen Parametern für das Transformationsmodell s (zur Bestimmung einer Affintransformation sind $s = 6$ Parameter notwendig) ergibt sich folgende Formel der notwendigen Iterationen n :

$$n = \frac{\log(1 - p)}{\log(1 - (1 - \varepsilon)^s)}$$

Dabei entspricht ε dem relativen Anteil der Ausreißer in den Korrespondenzen (Ausreißerquote) [Fischler & Bolles 1981].

Man kann also ohne Kenntnis der Ausreißerquote keinen absoluten Schwellwert von Korrespondenzen angeben, ab dem die Bilder als gleich akzeptiert werden können. Stattdessen wird in der Literatur gelegentlich eine Mindestanzahl an verifizierten Korrespondenzen festgelegt, die eine Zuordnung als korrekt definiert (z. B. 10 bei [Irschara *et al.* 2009, Kalantidis *et al.* 2011]), dies würde aber verhindern, die Zahl

¹⁰vgl. die hier verwendete Implementation aus scikit-image Version 0.19.2, <https://scikit-image.org/docs/0.19.x/api/skimage.measure.html?highlight=ransac#skimage.measure.ransac>, Januar 2023

der zuordenbaren Bildmerkmale als Ähnlichkeitsmaß zwischen Eingabe- und Referenzbild zu nutzen (siehe Abschnitt 4.6.1). Außerdem haben manche Bilder schlicht mehr deskriptiven Inhalt (und damit mehr Bildmerkmale, die extrahiert werden können) als andere.

Für die vorliegende Implementierung werden stattdessen maximal 1000 Iterationen durchgeführt oder abgebrochen, wenn die Wahrscheinlichkeit einer Ausreißer-freien Lösung 99 % beträgt (Standardwert)¹¹. Mit diesen Abbruchkriterien können nach obiger Formel für eine Affintransformationen Ausreißer-freie Lösungen bis zu einer Ausreißerquote von knapp 60 % gefunden werden.

Anstatt das korrekte Referenzbild an einer festen Schwelle von Korrespondenzen zu bestimmen, werden die untersuchten Referenzbilder nach Anzahl der Korrespondenzen sortiert. Anhand dieser Ähnlichkeitsordnung kann das Referenzbild ermittelt werden, das dem Eingabebild am ähnlichsten ist.

Nachdem RANSAC durchgeführt wurde, erhält man also eine Zahl an verifizierten Korrespondenzen, die ein zuverlässigeres Ähnlichkeitsmaß darstellt als die Zahl der durch die Indexsuche zugeordneten Merkmale (siehe Abb. 4.13).

Die Verifizierung der Hypothesen durch Überprüfung der nicht-lokalen Struktur mit RANSAC wird in der IR-Literatur auch *Spatial* oder *Geometric Verification* genannt [Perd'och *et al.* 2009, Sattler *et al.* 2012]. Dieser Schritt ist im Vergleich zur Index-basierten Suche sehr rechenaufwendig. Daher werden nur die besten (d. h. laut Index ähnlichsten) Hypothesen für die Verifizierung herangezogen. Wie viele Hypothesen geprüft werden sollten, ist eine Abwägung zwischen Rechenzeit und erreichbarer Genauigkeit. Die genaue Zahl lässt sich a priori nicht festlegen und wird in der Auswertung erörtert (siehe Abschnitt 5.7.2.1).

Für diese besten Hypothesen wird nacheinander die Verifizierung mittels RANSAC durchgeführt. Dafür müssen zuerst die Bildmerkmale aus dem Eingabebild und die der jeweiligen Referenzbild-Hypothese vorliegen. Nach der Index-Suche haben nicht alle Eingabemerkmale eine Entsprechung im ähnlichsten Referenzbild, manche Merkmale wurden auch anderen Referenzbildern zugeordnet. Um für die Hypothesenverifikation nur Korrespondenzen mit einem bestimmten Referenzbild zu zählen, muss eine erneute Zuordnung durchgeführt werden. Praktischerweise werden die Bildmerkmale mitsamt ihren Positionen im Referenzbild mit dem Index abgespeichert, um Rechenzeit für die wiederholte Merkmalsextraktion zu sparen.

Nachdem alle Hypothesen verifiziert wurden, liegen mit der Zahl der verifizierten Korrespondenzen neue, robustere Ähnlichkeitswerte vor. Die Hypothese mit der höchsten Anzahl von verifizierten Korrespondenzen ist die Vorhersage (siehe Abb. 4.13 rechts). Damit liegen für das Eingabebild erstens, die wahrscheinlich entsprechende Referenzkarte; zweitens, eine initiale Transformation und drittens, die Weltkoordinaten der Referenzkarte vor.

¹¹Alle konkret gewählten Parameter werden im Anhang B aufgelistet.

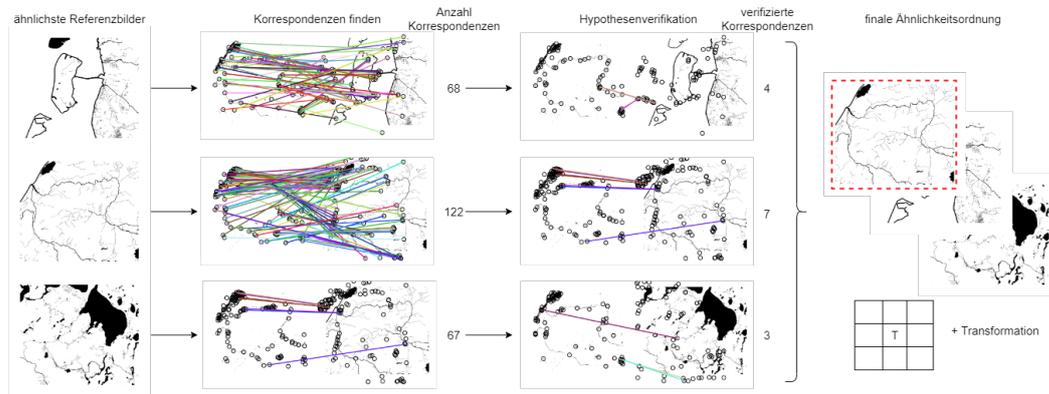


Abbildung 4.13: Die laut Index ähnlichsten Referenzbilder (Hypothesen) werden verifiziert. Dafür werden zuerst alle Merkmale des Eingabebildes den Merkmalen des jeweiligen Referenzbildes zugeordnet. Die Zahl der gefundenen Korrespondenzen reduziert sich nach der Verifikation mit RANSAC weiter. Nun können die Referenzbilder nach Anzahl der verifizierten Korrespondenzen sortiert werden. Das Referenzbild mit der höchsten Anzahl verifizierter Korrespondenzen gilt als die Vorhersage (rot umrandet). Die von RANSAC ermittelte Transformation kann für eine initiale Georeferenzierung herangezogen werden. Karten © OpenStreetMap contributors

4.6.4.1 Präemptionsheuristik

Wie im Experiment zu Merkmalsdeskriptoren (siehe Abschnitt 4.4.3) sichtbar wurde, ist die Anzahl der verifizierten Korrespondenzen bei einer korrekten Hypothese gegenüber den falschen Hypothesen im Mittel deutlich größer. Wenn also während der Verifikation von einer Hypothese zur nächstähnlichen ein deutlicher und plötzlicher Unterschied in der Zahl der verifizierten Korrespondenzen festgestellt wird, kann man davon ausgehen, bereits die korrekte Hypothese gefunden zu haben und die Verifikation vorzeitig abbrechen. Dies ist insbesondere dann interessant, wenn die Indexsuche schon ausreichend war, um die korrekte Referenzkarte als ähnlichste zu bestimmen und so die korrekte Hypothese an erster Stelle liegt. In den anderen Fällen muss aber damit gerechnet werden, dass die Vorhersage nicht zuverlässig ist und diese *Präemptionsheuristik* zu früh abbricht. Für die in Kapitel 5 durchgeführten Experimente wird auf ein präemptives Verfahren verzichtet. Stattdessen wird in Abschnitt 5.7.1 dediziert untersucht, wie viel Laufzeit mit dieser Heuristik zu welchen Kosten eingespart werden könnte.

4.7 Registrierung

Für die Georeferenzierung müssen zwei Aufgaben gelöst werden, die entweder zusammen oder in getrennten Schritten durchgeführt werden können:

1. Die Rektifizierung, um Deformationen im Blatt, z. B. durch nicht perfekte

Ausrichtung beim Digitalisieren, unterschiedlich weit abgeschnittene Kartenränder, oder auch Wellungen des Papiers, auszugleichen¹².

2. Die Zuweisung einer Transformation, die Modellkoordinaten (in Pixel) unter Berücksichtigung des räumlichen Bezugssystems in Weltkoordinaten (z. B. in Grad geographischer Länge und Breite) abbildet.

Es sind also zwei Koordinatentransformationen zu bestimmen: erstens eine *geometrische Transformation* in der Bildebene für die Rektifizierung und zweitens eine *Welttransformation*, die in Verbindung mit Kartenabbildung und geodätischem Datum den geographischen Raumbezug darstellt.

Um die Eingabekarte mit dem gefundenen Bild registrierbar zu machen, muss die Referenzkarte in die Kartenabbildung der jeweiligen Eingabekarte umprojiziert werden¹³ (die Notwendigkeit identischer Kartenabbildungen wurde in Abschnitt 4.2 erläutert). So liegt etwa die hier verwendete OSM-Referenzkarte in WGS84 vor und alle Eingabekarten in der Preußischen Polyederprojektion (siehe Abschnitt 3.4). Danach kann die Eingabekarte mittels einer affinen Transformationen mit einem Referenzbild registriert werden (in Abschnitt 3.2.2 werden die erwarteten Verzerrungen erläutert). Durch die Registrierung wird die Eingabekarte rektifiziert und in Verbindung mit der Georeferenz des Referenzbildes georeferenziert.

4.7.1 Rektifizierung

Die Hypothesenverifikation mit RANSAC liefert schon eine affine Transformation zurück. Diese beschreibt eine Abbildung der Punkte im Eingabebild auf das Referenzbild unter Wahrung der räumlichen Anordnung der Punkte. Diese könnte also direkt zur Registrierung des Eingabebildes genutzt werden.

Die Berechnung dieser Transformation verwendet nur eine geringe Anzahl von Passpunkten. Die Platzierungsgenauigkeit der Punkte ist aber nicht immer optimal, da je nach Generalisierung und Bildauflösung die Bildmerkmale zwischen Eingabe- und Referenzkarte leicht verschoben sein können. Deshalb kann die Transformation recht ungenau sein. Um die Genauigkeit zu verbessern, wird die Registrierung in einem zweiten Schritt unter Einbeziehung des gesamten Bildinhaltes verfeinert.

Dafür wird ein flächenbasiertes Registrierungsverfahren eingesetzt, das möglichst alle Pixel zueinander in Passung bringt. Somit können z. B. Informationen über einen gesamten Flussverlauf genutzt werden, anstatt nur einzelne Punkte, etwa an Abzweigungen oder anderen markanten Stellen. So können auch noch einzelne verbliebene Ungenauigkeiten korrigiert werden.

Für diese Feinregistrierung wird das ECC-Verfahren (*Enhanced Correlation Coefficient*) angewandt. Im Prinzip sind auch andere Verfahren denkbar, aber ECC scheint eine etablierte Standardmethode zur starren flächenbasierten Registrierung

¹²Ob dabei auch Verzerrungen im tatsächlichen Karteninhalt ausgeglichen werden sollen, hängt von der Anwendung ab und wie weit die Lesbarkeit des Originalmaterials erhalten bleiben soll.

¹³Mit der Standardbibliothek PROJ, <https://github.com/OSGeo/PROJ>.

zu sein (vgl. Abschnitt 2.4.2.2) und liegt in der Standardbibliothek OpenCV vor¹⁴. ECC wird iterativ gelöst, d. h. es wird schrittweise eine Bildtransformation auf das zu registrierende Ursprungsbild angewandt und dann die resultierende Bildähnlichkeit zum Zielbild berechnet. Hier wird das Eingabebild auf das Referenzbild registriert.

Das ECC-Verfahren vergleicht Gradienten zwischen Ursprungsbild und Zielbild, um theoretisch „subpixel“-genaue Passung erreichen zu können. Der namensgebende ECC ist dabei das globale Ähnlichkeitsmaß, das im Verfahren iterativ maximiert wird. In jeder Iteration wird eine Transformation T angewandt und der ECC folgendermaßen neu berechnet:

$$ECC(T) = \frac{i_z \cdot i_v(T)}{\|i_z\| \|i_v(T)\|}$$

Dabei sind i_z und i_v die Grauwerte des Zielbildes bzw. des mittels T verzerrten Ursprungsbildes (in vektorieller Notation). Durch die Normalisierung der Bilder mit der L^2 -Norm $\|\cdot\|$ ist der ECC invariant gegenüber globalen Kontrast- und Helligkeitsunterschieden. Außerdem ist dieses Ähnlichkeitsmaß „statistisch robust gegenüber Ausreißern“ [Evangelidis & Psarakis 2008a, S. 2, Übersetzung aus dem Englischen durch den Autor].

$ECC(T)$ wird maximiert, indem (ausgehend von einer Initialisierung oder der Einheitsmatrix) die Komponenten von T iterativ „perturbiert“ werden. Diese Perturbation der Modellparameter folgt dabei dank einiger Approximationen einem relativ effizienten Gradientenverfahren, bis ein Schwellwert der Differenz zwischen zwei Iterationen unterschritten wird (*Konvergenz*). Für die genaue Berechnung der Perturbationen sei auf [Evangelidis & Psarakis 2008a, Evangelidis & Psarakis 2008b] verwiesen.

Wie viele iterative Optimierungsverfahren, ist auch dieses Verfahren empfindlich gegenüber lokalen Minima und kann fälschlicherweise zu diesen konvergieren [Zitová & Flusser 2003, Hwooi & Sabri 2017]. Daher wird das Verfahren hier mit der Transformation aus RANSAC initialisiert (vgl. Abschnitt 2.4.2.2)

Die Registrierung mit ECC ist für die hochaufgelösten Kartendigitalisate sehr rechenintensiv und hat eine Zeitkomplexität von $O(KN^2)$, mit K gleich der Anzahl der Pixel und N der Anzahl der zu schätzenden Transformationsparameter. Daher eignet sich das ECC-Verfahren nur für eine Feinjustierung der Registrierung mit dem korrekten Referenzbild und kann das RANSAC-Verfahren in der vorhergehenden Hypothesenverifikation nicht ersetzen.

Die geeignete Wahl der Abbruchkriterien des Algorithmus hat einen entscheidenden Einfluss auf erreichbare Genauigkeit und erforderliche Rechenzeit. Nach eigenen Vorexperimenten wurden als Abbruchkriterien ein zu unterschreitender Schwellwert von 0,0001 und eine maximale Anzahl von 500 Iterationen festgelegt¹⁵. In Vorexperimenten hat sich gezeigt, dass mit späterem Abbruch die erreichbaren Registrierungs-genauigkeiten im Mittel nicht wesentlich besser werden.

¹⁴Hier wird die Implementierung aus OpenCV Version 4.6.0 genutzt, https://docs.opencv.org/4.6.0/dc/d6b/group__video__track.html#ga7ded46f9a55c0364c92ccd2019d43e3a, Mai 2023

¹⁵Siehe auch die Auflistung aller Experimentalparameter in Anhang B.

Für den finalen ECC-Wert nach erfolgter Registrierung ist zu beachten, dass er nicht als Indikator für die Güte der Registrierung zwischen verschiedenen Eingabekarten vergleichbar ist, weil Segmentierungsfehler und Generalisierungsunterschiede zu unterschiedlich hohen erreichbaren Werten führen. Inwieweit trotzdem Rückschlüsse von Registrierungsgenauigkeit auf Georeferenzierungsgenauigkeit getroffen werden können, wird in der Auswertung in Abschnitt 5.7.2.2 untersucht.

4.7.2 Raumbezug

Das Resultat des zweiten Registrierungsschrittes ist ein feinregistriertes Bild. Dieses Bild beinhaltet die rektifizierte Eingabekarte. Damit ist den Pixeln aber noch keine Weltkoordinaten zugewiesen. Hierfür ist es entscheidend, die Koordinaten der Referenzkarte zu erhalten, wenn diese in einzelne Bilder aufgeteilt wird (vgl. Abschnitt 4.5). Bei rechteckigen Ausschnitten geht dies einfach, indem die Koordinaten der Eckpunkte zu jedem Referenzbild abgespeichert werden (z. B. als World-File). Genauso wird die Kartenabbildung der Referenzkarte übernommen, bzw. es kann von dieser als Ursprung nach Belieben in eine gewünschte Kartenabbildung umprojiziert werden. Wenn die Eingabekarten einen Kartenrand aufweisen, kann dieser automatisch abgeschnitten werden, indem das registrierte Ausgabebild auf die Ausdehnung des Referenzbildes begrenzt wird.

Auswertung

Inhaltsverzeichnis

5.1	Überblick	68
5.1.1	Aufgabenstellung	68
5.1.2	Experimentalstrategie	68
5.2	Verwendete Daten	70
5.2.1	Eingabekarten	70
5.2.2	Referenzkarten	71
5.3	Versuchsaufbau	71
5.3.1	Durchführung	71
5.3.2	Metriken und ihre Messung	73
5.4	Demonstration der Methode	76
5.4.1	Idealbedingungen	76
5.4.2	Andere Signaturklassen	77
5.4.3	Störungen	78
5.4.3.1	Rauschen	78
5.4.3.2	Verdeckung	80
5.4.3.3	Auflösung der Eingabebilder	80
5.5	Anwendung: Georeferenzierung der KDR100	82
5.6	Übertragbarkeit	84
5.6.1	DK50	84
5.6.2	TÜDR200	84
5.7	Nutzbarkeit	85
5.7.1	Laufzeit	85
5.7.1.1	Aufbau des Index	86
5.7.1.2	Lokalisierung	86
5.7.1.3	Registrierung	89
5.7.2	Konfidenz	89
5.7.2.1	Lokalisierung	89
5.7.2.2	Registrierung	91
5.8	Ergebnisse	92

5.1 Überblick

5.1.1 Aufgabenstellung

In diesem Kapitel soll belegt werden, dass die Geometrie von Signaturen geeignet ist, topographische Kartenblätter automatisch zu georeferenzieren (vgl. Abschnitt 1.3). Diese Eignung bemisst sich daran, ob das Verfahren ausreichend schnell für einen praktischen Einsatz ist und ob dabei die Qualität der resultierenden Georeferenzierung für die in Abschnitt 1.2 vorgestellten Anwendungsfälle angemessen sind.

Die Anwendungen lassen sich in zwei Nutzungsszenarien mit unterschiedlich starken Qualitätsansprüchen zusammen fassen (vgl. Abschnitt 1.2.1):

1. Die grobe Lage der Eingabekarte soll bestimmt werden, um die räumliche Suche nach dieser Karte zu ermöglichen.
2. Die Eingabekarte soll möglichst genau georeferenziert werden, um anschließend räumliche Informationen aus dem Karteninhalt zu verwerten.

Wie die Ergebnisqualität für beide Fälle quantifiziert werden kann, wird in Abschnitt 5.3.2 behandelt.

Die konkrete Wahl der Methoden und der Implementationen, die in Kapitel 4 vorgestellt wurden, ist exemplarisch zu verstehen und nutzt ausschließlich bewährte Methoden der Bildverarbeitung (siehe Abschnitt 2.5). Noch gibt es keine vergleichbaren Verfahren, die auf die Verarbeitung von Altkarten spezialisiert sind. Für deren Entwicklung muss zuerst verstanden werden, wo die größten konzeptionellen Herausforderungen liegen. Daher sollen hier die auftretenden Fehlerquellen systematisch ergründet werden, um eine Grundlage für zukünftige Forschung zu bieten.

Nicht Teil der Untersuchung ist die vollständige Analyse des Einflusses aller Verfahrensparameter. Durch den mehrstufigen Georeferenzierungsprozess gibt es viele Wechselwirkungen bei der Parametrisierung der verschiedenen Algorithmen. Für die vorliegende Implementierung wurden vorwiegend Standardwerte übernommen¹. Dies stellt keineswegs die beste Parametrisierung des Verfahrens dar und sicherlich ließen sich mit abgestimmten Parametern noch bessere Ergebnisse erzielen (siehe Abschnitt 7.3). Es ist aber wahrscheinlich, dass dadurch eine Überanpassung an die vorliegenden Datensätze geschähe, anstatt dass dadurch Erkenntnisse über die generelle Verwendbarkeit des Verfahrens erlangt würden. Für allgemeingültige Aussagen über den Einfluss einzelner Verfahrensparameter auf die Georeferenzierungsqualität wäre ein diverser und belastbarer Datensatz notwendig – den es erst zu entwickeln gilt (siehe dazu Abschnitt 7.3.1).

5.1.2 Experimentalstrategie

Die Auswertung hat zum Ziel, folgende Hypothesen zu belegen (vgl. die Forschungsfragen in Abschnitt 1.3):

¹In Anhang B werden alle Experimentalparameter für die folgenden Untersuchungen aufgelistet.

1. Gewässersignaturen sind deskriptiver Karteninhalt, d. h. erlauben die automatisierte Entnahme guter Passpunkte.
2. Im Prinzip sind auch andere Signaturen geeignet, wenn das Segmentierungsproblem gelöst wäre.
3. Mit der vorgeschlagene Methode können Karten vollautomatisch georeferenziert werden.
4. Das Verfahren lässt sich insbesondere auch auf Altkarten anwenden.
5. Dabei werden Genauigkeiten erreicht, die den Nutzeranforderungen gerecht werden.
6. Außerdem ist die Laufzeit gut genug für eine zukünftige Einbettung in Anwendungssoftware.

Um diese Hypothesen zu belegen, wurden eine Reihe von Experimenten in vier Phasen durchgeführt.

Zuerst soll die Methode unter Idealbedingungen getestet werden (siehe Abschnitt 5.4.1). Dies hat den Zweck, die maximal erreichbare Ergebnisqualität ohne die bei Altkarten auftretenden Unsicherheiten zu zeigen. Zum anderen erlaubt dieser vereinfachte Fall die Einführung von isolierten Störquellen, um die Fehlertoleranz und Robustheit des Verfahrens unter verschiedenen Einflüssen wie Rauschen, Verdeckung, usf., besser einordnen zu können (siehe Abschnitt 5.4.3).

Diese künstlich eingeführten Fehler orientieren sich an denkbaren Fehlerquellen in der Verarbeitung von echten Kartenartefakten, die in Kapitel 3 behandelt wurden. Dazu zählen unter anderem Verdeckung von Signaturen, Schäden im Artefakt (Risse, gewelltes Papier, Beschriftungen/Stempel), unvollständige Kolorierung/Zeichnung, historische Veränderungen, usw. In den verarbeiteten Kartenbildern äußern sich diese Probleme als Segmentierungsfehler, unvollständige Referenzdaten, unterschiedlicher Grad der Generalisierung zwischen Eingabe- und Referenzkarte, uneinheitlicher Scanauflösung und Verzerrungen im Karteninhalt.

Der zweite Teil erfolgt in Abschnitt 5.5. Dort werden die Digitalisate eines tatsächlichen historischen Kartenwerks, der KDR100, georeferenziert. Echte Digitalisate bringen die oben genannten Störfaktoren mit sich. All diese Störfaktoren können den Erfolg oder die Genauigkeit der Georeferenzierung beeinträchtigen. Dabei ist im Nachhinein nicht zweifelsfrei festzustellen, welche Ursache genau für schlechte Ergebnisse verantwortlich war. Durch den Vergleich mit den vorhergehenden Experimenten können die Ursachen von suboptimaler Georeferenzierung besser abgeschätzt werden.

Drittens folgt in Abschnitt 5.6 die Übertragbarkeit auf verschiedene andere Kartenwerke, die so ausgewählt wurden, dass sie auf den ersten Blick ähnlich in Gestaltung, Alter und Qualität sind, um eine gute Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Das Erkenntnisinteresse ist hier vor allem, ob das Verfahren ohne weitere Anpassung

auch bei Karten mit anderen Maßstäben und unterschiedlich starker Generalisierung erfolgreich anwendbar ist (siehe Abschnitt 5.6).

Zuletzt sollen die Rahmenbedingungen für die zukünftige Verwendbarkeit des Verfahrens in der Praxis geprüft werden. Dafür werden die Laufzeit und die Möglichkeit zur automatischen Fehlererkennung anhand von Konfidenzabschätzung untersucht (siehe Abschnitt 5.7).

Die Bewertung der Ergebnisse im Hinblick auf die Anforderungen aus der Praxis und im Vergleich mit bisherigen Ansätzen in der Literatur erfolgt in Kapitel 6.

5.2 Verwendete Daten

5.2.1 Eingabekarten

Eingabekarten sind die Karten, die im Experiment georeferenziert werden sollen.

Als Eingabekarten dienen für die Experimente unter Idealbedingungen (siehe Abschnitt 5.4.1) rasterisierte Ausschnitte der Vektordaten aus OpenStreetmap. Zur besseren Vergleichbarkeit mit den realen Kartenwerken werden hier auch Gewässersignaturen und der Blattschnitt der KDR100 verwendet. Damit sind die Eingabekarten hier identisch zu den Referenzkarten für die KDR100 (siehe Abschnitt 5.2.2).

In den Experimenten unter „Realbedingungen“ sind die Eingabekarten die Digitalisate der Kartenblätter der historischen Kartenwerke KDR100, DK50 und TÜDR200 (siehe Abschnitte 3.4 und 3.5 für die Vorstellung der Kartenwerke) mit ihren jeweiligen Segmentierungsmasken. Die konkrete Menge von Eingabekarten, die in einem einzelnen Experiment gemeinsam verarbeitet werden, werden auch als *Datensatz* bezeichnet. Die folgenden Datensätze fanden als Eingabekarten Verwendung:

1. 656 synthetische Kartenblätter, erstellt aus OSM im Blattschnitt der KDR100
2. 656 synthetische Kartenblätter, künstlich degradiert
3. 657 Blätter der KDR100, davon Blätter 414 aus der Auflage A und 243 aus der Auflage B
4. 25 Blätter der DK50
5. 41 Blätter der TÜDR200

Um die Unterschiede der Kartengestaltung weitestgehend ausklammern zu können (dies ist ein breites Forschungsfeld, worauf in dieser Arbeit kein Fokus gelegt werden soll – vgl. zu diesem Thema Abschnitte 6.2.3 und 7.3.4), muss zu jeder Eingabekarte eine Segmentierung der Signaturen vorliegen. Die Segmentierungsmaske ist ein Binärbild mit identischen Abmessungen wie die Eingabekarte, bei der alle Pixel, die Gewässer darstellen, auf weiß gesetzt sind (Vordergrund) und alle anderen Pixel auf schwarz (Hintergrund).

Für die vorliegenden Datensätzen wurde die Segmentierung von Gewässersignaturen durch Farbschwellwerte ermittelt. Die Erstellung der Segmentierungsmasken wird in Abschnitt 4.3 behandelt. Eine manuelle Annotation würde zwar genauere Ergebnisse liefern, ist aber bei der großen Zahl von untersuchten Karten nicht realistisch. Der Aufwand wäre auch nicht verhältnismäßig, da in dieser Arbeit ein neuartiges Verfahren demonstriert wird und nicht die maximal erreichbare Genauigkeit evaluiert werden soll. Vielmehr ist von Interesse, ob bzw. wie weit das Verfahren auch robust gegenüber nicht perfekter Segmentierung ist.

5.2.2 Referenzkarten

Als Referenzkarte für alle Kartenwerke dient OpenStreetMap. Die Referenzkarte wurde wie in Abschnitt 4.5 beschrieben in Referenzbilder umgewandelt. Da sich der Blattschnitt der KDR100 und DK50 von dem Blattschnitt der TÜDR200 unterscheidet, wurden jeweils unterschiedliche Referenzbilder erstellt.

Für die Experimente wurde immer nach Gewässer-Objekten gefiltert, da diese auch aus den Eingabekarten segmentiert werden können. Die Ausnahme ist des Experiment in Abschnitt 5.4.2, in dem andere Signaturklassen getestet wurden.

Die *Overpass*-Anfrage, die für die Verwendung mit Eingabekarten der KDR100 (speziell der Auflage B) bzw. der DK50 angepasst ist, ist in Quelltext 5.1 aufgeführt. Die Anfrage liefert für jede Position im Blattschnitt die korrespondierenden Objekte als GeoJSON zurück. Die Variable `{{bbox}}` wird dabei mit den WGS84-Koordinaten der Eckpunkte des jeweiligen Kartenblattes ersetzt. Anschließend werden die Vektorkarten rasterisiert. Dafür werden die Signaturen in Weiß auf schwarzem Hintergrund abgebildet – analog zu den segmentierten Eingabekarten. Dabei wird ein leerer Kartenrand um die Referenzbilder angefügt, um auch in den Randbereichen zuverlässig Merkmale erkennen zu können und die Vergleichbarkeit zu den Eingabebildern zu verbessern (siehe Abbildung 5.1).

Die *Overpass*-Anfrage (vgl. Quelltext 5.2) für die TÜDR200 ist eine andere, da die Signaturen der Referenzkarten an die Gestaltung der TÜDR200 angepasst werden mussten: Aufgrund des kleineren Maßstabs werden Signaturen von z. B. Gräben nicht mehr dargestellt (vgl. Abbildung 5.11).

Für die hier untersuchten Kartenwerke besteht der Blattschnitt überwiegend aus regelmäßigen Rechtecken und konnten so einfach aus den Digitalisaten der Übersichtsblätter erstellt werden (wie in Abschnitt 4.5 beschrieben). Der Blattschnitt für die KDR100 und die DK50 beinhaltet 909 Blätter, der für die TÜDR200 beinhaltet 194 Blätter.

5.3 Versuchsaufbau

5.3.1 Durchführung

Sobald die Referenzkarten vorliegen, wird für jedes Experiment der Index trainiert (siehe dazu Abschnitt 4.6.2). Der bereits angelegte Index aus einem vorhergehenden

```

1 [out:json];
2 (
3   nwr ({{bbox}}) [water=lake];
4   nwr ({{bbox}}) [water=reservoir];
5   way ({{bbox}}) [natural=water] [name];
6   way ({{bbox}}) [type=waterway] [name];
7   way ({{bbox}}) [waterway=river] [name];
8   way ({{bbox}}) [waterway=canal] [name];
9   way ({{bbox}}) [water=river];
10  way ({{bbox}}) [waterway=stream] [name];
11  way ({{bbox}}) [natural=coastline];
12  way ({{bbox}}) [waterway=ditch];
13  way ({{bbox}}) [waterway=drain];
14  way ({{bbox}}) [waterway=riverbank];
15 );
16 out body;
17 >;
18 out skel qt;

```

Quelltext 5.1: Overpass-Anfrage für die Referenzsignaturen passend zur KDR100 Auflage B und DK50.

```

1 [out:json];
2 (
3   nwr ({{bbox}}) [water=lake];
4   nwr ({{bbox}}) [water=reservoir];
5   way ({{bbox}}) [natural=water] [name];
6   way ({{bbox}}) [type=waterway] [name];
7   way ({{bbox}}) [waterway=river] [name];
8   way ({{bbox}}) [waterway=canal] [name];
9   way ({{bbox}}) [water=river];
10  way ({{bbox}}) [waterway=stream] [name];
11  way ({{bbox}}) [natural=coastline];
12  way ({{bbox}}) [waterway=riverbank];
13 );
14 );
15 out body;
16 >;
17 out skel qt;

```

Quelltext 5.2: Overpass-Anfrage für die Referenzsignaturen passend zur TÜDR200.

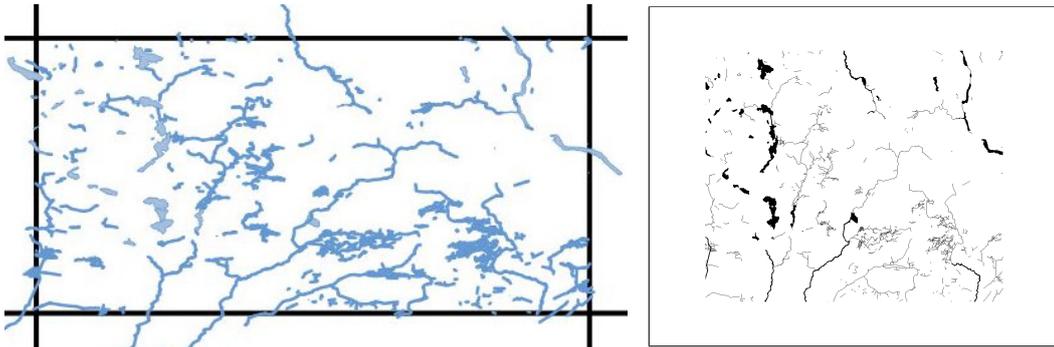


Abbildung 5.1: Links: OSM Referenzkarte für das Blatt 148 der KDR100 als Vektordaten (blau) mit dem Blattschnitt (schwarz). Rechts: Rasterisiertes Referenzbild, auf den Blattschnitt zugeschnitten. Invertiert zur besseren Lesbarkeit: Vordergrund in schwarz, Hintergrund in weiß. Die Seitenverhältnisse unterscheiden sich aufgrund unterschiedlicher Kartenabbildungen.

Experiment kann wiederverwendet werden, wenn der Blattschnitt und die Art der segmentierten Signaturen identisch sind. Dies ist hier in allen Experimenten außer dem Signaturvergleich (siehe Abschnitt 5.4.2) und der Untersuchung der TÜDR200 (siehe Abschnitt 5.6) der Fall. Referenzkarten und Index ergeben zusammen die Referenzdatenbank, anhand der die Eingabekarten georeferenziert werden. Wie in Abschnitt 4.6 ausgeführt, ist vor allem der Blattschnitt, aber auch die verwendeten Signaturklassen für den Index entscheidend. Somit kann für viele Experimente (alle, die den Blattschnitt der KDR100 nutzen) derselbe Index wiederverwendet werden.

Für das eigentliche Experiment werden immer so viele Eingabekarten je Datensatz georeferenziert wie möglich. Es ist zu erwarten, dass die Blätter nicht in gleichem Maße von Segmentierungsfehlern und anderen Problemen betroffen sind. Durch eine Vielzahl an verarbeiteten Bildern kann der Effekt von Ausreißern auf die Gesamtergebnisse eines Datensatzes (siehe Abschnitt 5.3.2) reduziert werden. Andererseits ist eine ausreichend große Stichprobe vonnöten, um wiederkehrende Fehlerquellen aufzudecken. Welche Arten von Fehlern welchen Einfluss auf die Georeferenzierungsqualität hat, lässt sich a priori nicht bestimmen und wird in Anschluss an die Auswertung in Kapitel 6 diskutiert.

Für jedes Experiment wird eine feste Zahl der Hypothesen in der Verifikation gewählt (siehe Abschnitt 4.6.4). Die genaue Zahl ist jeweils so gewählt, dass für die meisten Blätter eine korrekte Lösung gefunden werden kann, aber die Laufzeit angemessen gering bleibt. Da diese Abwägung in der Praxis nicht a priori möglich ist, wird im Abschnitt 5.7.2.1 der Einfluss diesen Parameters auf Genauigkeit und Laufzeit untersucht, um eine Indikation für eine angemessene Zahl zu liefern.

5.3.2 Metriken und ihre Messung

Der Zweck der meisten Experimente ist, den Einfluss verschiedener Faktoren auf die Georeferenzierungsqualität zu messen. Analog zur Zweiteilung des Georeferen-

zierungsverfahrens in Lokalisierung und Registrierung ergeben sich zwei getrennt zu betrachtende Qualitätsmetriken.

Nicht immer können alle Kartenblätter erfolgreich lokalisiert werden. Somit ergibt sich für einen Versuchsaufbau mit mehreren zu lokalisierenden Kartenblättern als erste Qualitätsmetrik die *Trefferquote* (engl. *Recall*) von korrekt lokalisierten Blättern:

$$\text{Trefferquote} = \frac{\#\text{korrekte Vorhersagen}}{\#\text{Eingabekarten}}$$

Für die übrigen wird entweder eine fehlerhafte Vorhersage getroffen, oder seltener hat der Algorithmus gar keine Lösung finden können (z. B. weil die Daten fehlerhaft waren, nicht ausreichend Karteninhalt vorliegt, oder weil durch ungünstige Hypothesen bei der Indexsuche keine Lösung für eine Transformation gefunden wurde).

Die zweite Qualitätsmetrik ist die *Genauigkeit*. Für die Nachnutzung von georeferenzierten Kartenblättern ist vor allem die *Lagegenauigkeit* von Interesse. Die Lagegenauigkeit beschreibt, wie exakt die Lage der georeferenzierten Karten mit der wahren Lage übereinstimmt. Dies bemisst sich daran, wie weit die Eckpunkte des georeferenzierten Karteninhaltes von den durch Blattschnitt und Randbeschriftung definierten Koordinaten entfernt liegen (die Lagegenauigkeit von Altkarten wird in Abschnitt 6.2.6 diskutiert).

Um Genauigkeitsaussagen über Datensätze unterschiedlicher Bildauflösung vergleichbar zu halten, wird die Genauigkeit in Metern mittlerer geodätischer Distanz zwischen beobachteter Position P_s und erwarteter Position P_t (aus dem Blattschnitt) der vier Karteneckpunkte angegeben (vgl. Abb. 5.2). Der Fehler wird dabei über die vier Eckpunkte gemittelt (*Mean Average Error, MAE*):

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^4 |P_t(i) - P_s(i)|}{4}$$

Bei den synthetischen Kartenblättern sind die Eckpunkte des Karteninhalts identisch mit den Eckpunkten der Bilder.

Bei den Kartendigitalisaten hingegen liegt ein Kartenrand vor und so wurden die Pixelkoordinaten der Eckpunkte manuell in den untransformierten Eingabebildern annotiert. Diese werden anschließend durch Template Matching in den transformierten, ggf. verzerrten Ausgabebildern wieder gefunden². Bei sehr starken Verzerrungen, kann die Suche nach den Karteneckpunkten scheitern, wodurch sehr hohe, aber wenig aussagekräftige Fehler berechnet werden. So stark verzerrte Karten sind aber definitiv unbenutzbar, weshalb der konkrete Fehlerwert unerheblich ist. Aus diesem Grund werden Georeferenzierungen mit einem Fehler über einem gewissen Grenzwert als „schlechte Registrierung“ zusammengefasst. Der genaue Grenzwert wurde dabei willkürlich entsprechend dem Maßstab und der auftretenden Fehlerverteilung des Datensatzes gewählt. Die Bewertung als schlechte Registrierung soll zumindest alle Blätter betreffen, für welche die Genauigkeitsmessung nicht möglich war, aber

²Implementierung aus scikit-image Version 0.19.2, https://scikit-image.org/docs/0.19.x/api/skimage.feature.html?highlight=match%20template#skimage.feature.match_template, Mai 2023

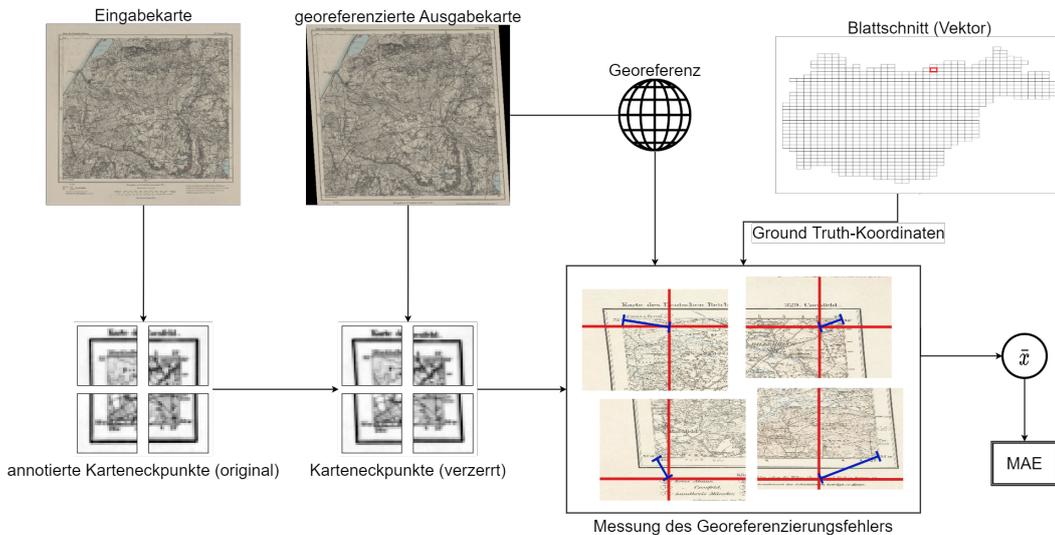


Abbildung 5.2: Messung der Registrierungs-genauigkeit. Die Eckpunkte der Eingabekarten wurden manuell annotiert, sodass sie nach erfolgter Georeferenzierung in den Ausgabebildern gesucht werden können. Die Transformation der Eckpunkte mit der Georeferenz, erlaubt die geodätische Distanz (blaue Balken) zwischen den Eckpunkten der Ausgabebilder mit den Koordinaten im Blattschnitt (rote Linien) zu vergleichen. MAE = Mean Average Error, mittlerer Fehler über die vier Ecken eines Blattes. Karte © Staatsbibliothek zu Berlin, Kartenabteilung

auch eine Indikation für die Nutzbarkeit der georeferenzierten Karte in der Praxis liefern (diese ist schwer exakt zu quantifizieren und wird in Abschnitt 6.3.1 diskutiert).

Die Verteilung und Anzahl dieser Ausreißer bei den Genauigkeitswerten unterscheiden sich stark, weshalb für jeden Datensatz Mittel und Median der Fehler angegeben wird. Wenn Kartenwerke unterschiedlichen Maßstabs verglichen werden, muss der Registrierungsfehler entsprechend dem Verhältnis des Maßstabsunterschiedes beurteilt werden. Ungenauigkeiten in den Originalkarten können dafür sorgen, dass auch bei perfekt kongruenten Signaturen ein Fehler ausgegeben wird. Dieser Effekt lässt sich nicht ohne eine detaillierte Deformationsanalyse der verwendeten Karten isolieren und muss daher in Kauf genommen werden (mehr dazu in Abschnitt 6.2.6).

Eine erfolgreiche Lokalisation ist die Voraussetzung für die anschließende Registrierung. Dementsprechend werden alle Registrierungsexperimente immer nur mit den Blättern eines Datensatzes durchgeführt, die auch korrekt lokalisiert wurden. Dies verhindert, dass die gemessene Genauigkeit durch Kartenblätter verfälscht wird, die womöglich nicht zur Verarbeitung geeignet sind.

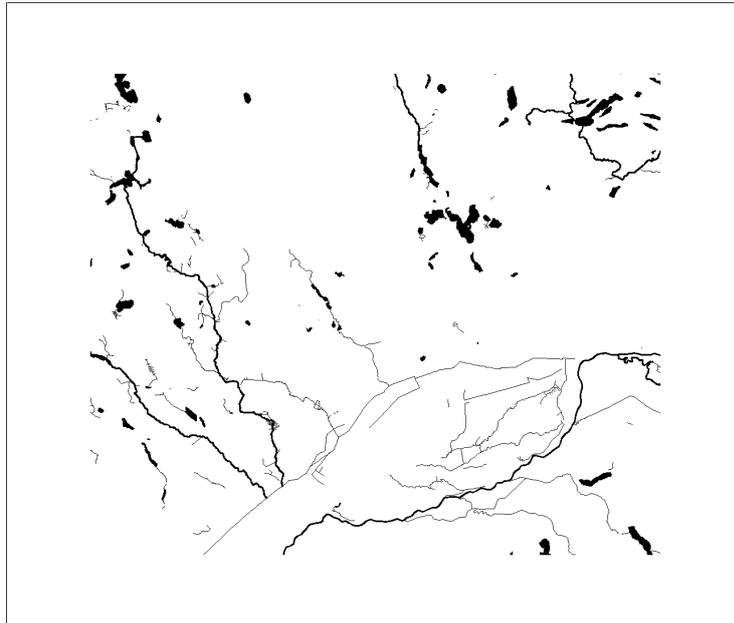


Abbildung 5.3: Beispielhaftes Eingabebild künstlich erzeugter idealer Daten. Das Blatt 248 erzeugt aus OSM-Gewässern. Invertiert zur besseren Lesbarkeit: Vordergrund in schwarz, Hintergrund in weiß. © OpenStreetMap contributors

5.4 Demonstration der Methode

In den ersten Experimenten wird zunächst gezeigt, dass die in Kapitel 4 vorgestellte Methode grundsätzlich geeignet ist, Karten zu lokalisieren und zu georeferenzieren. Dafür werden synthetische Karten aus OSM erzeugt und als Eingabekarten verwendet (siehe Abb. 5.3). Das erste Experiment soll die Funktion des Verfahrens unter Idealbedingungen demonstrieren, bevor die Effekte und der Einfluss verschiedener Störfaktoren untersucht werden. Um den Vergleich mit der Fallstudie in Abschnitt 5.5 zu erlauben, werden auch hier der Blattschnitt und die Signaturklassen der KDR100 genutzt.

5.4.1 Idealbedingungen

Es soll die maximal erreichbare Qualität unter Idealbedingungen ermittelt werden. Dafür entscheidend ist vor allem die Trefferquote (siehe Abschnitt 5.3.2). Es wurden 656 Blätter verarbeitet (dieselben, für die auch tatsächliche Kartendigitalisate verfügbar sind, die in Abschnitt 5.5 untersucht werden), mit einer Hypothesenverifikation über fünf Hypothesen.

Alle Blätter konnten erfolgreich lokalisiert werden. 655 Blätter (99,8%) waren schon vor Hypothesenverifikation die beste Hypothese. Nur für Blatt 35 war die Hypothesenverifikation überhaupt notwendig, dort kam die korrekte Hypothese erst an dritter Stelle im Index.

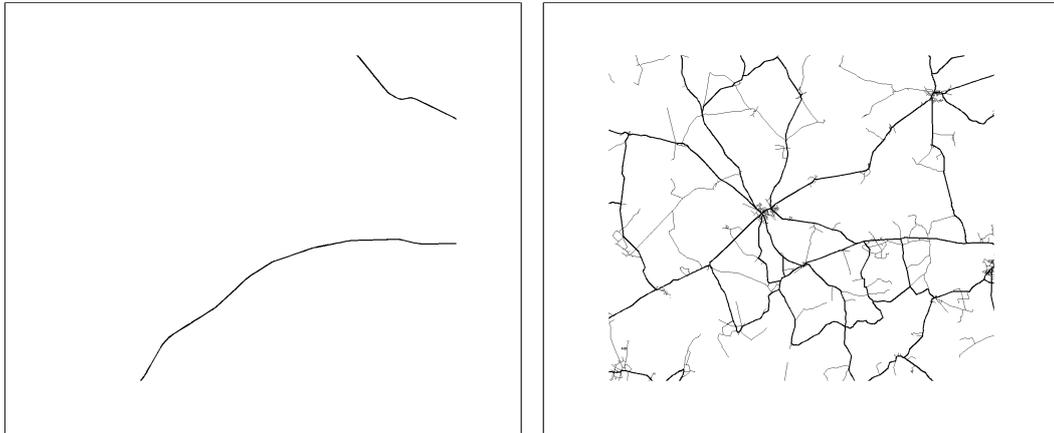


Abbildung 5.4: Beispielhaftes Eingabebild synthetischer Daten mit verschiedenen Signaturklassen. Das Blatt 248 mit Eisenbahnlinien (links) und Straßen (rechts). Invertiert zur besseren Lesbarkeit: Vordergrund in schwarz, Hintergrund in weiß. © OpenStreetMap contributors

Die Registrierungsgenauigkeit wird hier anhand der Eckpunkte der Bildkoordinaten geprüft, da kein Kartenrand vorliegt. Damit soll gezeigt werden, dass das Registrierungsverfahren auch für die binären Segmentierungsmasken gute Lösungen finden kann.

Fast alle Blätter erreichen eine Genauigkeit unter 20 m, der Median liegt bei 10 m und der Mittelwert bei 42 m. Die Diskrepanz zwischen Median und Mittelwert zeigt, dass zwar für die allermeisten Bilder eine sehr gute Passung gefunden wurde, aber einzelne Ausreißer auftreten: 16 Blätter liegen über dem Mittelwert. Für einen Teil der Bilder wurde keine geeignete Lösung gefunden, wodurch schnell sehr große Fehler entstehen, die den Mittelwert enorm beeinflussen. 6 Blätter hatten einen Fehler über 400 m, wo von einer nicht konvergierten Registrierung ausgegangen werden kann.

5.4.2 Andere Signaturklassen

Anhand von weiteren aus OSM erzeugten synthetischen Karten lässt sich zeigen, dass nicht nur Flüsse, sondern auch andere Signaturen eindeutige Geometrien aufweisen, mit denen die Georeferenzierung durchgeführt werden kann. Hier wird dies exemplarisch anhand von Straßen und Eisenbahnstrecken gezeigt (exemplarische Eingabekarten werden in Abb. 5.4 gezeigt).

Es zeigte sich, dass nicht alle Referenzkarten im Index abgebildet werden konnten, da z. B. in 44 der Blätter gar keine Eisenbahnstrecken enthalten waren und so auch keine Bildmerkmale entnommen werden konnten. Diese Blätter können entsprechend überhaupt nicht lokalisiert werden und wurden daher auch nicht in das Experiment einbezogen. Bei der Verwendung von Straßen zeigten sich wesentlich dichtere Kartenbilder, die aber z. B. bei Blättern an der Küste auch nur in einem Teil des Bildes Inhalt aufwiesen.

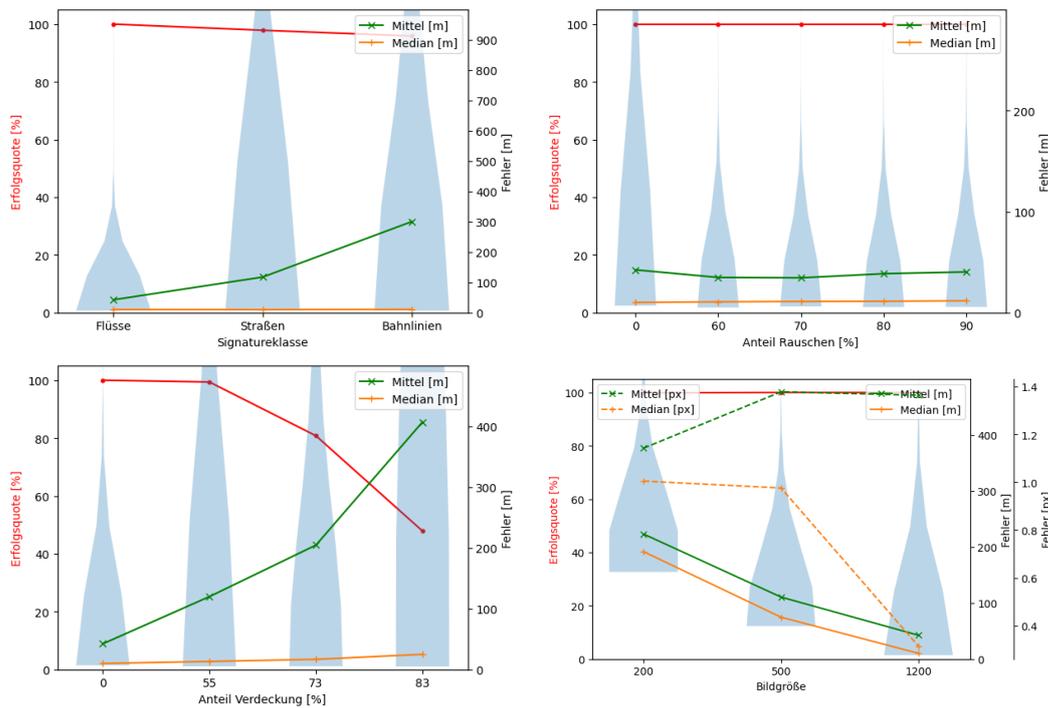


Abbildung 5.5: Einfluss von Signaturklassen (oben links), Rauschen (oben rechts), Verdeckung (unten links) und Eingabebildgröße (unten rechts) auf die Erfolgsquote und mittlere Georeferenzierungsgenauigkeit von OSM-Karten.

Rot: Erfolgsquote in Prozent erfolgreich lokalisierter Blätter.

Grün: Mittlere Georeferenzierungsgenauigkeit in Metern.

Orange: Median der Georeferenzierungsgenauigkeit in Metern.

Blau: Häufigkeitsverteilung der Georeferenzierungsgenauigkeiten. Starke Ausreißer sind der Übersichtlichkeit halber abgeschnitten, der genaue Fehlerwert bei nicht konvergierter Registrierung ist wenig aussagekräftig.

Abb. 5.5 oben links zeigt, dass mit jeder Signaturklasse alle Blätter erfolgreich identifiziert und lokalisiert werden können und für den größten Teil der Karten gute Registrierung gefunden wurde. Dabei unterschied sich der Median nicht wesentlich zwischen den Signaturklassen (10,1 m bei Flüssen, 9,9 m bei Straßen, 10,6 m bei Bahnlinien). Mit Straßen- und vor allem mit Bahnsignaturen war der mittlere Fehler aber wesentlich höher (Flüsse: 42,3 m, Straßen: 117,2 m, Bahnlinien: 300,4 m), was auf eine größere Zahl an Blättern mit mangelhafter bzw. nicht konvergierter Registrierung zurückzuführen ist.

5.4.3 Störungen

5.4.3.1 Rauschen

Rauschen ist ein allgegenwärtiger Störfaktor in der Bildverarbeitung. Wo immer optische Systeme digitale Bilder aufnehmen, tritt hochfrequentes Sensorrauschen auf.

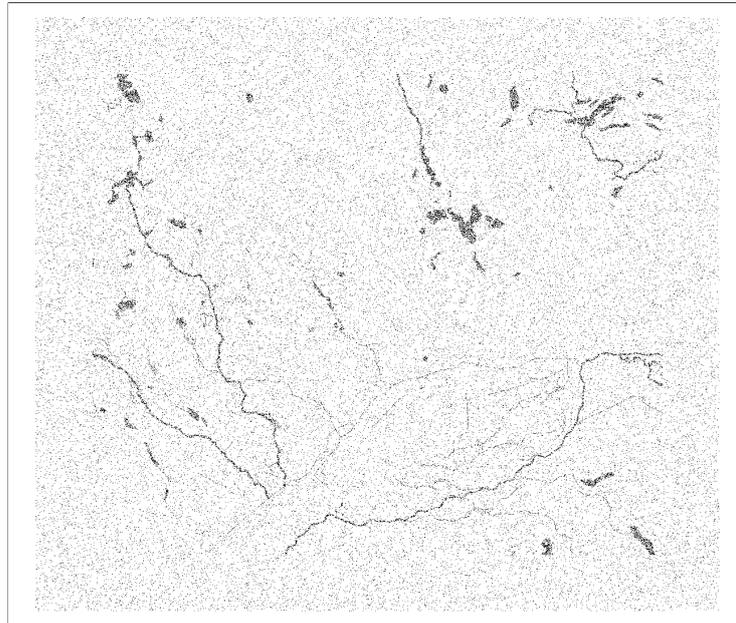


Abbildung 5.6: Beispielhaftes Eingabebild verrauschter Daten. Das Blatt 248 mit 90 % veränderter Pixel. Invertiert zur besseren Lesbarkeit: Vordergrund in schwarz, Hintergrund in weiß. Kartengrundlage © OpenStreetMap contributors

In Kombination mit der anschließenden Diskretisierung, Quantisierung und Kompression beim Speichern in digitale Bildformate verändert dies Farben und Formen in kleinem Maßstab. Auch wenn dieser Effekt so klein ist, dass er von einem menschlichen Betrachter noch nicht bemerkt wird, verändern sich die Ergebnisse von mathematischen Operationen auf dem Bildinhalt. Durch die Binarisierung der Kartenbilder bei der Segmentierung werden diese Effekte noch deutlicher, da vorher verrauschte Flächen und Farbübergänge an Kanten nun in nur zwei Farben aufgetrennt werden. Das Ergebnis sind einzelne weiße Pixel im Hintergrund und ausgefranste Kanten im Vordergrund. Diese Binarisierungsfehler können teilweise mit „Salt & Pepper“-Rauschen simuliert (siehe Abb. 5.6) werden.

Um die Robustheit des Verfahrens gegenüber fehlerhafter Binarisierung zu testen, wurde der komplette Datensatz von synthetischen Kartenbildern mit unterschiedlich starkem Rauschen belegt. Dafür wurden 60 %–90 % zufällig ausgewählte Pixel in jedem Bild verändert. 10 % der ausgewählten Pixel wurden mit weißen Pixeln überschrieben („Salt“) und die restlichen mit schwarzen Pixeln („Pepper“). Die unterschiedliche Gewichtung von weißen und schwarzen Pixeln ist dabei dem deutlich geringeren Anteil von Vordergrundpixeln in den Eingabekarten geschuldet. Dann wurde die Erfolgsquote der Lokalisierung bzw. die Genauigkeit der Georeferenzierung wurde in Abhängigkeit von der Stärke des Rauschens untersucht.

Tabelle 5.1 und Abb. 5.5 oben rechts zeigen, dass selbst starkes Rauschen im Eingabebild den Lokalisierungserfolg nicht beeinflusst und nur zu einer kaum merk-

Tabelle 5.1: Genauigkeit bei der Verarbeitung verrauschter synthetischer Kartenbilder. Grad des Rauschens in Prozent der manipulierten Pixel.

Grad des Rauschens	Median [m]	Mittel [m]
0 %	10,1	42,3
60 %	10,7	24,8
70 %	11,0	34,4
80 %	11,2	28,5
90 %	11,7	40,2

Tabelle 5.2: Lokalisierungserfolg und Genauigkeit bei der Verarbeitung synthetischer Kartenbilder mit Verdeckung. Grad der Verdeckung in Prozent der verdeckten Vordergrundpixel.

Grad der Verdeckung	% lokalisiert	Median [m]	Mittel [m]
0 %	100	10,1	42,3
55 %	99,7	13,2	119,9
73 %	91,6	16,8	204,8
83 %	78,3	25,0	407,4

lichen Verschlechterung der Georeferenzierungsqualität gegenüber den ungestörten Bildern führt.

5.4.3.2 Verdeckung

Durch lückenhafte Daten in den Referenzdaten, historische Veränderung der abgebildeten Objekte zwischen Aufnahme der Eingabekarte und Abruf der Referenzkarte und durch einen unterschiedlichen Grad der Generalisierung kann eine sehr große Diskrepanz zwischen Inhalt der Eingabe- und Referenzbilder entstehen. Daraus folgt, dass auf der Eingabekarten Signaturen abgebildet sind, die keine Entsprechung in einer ansonsten identischen Referenzkarte haben und umgekehrt (eine exemplarische Eingabekarte wird in Abb. 5.7 gezeigt).

In diesem Experiment wurde dieser Effekt durch Verdeckung (engl. *Occlusion*) von zufälligen Ausschnitten der Eingabebilder simuliert. Dafür wurden eine unterschiedliche Anzahl (300, 500 oder 700) von schwarzen (Hintergrund) Kreisen zufälliger Größe (15 px bis 50 px bei 1200 px breiten Bildern) auf die binären synthetischen Eingabearten gelegt. Die resultierende Reduktion der weißen Vordergrundpixel wird als Maß der Verdeckung in Prozent angegeben (gemittelt über den Datensatz).

Tabelle 5.2 und Abbildung 5.5 unten links zeigen den Effekt von unterschiedlich starker Verdeckung auf die Trefferquote und Registrierungsgenauigkeit.

5.4.3.3 Auflösung der Eingabebilder

Die Komplexität mehrerer Prozessschritte in der Georeferenzierung ist abhängig von der Bildgröße (siehe Abschnitte 4.4 und 4.7). Um Rechenzeit und Speicherbedarf



Abbildung 5.7: Beispielhaftes Eingabebild künstlich verdeckter Daten. Das Blatt 248 aus dem Datensatz mit 83% Verdeckung. Obwohl kaum Signaturen sichtbar bleiben, konnte auch dieses Blatt erfolgreich lokalisiert werden. Invertiert zur besseren Lesbarkeit: Vordergrund in schwarz, Hintergrund in weiß. Kartengrundlage © OpenStreetMap contributors

einzusparen ist es also denkbar, die Eingabebilder zu verkleinern, die verkleinerten Bilder zu verarbeiten und anschließend die Originalbilder mit entsprechend skaliertes Transformation zu registrieren. Die für die Verkleinerung notwendige Interpolation führt aber zwangsläufig zu einem Informationsverlust des Bildes. Hier wird untersucht, ob dieser Informationsverlust die Georeferenzierungsqualität beeinträchtigt.

Die Referenzbilder im Index haben in der Regel eine Bildauflösung von $500 \text{ px} \times 438 \text{ px}$ (einzelne Blätter haben ein anderes Format und sind bei gleicher Breite etwas höher). Die Eingabebilder in den bisherigen Experimenten hatten immer eine Bildauflösung von $1200 \text{ px} \times 1050 \text{ px}$ und wurden für die Verarbeitung auf die Größe der Referenzkarten verkleinert. In diesem Experiment wurden auch Eingabebilder mit geringerer Bildauflösung, nämlich mit zumeist $500 \text{ px} \times 438 \text{ px}$ und $200 \text{ px} \times 175 \text{ px}$ getestet – diese werden folglich für die Verarbeitung hochskaliert.

Abbildung 5.5 unten rechts zeigt, dass bei kleineren Eingabebildern der Registrierungsfehler in Pixeln kaum verändert ist (siehe Tabelle 5.3, die Fehler in Pixel sind leicht ungenau, weil die Karteneckpunkte nach der Verkleinerung nicht mehr eindeutig der Mitte eines Pixels entsprechen), aber der Fehler in Metern größer wird, weil ein Pixel bei geringer Bildauflösung einer größeren Strecke entspricht als bei einer höheren Bildauflösung. Auf den Lokalisierungserfolg hatte selbst die starke Verkleinerung auf $200 \text{ px} \times 175 \text{ px}$ keinen Effekt.

Tabelle 5.3: Genauigkeit bei der Verarbeitung unterschiedlich stark verkleinerter Kartenbilder.

Bildbreite [px]	Median [px]	Mittel [px]	Median [m]	Mittel [m]
200	1,00	1,14	192	223
500	0,98	1,38	75	111
1200	0,31	1,36	10	42

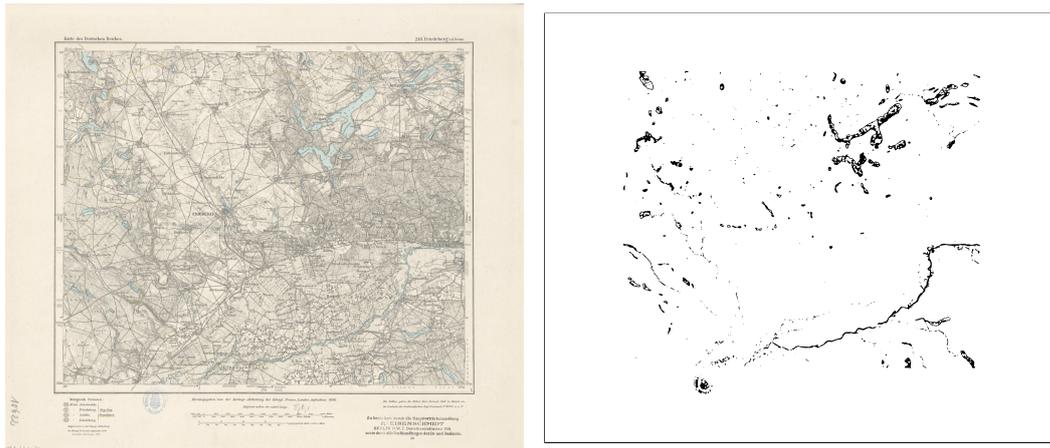


Abbildung 5.8: Beispielhaftes Eingabebild realer Karten. Das Blatt 248 aus dem Datensatz KDR100 (links) und die entsprechende Segmentierung (rechts). Die Segmentierung ist zur besseren Lesbarkeit invertiert: Vordergrund in schwarz, Hintergrund in weiß. Karte © Staatsbibliothek zu Berlin, Kartenabteilung

5.5 Anwendung: Georeferenzierung der KDR100

Die Georeferenzierung tatsächlicher topographische Karten (eine exemplarische Eingabekarte wird in Abbildung 5.8 gezeigt) statt der synthetischen OSM-Daten stellt das Verfahren vor eine Reihe an Herausforderungen. Die größte Herausforderung ist, dass die Segmentierung nie perfekt ist. Selbst bei den vergleichsweise „einfachen“ Segmentierungen wie hier bei der zwei- bis dreifarbigem KDR100 sind die Ränder der Signaturen nicht immer scharf zu trennen. Überlagerte Beschriftungen z. B. resultieren in Lücken im Vordergrund und verschiedene Artefakte aus der Digitalisierung (z. B. durch JPEG-Bildkompression, vgl. Abschnitt 3.2.4) verursachen Fehler bei der Binarisierung. Ferner finden sich auf fast allen Karten farbige Archivstempel und -beschriftungen sowie gelegentlich Markierungen im Karteninhalt oder Schäden im Papier durch die frühere Nutzung des Artefakts. All diese Faktoren können die Repräsentation des Bildinhaltes verfälschen und so die Zuordnung zur Referenzkarte erschweren. Auch Verzerrungen durch verzogenes oder gewelltes Papier können nur in einem gewissen Rahmen in der Registrierung ausgeglichen werden.

Elementar für die Verarbeitung von Altkarten ist, ob das Verfahren robust gegen historische Veränderungen der Topographie ist, denn nicht nur menschgemachte

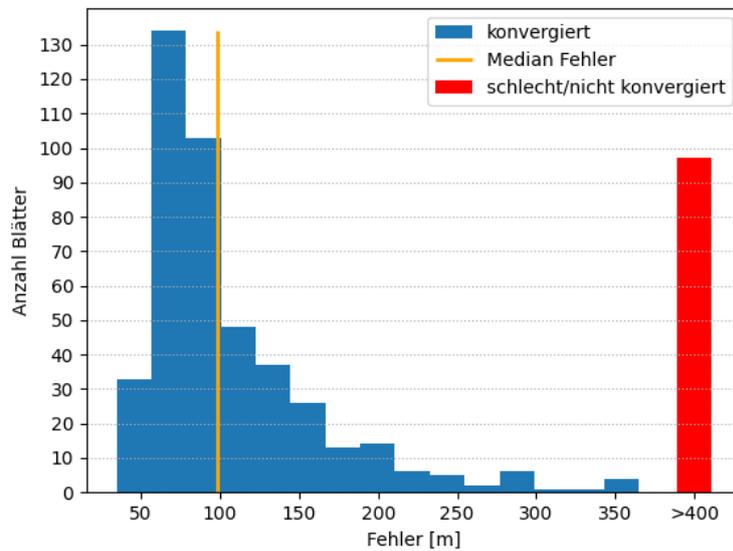


Abbildung 5.9: Histogramm der Georeferenzierungsgenauigkeit in Metern von Kartenblättern der KDR100. Hohe Fehlerwerte sind der Übersichtlichkeit halber zusammengefasst, der genaue Fehlerwert ist bei nicht konvergierter Registrierung wenig aussagekräftig.

Strukturen, wie Siedlungen und Straßen, haben sich in den letzten Jahrhunderten rapide verdichtet. Auch natürliche Phänomene, wie Flussläufe wurden immer wieder begründet, trocken gelegt oder angestaut.

Für dieses Experiment wurden derselbe Blattschnitt und damit derselbe Index wie in den vorhergehenden Experimenten in den Abschnitten 5.4.1–5.4.3 genutzt. In der Lokalisierung wurden immer die 30 ähnlichsten Hypothesen zur Verifikation einbezogen (vgl. Abschnitt 5.7.2.1 zur Wahl diesen Parameters).

Von 657 Eingabebildern waren 89 nicht in den ersten 30 Hypothesen aus dem Index und konnten so nicht lokalisiert werden. 26 weitere wurden fehlerhaft lokalisiert. So blieben 542 (82,5%) erfolgreich lokalisierte Blätter. Die Registrierungsgenauigkeit war wesentlich breiter gestreut als bei den synthetischen Datensätzen und zeigt insgesamt höheren Fehler. Der Medianfehler lag hier bei 96 m, der Mittelwert (bedingt durch 91 schlechte Registrierungen) lag bei 1020 m Fehler (64 Blätter mit Fehler über dem Mittelwert). Eine „schlechte Registrierung“ wird hierbei ab 400 m angenommen (siehe Abschnitt 5.3.2).

Auch in diesem Experiment zeigt sich, dass die meisten Blätter einen geringen Fehler aufweisen und die Häufigkeit der höheren Fehler beinahe stetig abnimmt (siehe Abb. 5.9). Auffällig ist, dass der häufigste Fehlerbereich der zwischen 56 m und 78 m ist (134 Blätter), der zweithäufigste Fehler zwischen 78 m und 100 m (103 Blätter), erst an vierter Stelle kommen 33 Blätter mit kleinen Fehlern unter 56 m. Der geringste Fehlerwert war 35 m.

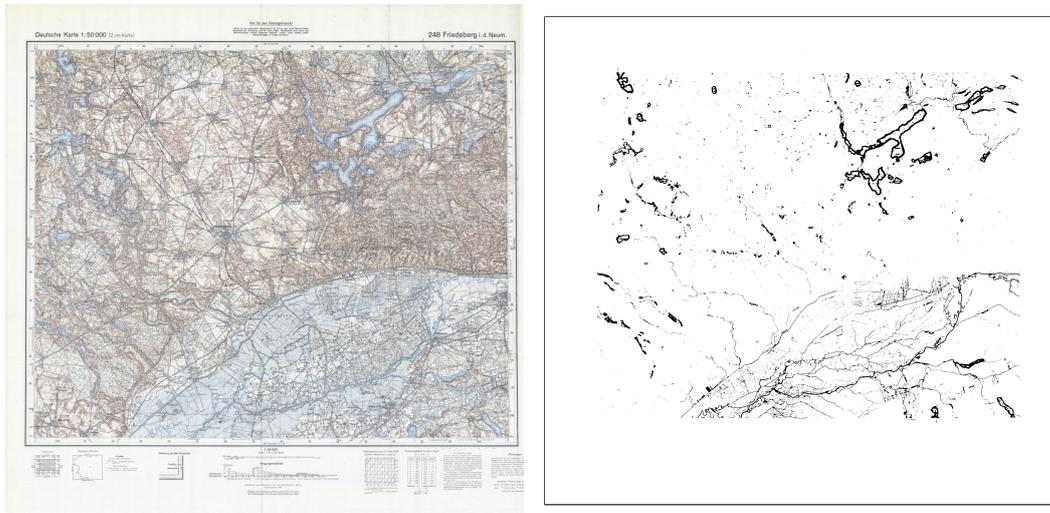


Abbildung 5.10: Beispielhaftes Eingabebild realer Karten. Das Blatt 248 aus dem Datensatz DK50 (links) und die entsprechende Segmentierung (rechts). Die Segmentierung ist zur besseren Lesbarkeit invertiert: Vordergrund in schwarz, Hintergrund in weiß. Karte © Landkartenarchiv.de

5.6 Übertragbarkeit

Um zu zeigen, dass das Verfahren auch auf andere Kartenwerke anwendbar ist, wurden zwei weitere Kartenwerke mit unterschiedlichem Maßstab ausgewählt. Dadurch sollte insbesondere das Verhalten bei unterschiedlichem Detail- bzw. Generalisierungsgrad untersucht werden.

5.6.1 DK50

Die DK50 hat den gleichen Blattschnitt und eine ähnliche Gestaltung wie KDR100, es wurde derselbe Index wiederverwendet. In Abbildung 5.10 wird eine exemplarische Eingabekarte gezeigt.

24 von 25 Blättern (96 %) wurden erfolgreich lokalisiert. Die Georeferenzierungsgenauigkeit ist größtenteils sehr gut: 22 Blätter zeigen eine gute Genauigkeit unter 100 m, nur zwei Blätter wiesen eine schlechte Passung bzw. starke Verzerrung auf, was insgesamt zu einem Medianfehler von 53 m und mittlerem Fehler von 215 m führte.

5.6.2 TÜDR200

Die TÜDR200 hat einen anderen Blattschnitt als die vorigen Kartenwerke. Die 194 Referenzbilder mit leicht reduzierten Signaturen wurden in einem eigenen Index angelegt (siehe Abschnitt 5.2.2). Eine exemplarische Eingabekarte wird in Abbildung 5.11 gezeigt.

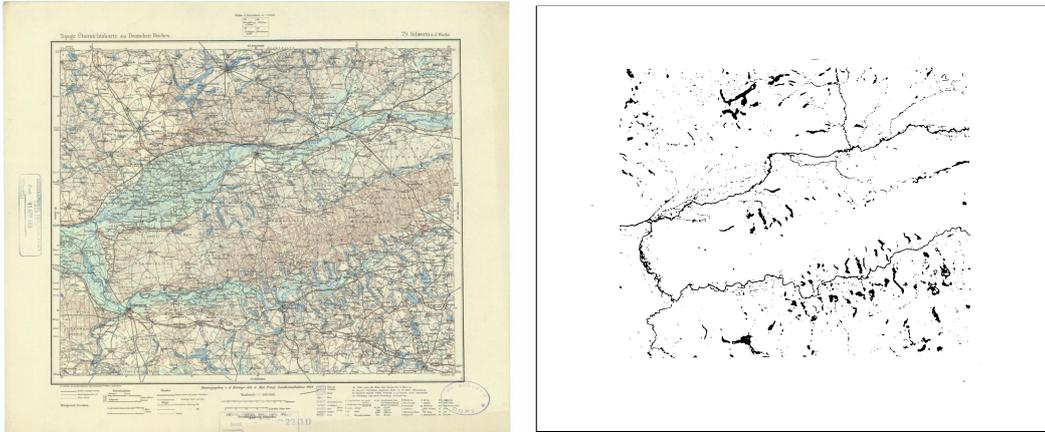


Abbildung 5.11: Beispielhaftes Eingabebild realer Karten. Das Blatt 79 aus dem Datensatz TÜDR200 (links) und die entsprechende Segmentierung (rechts). Die Segmentierung ist zur besseren Lesbarkeit invertiert: Vordergrund in schwarz, Hintergrund in weiß. Karte © Landkartenarchiv.de

41 Blätter wurden verarbeitet, davon konnten neun nicht lokalisiert werden. Von den nicht lokalisierten Blättern liegen vier Blätter an den Grenzen des Deutschen Reiches. Die Nachbarländer sind aber nur als leere Fläche dargestellt und so fehlt bei diesen vier Blättern ein Teil des Karteninhalts. Weitere vier der nicht lokalisierten Blätter liegen an der Küste und haben deshalb wenig Inhalt.

Der Medianfehler der Georeferenzierung lag bei 259 m, der mittlere Fehler bei 3950 m. 12 Blätter konnten nur schlecht registriert werden (nicht konvergiert, Eckpunkte nicht gefunden), alle anderen lagen unter 323 m, 18 lagen unter 300 m, nur eines unter 200 m.

5.7 Nutzbarkeit

5.7.1 Laufzeit

In Abschnitt 5.3.2 werden die Qualitätsmetriken der Georeferenzierung eingeführt. Um eine Verbesserung gegenüber dem konventionellen manuellen Georeferenzierungsprozess darzustellen, muss das automatische Verfahren auch schneller sein. Dementsprechend soll hier die Laufzeit des entwickelten Verfahrens untersucht werden.

Für alle Experimente wurden unkomprimierte Bilddateien verwendet, um die benötigte Zeit für die Dekodierung der hochauflösten Bilder zu reduzieren. Dies erspart gegenüber PNG-Bildern ca. 6 s bis 7 s pro Bild und noch mehr gegenüber stärker komprimierten Dateiformaten, wie z. B. JPEG.

Alle Experimente wurden auf einem 64-bit Consumer PC i7 Dualcore mit 2,8 Ghz und 24 GB RAM durchgeführt. Bei der Implementierung wurden keine expliziten Maßnahmen zur Parallelisierung getroffen.

5.7.1.1 Aufbau des Index

Der Zeitbedarf für Aufbau des Index ist abhängig von der Anzahl der möglichen Kartenpositionen im Blattschnitt. Bei den 909 Blättern des Blattschnittes der KDR100 dauerte der Aufbau 720s, also durchschnittlich 0,8s pro Blatt. Rund zwei Drittel der Zeit entfällt dabei auf das Erkennen der Interestpunkte und Berechnung der zugehörigen Deskriptoren und ein Sechstel auf die Rasterisierung der Referenzvektordaten. Die benötigte Zeit für den Download von OSM-Referenzdaten wurde nicht einberechnet.

Der Index der TÜDR200 wurde innerhalb von 240s aufgebaut, benötigte also ca. 1,2s pro Blatt. Die leicht höhere Laufzeit ist auf die größere Anzahl von Bildmerkmalen pro Blatt zurückzuführen.

5.7.1.2 Lokalisierung

Der maßgebliche Anteil an der Lokalisierungszeit fällt auf die Hypothesenverifikation. Gleichzeitig haben NutzerInnen hier einen Einfluss auf die zu erwartende Laufzeit: die Anzahl der zu testenden Hypothesen kann verringert werden, um deutliche Laufzeitersparnisse zu erreichen. Der Nachteil daran ist, dass dadurch womöglich einige Blätter nicht mehr korrekt lokalisiert werden können: wenn z. B. nur die nach Index-Suche 30 ähnlichsten Hypothesen geprüft werden, wird ein Blatt, das nach Indexähnlichkeit erst an 31. Stelle liegt, niemals lokalisiert werden.

Abbildung 5.12 zeigt den Zusammenhang zwischen der Anzahl der geprüften Hypothesen und der damit maximal erreichbaren Trefferquote. In der Praxis werden etwas geringere Trefferquoten erzielt, weil in manchen Fällen auch die Hypothesenverifikation scheitert und nicht das korrekte Referenzbild bestimmt.

Die gemessenen Laufzeiten für eine, zehn, 20 oder 30 Hypothesen sind in Tabelle 5.4 ersichtlich. Für die meisten Experimente wurden 30 Verifikationen gewählt. Für Experimente, bei denen alle korrekten Ergebnisse schon nach weniger Verifizierungen gefunden werden konnten, wurden zur Zeitersparnis entsprechend weniger Verifikationen durchgeführt.

Zusätzlich zur Hypothesenverifikation wird Zeit benötigt, um das Bild von der Festplatte einzulesen, zu dekomprimieren und zu segmentieren (pro Blatt ca. 1,4s). Danach fallen ca. 0,3s auf die Extraktion der Bildmerkmale. Die Indexsuche ist mit ca. 0,2s im Vergleich sehr schnell und skaliert nur logarithmisch mit Größe des Index (vgl. Abschnitt 4.6.2). Der gesamte Geolokalisierungsprozess dauert so im Mittel pro Blatt ohne Hypothesenverifikation ca. 2,3s und mit Verifikation von 30 Hypothesen ca. 15s.

In Tabelle 5.5 wird gezeigt, an welcher Stelle r die korrekten Referenzbilder unter den nach Ähnlichkeit sortierten Hypothesen liegen. Daraus ergibt sich die Zahl der für eine korrekte Lokalisierung notwendigerweise zu verifizierenden Hypothesen R .

Beim Vergleich der mittleren r über die verschiedenen Datensätze zeigt sich, dass für die Lokalisierung synthetischer Daten reine Indexsuche ausreichend ist. Die Hypothesenverifikation ist also nur für eine höhere Robustheit gegenüber fehlerbehafteten Daten mit viel Verdeckung oder für die Altkarten erforderlich.

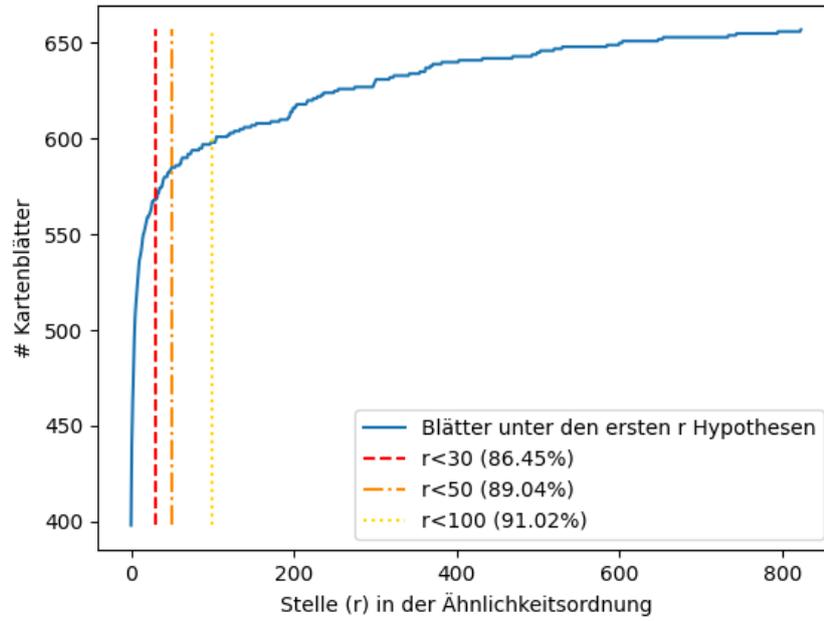


Abbildung 5.12: Die Verteilung der Blätter nach ihrer Stelle in der Ähnlichkeitsordnung noch Index-Ähnlichkeit. Nur bei 86,45% der Eingabebilder ist das korrekte Referenzbild unter den ersten 30 Hypothesen. Entsprechend liegt die erreichbare Trefferquote nach Hypothesenverifikation darunter.

Tabelle 5.4: Laufzeit der Hypothesenverifikation je Kartenblatt für eine unterschiedliche Anzahl von zu prüfenden Hypothesen.

# Verifikationen	Zeit/Blatt [s]
1	0,3
10	3,7
20	7,8
30	14,1

Tabelle 5.5: Vergleich der Lokalisierungsergebnisse vor und nach Hypothesenverifikation. Die zweite Spalte zeigt, an welcher Stelle r das richtige Referenzbild im Mittel und Median lag. Die dritte Spalte zeigt, für wie viele Blätter das korrekte Referenzbild an erster Stelle lag und keiner Hypothesenverifikation bedurfte. Die vierte Spalte zeigt die maximal erreichbare Trefferquote, wenn maximal R Hypothesen verifiziert werden. In der fünften Spalte ist die finale Trefferquote nach Hypothesenverifikation zu sehen.

Datensatz	r		$r = 0$		$r < R$			korrekt	
	M	Md	#	%	#	%	R	#	%
KDR100 ideal	0	0	655	99,8	656	100	5	653	99,5
KDR100 90% R.	0	0	377	57,4	656	100	15	656	100
KDR100 83% V.	2,6	0	377	57,4	456	69,5	30	314	47,9
KDR100 real	34,1	0	398	60,6	568	86,5	30	542	82,5
DK50	2,2	0	16	64,0	24	96,0	40	24	96,0
TÜDR200	29,1	1	18	43,9	32	78,0	30	32	78,0

Aber auch bei den Altkarten liegen die meisten Referenzbilder an erster Stelle (Median ist null). Daher konnte mit der Präemptionsheuristik (vgl. Abschnitt 4.6.4.1) die notwendige Zahl der Verifikationen für 228 von 568 Blätter reduziert werden (die übrigen 89 Blätter konnten bei 30 geprüften Hypothesen ohnehin nicht lokalisiert werden). Damit fiel die durchschnittliche Zeit pro Blatt auf 0,28s. Dieser Zeitgewinn wird durch 16 zusätzlich fehlerhaft lokalisierte Blätter erkauft, bei denen fälschlicherweise zu früh abgebrochen wurde.

Für die Wahl der zu prüfenden Hypothesen kann in der Praxis gelten: Bei kleinen Kartenwerken (weniger als 50 mögliche Positionen im Index) können alle Hypothesen geprüft werden. Bei vielen Karten im Index und ähnlichen Fehlerquellen wie in der KDR100 ist die Prüfung von 30 Hypothesen eine geeignete erste Annahme.

Eine weitere laufzeitrelevante Eigenschaft ist die Auflösung der Eingabebilder. Sehr hoch aufgelöste Bilder erfordern etwas mehr Zeit für die Segmentierung und die Merkmalsextraktion. Die Anzahl der Bildmerkmale oder der Anteil der Vordergrund-Pixel im segmentierten Eingabebild zeigen jedoch keinen eindeutigen Zusammenhang zur Laufzeit.

Wenn man aber die untersuchten Hypothesen (statt nur der gefundenen Lösungen) betrachtet, besteht aber ein antiproportionaler Zusammenhang zwischen der Anzahl der Korrespondenzen und der Zeit, die für die Verifikation benötigt wird. D. h. RANSAC konvergiert erst nach mehr Iterationen, wenn weniger Korrespondenzen gefunden werden konnten – was vor allem bei falschen Hypothesen der Fall ist. Bei korrekten Hypothesen liegen häufig entsprechend mehr Korrespondenzen vor, wodurch bei niedriger Ausreißerquote geringe Restfehler auftreten und das Verfahren schneller eine Transformation als Lösung akzeptiert.

5.7.1.3 Registrierung

Die Registrierung dauert im Schnitt 0,81 s pro Blatt. Die allermeisten (484 von 537 lokalisierten Blättern) liegen dabei deutlich unter 1 s, ein paar Ausreißer mit bis zu 8 s. Dabei besteht kein sichtbarer Zusammenhang zum ECC-Wert (also der Ähnlichkeit von registriertem Bild und Referenz). Dies bedeutet, dass die allermeisten Blätter aufgrund einer vermeintlich gefundenen Lösung die Registrierung terminieren (selbst wenn sich diese als vergleichsweise schlechte Georeferenzierung herausstellt) und nicht aufgrund von Abbruchkriterien. Somit bringt eine Veränderung der Akzeptanzparameter der Registrierung (z. B. mehr Iterationen) wahrscheinlich keine wesentliche Veränderung des Gesamtergebnisses.

Die Experimente mit unterschiedlich aufgelösten synthetischen Bildern (unter Abschnitt 5.4.3.3 wurde für die Registrierung von 200 px breiten Bildern 0,24 s gebraucht, bei 500 px breiten 0,30 s und bei 1200 px breiten 0,70 s) zeigen dass obgleich die ECC-Registrierung lineare Komplexität in Abhängigkeit zur Anzahl der Pixel hat [Evangelidis & Psarakis 2008a], der Registrierungsprozess insgesamt aufgrund der vorausgehenden Merkmalszuordnung und der merkmalsbasierten Registrierung nicht in gleichem Maße durch kleinere Eingabebilder beschleunigt werden kann.

5.7.2 Konfidenz

Automatische Systeme können niemals eine hundertprozentige Erfolgsquote haben und auch die hier vorgestellte Methode hat, wie dieses Kapitel zeigt, eine gewisse Fehlerrate. Für BereitstellerInnen oder NutzerInnen von georeferenzierten Karten würde eine manuelle Suche und Korrektur von Fehlern schnell die eingesparte Zeit zunichte machen. Für einen effizienten Korrekturprozess ist es wichtig, fehlerhafte Georeferenzierungen schnell zu finden und auf die korrekte Erkennung von fehlerfreien Karten vertrauen zu können. Um dies zu ermöglichen, wird untersucht, ob im Verfahren ein nützlicher Wert für Ergebniskonfidenz angegeben werden kann. Somit müssten NutzerInnen nur die Blätter mit niedriger Konfidenz überprüfen und gegebenenfalls korrigieren.

5.7.2.1 Lokalisierung

Um abzuschätzen, ob eine ausgewählte Hypothese (Vorhersage) tatsächlich das korrekte Referenzbild darstellt, wird die Anzahl der Korrespondenzen dieser Hypothese (Ähnlichkeit) mit der Ähnlichkeit der anderen geprüften Hypothesen verglichen. Es zeigt sich, dass die in der Verifikation verworfenen Hypothesen deutlich weniger Korrespondenzen haben, selbst wenn sie in der Index-Suche noch gut abschnitten. Ferner zeigt sich, dass sich die Ähnlichkeit unter den falschen Hypothesen eines Blattes in einem ähnlichen Bereich bewegen. Die Ähnlichkeit der korrekten Hypothese hingegen fällt häufig signifikant höher aus. Dies lässt sich damit erklären, dass die hohe Zahl der beobachteten Korrespondenzen bei der korrekten Prädiktion das Resultat einer tatsächlichen Ähnlichkeit des Inhalts beider Bilder sind, während die Korrespondenzen der falschen Hypothesen eher zufällig beobachtet werden und quasi eine

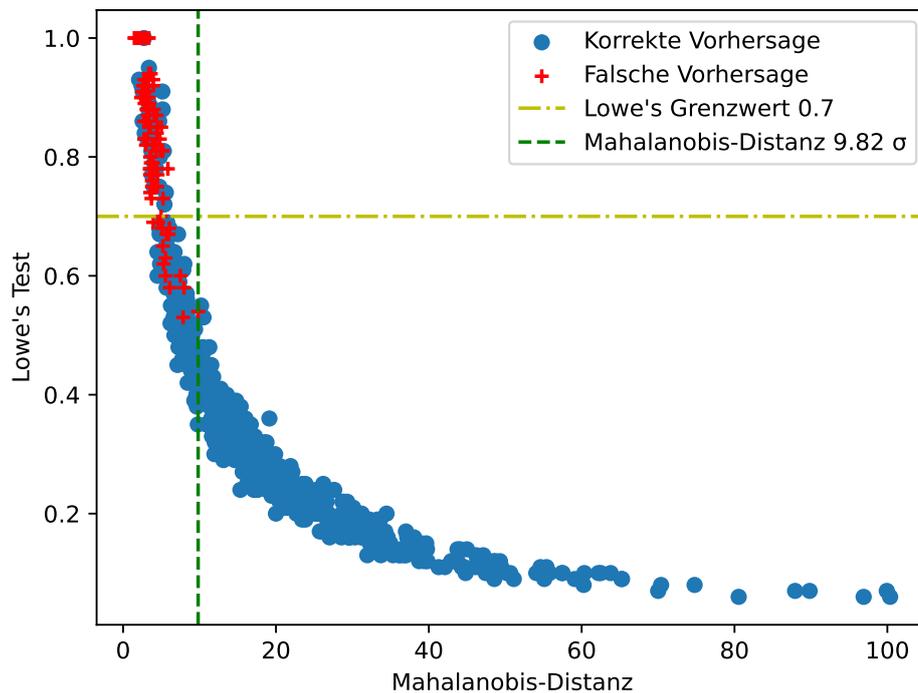


Abbildung 5.13: Abschätzung der Lokalisierungskonfidenz anhand der Mahalanobis-Distanz oder mit Lowe's Test. Die Ähnlichkeit aller falschen Vorhersagen liegt weniger als 9,82 Standardabweichungen von den restlichen Hypothesen entfernt. Mit diesem Grenzwert könnten falsche Hypothesen zuverlässig erkannt werden, es müssten aber 132 falsch-negative Vorhersagen in Kauf genommen werden.

Art „Grundrauschen“ darstellen.

Die Überprüfung der Korrektheit der Vorhersage ist folglich mit zweierlei Methoden denkbar: erstens, mit der *Mahalanobis-Distanz*, der Ähnlichkeit der Vorhersage zur Verteilung der übrigen Ähnlichkeitswerte (angegeben in Standardabweichungen zum Mittelwert) oder zweitens, mit dem Verhältnis des Ähnlichkeitswertes der Vorhersage zum zweitgrößten Ähnlichkeitswert (im Kontext von Merkmalszuordnungen unter dem Namen *Lowe's Test Ratio* bekannt, nach [Lowe 2004]). Abbildung 5.13 zeigt, dass die falschen Prädiktionen deutlich durch diese Metriken eingegrenzt werden.

Andererseits wurde für einige Blätter zwar das korrekte Referenzbild bestimmt, sie weisen aber eine derart niedrige Ähnlichkeit auf, dass sie sich statistisch nicht von den falschen Hypothesen abgrenzen lassen. Dies geschieht etwa, wenn nur wenig Bildinhalt und damit insgesamt nur wenige Bildmerkmale extrahiert werden konnten. Solche Vorhersagen haben also eine geringe Konfidenz: Bei diesen Blättern muss davon ausgegangen werden, dass sie auch anfälliger für Fehler anderer Art (wie z. B. Rauschen) sind und unter leicht veränderten Eingabedaten auch falsch lokalisiert worden wären.

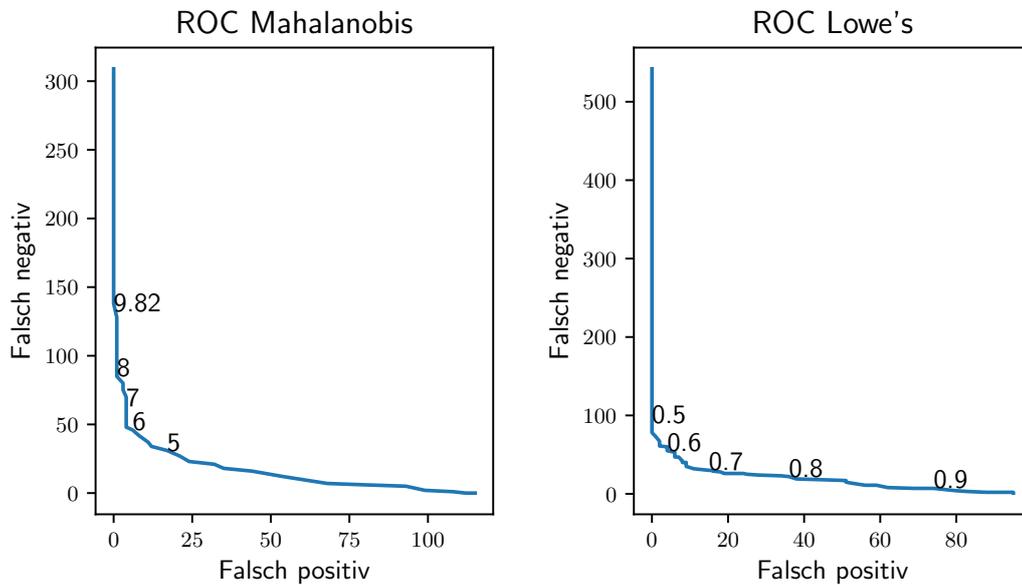


Abbildung 5.14: Grenzwertoptimierungskurve für die Abschätzung korrekter Lokalisierung mittels Mahalanobis-Distanz (link) oder Lowe's Test (rechts)

Um also falsche von korrekten Vorhersagen unterscheiden zu können, können unterschiedliche Grenzwerte für die Mahalanobis-Distanz und Lowe's Test angesetzt werden (so genannte *Receiver Operating Characteristic, ROC*). Abbildung 5.14 zeigt die resultierende Anzahl von Blättern, die je nach Grenzwert fälschlicherweise für falsche Prädiktionen (falsch negativ) bzw. fälschlicherweise als richtige Prädiktionen (falsch positiv) erkannt werden. Die Wahl des Grenzwertes kann somit von den NutzerInnen angepasst werden, um entweder falsch positive Vorhersagen auszuschließen oder weniger Vorhersagen von Hand auf ihre Korrektheit prüfen zu müssen.

So können bei der Vorhersage der Kartenpositionen der KDR100 ab einer Mahalanobis-Distanz von 9,82 Standardabweichungen alle falsch-positiven Vorhersagen ausgeschlossen werden. Es werden aber 132 korrekte Vorhersagen fälschlicherweise als falsch bestimmt, was einer Falsch-negativ-Rate von 24 % entspricht.

Die Möglichkeit, falsche Prädiktionen zu erkennen, steht im Konflikt mit der Präemptionsheuristik (siehe Abschnitt 4.6.4.1): Bei einem frühen Abbruch der Hypothesenverifikation werden nicht genug Hypothesen geprüft und so der für die Mahalanobis-Distanz wichtige Mittelwert der Ähnlichkeitsverteilung verfälscht. In der Praxis muss man sich also dafür entscheiden, entweder die Ergebniskonfidenz abschätzen zu können oder eine höhere mittlere Geschwindigkeit bei der Verarbeitung zu erreichen.

5.7.2.2 Registrierung

Wie u. a. dem Experiment in Abschnitt 5.5 zu entnehmen ist, gibt es eine Reihe an Blättern, die zwar erfolgreich lokalisiert wurden, aber eine schlechte Registrierung

aufweisen und manuell nachgebessert werden müssen (siehe Abschnitt 5.3.2). Um diese Blätter automatisch zu erkennen, muss die Konfidenz der Registrierungslösung abgeschätzt werden. Einen Indikator für die Konfidenz der Registrierung zu finden ist wesentlich schwieriger, als für die Lokalisierung. Naheliegender wäre es, den finalen ECC-Wert der Registrierung als Maß der Registrierungsqualität zu betrachten. Dieser Wert beschreibt die Korrelation des Ursprungsbildes mit dem Zielbild und ist der Zielwert, anhand dessen die Registrierung iterativ optimiert wird, bis ein Maximum gefunden wird. Ein hoher Wert deutet also auf eine vermeintlich gute Passung der Bildinhalte hin (vgl. Abschnitt 4.7).

Der ECC-Wert ist aber nicht über mehrere Bilder desselben Datensatzes vergleichbar, weil z. B. auch bei Verdeckung eine gute Lösung gefunden werden kann, der ECC-Wert dann aber niedriger ausfällt als bei einer vergleichbar guten Lösung für Kartenbilder ohne Verdeckung. Bei der Registrierung der KDR100 waren erst ab einem ECC-Wert von über 0,76 nur noch Registrierungen zu finden, die keiner manuellen Prüfung bedürfen. Da aber die guten Registrierung über fast alle möglichen ECC-Werte gestreut sind, werden damit nur 33 Blätter sicher als gut klassifiziert.

Eine andere Möglichkeit ist, Ausreißer bei den Transformationsparametern zu suchen: Da z. B. davon ausgegangen werden kann, dass die meisten Karten mehr oder weniger rechtwinklig sind, wären große Werte für die Scherung bei der Registrierung ein Indiz für eine nicht konvergierte Lösung. Damit lassen sich aber nur wenige sehr schlechte Registrierungen erkennen, es bleiben zu viele schlechte Registrierungen übrig, die sich nicht einfach von den guten Registrierungen trennen lassen.

5.8 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Auswertung werden hier zusammengefasst:

- Gewässersignaturen haben sich unter Idealbedingungen als geeignet herausgestellt, um alle Blätter erfolgreich zu georeferenzieren.
- Andere Signaturklassen funktionieren zwar im Prinzip genau so gut, sind aber gegebenenfalls im Maßstab 1 : 100 000 nicht ausreichend häufig, um alle Blätter verarbeiten zu können. Die Robustheit gegen historische Veränderungen dieser Signaturen wurde nicht untersucht.
- Das vorgestellte Verfahren hat sich robust gegen simuliertes Rauschen gezeigt: Es war kein Einfluss auf Trefferquote und nur geringe Verschlechterung der Registrierungsgenauigkeit festzustellen.
- Gegen simulierte Verdeckung war das Verfahren nur zu einem gewissen Maße robust: ab 75 % verdeckter Vordergrundpixel fiel die Trefferquote der Lokalisierung und der Anteil der schlechten Registrierungen unter das Niveau der Altkarten.
- Mit dem vorgestellten Verfahren konnte der Großteil (79 % bis 96 %) der Altkarten erfolgreich lokalisiert werden.

- Die Georeferenzierungsgenauigkeit ist für die meisten Karten sehr gut. Für 8 % bis 29 % der Blätter war die Georeferenzierung allerdings unbrauchbar.
- Die Anpassung an neue Kartenwerke erforderte nur minimalen Parametrisierungsaufwand (wiewohl die Karten sehr ähnlich sind).
- Die Registrierungsgenauigkeit (in Metern) ist maßstabsabhängig: ein größerer kartographischer Maßstab erlaubt höhere Genauigkeit.
- Die Laufzeit, die benötigt wird, um ein einzelnes Blatt zu georeferenzieren, ist niedrig genug, um von AnwenderInnen auf dem eigenen PC durchgeführt zu werden. Den Index zu trainieren, könnte ein Hindernis sein und lohnt sich nur, wenn viele Karten desselben Kartenwerks auf einmal georeferenziert werden sollen.
- Die Ergebniskonfidenz lässt sich nur für die Lokalisierung abschätzen, nicht aber für die Registrierung.

Tabelle 5.6 zeigt die Ergebnisqualität von synthetischen Datensätzen und den realen Kartenwerken im Vergleich.

Im folgenden Kapitel wird betrachtet, ob und wie weit die Ziele der vorliegenden Arbeit mit diesen Ergebnissen erreicht werden konnten. Außerdem wird diskutiert, an welchen Schwächen das Verfahren in der derzeitigen Implementierung leidet, bzw. welche Umstände zu Fehlern führen; wie die Ergebnisqualität mit dem aktuellen Stand der Forschung zu vergleichen ist; und ob und wie sehr das vorgestellte Verfahren potenziellen NutzerInnen bei der Georeferenzierung hilft.

Tabelle 5.6: Vergleich der Ergebnisqualität aller Experimente. R. = Rauschen, V. = Verdeckung. Schlechte Registrierung wird bei den synthetischen Datensätzen ab 30 m MAE angenommen, außer bei den unterschiedlich aufgelösten Bildern. Dort bei 200 px mit 240 m und bei 500 px mit 90 m. Bei den tatsächlichen Kartenwerken sind schlechte Registrierungen solche mit einem Fehler über 400 m.

Datensatz	# Karten	korrekt		MAE Md [m]	# schlechte Registrierung
		#	%		
KDR100 ideal	656	656	100	10,1	6
KDR100 Straßen	656	655	99,8	9,9	7
KDR100 Eisenbahn	634	629	99,2	10,6	84
KDR100 60% R.	656	656	100	10,7	25
KDR100 70% R.	656	656	100	11,0	26
KDR100 80% R.	656	656	100	11,2	29
KDR100 90% R.	656	656	100	11,7	30
KDR100 55% V.	656	652	99,4	13,2	67
KDR100 75% V.	656	530	80,8	16,8	123
KDR100 83% V.	656	314	47,9	25,0	139
KDR100 200px	656	655	99,8	192	12
KDR100 500px	656	656	100	75	15
KDR100 real	656	542	82,5	96,0	91
DK50	25	24	96	52,6	2
TÜDR200	41	32	78	258,5	12

Ergebnisdiskussion

Inhaltsverzeichnis

6.1	Bewertung der Auswertungsergebnisse	95
6.2	Fehleranalyse	96
6.2.1	Qualitative Analyse	97
6.2.1.1	Blatt 388	97
6.2.1.2	Blatt 389	99
6.2.1.3	Blatt 413	99
6.2.1.4	Blatt 414	99
6.2.1.5	Blatt 553	100
6.2.1.6	Blatt 554	100
6.2.1.7	Blatt 568	102
6.2.1.8	Blatt 569	102
6.2.1.9	Zusammenfassung der qualitativen Analyse	102
6.2.2	Dichte und Verteilung von Signaturen	104
6.2.3	Ungenau Segmentierung	105
6.2.4	Transformationsklassen	107
6.2.5	Historische Veränderung	107
6.2.6	Ungenauigkeit im Originalmaterial	108
6.3	Einordnung der Praxistauglichkeit	109
6.3.1	Ergebnisqualität	110
6.3.2	Verarbeitungsgeschwindigkeit	111
6.3.3	Einfache Übertragbarkeit auf neue Kartenwerke	112
6.4	Vergleich der Ergebnisse mit der Literatur	112
6.4.1	Vorhergehende Arbeiten	114
6.4.2	Vergleich	116

6.1 Bewertung der Auswertungsergebnisse

Die grundlegende Forschungsfrage der vorliegenden Arbeit ist, ob sich die Geometrie von Gewässersignaturen eignet, topographische Altkarten zu georeferenzieren. Diese Frage wurde anhand einer prototypischen Implementation bearbeitet, der die folgenden Arbeitshypothesen zugrunde liegen:

1. Wenn die Kartenabbildungen angeglichen wurden, können Karten in der Bild-domäne verarbeitet werden.
2. Insbesondere können die Signaturen und deren Geometrien mit Bildmerkmalen eindeutig beschrieben werden.
3. Bewährte Zuordnungs- und Registrierungsverfahren können Karten präzise registrieren.
4. Durch Indizierung der Referenzbilder lässt sich eine sehr schnelle Zuordnung sicherstellen.
5. Die Georeferenzierungsgenauigkeit der meisten Blätter ist sehr gut und erlaubt die vielfältigen Nachnutzungen möglicher AnwenderInnen. Aber die Georeferenzierung einiger weniger Blätter ist unbrauchbar.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass diese Hypothesen bestätigt werden konnten und die Ziele der Arbeit erreicht wurden (vgl. Abschnitte 1.3 und 5.1). Die Forschungsfrage lässt sich positiv beantworten – wenn auch Einschränkungen sichtbar werden. So konnten nicht alle Karten erfolgreich lokalisiert werden und auch die Registrierung ist stellenweise mangelhaft.

Es stellt sich die Frage, warum manche Blätter in Lokalisierung oder Registrierung scheitern. Insbesondere ist für die Bewertung des vorgeschlagenen Verfahrens wichtig, ob sich die Probleme mit einer Weiterentwicklung der Methoden und Feinjustierung der Parameter beheben ließen, oder ob die Nutzung von Signaturgeometrien grundsätzlich limitiert ist.

Um diese Fragen zu beantworten und eventuelle Muster zu entdecken, werden nun einige Fehlerfälle im Einzelfall betrachtet und qualitativ untersucht. Der Fokus soll hierbei nicht darauf liegen, die Genauigkeit zu perfektionieren (siehe Abschnitt 6.2.6, warum das ohnehin nicht unbedingt sinnvoll wäre). Stattdessen soll besser verstanden werden, wieso manche Blätter sehr schlechte Genauigkeiten aufweisen, um in der Zukunft die Qualität in der Breite zu verbessern.

6.2 Fehleranalyse

Die Auswertung der synthetischen Daten in Abschnitt 5.4.1 zeigt, dass das Verfahren im Prinzip sehr genaue Georeferenzierungen durchführen kann. Es gibt aber einige Fehlerquellen bei der Verarbeitung von echten Karten, welche die Genauigkeit stark reduzieren können bzw. teilweise dafür sorgen, dass Blätter gar nicht georeferenziert werden können.

Der Vergleich der Ergebnisse der synthetischen degradierten Karten mit den Ergebnissen der Altkarten legt nahe, dass die Fehler Ursachen zuzuschreiben sind, die eher mit Verdeckung vergleichbar sind als mit Rauschen. Das wäre bei Altkarten der Fall, wenn die Signaturen der Eingabekarten nicht mit der Referenzkarte zusammen passen: etwa wegen historischer Veränderung der Topographie (siehe hierzu Abschnitt 6.2.5).

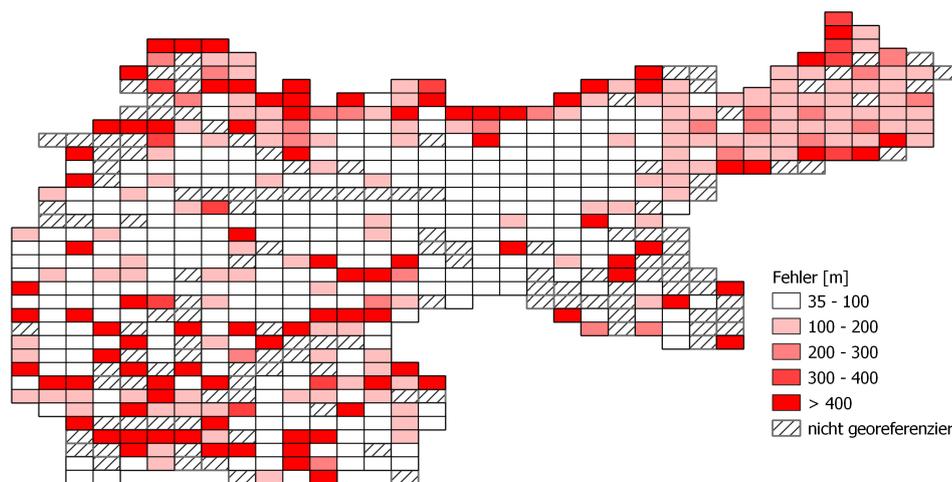


Abbildung 6.1: Fehlerverteilung geographisch. Tiefrot: hoher Fehler, weiß: geringer Fehler. Schraffierte Blätter konnten nicht lokalisiert werden.

Einen anderen Einblick in die möglichen Gründe für schlechte Ergebnisqualität bei echten Karten der KDR100 liefert der Überblick über die Lage der Blätter mit hohen Fehlern in Abb. 6.1. Auffällig ist hierbei, dass kaum ein Blatt an der Küste gute Qualität aufweist (siehe dazu auch Abschnitt 6.2.2).

Die Fehlerverteilung in der Übersichtskarte und eine flüchtige Betrachtung der betroffenen Blätter werfen die Frage auf, warum direkt benachbarte Blätter mit ähnlichem Inhalt teilweise deutliche Qualitätsunterschiede aufweisen. Daher sollen hier zwei Vierergruppen von benachbarten Blättern (siehe Abb. 6.2) und deren augenscheinlich problematischer Inhalt im Detail betrachtet werden.

6.2.1 Qualitative Analyse

Um genauer zu beleuchten, welche Teile des Karteninhaltes für Probleme bei der Registrierung sorgen, wurde jedes Kartenbild der Stichprobe jeweils mit demselben in Viertel (Quadranten) unterteilten Bild verglichen. Dabei wurden die Quadranten auch immer mit den entsprechendem Viertel des jeweiligen Referenzbildes registriert.

6.2.1.1 Blatt 388

Blatt 388 entstammt der Stichprobe A und wurde mit 912 m Fehler schlecht registriert (siehe Abb. 6.3). Nur der obere rechte Quadrant zeigt sehr gute Passung. Eigentlich lässt sich der Hauptflusslauf in allen Quadranten gut erkennen, aber in den linken Quadranten ist die Kontur durch viele kleine kreuzende Signaturen (Gräben) fehlerhaft segmentiert. Es ist nicht ganz klar, warum die Registrierung hier im Unterschied zu etwa Blatt 413 nicht gut funktioniert hat.

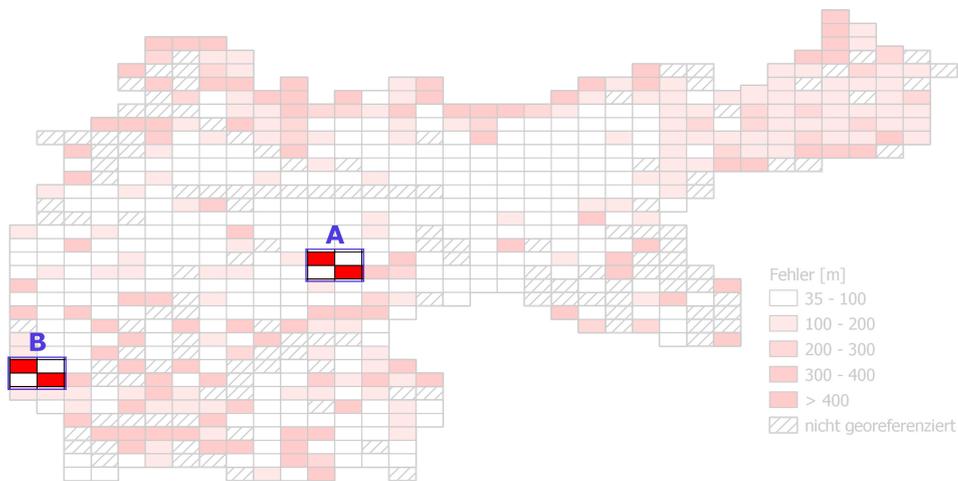


Abbildung 6.2: Stichproben für die qualitative Fehleranalyse. A: die Blätter 388, 389, 413, 414; B: die Blätter 553, 554, 568, 569

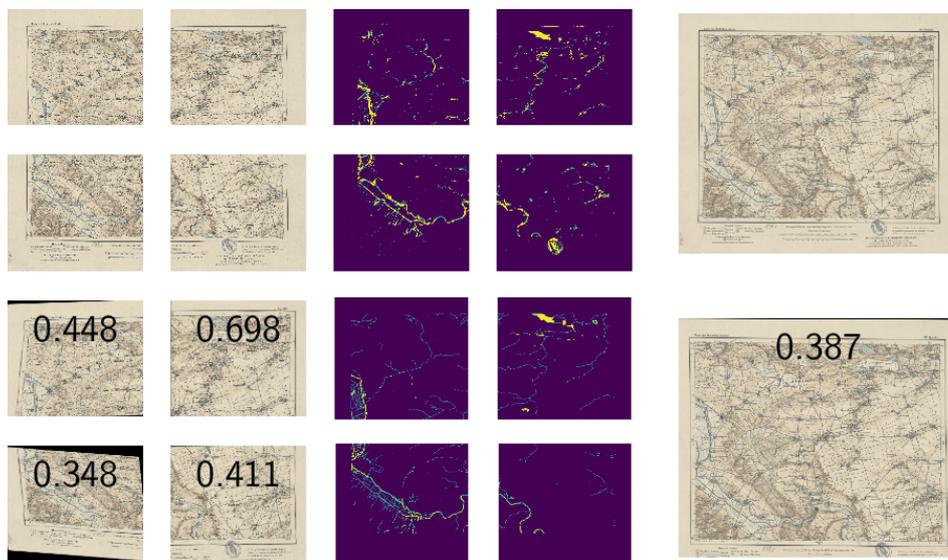


Abbildung 6.3: Negativbeispiel aus Stichprobe A: Blatt 388. Die obere Reihe zeigt die Eingabekarte in Quadranten (links), deren Segmentierungen (Mitte) sowie komplett (rechts). In der unteren Reihe sind die registrierten Teilkarten mit dem entsprechenden finalen ECC-Wert sichtbar (links). In der Mitte sind die entsprechenden Referenzkarten abgebildet, das jeweilige Zielbild der Registrierung. Rechts ist das Ergebnis der Registrierung des normalen Georeferenzierungsprozesses der vollständigen Eingabekarte. Karte © Staatsbibliothek zu Berlin, Kartenabteilung

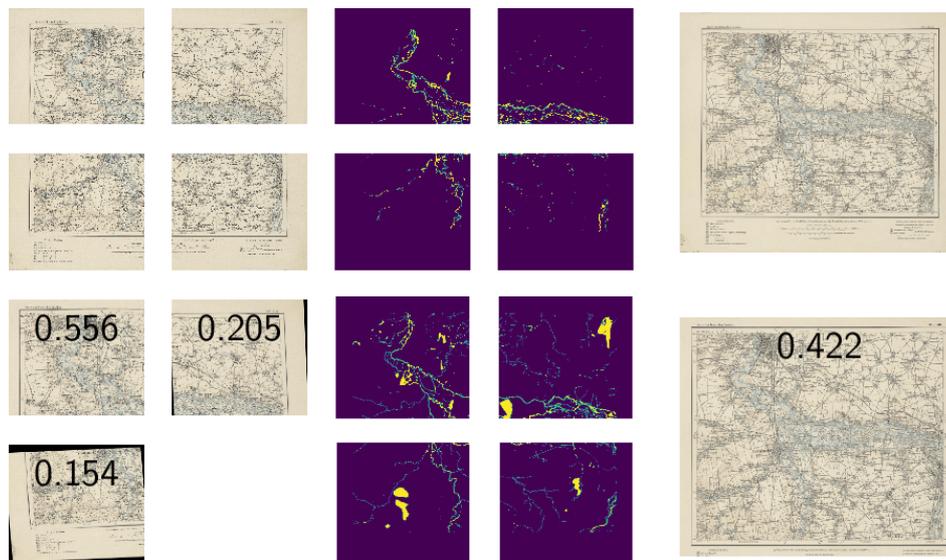


Abbildung 6.4: Positivbeispiel aus Stichprobe A: Blatt 389. Aufbau wie in Abb. 6.3, nur unten links fehlt der Quadrant, für den die Registrierung nicht konvergierte. Karte © Staatsbibliothek zu Berlin, Kartenabteilung

6.2.1.2 Blatt 389

Blatt 389 entstammt der Stichprobe A und konnte mit 95 m Fehler gut registriert werden (siehe Abb. 6.4). Trotz Seen in der Referenzkarte, die nicht in der Eingabekarte vorkommen (vermutlich renaturierter Tagebau), konnte eine gute Georeferenzierung erreicht werden. Womöglich sind die übergreifenden Flusssignaturen deskriptiver, als die vereinzelt flächenhaften See-Signaturen. Der untere rechte Quadrant hatte zwar so wenig Inhalt, dass er im einzelnen nicht registriert werden konnte, aber im Gesamtbild durch die Informationen der anderen Quadranten ausgeglichen werden konnte.

6.2.1.3 Blatt 413

Blatt 412 entstammt der Stichprobe A und konnte mit 101 m Fehler gut registriert werden (siehe Abb. 6.5). Die Kanten der Flüsse sind in der Segmentierung etwas unscharf. Wo feine Signaturen ungenau segmentiert wurden, ergeben sich fleckige Stellen. Insgesamt ist die grobe Struktur des Flussnetzwerkes aber gut erhalten und über alle Quadranten verteilt. ECC-Werte legen nahe, dass die Quadranten oben rechts und unten links mehr zur Passung beitragen, als die anderen.

6.2.1.4 Blatt 414

Blatt 414 entstammt der Stichprobe A und wurde mit 1452 m Fehler schlecht registriert (siehe Abb. 6.6). Der Flusslauf zeigt sich stark mäandrierend und konnte nur

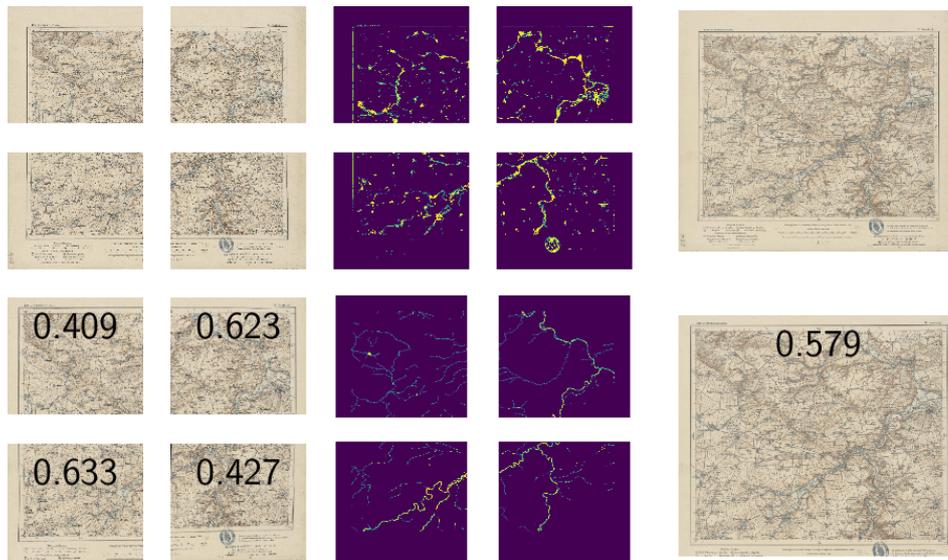


Abbildung 6.5: Positivbeispiel aus Stichprobe A: Blatt 413. Aufbau wie in Abb. 6.3. Karte © Staatsbibliothek zu Berlin, Kartenabteilung

unscharf, an Kreuzungspunkten fleckig, segmentiert werden. Dadurch sind wahrscheinlich gerade diese deskriptiven Kreuzungspunkte schlecht zuordenbar. Nur der obere linke Quadrant zeigt einen hohen ECC-Wert und gute Passung, konnte aber wohl im Gesamtbild die Ambiguitäten der anderen Quadranten nicht ausgleichen.

6.2.1.5 Blatt 553

Blatt 553 entstammt der Stichprobe B und wurde mit 1515 m Fehler schlecht registriert (siehe Abb. 6.7). Die linken Quadranten haben gar keinen segmentierten Inhalt, weil die französische Rheinseite nicht koloriert ist. Dadurch ist eine gute Passung nur am rechten Bildrand möglich und im linken Bereich treten starke Verzerrungen durch Extrapolation auf.

6.2.1.6 Blatt 554

Blatt 554 entstammt der Stichprobe B und wurde mit 79 m Fehler gut registriert (siehe Abb. 6.8). Die linken Quadranten haben nur wenig segmentierten Inhalt. Oben links wird aber ein höherer ECC-Wert erreicht, als unten links – womöglich wegen der größeren Fläche der segmentierten Signaturen. Unten links ist ECC-Wert wahrscheinlich wegen verrauschter kleiner Signaturen schlecht, unten rechts wahrscheinlich aufgrund des Archivstempels. Insgesamt zeigt sich, dass alle Quadranten separat eine relativ starke Verzerrung aufweisen, aber beim gesamten Kartenbild die Ungenauigkeiten gut ausgeglichen werden konnten.

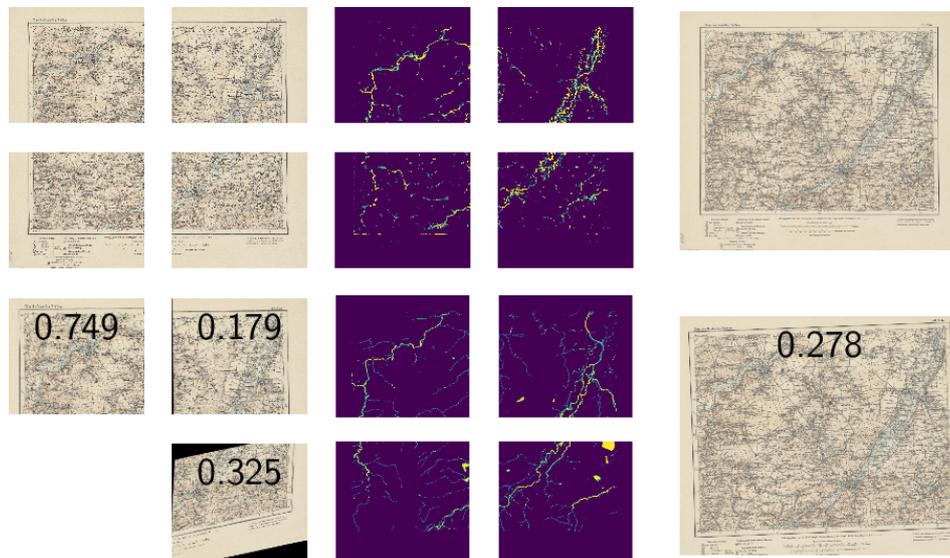


Abbildung 6.6: Negativbeispiel aus Stichprobe A: Blatt 414. Aufbau wie in Abb. 6.3, nur unten links fehlt der Quadrant, für den die Registrierung nicht konvergierte. Karte © Staatsbibliothek zu Berlin, Kartenabteilung

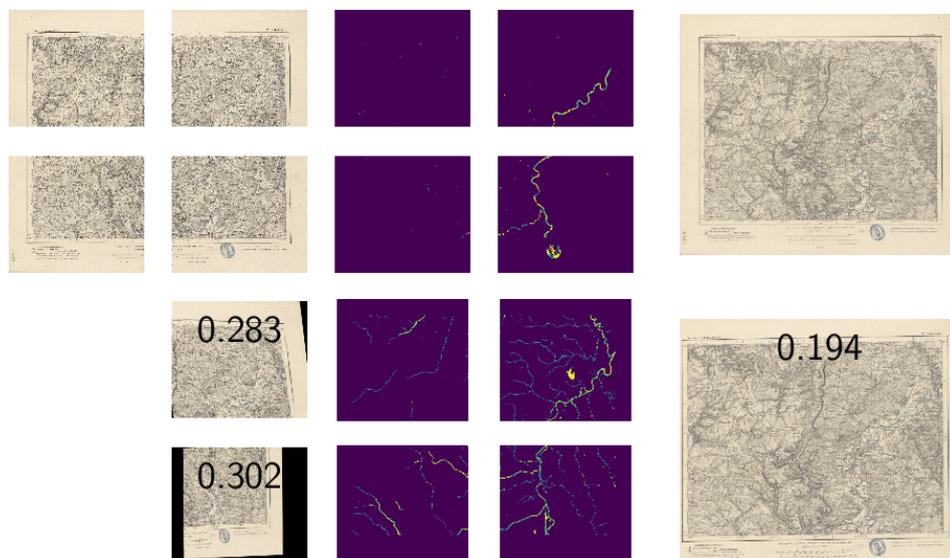


Abbildung 6.7: Negativbeispiel aus Stichprobe B: 553. Aufbau wie in Abb. 6.3, nur unten links fehlen die Quadranten, für den die Registrierung nicht konvergierte. Karte © Staatsbibliothek zu Berlin, Kartenabteilung

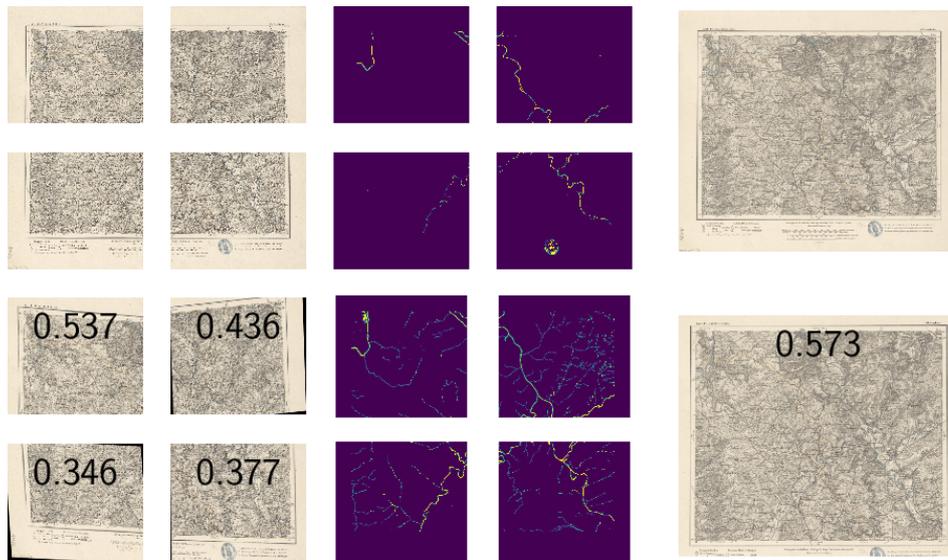


Abbildung 6.8: Positivbeispiel aus Stichprobe B: Blatt 554. Aufbau wie in Abb. 6.3. Karte © Staatsbibliothek zu Berlin, Kartenabteilung

6.2.1.7 Blatt 568

Blatt 568 entstammt der Stichprobe B und wurde mit 38 m Fehler sehr gut registriert (siehe Abb. 6.9). Es ist eine ähnliche Situation, wie in Blatt 554, nur mit etwas besser verteiltem Karteninhalt. Der Flussverlauf im oberen rechten Quadranten wurde durch Kanalisierung leicht verändert. Die Segmentierung ist insgesamt recht scharf. Auch hier zeigt sich, dass der ECC-Wert nicht immer mit der visuell wahrnehmbaren Verzerrung zusammenpasst und das Gesamtbild deutlich bessere Passung zeigt, als die einzelnen Quadranten für sich.

6.2.1.8 Blatt 569

Blatt 569 entstammt der Stichprobe B und wurde sehr schlecht registriert (siehe Abb. 6.10). Die Karte ist so stark verzerrt, dass nicht alle Karteneckpunkte zur Fehlerberechnung erkannt werden konnten, der errechnete Fehler von 10474 m ist also nicht korrekt. Die rechten Quadranten sind fast ohne segmentierten Inhalt, dadurch bringt schon der Archivstempel am unteren rechten Kartenrand Unsicherheit ein und sorgt für starke Verzerrung.

6.2.1.9 Zusammenfassung der qualitativen Analyse

Da der Fehlerausgleich über das gesamte Kartenbild zumeist besser funktioniert, als die Quadranten einzeln zu registrieren, stellt es sich als schwierig heraus, von den Quadranten auf das Gesamtbild zu schließen. Diese Analyse kann also nur als Indikation für wahrscheinliche Fehlerquellen dienen.

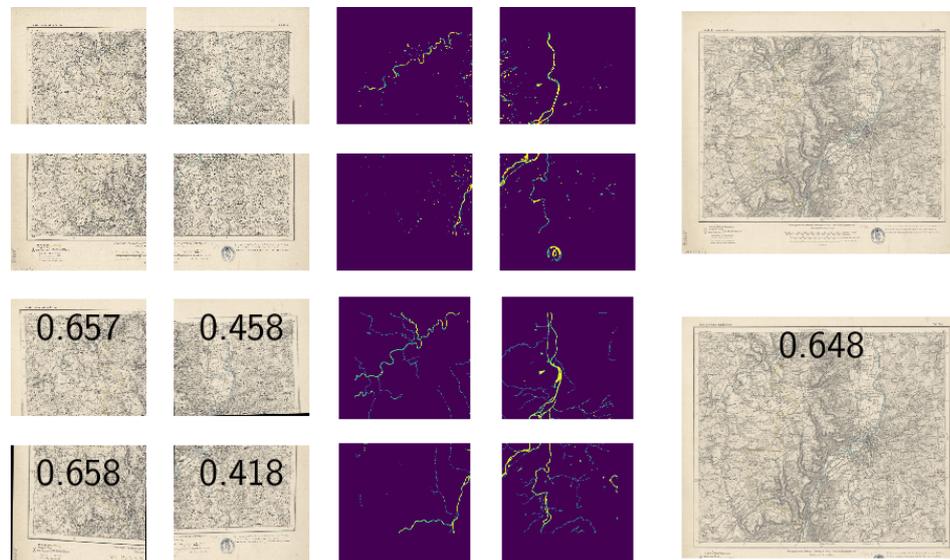


Abbildung 6.9: Positivbeispiel aus Stichprobe B: Blatt 568. Aufbau wie in Abb. 6.3. Karte © Staatsbibliothek zu Berlin, Kartenabteilung

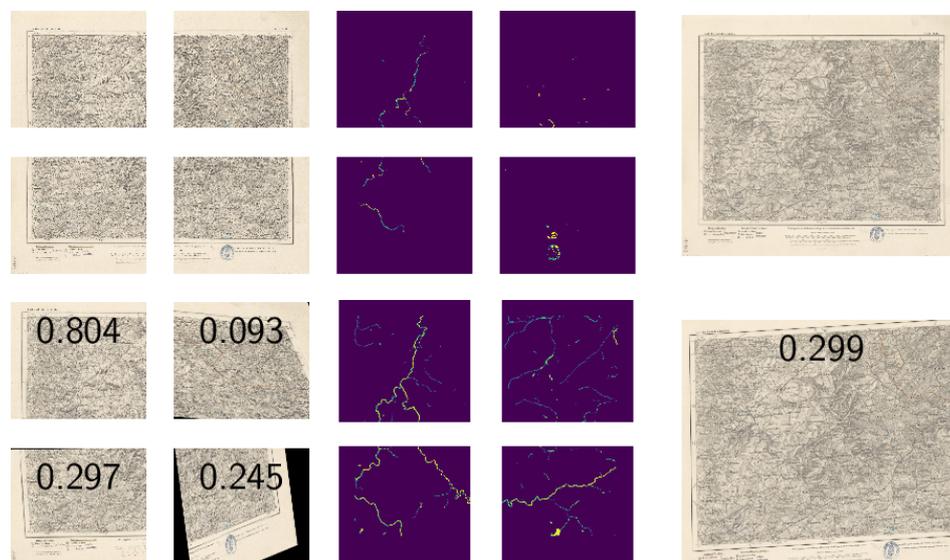


Abbildung 6.10: Stichproben für die qualitative Fehleranalyse. Negativbeispiel aus Stichprobe B: 569 Karte © Staatsbibliothek zu Berlin, Kartenabteilung

Zwar lassen sich Probleme mit vormals mäandrierenden, jetzt kanalisierten Flüssen feststellen, aber die Fehleranfälligkeit entspringt hier vermutlich eher der unzuverlässigen Segmentierung, als der historischen Veränderung zwischen Eingabe- und Referenzkarte.

Neben der Segmentierung scheint die größte Quelle für Fehler eine ungleichmäßige Verteilung der Signaturen zu sein. Insbesondere in den Bildbereichen, in denen wenige Flusssignaturen vorkommen, kann ein einzelner Störfaktor, wie die allgegenwärtigen Archivstempel, zu einer nicht konvergierenden Registrierung führen.

6.2.2 Dichte und Verteilung von Signaturen

Der Vergleich von verschiedenen Signaturen in Abschnitt 5.4.2 zeigt, dass eine gewisse Dichte an Signaturen notwendig für die erfolgreiche Georeferenzierung ist. So sind z. B. Bahnlinien im Abbildungsbereich von vielen Kartenblättern gar nicht vorhanden, weshalb diese Blätter auch nicht georeferenziert werden konnten. Gewässer hingegen sind in allen Bereichen der untersuchten Kartenwerke aufzufinden. Aber auch wenn die Phänomene in Referenzkarten abgebildet sind, haben sie eventuell keine entsprechende Abbildungen in den Eingabekarten. So werden etwa in der Auflage A der KDR100 nicht alle Flüsse blau koloriert. Stattdessen werden kleinere Flussläufe teilweise nur als schwarze Linien dargestellt und konnten deshalb nicht segmentiert werden. Dadurch fehlen dann oft auch die notwendigen Informationen für eine erfolgreiche Lokalisierung oder Registrierung.

Aber auch in anderen Karten können manche Signaturen der Generalisierung zum Opfer fallen – z. B. zeigt die DK50 Kanäle und Gräben, die in den höhermaßstäbigen Karten nicht abgebildet sind. Die Referenzkarten müssen also an die Generalisierung des jeweiligen Kartenwerks angepasst sein. Da das Tag-System von OpenStreetMap bei Flüssen leider keine genauen Abstufungen der Größe erlaubt, bleibt dennoch oft eine Diskrepanz der dargestellten Signaturen zwischen Eingabe- und Referenzbild.

Aber auch wenn die Signaturen in Eingabe- und Referenzbild zugeordnet werden können, spielt deren Verteilung im Bild eine wesentliche Rolle für die Qualität der Registrierung (dies deckt sich mit Georeferenzierungsarbeiten in der Literatur, etwa [Kreßner 2008, Cajthaml & Janata 2017]). Wenn Signaturen ungleichmäßig im Bild verteilt sind, können nur die Bildregionen mit Signaturen Informationen für die Registrierung liefern. So können teilweise große Fehler auftreten, da kleine Registrierungsfehler in der inhaltsreichen Region durch die Transformation in die übrigen Bildbereiche verstärkt werden. Die sechs schlecht registrierten Blätter des Experimentes unter Idealbedingungen (vgl. Abschnitt 5.4.1) in Abbildung 6.11 belegen diesen Effekt: fünf der sechs Blätter liegen an der Küste, wo teilweise nur eine Ecke Signaturen enthält, wodurch stark gescherte Transformationen gefunden werden. Gleichwohl kann es aber auch bei Blättern mit wenig Inhalt zu guten Lösungen kommen, wenn eine ausreichend gute initiale Transformation in das Registrierungsverfahren gegeben wird.

Dieselbe Problematik wird auch in der Fehlerverteilung der KDR100 sichtbar

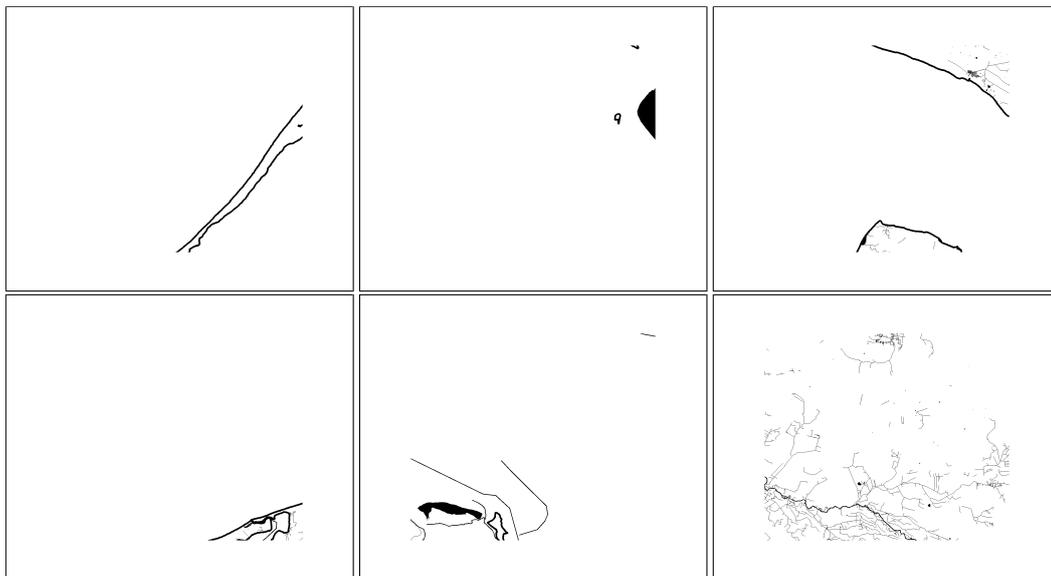


Abbildung 6.11: Die Blätter mit nicht konvergierter Registrierung unter Idealbedingungen. Alle bis auf das letzte bilden Küstenregionen ab und haben stark ungleichmäßig verteilte Signaturen. Invertiert zur besseren Lesbarkeit: Vordergrund in schwarz, Hintergrund in weiß. © OpenStreetMap contributors

(siehe Abb. 6.1 entlang der Ostseeküste). Eine quantitative Auswertung bestätigt, dass Küstenblätter schlechter georeferenziert werden als andere (vgl. Abb. 6.12). Auch hier ist die Ursache der zumeist spärliche und schlecht verteilte Karteninhalt.

6.2.3 Ungenaue Segmentierung

Ein weiterer Grund für uneinheitliche Ergebnisse ist die unterschiedliche Gestaltung der beiden Auflagen der KDR100. In den Karten der Auflage B sind insgesamt mehr segmentierbare Gewässer dargestellt als in den Karten der Auflage A – z. B. Moore, Gräben und das flächenhaft dargestellte Meer.

Andererseits sind in Auflage A nicht alle Flüsse koloriert. Bei manchen davon wurde die nachträgliche Koloration scheinbar unvollständig durchgeführt, andere Flüsse sind von vorneherein nur als einzelne schwarze Linie aufgeführt. Welche Eigenschaft eines Fluss die jeweilige Signatur bestimmt, ist aus der Literatur zum Kartenwerk jedoch nicht zu ermitteln. Diese Signaturen können also ohne bessere Segmentierung nicht für Passpunkte genutzt werden und zeigen entsprechend schlechte Übereinstimmung mit den Referenzdaten. Dies führt bei manchen Blättern der Auflage A zu der oben beschriebenen Problematik von fehlendem bzw. ungleichmäßig verteiltem Karteninhalt und mangelhafter Georeferenzierungsqualität.

Außerdem wurde die Küstenlinie in Blättern der Auflage A oft nur unzureichend segmentiert. Durch den blassen Farbverlauf ergibt sich oft nicht genug Kontrast für

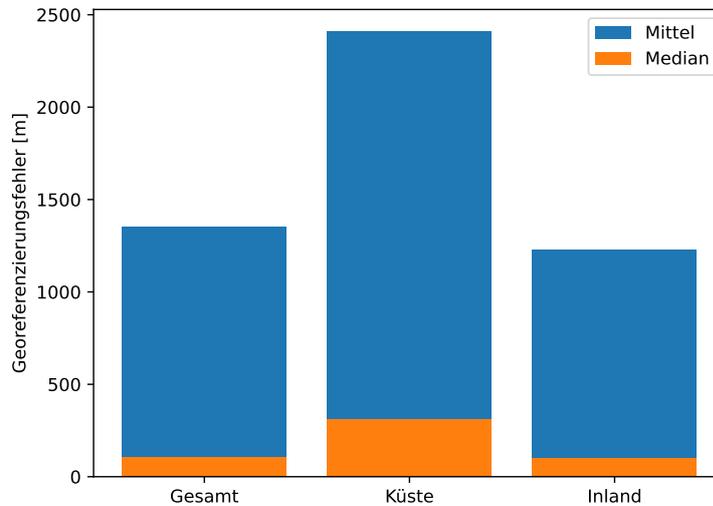


Abbildung 6.12: Vergleich der Georeferenzierungsfehler zwischen Blättern der KDR100 an der Küste oder im Inland. Blätter an der Küste haben oft nicht in allen Bildbereichen verwertbare Informationen und erreichen so regelmäßig nur geringere Genauigkeiten. 56 Blätter wurden als Küstenblätter eingestuft, 474 liegen im Inland.

eine durchgehende Küstenlinie in der Segmentierungsmaske, wodurch diese nicht zuverlässig der Referenzkarte zugeordnet werden konnte, was die Passung womöglich verbessert hätte. Die Auflage B hingegen hat insbesondere im Alpenvorland mäßige Druckqualität, was bei der dichten Überlagerung des Dreifarbindrucks zu verschwommenen Farben und unscharfen Signaturen führt.

Neben fehlenden Signaturen kann es auch vorkommen, dass die falschen Phänomene als Vordergrund segmentiert wurden. In der KDR100 Auflage A und der TÜDR200 sind administrative Grenzen farbig eingezeichnet, teilweise auch in blau. Diese werden gelegentlich falsch als Gewässer segmentiert. Dies führte dazu, dass z. B. Blatt 617 der KDR100 nicht lokalisiert werden konnte.

Mit der uneinheitlichen Gestaltung der Karten hängen zwei Fehlerquellen zusammen: erstens, die feinen Linien von kleinen Gräben und Feuchtgebieten werden oft nicht vollständig segmentiert und sorgen für eine verrauschte Segmentierungsmaske. Zweitens, der aus beiden Auflagen gemischte Datensatz wird mit einer gemeinsamen Referenzkarte verarbeitet, die eher auf Auflage B zugeschnitten ist. So können viele Signaturen der Referenzkarte in Blättern der Auflage A nicht wiedergefunden werden, was dort die Unsicherheit erhöht.

Die Referenzkarte wurde aber auf Auflage B zugeschnitten, statt auf Auflage A, weil damit die Genauigkeit für Blätter der Auflage A nur leicht sinkt, während die Genauigkeit für Blätter der Auflage B und damit die mittlere Genauigkeit über den gesamten Datensatz deutlich verbessert wurde. Abb. 6.13 zeigt, dass die Blätter der Auflage B dennoch eine leicht schlechtere Qualität aufweisen. Dieser Effekt auf die Registrierung ist aber recht klein und legt nahe, dass vor allem dominante

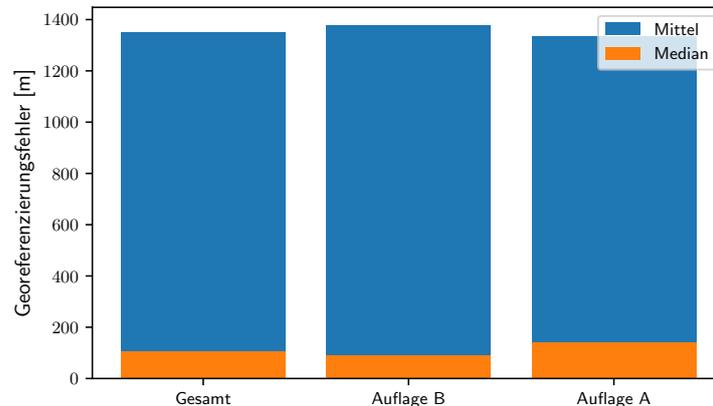


Abbildung 6.13: Vergleich der Georeferenzierungsfehler zwischen Blättern der Auflage A und Auflage B der KDR100. Bei Blätter der Blätter A können weniger Signaturen segmentiert werden, deren Informationen dann nicht für eine hochgenaue Registrierung zur Verfügung steht. 316 Blätter liegen in der Auflage A vor, 214 in der Auflage B.

Signaturen, wie große Flüsse, die entscheidenden Informationen für eine gute Georeferenzierung liefern.

Die Kartenwerke DK50 und TÜDR200 zeigen, dass auch ein schlechter Erhaltungszustand und minderwertige Digitalisierung für viel Rauschen und sehr uneinheitliche Farben sorgen kann. Wenn dann der gesamte Datensatz mit einheitlichem Farbschwellwert segmentiert wird, sind z. B. die besonders stark vergilbten Blätter fehlerhaft.

6.2.4 Transformationsklassen

Die KDR100 weist aufgrund der Verwendung der Preußischen Polyederprojektion leicht trapezförmige Blätter auf. Dadurch entsteht eine geringe Verzerrung der Eckpunkte, die sich mit affiner Transformation nicht vollständig ausgleichen lässt. Mindestens eine Ecke wird disloziert bleiben. Als Beispiel kann Blatt 299 aufgeführt werden: hier wurden drei Ecken nahezu perfekt registriert, nur eine schert mit 190 m aus, wodurch ein mittlerer Fehler von knapp 50 m verbleibt. Um die Trapezform auszugleichen, wäre stattdessen eine Perspektivtransformation notwendig. Die Auswertung in [Luft & Schiewe 2021a] zeigt, dass durch die flexiblere Transformation zwar die besten Genauigkeiten noch besser werden, aber bei der Perspektivtransformation aufgrund der höheren Freiheitsgrade mehr Blätter mit schlechter Registrierungsqualität auftreten.

6.2.5 Historische Veränderung

Die größten Unterschiede zwischen Eingabekarten und Referenzkarten aber sind gleichzeitig die, die konzeptionell am ehesten erwartet werden: Die Veränderung der

kartierten Umwelt vom Zeitpunkt der Aufnahme der Altkarte bis heute. Es ist eine explizite Anforderung an das entwickelte Verfahren, hiergegen robust zu sein.

Die Verwendung von Flusssignaturen erweist sich als vergleichsweise robust, da hier deutlich weniger Veränderungen zu erwarten sind, als bei menschengemachten Strukturen, wie etwa Straßen. Andererseits ist bemerkenswert, wie stark doch in den letzten 150 Jahren in die Natur eingegriffen wurde: viele stark mäandrierende Flüsse wurden in dieser Zeit begradigt, Moore und Feuchtgebiete mit Gräben trocken gelegt und Tagebergbau angefangen und wieder aufgegeben, was geflutete oder renaturierte Becken zurück lässt. Die Betrachtung des Experiments zur Verdeckung in Abschnitt 5.4.3.2 zeigt zwar, dass fehlende oder neu hinzugekommene Signaturen für die Lokalisierung im Prinzip kein wesentliches Problem darstellen. Bei der Registrierung der fehleranfälligen echten Karten wiederum führen die konfigrierenden Informationen zu schlechteren Ergebnissen. Ein wahrscheinlicher Grund dafür ist die Tendenz des ECC-Verfahrens, zu lokalen Minima zu konvergieren (siehe Abschnitt 4.7.1).

6.2.6 Ungenauigkeit im Originalmaterial

Um die Genauigkeit des hier vorgestellten Verfahrens einordnen zu können, muss die Genauigkeit des verarbeiteten Kartenmaterials kritisch betrachtet werden.

Obwohl die Blätter der KDR100 professionell archivarisches behandelt und digitalisiert wurden, hat sich bei einigen Blättern offenbar das Papier gewellt. Im Extremfall bei Blatt 648 war der Kartenrand um bis zu elf Pixel (fast ein Millimeter oder 100 m in der Natur) gekrümmt.

Bei einzelnen Blättern der Auflage B waren auch die mehrfarbigen Druckplatten um bis zu sechs Pixel (Blatt 71) diagonal zueinander verschoben. Dadurch passt der zur Georeferenzierung verwendete Karteninhalt nicht mehr mit dem Kartenrand zusammen, der zur Berechnung des Fehlers verwendet wurde.

Auch der Digitalisierungsprozess hat einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Abgrenzbarkeit der Signaturen. Dies ist einerseits bedingt durch verlaufende Farbe auf manchen Papieren und die in der Diskretisierung folgende Vermischung von Farbwerten mit den Nachbarpixeln. Dies verschiebt insbesondere mehrfarbige Signaturgrenzen regelmäßig um ein bis drei Pixel. Andererseits sorgt Anti-Aliasing in der Diskretisierung auch bei guter Scanauflösung dafür, dass der dünnstmögliche Strich auf dem Artefakt im Digitalbild mindestens drei Pixel breit erscheint.

Dies macht eine exakte Annotation der Karteneckpunkte für die Auswertung schwierig. Wenn die Kartenränder mehrere Pixel breit sind, welcher genau entspricht den angegebenen Koordinaten? Es gibt zwar Methoden, subpixelgenaue Linienschnittpunkte zu bestimmen. Das gäbe aber eine trügerische Genauigkeit, weil die Kartenränder wahrscheinlich nicht in dieser Präzision mit den angegebenen Koordinaten übereinstimmen.

Da auch Straßensignaturen unterschiedlich breit sind (teilweise parallele Doppellinien, die regelmäßig 3 px bis 12 px (oder 0,2 mm bis 1 mm) breit sind, was ca. 20 m bis 100 m in der Realität entsprechen würde), steht auch die tatsächliche Breite

der abgebildeten Flüsse in Frage. Somit sorgt die Generalisierung allein durch die Wahl einer linienhaften Signatur schon für räumliche Fehler. Der Effekt von Generalisierung ist (je nach Maßstab) teilweise noch deutlich stärker, wenn Geometrien vereinfacht wurden: z. B. werden in bergigem Gelände die Talflanken an die Straße oder den Fluss in der Sohle angeglichen. Wie stark sich diese Vereinfachungen auf die Lagegenauigkeit der Signaturen auswirken, lässt sich schwer einschätzen und ohne eine detaillierte Analyse des Kartenwerkes nicht allgemein beantworten.

Die Genauigkeit der Karte ist aber nicht nur durch technische Begebenheiten beim Kartieren und Digitalisieren der Signaturen begrenzt. Die Voraussetzung ist, dass die ursprüngliche Aufnahme und Vermessung korrekt war. Es stellt sich etwa die Frage, welche Punkte tatsächlich bei der Aufnahme eingemessen wurden und welche Signaturen, insbesondere in unwegsamem Gelände, „à vue“ gezeichnet wurden [Kreßner 2010]. Teilweise wurde sogar aus anderen Karten kopiert, oder einzelne Objekte nachgetragen, wodurch regelmäßig unbewusst Fehler übernommen wurden [Jenny & Hurni 2011]. Fehler in der topographischen Aufnahme sind ohne tiefgreifende Analyse schwer einzuschätzen (wie etwa bei [Kreßner 2009]), werden aber bei mittleren und kleinen Maßstäben wahrscheinlich vollständig vom stärkeren Einfluss der Generalisierung kaschiert. Signifikante Fehler sind aber nicht auszuschließen: So wird z. B. in der KDR100 eine Straßenkreuzung am Rand des Blattes 383 in einer früheren Auflage ca. 200 m weiter südlich auf dem Nachbarblatt 403 abgebildet.

Ungenauigkeiten, die durch die Kartenabbildung bedingt sind, wie z. B. die Klaffung am Kartenrand (ca. 0,01 mm oder 1 m in der Natur) oder die theoretische Wölbung in der Kartenmitte (maximal 0,16 mm in der Höhe), sind dagegen vernachlässigbar.

All diese Fehler können sich freilich auch gegenseitig teilweise ausgleichen, in welcher Abhängigkeit die Fehler stehen lässt sich aber nicht allgemeingültig sagen. Es ist quasi unmöglich, zuverlässige Ground Truth für die Lage und Identität aller Signaturen einer Karte zu bestimmen und so ist die vermeintliche Genauigkeit von topographischen Karten mit Vorsicht zu genießen.

Zusammengefasst kann angenommen werden, dass eine Position (d. h. ein spezifischer Pixel) selbst bei einer hypothetischen optimalen Georeferenzierung, im Regelfall 40 bis 250 von dem Ort abweicht, den er eigentlich darstellen sollte. Dies bezieht sich auf Karten im Maßstab 1 : 100 000 und ca. 400 ppi Scanauflösung. Bei einer großmaßstäbigeren Karte entspricht ein Pixel entsprechend einer kürzeren Strecke und auch die Effekte von Generalisierung sind weniger ausgeprägt. Bei Karten in diesem Maßstab ist also ein Georeferenzierungsfehler von ein- bis zweihundert Metern als akzeptabel zu betrachten.

6.3 Einordnung der Praxistauglichkeit

Die in der Einleitung aufgeführten Nutzeranforderungen waren:

- Die Ergebnisqualität muss ausreichend sein.
- Das Verfahren muss schneller und einfacher sein, als das bisherige manuelle.

- Das Verfahren soll auf ein möglichst breites Spektrum von Karten anwendbar sein.

6.3.1 Ergebnisqualität

In Abschnitt 1.2.2 werden zwei grundlegende Aufgaben mit unterschiedlichen Genauigkeitsansprüchen beschrieben:

- eine grobe Lokalisierung von Karten, z. B. für die Suche im WebGIS,
- genaue Georeferenzierung und Rektifizierung für subsequente räumliche Analysen.

Die Genauigkeit auch der schlechteren Registrierungen eignen sich auch ohne manuelle Korrektur gut genug für räumliche Suche und Visualisierung [Kowal & Pridal 2012]. Gegebenenfalls kann bei erfolgreicher Lokalisierung auch die mittels RANSAC gewonnene Transformation verworfen werden und direkt die Position der Referenzkarte übernommen werden. Damit wäre nur eine Ungenauigkeit in Größe des Kartenrandes der Eingabekarte zu akzeptieren.

Um zu bewerten, ob die erreichte Registrierungsgenauigkeit auch für die zweite, komplexere Aufgabe geeignet ist, sollte ein genauerer Blick auf die konventionelle manuelle Georeferenzierung geworfen werden. Klassischerweise würden die AnwenderInnen die Kartenblätter mit einem GIS georeferenzieren. Dabei würden sie Passpunkte an Gitterlinien setzen – oder wenn diese nicht vorhanden sind, auf geeignete Punktsignaturen – und dabei auf eine möglichst gute Verteilung von Passpunkten achten, bis die Restfehler minimal sind. Mit den Ergebnissen diesen manuellen Verfahrens muss sich die automatische Georeferenzierung messen lassen. Zum Vergleich wurden zehn Blätter der KDR100 manuell mithilfe von vier bis sieben auf Kirchen platzierten Passpunkten georeferenziert und affin transformiert. Es ergab sich ein Medianfehler der Georeferenzierung an den Karteneckpunkten von 110,6 m und einem mittleren Fehler von 150,3 m.

Eine ungleiche Verteilung von Passpunkten stellt auch die manuelle Georeferenzierung vor Herausforderungen: Blatt 25 an der Ostseeküste zeigt nur wenig Landmasse im unteren rechten Bildbereich mit wenigen zuverlässigen Punkten und konnte nur mit Fehlern an den oberen Eckpunkten von 650 m bzw. 560 m georeferenziert werden, was für das Blatt insgesamt einen Fehler von 332 m ergab.

Die Einordnung dieser Ergebnisqualität in bisherige Arbeiten zur manuellen Georeferenzierung von Altkarten gestaltet sich schwierig, da Karten mit stark unterschiedlichem Alter und Maßstab nicht direkt vergleichbar sind. Ferner werden oft nur die Restfehler der Ausgleichsrechnung als Maß der Genauigkeit angegeben (etwa bei [Kowal & Pridal 2012]). Diese sind aber nicht geeignet, Aussagen über die Qualität der Georeferenzierung zu machen – dafür müssten neue Kontrollpunkte genutzt werden, die nicht als Passpunkte in die Ausgleichsrechnung eingeflossen sind.

Eine Reihe von Arbeiten beschäftigte sich mit der *Josephinischen Landesaufnahme* im Maßstab 1:28 800 aus dem späten 18. Jahrhundert. Dort erreichte

[Podobnikar 2009] einen mittleren Fehler von 570 m, den [Molnár *et al.* 2014] auf einzelnen Blättern bis auf 100 m bis 200 m reduzieren konnten. Unter der Anforderung von nahtlosen Kartenrändern erreichten [Cajthaml & Janata 2017] immerhin noch einen mittleren Fehler von 304 m mit polynomialer Transformation, stellten aber große lokale Unterschiede in der Genauigkeit der Kartenwerke fest.

[Kreßner 2008] bezeichnete Blätter des *Schmettauschen Kartenwerks* im Maßstab 1 : 24 000 ebenfalls aus dem späten 18. Jahrhundert als „bestmöglich georeferenziert“ [Kreßner 2008, S. 133] mit mittlerem quadratischen Fehler von 8 m bis 55 m. Auch hier war es aber trotz komplexer elastische Transformationen mit vielen Passpunkten nicht möglich, alle Verzerrungen in der Karte auszugleichen.

Besser vergleichbar zu den in dieser Arbeit untersuchten Kartenwerken sind die von [Koldrack & Bill 2015] georeferenzierten Messtischblätter im Maßstab 1 : 25 000 aus den Jahren 1868 bis 1965. Hier erreichte ein „Crowdsourcing“-Ansatz Fehler von unter 100 m für 99 % der Blätter. Für Karten im Maßstab 1 : 100 000 würde ein viermal höherer Fehler die gleiche Lagegenauigkeit ergeben (vgl. Abschnitt 5.6).

Wenn Georeferenzierungen dieser Qualität für AnwenderInnen bisher geeignet waren, sind die in dieser Arbeit für die meisten Blätter erreichten Genauigkeiten konkurrenzfähig. Denn der Großteil der Blätter hat Fehler unter 96 m, was ca. 1 mm auf der Karte bzw. 100 m in der Natur entspricht.

Jedenfalls ist der Fehler der meisten Blätter so gering, dass die Verzerrungen für das Auge kaum zu sehen sind. Für Anwendungen, die höhere Genauigkeit erfordern, sind diese Karten ohnehin nicht geeignet (siehe Abschnitt 6.2.6). Ein Anspruch an geringere Fehlerwerte offenbart ein trügerisches Vertrauen in die Genauigkeit von Altkarten.

6.3.2 Verarbeitungsgeschwindigkeit

Auch ohne dass in der vorliegenden Implementierung besondere Laufzeitoptimierung durchgeführt wurde, stellt sich das Verfahren als schnell genug heraus, um in einer interaktiven Software bei EndnutzerInnen angewandt werden zu können. So ließe sich das Verfahren z. B. in ein GIS-Plugin integrieren und es ist nicht notwendig, Berechnungen etwa in die Cloud auszulagern – außer gegebenenfalls das einmalige Erstellen des Index.

Auch die Möglichkeit, gescheiterte Georeferenzierungen zu erkennen, ist von großem Vorteil, weil dadurch die manuelle Fehlerkorrektur auf ein Minimum reduziert wird.

Ein Problem für EndanwenderInnen kann der große Speicherbedarf von hochauflösten Kartendigitalisaten sein. Allein die Dekompression von Bildern mit mehr als 400 ppi kann einen Consumer-PC an technische Grenzen bringen. Sowohl das Experiment zu unterschiedlichen Bildauflösungen in Abschnitt 5.4.3.3, als auch die technisch bedingte Reduzierung der Bildgröße während der Verarbeitung zeigen aber, dass so die Verarbeitung ohne Qualitätsverlust vereinfacht werden kann. Die verbleibende hohe Bildgröße der Ein- und Ausgabebilder müssen für die Erhaltung der Bildqualität in Kauf genommen werden. Es lässt sich lediglich hoffen, dass moder-

ne verlustarme Bildkompressionsverfahren (wie z. B. JPEG2000) sich auch für die Digitalisate von Altkarten weiter durchsetzen.

6.3.3 Einfache Übertragbarkeit auf neue Kartenwerke

Für die Übertragung auf neue Kartenwerke wurden in den Experimenten in Abschnitt 5.6 die folgenden Schritte durchgeführt:

1. Vektordatei mit geographischen Koordinaten der Blätter aus dem Blattschnitt erstellen
2. Kartenabbildung und Bezugsellipsoid des Kartenwerkes recherchieren oder durch ein ähnliches Bezugssystem annähern
3. Segmentierungsparameter an die Kartenbilder anpassen
4. Referenzdaten entsprechend der segmentierten Signaturen filtern
5. Index aufbauen

Diese Schritte müssen bei jedem neuen Kartenwerk durchgeführt werden. Wenn bekannt ist, dass der Blattschnitt identisch mit einem bisherigen ist (wie hier bei DK50 und KDR100), bleiben nur Schritte 2 und 3.

Für die hier durchgeführten Experimente wurden die geographischen Koordinaten der Referenzbilder anhand der überlieferten Übersichtsblätter ermittelt. Dies hat auch ermöglicht, die einzelnen unregelmäßigen Blätter optimal abbilden zu können. Wenn kein Übersichtsblatt mit Blattschnitt vorhanden ist, muss die Gradeinteilung aus den Kartenrändern abgeleitet werden und kann großzügig in regelmäßigem Abstand automatisch erstellt werden. Die Experimente zur DK50 haben gezeigt, dass auch ein großer Index mit deutlich mehr Referenzbildern keine zusätzliche Unsicherheit ins Verfahren einbringt, auch wenn tatsächlich nur wenige Blätter georeferenziert werden.

6.4 Vergleich der Ergebnisse mit der Literatur

Hier sollen die Ergebnisse der Auswertung in die Literatur eingeordnet und mit bestehenden Ansätzen verglichen werden. Diese unterscheiden sich sehr stark in der Herangehensweise, den verarbeiteten Daten und der Art, wie Ergebnisse aufbereitet werden (siehe Abschnitt 2.2). Beim Vergleich der Ergebnisse ist also Vorsicht geboten und es muss auf die Details der verwendeten Karten und Qualitätsmetriken geachtet werden.

Die folgenden Faktoren gehen in den Vergleich der bestehenden Arbeiten ein:

- Die Beschaffenheit des untersuchten Datensatzes, insb. Maßstab, Anzahl der untersuchten Karten und den vermuteten Einfluss von Stördaten.

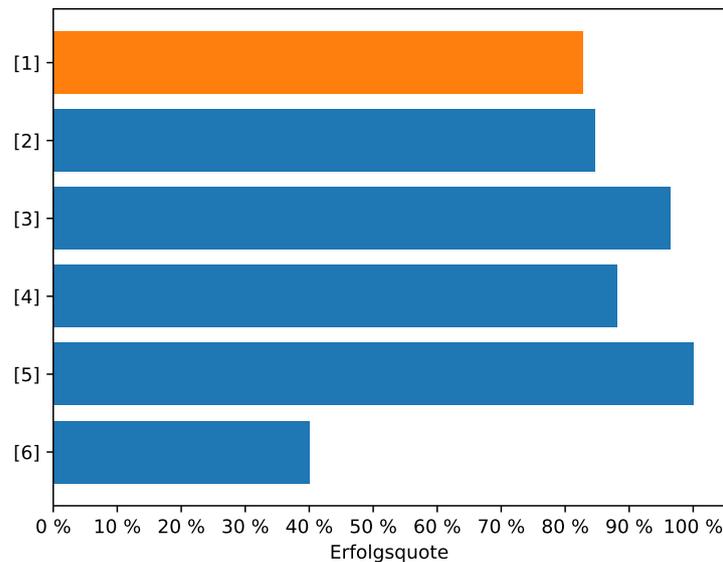


Abbildung 6.14: Vergleich der Trefferquote (erfolgreiche Georeferenzierungen) der Gesamtmenge der Altkarten der vorliegenden Arbeit [1] mit dem realen Kartensatz von [Bahgat & Runfola 2021] [2], [Luft & Schiewe 2021a] [3], [Burt *et al.* 2019] [4], [Howe *et al.* 2019] [5] und [Heitzler *et al.* 2018] [6].

- Die Erfolgsquote der Georeferenzierung, d. h. für wie viele Karten des Datensatzes konnte ein Ergebnis gefunden werden.
- Die Georeferenzierungsgenauigkeit, d. h. welcher Fehler durch resultierende Verzerrung oder suboptimale Registrierung entsteht.
- Eine Einschätzung, wie gut das Verfahren auf Karten mit anderen Eigenschaften übertragbar wäre.

Abbildung 6.14 zeigt die Erfolgsquote für alle Studien im Überblick. Die Erfolgsquote ist für alle Datensätze pro Studie summiert, um die Leistung des jeweiligen Verfahrens in Gänze zu betrachten. Es mag durchaus sein, dass manche Verfahren besser für einen bestimmten Maßstab geeignet sind als für einen anderen. Um in der Zukunft ein generelles Verfahren für eine Vielfalt von verschiedenen Karten zu finden, ist das aber abträglich.

Jede Arbeit nutzt Karten andere Maßstäbe, teilweise sogar stark unterschiedliche innerhalb des Datensatzes. Dadurch ergeben sich teils stark unterschiedliche metrische Fehler (ein Fehler von 1000 m ist viel für eine Karte im Maßstab 1 : 10 000, aber ausgesprochen gut im Maßstab 1 : 1 000 000). Für eine bessere Vergleichbarkeit wird die Registrierungsgenauigkeit deshalb hier in Pixel angegeben. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit wurden bisher immer in Metern angegeben und demnach für den Vergleich entsprechend der Scanauflösung und des Kartenmaßstabs umgerechnet. Daher können die Werte durch Skalierungseffekte etwas ungenau werden.

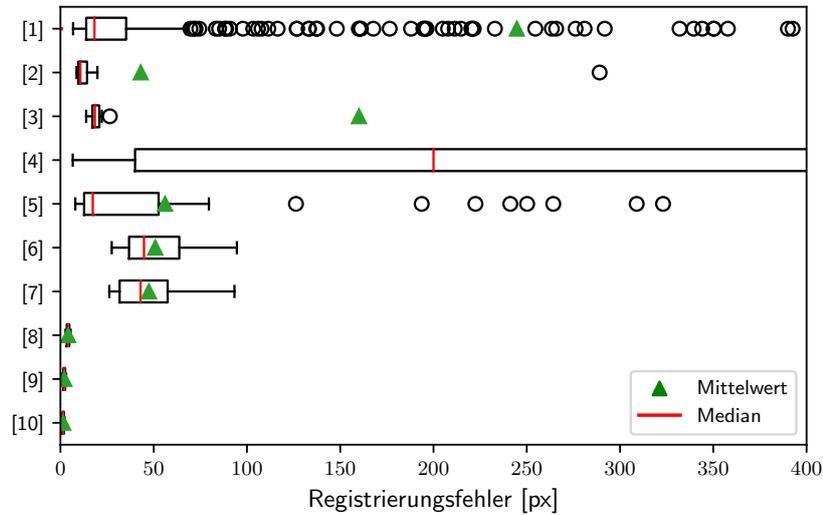


Abbildung 6.15: Vergleich der erreichten Registrierungsgenauigkeiten der Kartenwerke KDR100 [1], DK50 [2] und TÜDR200 [3] der vorliegenden Arbeit mit synthetischen Karten bei [Bahgat & Runfola 2021] mit 2000 px Bildauflösung [4], [Luft & Schiewe 2021a] [5], [Howe *et al.* 2019] mit Affintransformation [6] oder TPS [7] und [Burt *et al.* 2019] im Maßstab 1 : 250 000 [8], 1 : 50 000 [9] und 1 : 24 000 [10].

In der vorliegenden Arbeit werden nur die vier Karteneckpunkte genutzt, um einen mittleren Fehler pro Kartenblatt anzugeben (MAE, vgl. Abschnitt 5.3.2). Manche andere Arbeiten nutzen mehr Kontrollpunkte und den *root mean squared error* (RMSE). Dadurch werden deren Ergebnisse etwas stabiler und einzelne lokale Deformationen fallen nicht so stark ins Gewicht.

Trotzdem gibt es bei der Registrierungsgenauigkeit immer noch starke Unterschiede je Maßstab, deshalb sind in Abbildung 6.15 die verschiedenen Datensätze nebeneinander gestellt. Lediglich [Howe *et al.* 2019] geben nur einen gemeinsamen Datensatz von stark heterogenen Maßstäben an (s. u.).

6.4.1 Vorhergehende Arbeiten

In den Vergleich gehen die bisherigen Arbeiten zur automatischen Georeferenzierung ein, die in Abschnitt 2.2 vorgestellt wurden. Dabei wurden nur die Arbeiten berücksichtigt, die Angaben zur Erfolgsquote der Georeferenzierung und zur Lagegenauigkeit oder Registrierungsgenauigkeit der Ausgabebilder machen.

[Heitzler *et al.* 2018] präsentieren eine Methode zur Georeferenzierung der Siegfriedkarte anhand der Gitterlinien und Randbeschriftung. Es wurden leider nur 20 Kartenblätter ausgewertet, obwohl das Kartenwerk aus 462 Blättern in identischem 1 : 25 000 Maßstab und Gestaltung besteht (plus 142 Blättern im Maßstab 1 : 50 000). Es drängt sich also die Frage auf, wie diese Auswahl zustande kam und ob die Ergebnisse auf den Rest des Kartenwerks übertragbar sind. Von den 20 Karten konnten 18

erfolgreich georeferenziert werden. Leider geben die Autoren keine Genauigkeitswerte an, aber durch die Verwendung von Gitterlinienkreuzungspunkten als Passpunkte ist bei einem großen Maßstab mit sehr geringen Fehlern zu rechnen.

[Howe *et al.* 2019] verarbeiten 20 Karten aus Atlanten mit sehr unterschiedlichen Maßstäben von 1:443 529 bis 1:7 500 000. Diese sind überwiegend politische und geologische Karten aus den Jahren 1866–1927 mit geringen Stördaten.

Sie geben für einige Karten erstaunlicherweise auch dann hohe Fehler an, wenn die Passpunkte nicht algorithmisch gefunden wurden, sondern von Hand. Diese Fehler sind teilweise sogar noch höher als die Ergebnisse des automatisierten Verfahrens. Das legt den Schluss nahe, dass die gewählten Transformationsmodelle nicht geeignet sind, die in den Karten vorherrschenden Deformationen und Ungenauigkeiten auszugleichen.

Ob sich die Erkennung von Toponymen gut auf andere und vor allem ältere Karten übertragen lässt, ist unklar. Die Texterkennung ist an sich schon recht fehleranfällig, so dass sich die Frage stellt, ob Veränderungen von Toponymen ausreichend robust erkannt werden können (in Europa noch wahrscheinlicher, als in den USA, da viele Regionen in der Geschichte Herrschaft und Sprache verändert haben).

[Burt *et al.* 2019] erreichen mit ihrer Gitterlinien-basierten Methode vor manueller Intervention eine Erfolgsquote von 88 %. Die 12 Fehlschläge waren auf eine Überlagerung des Kartennetzes mit einem komplementären UTM-Gitter zurückzuführen. Insgesamt verarbeiteten sie 101 Karten im Maßstab 1:24 000, 1:50 000 oder 1:250 000, vermutlich aus dem späten 19. und 20. Jahrhundert. Ihr Verfahren ist im Prinzip für alle Karten verwendbar, die eine ausreichende Anzahl von Gitterlinien abbilden, deren Kreuzungspunkte gut vom darunterliegenden Inhalt zu trennen sind. Dies ist für alle modernen topographischen Karten der Fall, aber für Karten vor dem 19. Jahrhundert nicht üblich. Ferner obliegt hier den NutzerInnen, Wissen über die grobe Kartenausdehnung und die Kartenabbildung einzubringen, was bei kleinmaßstäbigen Karten vielleicht noch gut funktioniert, bei größeren Maßstäben aber entweder ausführliche Metadaten oder Expertenwissen erfordert.

[Luft & Schiewe 2021a] war eine Vorarbeit zu den hier präsentierten Ergebnissen mit einfacherem Verfahren basierend auf *pixel patches* (d. h. Bildausschnitte) als Merkmalsdeskriptoren, welche sich als empfindlicher auf Änderungen der Bildauflösung und andere Störfaktoren herausstellten, als die in der vorliegenden Arbeit verwendeten KAZE-Deskriptoren. Auch dort wurde das Kartenwerk KDR100 verarbeitet, allerdings mit einer kleineren Auswahl von 55 Kartenblättern, die der damaligen Verfügbarkeit geschuldet. In dieser Auswahl waren aber kaum „schwierige“ Blätter an den Küsten enthalten, was sich positiv auf die durchschnittliche Ergebnisqualität auswirkt.

[Bahgat & Runfola 2021] sind die ersten, die (ähnlich wie in der vorliegenden Untersuchung) eine große Menge synthetischer und echter Karten nutzen, um ihre Toponym-basierte Georeferenzierungsmethode systematisch nach Fehlerquellen zu analysieren. Die 7 580 synthetischen Karten sind kleinmaßstäbig und erproben u. a. den Einfluss von Bildauflösung, ungenauer Toponymplatzierung und die notwendige Anzahl von Toponymen. Die 333 realen Karten sind kleinmaßstäbig, relativ jung und

überwiegend Übersichtskarten digitaler Herstellung mit wenig Stördaten.

Ihre Methode findet bei 92,2 % der synthetischen Karten eine Lösung, aber nur bei 84,7 % der besten realen Karten. Die Erfolgsquote fällt aber bei niedriger Bildauflösung auf 60 % ab. Die Georeferenzierungsgenauigkeit wird nur in Prozent der Kartenausdehnung der synthetischen Karten angegeben und ist bei 19,8 % der 3512 besten Karten sehr gut, d. h. geringer als 1 % der Kartenausdehnung (was in der KDR100 etwas weniger als 400 m Fehler entspräche) und bei weiteren 20,2 % noch akzeptabel (5 % der Kartenausdehnung). Die realen Karten haben vermutlich vergleichbare Genauigkeit, es wurden zumindest ähnliche Residuen gemessen.

Wie gut die Methode auf Altkarten mit dem einhergehenden schlechteren Erhaltungszustand und herausfordernder Texterkennung übertragbar ist, ist nicht zu beurteilen.

6.4.2 Vergleich

Fast alle Verfahren liefern eine Erfolgsquote von über 80%, lediglich das Verfahren von [Heitzler *et al.* 2018] scheint wenig robust. Die verbleibenden Unterschiede oberhalb der 80 % sind wohl stark abhängig von der Auswahl der Karten und der genauen Parameteranpassung (und ggf. Überanpassung) des jeweiligen Verfahrens an die untersuchten Datensätze. Während [Luft & Schiewe 2021a] noch eine nahezu perfekte Erfolgsquote zeigt, wird bei der vorliegenden Arbeit klar, dass mit ungefilterten Daten ohne besondere Behandlung der schwierigsten Fälle (wie Blättern an der Küste) wahrscheinlich eine gewisse Fehlerquote in Kauf genommen werden muss.

Wenn man den Median in Abbildung 6.15 vergleicht, wird ersichtlich, dass das hier vorgestellte Verfahren für den Großteil der Kartenblätter eine bessere Genauigkeit erreicht (10,7 px bis 18,5 px) als das von [Howe *et al.* 2019], dem besten anderen karteninhaltsbasierten Verfahren (42,9 px bis 44,8 px). Die Mittelwerte der Genauigkeit hingegen sind etwa gleich. Für diese Diskrepanz zwischen Median und Mittelwert sind die vielen Ausreißer verantwortlich, die bei vielen anderen Arbeiten unerwartet selten berichtet werden. Mit der Genauigkeit von Gitterlinien-basierten Verfahren können inhaltsbasierte Verfahren nicht mithalten.

Grundsätzlich eignen sich die unterschiedlichen Verfahren für sehr unterschiedliche Arten von Karten. Toponymerkennung etwa wird bei großmaßstäbigen Karten mit vielen Stördaten und mit mehr Ambiguitäten konfrontiert sein und deshalb weniger gut anzuwenden sein (vgl. [Luft 2020]), was auch von [Bahgat & Runfola 2021] empirisch bestätigt wurde.

Andererseits lässt sich die hier verwendete Segmentierung von Gewässersignaturen gar nicht auf den Datensatz von [Howe *et al.* 2019] anwenden, da derartige Signaturen auf diesen Karten gar nicht eingezeichnet sind. Unser Verfahren ließe sich aber sicherlich auf die Datensätze von [Heitzler *et al.* 2018] und wahrscheinlich teilweise auf die von [Burt *et al.* 2019] anwenden.

Die hier verwendeten Kartenreihen der Preußischen Landesaufnahme haben den Vorteil, dass sie viele Blätter mit einheitlicher Gestaltung enthalten. Dadurch können

nach entsprechender Parametrisierung auch einfacher einheitlich gute Ergebnisse erzielt werden. [Howe *et al.* 2019] scheinen die untersuchten Karten zumindest so ausgewählt zu haben, dass sie augenscheinlich ähnlich aussehen und vergleichbare Schwierigkeit aufweisen.

Grundsätzlich stellt die Auswahl der zu verarbeitenden Karten eine Menge impliziter Annahmen dar und macht aufgrund der Heterogenität von denkbaren Karten einen großen Unterschied für die Ergebnisqualität. Unsere Experimente sind die einzigen, in denen ein komplettes Kartenwerk (bzw. alle davon erhaltenen Blätter) georeferenziert werden. Bei allen anderen wird immer eine Auswahl an Karten genommen, die zwar unterschiedliche Gestaltung und Maßstab haben können, aber bewusst oder unbewusst keine schwierigen Fälle enthalten.

Wie man am Vergleich zwischen der vorliegenden Arbeit und [Luft & Schiewe 2021a] sieht, werden die Ergebnisse wesentlich schlechter, wenn man auch die schwierigen Blätter desselben Kartenwerks mit betrachtet. Dementsprechend muss sich auch bei den anderen Arbeiten in der Literatur die Frage stellen, wie die Datensätze ausgewählt werden und ob die Ergebnisse bei einer repräsentativeren Auswahl von Karten nicht schlechter ausfielen.

Ohne eine systematische Typologisierung der Schwierigkeit der digitalen Verarbeitung von Karten ist eine solche Auswahl aber immer subjektiv und kann kaum verglichen werden.

Je kleiner der verarbeitete Datensatz, desto mehr muss man sich fragen, ob das Verfahren auf diesen bewusst oder unbewusst besonders zugeschnitten ist oder ob das Verfahren auch ohne größere Veränderungen auf anderen Karten funktionieren würde. Das hängt auch damit zusammen, dass je komplexer ein Verfahren ist, auch mehr Parametrisierungsaufwand vonnöten ist, um es auf einen neuen Datensatz anzupassen. Dabei werden von den NutzerInnen viele implizite Annahmen getroffen, die möglicherweise einen entscheidenden Effekt auf die Ergebnisqualität haben. Ausführliche Sensitivitätsanalysen sind aber zu diesem Zeitpunkt noch wenig zielführend, bevor eindeutig belegt wurde, welche Methoden am besten geeignet sind und auch erste Anstrengungen getan wurden, die Verfahren für NutzerInnen zugänglich und verständlich zu machen.

Für einen Vergleich der diversen Ansätzen zur Georeferenzierung ist es eigentlich zu früh. Wie sich in Kapitel 2 gezeigt hat, sind die wenigen bestehenden Methoden auf unterschiedliches Kartenmaterial spezialisiert. Um mehrere verschiedenartige Verfahren vergleichbar zu machen, bräuchte es einheitliche Benchmark-Datensätze. Es wurde aber noch kein Versuch unternommen, solche für das Problem der Georeferenzierung zu erstellen, was eine schier unlösbare Aufgabe ist, da das Angebot an Karten äußerst heterogen ist. Lediglich im Jahr 2021 wurde erstmals ein Anlauf unternommen, Verfahren zur Verarbeitung in einem Wettbewerb vergleichbar zu machen. Leider war die für die Georeferenzierung relevante Aufgabe dort eingeschränkt auf die Erkennung des Kartenrandes [Chazalon *et al.* 2021].

Zusammenfassung & Ausblick

Inhaltsverzeichnis

7.1	Fazit	119
7.2	Relevanz	121
7.3	Ausblick	121
7.3.1	Anwendung auf andere Karten(werke)	122
7.3.1.1	Anwendung auf ältere Karten	124
7.3.1.2	Transformationen und Verzerrungen	124
7.3.1.3	Bessere Referenzdaten	125
7.3.1.4	Unabhängigkeit vom Blattschnitt	126
7.3.2	Verbesserung der Lokalisierung	126
7.3.2.1	Merkmale	126
7.3.2.2	Geographischer Kontext	127
7.3.2.3	Verwendung anderer Signaturen	128
7.3.3	Verbesserung der Registrierung	128
7.3.4	Verbesserung der Segmentierung	130
7.3.5	Implementierung in einer Anwendungssoftware	130
7.3.6	Implikationen außerhalb von Altkarten	131

7.1 Fazit

In dieser Arbeit wurde demonstriert, dass Altkarten anhand ihres Inhaltes georeferenziert werden können. Insbesondere wurde am Beispiel von Gewässersignaturen gezeigt, dass deren Geometrie eindeutig und zuverlässig zum Herstellen von Korrespondenzen zu Referenzkarten verwendet werden kann.

Dazu wurde prototypisch ein CBIR-basiertes Verfahren für die effiziente Zuordnung implementiert. Die Anwendbarkeit des Verfahrens wurde mit der Georeferenzierung von drei topographischen Kartenwerken unter Beweis gestellt. Zwar waren die Kartenwerke in ihrer Gestaltung recht ähnlich, um die Ergebnisse nicht zu sehr durch problematische Segmentierungen zu beeinflussen. Aber es wurde mit der *Karte des Deutschen Reiches 1:100 000* erstmals ein großes Kartenwerk komplett georeferenziert, ohne eine Vorauswahl der Karten zu treffen. So war sichergestellt, dass

genau so viele schwierige Karten in den Datensätzen auftraten, wie sie auch in der Praxis zu erwarten wären.

Im Zuge dessen wurden auch die Forschungsfragen aus Abschnitt 1.3 beantwortet:

- Kartenbilder können mit den Bildverarbeitungsmethoden aus Image Retrieval und Registrierung georeferenziert werden. Eine Voraussetzung für die eindeutige Repräsentation des Karteninhalts mit Bildmerkmalen ist aber eine vorhergehende Segmentierung, um Stördaten auszuschalten.
- Geographische Daten lassen sich problemlos in der Bildebene verarbeiten, wenn die Kartenabbildungen vereinheitlicht werden und die Maßstäbe (und damit die Generalisierung) nicht zu unterschiedlich sind.
- Gewässersignaturen sind für die Lokalisierung nach über einem Jahrhundert potenzieller Veränderung und in verschiedenen Maßstäben für die Lokalisierung von Karten geeignet. Genauso sind aber auch andere Signaturen denkbar (siehe dazu Abschnitt 7.3.2.3).
- Die Lagegenauigkeit ist für die meisten Karten gut und zumindest konkurrenzfähig zu bestehenden Georeferenzierungsverfahren, auch mit der manuellen Georeferenzierung. Ob somit den Anforderungen der Anwender gerecht wird, konnte in dieser Arbeit nicht untersucht werden. Die Weitergabe der hier georeferenzierten Karten zurück an die SBB und an weitere Forschungsprojekte steht aber an und wird hoffentlich bald Erkenntnisse für die Praxistauglichkeit liefern.
- Das hier entwickelte automatische Verfahren stellt eine deutliche Zeitersparnis gegenüber der konventionellen manuellen Georeferenzierung dar (siehe dazu Abschnitt 7.2).

Da Signaturgeometrien bisher noch nie alleine zur Georeferenzierung genutzt wurden, wurde ferner eine systematische Untersuchung von synthetischen Daten und eine Analyse der Fehlerfälle durchgeführt. Damit sollte ein besseres Verständnis der dabei zu bewältigenden Herausforderungen erreicht werden und so eine Grundlage für die weitere Erforschung des vorgeschlagenen Ansatzes geliefert werden.

Es wurden drei Herausforderungen ausgemacht, die den Erfolg der Methode maßgeblich bestimmen:

- der Erhaltungszustand der Artefakte,
- die Qualität der Segmentierung,
- die Verteilung der Signaturen im Kartenblatt.

Diese Herausforderungen sind aber vor allem durch die Quellen bestimmt und keine grundsätzliche Limitation der vorgeschlagenen Methode. Die vorgeschlagene Methode verspricht weitreichend anwendbar zu sein, wenn

- die Eingabekarten grundsätzlich geeignete Signaturen darstellen,
- die Vorverarbeitung, insbesondere die Segmentierung, ausreichend gut ist,
- die Methode etwas erweitert wird, um hier getroffene Annahmen und Vereinfachungen zu reduzieren,
- die Methode etwas robuster gestaltet wird.

In Abschnitt 7.3 werden mögliche Schritte vorgeschlagen, wie diese offenen Aufgaben in zukünftiger Forschung angegangen werden könnten.

7.2 Relevanz

Das vorgeschlagene Verfahren ist gut geeignet, um Kartendigitalisate ohne großen manuellen Aufwand zu georeferenzieren. Dabei richtet sich die Anwendung in erster Linie an Archive oder an AnwenderInnen, die eine größere Menge an Karten verarbeiten wollen. Durch den initialen Anpassungsaufwand für die Vorbereitung des Blattschnittes, die Parametrisierung der Segmentierung und den Indexaufbau ist das vorgeschlagene Verfahren vor allem für die Verarbeitung von dutzenden bis hunderten Karten gleichzeitig nützlich. Nun lässt sich argumentieren, dass die Archive ohnehin Metadaten (wie die Bezeichnung des jeweiligen Kartenblattes) der Altkarten bereithalten, die in Verbindung mit einem bekannten Blattschnitt einen viel einfacheren automatischen Georeferenzierungsprozess erlauben würden. Dennoch kann das vorgeschlagene Verfahren einen Mehrwert bieten, insbesondere da es ohne weitere Anpassungen auf verschiedenste Karten anwendbar ist und auch unterschiedlich geartete Kartenränder ausgleichen kann. Da es vollautomatisch und wenig ressourcenintensiv ist, sollte es gut in bestehende Prozesse integriert werden können. Hierfür wäre nur eine Entwicklung einer entsprechenden Benutzerschnittstelle notwendig (siehe Abschnitt 7.3.5).

In der vorliegenden Arbeit wurden Kartenwerke des ausgehenden 19. Jahrhunderts untersucht. Inwieweit die Methode auch auf ältere Karten übertragen werden kann, wäre zu untersuchen (siehe Abschnitt 7.3.1.1). Vermutlich sind auch einige Karten des 18. Jahrhunderts möglich, da diese ausreichend genau sind. Hier steht aber vermutlich die Segmentierbarkeit der zumeist handgezeichneten Karten im Wege. Vor dieser Zeit gab es kaum Kartenwerke im engeren Sinne, eher Einzelkarten. Für Einzelkarten außerhalb eines bekannten Blattschnitts, insbesondere auch ältere und solche mit starker Verzerrung, ist die Methode in der vorliegenden Form nicht geeignet.

7.3 Ausblick

In der vorliegenden Arbeit sollte vor allem gezeigt werden, dass Signaturen grundsätzlich ausreichend deskriptiv sind, um mit ihnen Karten präzise zu georeferenzieren.

Das vorgeschlagene Verfahren und vor allem die konkrete Implementation stellen aber nur ein „Proof of Concept“ dar. Es gilt zuerst, die Verfahrensparameter weiter zu optimieren, die in dieser Arbeit nur cursorisch geprüft und behandelt wurden. Dabei müssen aber möglichst diverse Eingabekarten betrachtet werden, um die Überanpassung des Verfahrens zu verhindern. Auch sollten einige Parameter dynamisch und automatisch an die Eingabedaten angepasst werden, um den Parametrisierungsaufwand gering zu halten. Beispiele dafür wären etwa, die Filtergröße bei der Segmentierung an die Bildauflösung anzupassen oder intelligentere Abbruchkriterien der Registrierung zu nutzen.

Um sehr gute Ergebnisse zu erreichen, muss vor allem die Segmentierung von Altkarten verbessert werden (siehe Abschnitt 7.3.4). Aber auch die Qualität und Vollständigkeit der Referenzdaten ist entscheidend (siehe Abschnitt 7.3.1.3. Ein weiteres wichtiges Thema für die Entwicklung von besseren Methoden, ist die systematische Bewertung von „Schwierigkeit“ der verarbeiteten Daten (d. h. was sind die Eigenschaften, die eine automatische Verarbeitung möglich und genau machen; siehe Abschnitt 7.3.1). All diese Bereiche sind für sich schon komplexe und lebendige Forschungsbereiche. In den folgenden Abschnitten sollen erste Schritte gezeigt werden, wie diese Perspektiven die automatische Georeferenzierung von Altkarten bereichern können.

7.3.1 Anwendung auf andere Karten(werke)

In der vorliegenden Arbeit wurden nur drei recht ähnliche Kartenwerken untersucht, da viele andere Karten sehr viel schwieriger zu segmentieren sind. Es drängt sich natürlich die Frage auf, für welche anderen Karten(-werke) das vorgestellte Verfahren anwendbar ist. Eigene vorhergehende Experimente haben gezeigt [Luft & Schiewe 2021b], dass auch die Untersuchung anderer Kartenwerke vielversprechend ist. Z. B. konnten einige Blätter der *Topographischen Karte 1:25 000 (TK25)* erfolgreich georeferenziert werden. Auch die Blätter der *Karte des Deutschen Reiches 1:500 000*, die ausreichend segmentierbare Flüsse und Küstenlinien enthalten, konnten trotz der unüblichen Kartenabbildung georeferenziert werden.

Die Verarbeitung von topographischen Altkarten aus dem amerikanischen Raum, etwa die USGS100, gestaltete sich aber als schwieriger. Die vielen verschiedenen Auflagen mit stark unterschiedlicher Farbgebung machten die Segmentierung problematisch. Auch passten vielerorts die OSM-Referenzdaten nicht gut zum dargestellten Karteninhalt: so waren etwa manche Fließgewässer in Wüstengebieten nicht in den Referenzdaten eingezeichnet. Das Fehlen der Gewässer liegt womöglich daran, dass diese inzwischen ausgetrocknet sind oder OSM in abgelegenen Gebieten unvollständig ist. Hier wäre zu untersuchen, ob sich diese Probleme durch die Wahl anderer Referenzdaten (z. B. das National Hydrography Dataset¹) oder gleich ganz anderer Signaturklassen, vermeiden lassen.

An diesen Experimenten zeigt sich, dass Altkarten sehr heterogen sind und entsprechend unterschiedliche Anforderungen an ein Georeferenzierungsverfahren stel-

¹<https://www.usgs.gov/national-hydrography/national-hydrography-dataset>

len. Ein Verfahren, das bei einem Kartenwerk sehr gute Ergebnisse zeigt, kann bei anderen Karten sehr viel schlechter funktionieren. Selbst wenn die Karten für einen Menschen vermeintlich ähnlich aussehen, stellt die automatische Verarbeitung besondere Ansprüche.

Auch die Vergleiche mit bestehenden Arbeiten zur automatischen Georeferenzierung (siehe Abschnitt 6.4) haben gezeigt, dass verschiedene Karten sehr unterschiedlich schwer zu verarbeiten sein können. Manche Karten scheinen mithin unmöglich zu verarbeiten sein.

Neben unterschiedlicher Gestaltung und Maßstäbe, muss die zukünftige Forschung ein besonderes Augenmerk auf den Einfluss unterschiedlicher Informationsdichte legen. Es wäre insbesondere zu untersuchen, wie Methoden robuster gegen Stördaten oder ungleichmäßige Verteilung von Signaturen gemacht werden können.

Insgesamt bleibt festzustellen, dass eine bessere Klassifikation von Karten notwendig ist, um die Anwendbarkeit von verschiedenen Verfahren beschreiben zu können. Aber eine systematische Analyse für Metriken zur Menge und Dichte der Signaturen wurde bisher nur vereinzelt durchgeführt [Harrie & Stigmar 2010]. Eine solche Analyse der *Graphical Map Load* [Barvir & Vozenilek 2020] wäre ein Ansatz festzustellen, welche Karten in der Verarbeitung vergleichbar anspruchsvoll sind.

Als Alternative für Vergleichbarkeit von verschiedenen Methoden hat sich in verschiedenen Forschungsbereichen der Bildverarbeitung die Verwendung von sogenannten „Benchmark“-Datensätzen etabliert. Benchmark-Datensätze sind frei verfügbare Datensätze mit einer Auswahl von Beispieldaten, die das gesamte Spektrum der erwarteten Schwierigkeiten abdecken und im Regelfall auch Ground Truth-Ergebnisse für die jeweilige Aufgabe enthalten. Gerade bei Altkarten mit unklarer Lagegenauigkeit (vgl. Abschnitt 6.2.6) kann die Angabe von Ground Truth-Georeferenzierungen aber subjektiv bis irreführend sein.

Für die digitale Verarbeitung von Altkarten gibt es bisher noch gar keine Benchmark-Datensätze. Lediglich zur ICDAR 2021 wurde einmalig der Versuch der Vergleichbarkeit mit einem Wettbewerb gewagt [Chazalon *et al.* 2021]. Es ist angezeigt, einen oder mehrere Benchmark-Datensätze zusammenstellen, die die Diversität und Schwierigkeit verschiedener Kartentypen berücksichtigen und im Idealfall für verschiedene Aufgabenstellungen (z. B. Segmentierung, Vektorisierung, Georeferenzierung) genutzt werden können. Hier sollten gemeinsame Anstrengungen von VerarbeiterInnen und BereitstellerInnen getan werden, um Probleme der Auswahl, Menge und Lizenzrechte zu lösen.

Um bis dahin eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erreichen, sollten Kartenwerke untersucht werden, die schon in bisherigen Arbeiten manuell oder automatisch verarbeitet wurden. Dafür böten sich z. B. die Messtischblätter [Koldrack & Bill 2015], die Siegfriedkarte [Heitzler *et al.* 2018], die Josephinische Landesaufnahme [Podobnikar 2009, Molnár *et al.* 2014, Cajthaml & Janata 2017] oder sogar das Schmettausche Kartenwerk an [Kreßner 2008, Kreßner 2010]. Das Problem ist dabei oft nur, dass die Karten leider nicht ohne weiteres vollzählig und in guter Qualität zugänglich sind. Hier stehen oft die Bildrechte der jeweiligen Archive einer Verbreitung im Weg.

7.3.1.1 Anwendung auf ältere Karten

Etwas losgelöst von den rein technischen Herausforderungen bei der Verarbeitung, stellt sich die Frage, wie alt die Eingabekarten sein können, um noch automatisch georeferenziert werden zu können.

[Kreßner 2008, Kreßner 2010] zeigt, dass Karten im 18. Jahrhundert mit ausreichend hoher Genauigkeit hergestellt wurden um sie recht präzise georeferenzieren zu können. Vor den großen Landesaufnahmen ist aber mit signifikanten „lokal differenzierten Verzerrungen“ [Kreßner 2008, S. 133] zu rechnen, weshalb auch komplexere Transformationen Einsatz finden müssen (siehe Abschnitt 7.3.1.2).

[Narin & Gullu 2021] zeigen, dass selbst Karten aus dem 15. Jahrhundert genauer sind als zuweilen angenommen wird. Es wäre interessant zu untersuchen, ob man auch diese automatisch georeferenzieren kann. Die Voraussetzung dafür wäre einerseits die Anwendung komplexer lokaler Deformationen, um die Kartenabbildung auszugleichen, die nicht den heutigen geodätischen Standards entspricht. Außerdem zeigen [Narin & Gullu 2021] genauso wie [Kreßner 2010], dass für eine genaue Georeferenzierung die damals geltende Missweisung berücksichtigt werden muss, die sich zudem über den Kartenbereich verändern kann. Glücklicherweise stehen dafür inzwischen recht detaillierte archäomagnetische Daten zur Verfügung [Korte & Constable 2011], die aber noch nicht zur Berechnung von Transformationen zur Georeferenzierung Beachtung gefunden haben. Ab wann die Missweisung bei der Aufnahme von Karten systematisch berücksichtigt wurde, lässt sich nicht zweifelsfrei festzustellen.

7.3.1.2 Transformationen und Verzerrungen

In der vorliegenden Arbeit wurde vereinfachend angenommen, dass für die verarbeiteten Karten das räumliche Bezugssystem bekannt ist. Wie in Abschnitt 3.2 ausgeführt, ist das räumliche Bezugssystem bei vielen Altkarten aber nicht mit Sicherheit zu rekonstruieren. In diesen Fällen wird in der konventionellen manuellen Georeferenzierung oft versucht, die Passung mittels polynomialen oder TPS-Transformationen herzustellen.

Die gängigen RANSAC-Implementierungen unterstützen diese Transformationsmodelle nicht. Im Prinzip ist RANSAC aber mit beliebigen Transformationen nutzbar, es muss nur ein effizientes Verfahren gefunden werden, diese iterativ abzuschätzen.

Tatsächlich sind aber auch diese Transformationsmodelle nicht perfekt geeignet, um unterschiedliche Kartenabbildungen auszugleichen und es bleiben oft störende Verzerrungen [Kreßner 2010, Narin & Gullu 2021]. Ferner muss damit gerechnet werden, dass in Altkarten auch Verzerrungen auftreten, die nicht auf die Kartenabbildung zurückzuführen sind, sondern etwa auf ungenaue Positionsbestimmung oder Missweisung während der Aufnahme oder auf Schäden im Papier.

Um all diese Verzerrungen ausgleichen zu können, müssen noch komplexere elastische Transformationen verwendet werden. So bietet sich etwa nach einer initialen

affinen Transformation an, die verbleibenden Verzerrungen durch lokal stetige lineare Transformationen auszugleichen [White & Griffin 1985, Taquet *et al.* 2011]. In der medizinischen Bildverarbeitung wird in den letzten Jahren weiter an elastischen Registrierungsverfahren geforscht, die zwar anderen Anforderungen unterliegen, aber durchaus auch für Karten nützlich sein könnten [Yang *et al.* 2011, Sotiras *et al.* 2013].

Inzwischen finden sich sogar auch für die Abschätzung einer Transformation Deep Learning-Ansätze, deren Eignung und Generalisierbarkeit genauer zu prüfen wäre [Yilmaz & Gullu 2012, Wu *et al.* 2022c].

7.3.1.3 Bessere Referenzdaten

Gerade bei der Verwendung von Flusssignaturen ist festzustellen, dass je nach Maßstab die Signaturen unterschiedlich breit gezeichnet werden oder kleinere ganz wegfallen. Leider erlauben die genutzten OSM-Referenzdaten keine Rückschlüsse auf die Größe der Flüsse, um so besser an unterschiedliche Maßstäbe angepasst werden zu können. Es gibt zwar erste Arbeiten, die die Ordnung von Flüssen in OSM zu schätzen [Hajek & Kriz 2018], es wäre aber noch zu untersuchen, ob damit die Generalisierung ausreichend an die Eingabekarten angeglichen werden kann.

Bei der Verwendung von so genannter *Volunteered Geographic Information* (wie OSM) ist nicht garantiert, dass die Daten vollständig sind. Insbesondere kleinere Objekte in entlegenen Gebieten sind nur sehr uneinheitlich eingetragen. So ist etwa in manchen Gegenden jeder Entwässerungsgraben abgebildet, in anderen nicht einmal kleine Flüsse. Es gibt einige systematische Analysen über die Vollständigkeit von OSM-Daten [Barron *et al.* 2014, Zheng & Zheng 2014, Herfort *et al.* 2022]. Diese sollten zurate gezogen werden, um zu entscheiden, in welchen Gebieten der Erde OSM sinnvollerweise als Referenzkarte dienen kann.

Generell ist das Datenformat von OSM etwas sperrig und die Verarbeitung war bei einzelnen Blättern fehlerbehaftet. Insbesondere komplexe Geometrien, wie Seen mit Inseln, konnten teilweise nicht korrekt abgebildet werden. Es ist auch schwierig Küstenlinien und Inseln aus OSM selektiv zu extrahieren. Für eine garantiert vollständige Küstenlinie müsste der gesamte Datensatz vorverarbeitet werden². Es wäre zu ermitteln, ob es andere geeignete Referenzdatensätze gibt, die eine ähnlich gute Abdeckung, aber gegebenenfalls besseren Detailgrad und ein günstigeres Format aufweisen.

Unabhängig von der Wahl der konkreten Referenzkarte ist es wichtig, eine gute Übereinstimmung von Eingabe- und Referenzsignaturen zu finden. So werden z. B. in der KDR100 Auflage A die Küsten nur linienhaft koloriert, in der Auflage B aber die gesamte Meeresfläche. Ein erster Ansatz, beide Auflagen gleichermaßen gut verarbeiten zu können, wäre im Index mehrere verschiedenartige Repräsentationen zu speichern. Also z. B. jedes Blatt einmal mit gefülltem Meer und einmal mit Küsten-

²siehe <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Coastline>, März 2023. Deshalb wurden in der vorliegenden Arbeit Küstenlinien aus einem anderen Datensatz verwendet, dessen Generalisierung aber nicht gut mit den OSM-Daten zusammenpasste.

linie abzubilden. Dazu wäre zuerst sicherzustellen, dass zusätzliche Exemplare von Referenzbildern nicht für mehr Unsicherheit bei der Lokalisierung sorgen.

Ferner wäre zu untersuchen, ob man auch die Notwendigkeit der Anpassung der Referenzkarten vermeiden kann. So könnten z. B. mehrere Klassen der Referenzkarten im Index hinterlegt werden. Damit könnten bei der Lokalisierung die Signaturen der Eingabebilder klassifiziert werden und immer nur die relevante Signaturklasse der Referenzkarte zur Zuordnung genutzt wird. Insbesondere, wenn mehrere Signaturklassen gleichzeitig verwendet werden sollen (mehr dazu in Abschnitt 7.3.3), ist eine Mehrklassenrepräsentation der Referenzkarte unabdingbar.

7.3.1.4 Unabhängigkeit vom Blattschnitt

Die Repräsentation der Referenzkarte im Index ist neben der Wahl der abgespeicherten Informationen hauptsächlich bestimmt durch den Blattschnitt des Eingabekartenwerks. Daher muss für jedes neue Kartenwerk mit anderem Blattschnitt ein neuer Index trainiert werden. Dies ist eine Einschränkung, die für die Demonstration der hier entwickelten Methode duldbar war, aber in zukünftiger Entwicklung gelockert werden sollte, um eine einfachere Übertragbarkeit des Verfahrens zu erlauben.

Denkbar wäre dafür z. B., künstliche Blattschnitte mittels eines *moving window*-Ansatz zu erzeugen. Dadurch könnte auch eine begrenzte Maßstabsunabhängigkeit erreicht werden, indem Referenzkartenausschnitte unterschiedlicher Größe im Index abgelegt werden. So kann das IR-Paradigma voll angewandt werden: bei mehreren überlappenden Referenzbildern könnten diese als sich gegenseitig stützende Hypothesen aus der Index-Suche zurückgeliefert werden. Um dann ein geeignetes Zielbild für die Registrierung auszuwählen, muss natürlich eine etwas komplexere Hypothesenauswahl implementiert werden. Für den Erfolg dessen ist aber notwendig, dass erstens die Index-Suche effizient genug ist, um eine wesentlich größeren Index schnell abzufragen und zweitens derart robust ist, dass auch bei mehreren konfligierenden Erklärungen eindeutige Evidenzen zurückgeliefert werden.

7.3.2 Verbesserung der Lokalisierung

7.3.2.1 Merkmale

Wie kann also eine möglichst robuste Lokalisierung geschaffen werden? Tatsächlich ist theoretisch nicht gut begründet, welche Punkte im Kartenbild tatsächlich die besten Passpunkte für die Georeferenzierung bilden. Die Anwendbarkeit von klassischen Interest-Operatoren beruht auf der Annahme, dass deskriptive Punkte in einem segmentierten Kartenbild ähnliche Eigenschaften aufweisen wie deskriptive Punkte in natürlichen Bildern (z. B. maximale Krümmung oder starke Gradienten). Auch die Wiederholbarkeit ist keinesfalls gewährleistet, wenn Zuordnungen zwischen den Bildern intermodal erfolgen, wie hier zwischen einer segmentiertem Rasterkarte und einer rasterisierten Vektorkarte.

In Abschnitt 4.4.3 wurde zwar ein Experiment zum Vergleich der Eignung gängiger Merkmalsdeskriptoren gemacht, dieses ist aber keinesfalls umfassend. Es gibt

eine Vielzahl von Interest-Operatoren und Merkmalsdeskriptoren mit einer noch größeren Kombinationsmöglichkeiten derselben, so dass eine erschöpfende Untersuchung notwendig wäre, um zu entscheiden, welcher für den vorliegenden Anwendungsfall am besten geeignet ist oder ob nicht doch ein neuer Detektor/Deskriptor entwickelt werden muss, der speziell für segmentierte Kartenbilder optimiert ist.

Ein vielversprechender Ansatz bei undefinierten Deskriptivitätskriterien bei multimodaler Zuordnung ist, mit einem *Autoencoder* Bildmerkmale zu lernen [Mukherjee *et al.* 2017]. Da diese keine Ansprüche an die Eigenschaften der Bilder stellen, bzw. die am besten geeignete Repräsentation selbst lernen, könnte damit gegebenenfalls sogar die parametrisierungsaufwändige und fehleranfällige Segmentierung entfallen. Zusätzlich könnte sich so die womöglich einschränkende Festlegung auf eine einzelne Signaturklasse erübrigen.

7.3.2.2 Geographischer Kontext

Aber nicht nur wie Bildinhalte kodiert werden ist wichtig. Auch die Inhalte der Referenzkarten wurden in der vorliegenden Arbeit eher prototypisch konstruiert. Dass für jedes Referenzbild nur ein Beispiel im Index abgelegt wurde, ist nicht nur aufgrund der unterschiedlichen Maßstäbe und Gestaltungsmöglichkeiten (siehe Abschnitt 7.3.1.3) unzureichend. Wenn mehrere Referenzbilder desselben Kartenausschnittes mit unterschiedlichen Gestaltungen abgelegt würden, könnte auch eine höhere Sicherheit der Zuordnung entstehen. Konkret hieße das, dass neben der rasterisierten Vektorkarten auch unterschiedliche segmentierte Rasterkarten automatisch gesammelt und im Index abgelegt werden könnten. Folglich könnten für die relevanten Punkte in der Referenzkarte jeweils Codewörter mit mehreren Beispielen gelernt werden, die eine robustere Zuordnung erlauben, da die Bandbreite der erwarteten möglichen Darstellungen (Generalisierung, Form der Signaturen, Maßstab, usw.) breiter abgedeckt würde.

Eine andere Dimension an ungenutzten Informationen zeigt sich, wenn mehrere Karten eines Kartenwerkes gleichzeitig georeferenziert werden sollen (wie in allen Experimenten hier). Bisher wurde jede Karte unabhängig verarbeitet, ohne Informationen aus den anderen bisherigen Georeferenzierungen zu nutzen. Durch eine parallele Verarbeitung kann nicht nur Rechenzeit gespart werden (wenn etwa mehrmals Merkmale desselben Referenzbildes aus dem Speicher geladen werden), sondern auch die Suche besser zielgerichtet werden: Wenn etwa schon einige Blätter mit hoher Konfidenz lokalisiert werden konnte, ist die Wahrscheinlichkeit geringer, dass dieser Ort noch für die weiteren Kartenblätter als Kandidat zur Verfügung steht. Genauso wäre denkbar zu erkennen, ob zwei zu Eingabekarten benachbart sind (etwa anhand von Signaturen, die über den Kartenrand hinausgehen), was bei der gemeinsamen Georeferenzierung der beiden Blätter viel mehr zusammenhängende Bildmerkmale liefert und so eine sicherere Lokalisierung erlauben könnte.

7.3.2.3 Verwendung anderer Signaturen

Die Experimente mit unterschiedlichen Signaturen (siehe Abschnitt 5.4.2) haben gezeigt, dass prinzipiell verschiedenste linienhafte Signaturen ausreichend deskriptiv sind, um eindeutig zugeordnet werden zu können. Die Voraussetzung ist, dass sie in ausreichender Dichte im Kartenmaterial vorhanden sind (vgl. Abschnitt 6.2.2). Auch die Untersuchung der Robustheit des Verfahrens gegen historische Veränderungen der Signaturen ist vielleicht mit Straßen und Eisenbahnlinien aussagekräftiger, als mit Gewässersignaturen.

Die Lokalisierung und Registrierung ist ebenso mit Punktsignaturen denkbar. Hier entfielen der Schritt der Merkmalsextraktion, da die Signaturen selbst als Passpunkte für das Finden einer geeigneten Transformation dienen. Flächenhafte Signaturen wiederum können (wie in den Experimenten hier auch Seen bzw. die Küstenlinie) anhand ihrer Umrisse wie linienhafte Signaturen verarbeitet werden, da vor allem ihre Form die Identifikation erlaubt. Die homogene Fläche in ihnen enthält keine aussagekräftigen Merkmale, könnte aber womöglich mit weiterentwickelten Deskriptoren, welche die visuellen Variablen der Signatur repräsentieren können, zur Disambiguierung hinzugezogen werden.

Die größte Herausforderung in der Praxis ist hierbei aber, die jeweiligen Signaturen aus dem Kartenmaterial zu extrahieren. Nicht viele Signaturen sind so einfach anhand ihrer Farbinformationen zu extrahieren, wie die Gewässersignaturen in den hier untersuchten Karten. Für Signaturen, die schwerer von anderen zu unterscheiden sind, wie z. B. Straßen oder Bahnlinien, die häufig als unterschiedlich gestaltete schwarze Linien auftreten, sind komplexere Verfahren notwendig. Siehe dazu Abschnitt 7.3.4.

In jedem Fall ist erhebliches Vorwissen über das verarbeitete Kartenmaterial erforderlich, um sowohl geeignete Segmentierungsverfahren anzupassen, als auch um zu den segmentierten Signaturen passende Referenzkarten auszuwählen.

7.3.3 Verbesserung der Registrierung

Selbst im Experiment unter Idealbedingungen zeigte sich, dass das Registrierungsverfahren nicht immer zuverlässig konvergiert (siehe Abschnitt 5.4.1). Der Hauptgrund dafür ist, dass das ECC-Verfahrens bei den sich vielerorts ähnelnden Strukturen der segmentierten Kartenbilder oft zu lokalen Minima konvergiert.

Ein Ansatz, die Stabilität des Registrierungsverfahrens zu erhöhen, wäre die möglichen Freiheitsgrade der Transformation einzuschränken, z. B. keine starke Scheerung zuzulassen. Dies erfordert genaue Kenntnis über die auftretenden Verzerrungen in den Eingabedaten, riskiert anderenfalls eine reduzierte Anwendbarkeit. Für die Georeferenzierung wäre das durchaus vertretbar, da Digitalisate von Landkarten in der Regel nicht stark geschert sind.

In manchen Fällen lieferte ECC ohne Initialisierung eine bessere Lösung, als mit Initialisierung aus der Hypothesenverifikation. ECC ist angewiesen auf eine gute Initialisierung, die aber bei vielen schlechten Korrespondenzen in der Verifikation

nicht garantiert werden kann.

Man könnte auch einen kaskadierenden Registrierungsprozess einsetzen. D. h. die Bilder werden erst in eine niedrige Auflösung verkleinert und so miteinander registriert, um eine Initialisierung für eine weitere Registrierung mit höherer Auflösung durchzuführen. Genauso kann auch erst mit einem einfachen Transformationsmodell grob registriert werden, um anschließend mit einer komplexeren Transformation differenzierte Verzerrungen auszugleichen. So könnten z. B. auch die trapezförmigen Blätter erst mit einer Affintransformation ausgerichtet werden und dann mit der Perspektivtransformation feinangepasst werden.

Für eine breitere Anwendbarkeit des hier vorgestellten Verfahrens sind noch mehr Transformationsklassen zu untersuchen. Nicht nur die aus Georeferenzierung altbekannten polynomialen und TPS-Transformationen, sondern vor allem auch solche, die lokale Verzerrungen ausgleichen können. Insbesondere ältere Karten weisen komplexe nicht-lineare Verzerrungen auf, sei es durch fehlerhafte topographische Aufnahme, gewelltes Papier oder Effekte der Kartenabbildung. Die Herausforderung ist dabei, auch mit relativ wenigen und ungenauen Passpunkten bei ungleichmäßig verteilten Signaturen robuste und stabile Lösungen zu finden. Merkmalsbasierte Verfahren sind in der Regel die robusteren. Und auch stückweise Transformationen nutzen eine diskrete Zahl an Zuordnungen. Damit ist die komplexe Registrierung natürlich deutlich performanter. da mit flexibleren Transformationen auch schwieriger zu entscheiden ist, welche Korrespondenzen Ausreißer sind, ist unklar, wie solche Verfahren bei einer hohen erwarteten Anzahl von Fehlzuordnungen angewendet werden können (etwa in iterativer Abschätzung mittels RANSAC).

In Abschnitt 6.2.2 wurde diskutiert, warum ungleichmäßig verteilte Signaturen ein großes Problem für die Genauigkeit sind. Vielleicht können fehlende oder ungleichmäßig verteilte Signaturen dadurch ausgeglichen, dass gezielt mehr Bildmerkmale auf den vorhandenen Vordergrundbereichen extrahiert werden (*dense sampling*). So kann eine genauere Transformation berechnet werden und hoffentlich der Restfehler in den gefüllten Bildbereichen soweit reduziert, dass er auch in den leeren Bildbereichen nicht durch Extrapolation zu groß wird.

Eine andere Möglichkeit besser verteilte Informationen sicherzustellen und gleichzeitig die Generalisierbarkeit des Verfahrens zu verbessern, wäre gleichzeitig mehrere Signaturklassen zur Zuordnung und Registrierung zu verwenden. Es ist aber völlig unklar, wie Raumbezüge unterschiedlicher Quelle kombiniert werden können. Es gibt keine etablierten Methoden, unterschiedlich konfidente Zuordnungsmengen etwa mit unterschiedlich gewichteten Passpunkten [Janata & Cajthaml 2020] zu einem gemeinsamen Transformationsmodell aufzulösen (z. B. Ortsnamen mit großer räumlicher Unsicherheit und Flüsse mit recht guter Lagegenauigkeit). Dies sollte unbedingt verfolgt werden, auch um die verschiedenen Ansätze aus der Forschung zur automatischen Georeferenzierung kombinieren zu können.

7.3.4 Verbesserung der Segmentierung

Die Qualität der Georeferenzierung ist maßgeblich abhängig von der Qualität der eingegebenen Segmentierungsmasken. Dabei machen insbesondere sehr feine Signaturen, Schraffuren, Flächenmuster, Doppellinien usw. Probleme. Reine Farbsegmentierung ist nicht in der Lage, aus den Schraffuren oder Flächenmustern die tatsächliche Geometrie zuverlässig zu bestimmen, wie an den flächenhaften Signaturen von Mooren und Feuchtgebieten oder den Schraffuren der großen Wasserflächen in der KDR100 Auflage B sichtbar wurde.

Daher sollte starke Aufmerksamkeit auf die Entwicklungen von Segmentierungsverfahren gelenkt werden, die besser für Altkarten geeignet sind. Glücklicherweise wird die Segmentierung in der Literatur deutlich mehr behandelt, als die Georeferenzierung selbst. In den letzten Jahren zeigten sich dabei viele Fortschritte in generalisierten Verfahren durch Deep Learning-Ansätze, die auch flächenhafte Gewässersignaturen erfolgreich segmentieren konnten [Jiao *et al.* 2020, Wu *et al.* 2022b, Wu *et al.* 2022a, Wu *et al.* 2023]. Hier ist noch nicht abzusehen, welche Verfahren gut generalisierbar sind und es sind noch einige Untersuchungen notwendig, ob und wie die bisherigen Verfahren für die Georeferenzierung geeignete Eingabemasken liefern können.

7.3.5 Implementierung in einer Anwendungssoftware

Abgesehen von besserer Robustheit und Generalisierbarkeit sind zuerst noch einige Schritte zu tun, das vorgeschlagene Verfahren in die Praxis der AnwenderInnen zu bringen.

Das hier vorgestellte Verfahren (so wie alle anderen in der Literatur auch) erfordert eine aufwendige Abschätzung von vielen Parametern der verschiedenen Algorithmen, um die besten Gesamtergebnisse zu erzielen. Diese Parameter müssen an jeden neuen Datensatz angepasst werden. Ein interaktives Werkzeug, z. B. als GIS-Plugin, das NutzerInnen direkt visuelles Feedback gibt, würde die Anpassung wesentlich vereinfachen.

Automatisches Georeferenzierung wird nicht immer perfekt sein, es ist stets mit Fehlern und Ungenauigkeiten zu rechnen. Für einen nutzerfreundlichen und effizienten Prozess wäre es also hilfreich, ein Verfahren für die zielgerichtete manuelle Fehlerkorrektur mitzuliefern. Dafür wäre ein Werkzeug denkbar, das NutzerInnen die Karten zur Kontrolle vorlegt und ggf. erlaubt, die Georeferenzierung mit zusätzlichen Passpunkten – oder, noch besser, durch drag & drop – zu korrigieren. Um den Arbeitsaufwand zu reduzieren, sollten die Ausgabekarten dabei nach Konfidenz absteigend sortiert werden, so dass nur die wirklich schlechten Ergebnisse bearbeitet werden müssen. Dafür wäre es zweckdienlich, einen guten Konfidenzwert angeben zu können, insbesondere für die Registrierung konnte hier noch keiner gefunden werden.

Ebenso kann es für NutzerInnen gewünscht sein, den Inhalt benachbarter Blätter zu einer Gesamtkarte zusammenzufügen. Während das hier vorgestellte Verfahren jetzt schon erlaubt, die Kartenränder abzuschneiden, wird kein Fehlerausgleich über

benachbarte Blätter durchgeführt, um größere Klaffung zu umgehen. Ein Verfahren wie etwa bei [Cajthaml & Janata 2017, Janata & Cajthaml 2020] sollte untersucht werden, um Fehler über benachbarte Blätter auszugleichen.

7.3.6 Implikationen außerhalb von Altkarten

Die hier erprobten Verfahren können ein Ansatz sein, auch andersartige Daten zu erschließen. So, wie das CBIR auf gezeichneten Kartenskizzen eine Inspiration für die Lokalisierung von Karten war, kann das hier vorgestellte Verfahren womöglich auch genutzt werden, um diese Skizzen zu georeferenzieren. Damit tut sich ein Aufgabengebiet auf, das – im Gegensatz zu Altkarten – seine Relevanz nicht mit der zunehmenden Verarbeitung der Daten verliert.

Aber auch andere intermodale Zuordnungen können von den hier gewonnenen Erkenntnissen profitieren: So wurden und werden z. B. sehr entlegene Gebiete oft mit nicht professionell photogrammetrischen Bildern aufgezeichnet, sondern etwa mit Photos aus Hubschrauberüberflügen. Gegebenenfalls können auch Photos aus sehr flacher Perspektive („off nadir“) georeferenziert werden, wenn Ihr Inhalt mit Referenzkarten zugeordnet wird. Dies würde die Lücke zwischen Georeferenzierung und Bildlokalisierung (wie bei [Irschara *et al.* 2009, Floros *et al.* 2013, Sattler *et al.* 2012, Tran *et al.* 2019]) schließen.

Außerdem gibt es noch immer einige Regionen auf der Welt, für die nicht regelmäßig gute topographische Karten hergestellt werden. Eventuell können historische Karten und Satellitenbilder miteinander registriert werden, um eine Basis für flächendeckende topographische Karten zu liefern, die höchsten Qualitätsansprüchen gerecht wird.

Die Forschung zur Entwicklung von automatischen Verfahren zur Verarbeitung von Altkarten steht erst in ihren Anfängen. Und dennoch verspricht sie schon jetzt, nicht nur einen reichen Wissensschatz aus historischen Quellen zu erschließen, sondern auch darüber hinaus viele Erkenntnisse über die Verarbeitung von Geodaten in Bildern und Dokumenten mit sich zu bringen.

Verweis auf Quelltext der Implementierung

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurde eine Software entwickelt, die das vorgeschlagene Verfahren zur Georeferenzierung implementiert. Der gesamte Quelltext für diese Software ist unter <https://github.com/luftj/MaRE> zugänglich und dokumentiert. Der Stand zur Abgabe der vorliegenden Dissertation ist unter <https://github.com/luftj/MaRE/releases/tag/v1.0> festgehalten.

Experimentalparameter

Die in Anhang A referenzierte prototypische Implementierung erfordert das Setzen einiger Parameter zur korrekten Funktionsweise und genauen Georeferenzierung. Diese Parameter müssen für das jeweils untersuchte Kartenmaterial angepasst werden und wurden auch für einzelne Experimente in dieser Arbeit zweckdienlich justiert.

Im Sinne der Reproduzierbarkeit erfolgt hier eine Auflistung aller gesetzten Parameter für die in dieser Arbeit durchgeführten Experimente. Die Parameter sind auch im Quellcode für die jeweiligen Experimente zu finden im Ordner `experiments` in den Dateien, die mit `config_` beginnen.

Sollten Parameter nicht aufgelistet sein, die aber für die Verwendung bestimmter Algorithmen erwartet würden, wurden auch keine explizit gesetzt, sondern die Standardwerte der jeweiligen Implementierung verwendet.

B.1 Umgebungsparameter

Die folgenden Parameter sind nur zur Konfiguration der lokalen Ausführungsumgebung nötig und beeinflussen nicht die Ergebnisse der Georeferenzierung.

Name	Beschreibung
<code>base_path</code>	Übergeordnetes Verzeichnis für alle Prozess- und Ausgabedateien.
<code>path_output</code>	Zielverzeichnis für Ausgabedateien.
<code>path_logs</code>	Zielverzeichnis für Log-Dateien.
<code>base_path_index</code>	Zielverzeichnis für Index-Dateien.
<code>path_osm</code>	Zielverzeichnis für die heruntergeladenen Referenzkarten.
<code>osm_url</code>	URL zu einer Overpass-Instanz.
<code>force_osm_download</code>	Kann gesetzt werden, um erneutes Laden der Referenzkarten zu erzwingen.
<code>download_timeout</code>	Timeouts beim Laden der Referenzkarten für Verbindungsaufbau sowie Lesen .
<code>sheet_name_field</code>	Im Blattschnitt der Name des GeoJSON-Property, das den Bezeichner des Blattes enthält.

save_transform	Kann gesetzt werden, um die Registrierungstransformation mit den georeferenzierten Ausgabebildern abzuspeichern (zur Erkennung von fehlerhaften Georeferenzierungen).
reference_sheets_path	Pfad zur Datei mit dem Verweis von Merkmalen im Index zu den Blättern.
reference_index_path	Pfad zur Datei in dem der Index selbst abgespeichert wird.
reference_descriptors_path	Pfad zur Datei, in dem Index und Deskriptoren verknüpft werden.
reference_descriptors_folder	Pfad zum Verzeichnis, in dem die Deskriptoren aller Referenzbilder abgelegt werden.
reference_keypoints_path	Pfad zur Datei, in dem Index und Interestpunkte verknüpft werden.
reference_keypoints_folder	Pfad zum Verzeichnis, in dem die Interestpunkte aller Referenzbilder abgelegt werden.
gdal_output_options	Parameter die an GDAL zur Erstellung des Ausgabebildes übergeben werden, z.B. Dateiformat, Kompression und Abbildung.
output_file_ending	Dateiformat für die georeferenzierten Ausgabekarten, z.B. tiff (für GeoTIFF) oder jp2 (für JPG2000).
jpg_compression	Wenn Dateiformat auf JPG oder jp2 gesetzt, kann hiermit das Kompressionslevel konfiguriert werden.

B.2 Gleichbleibende Parameter

Die folgenden Parameter wurden für alle Experimente verwendet.

Name	Wert	Beschreibung
proj_map	+proj=longlat +ellps=bessel +towgs84=598.1, 73.7, 418.2, 0.202, 0.045, -2.455, 6.7 +no_defs	proj-String für die Abbildung der Eingabekarten, hier entsprechend DHDN mit Potsdam Datum.

proj_sheets	wie proj_map	Abbildung für die Referenzkartenpositionen.
proj_osm	+proj=longlat +datum=WGS84 +ellps=WGS84 +no_defs	Entspricht EPSG:4326. Abbildung der Referenzkarte (OSM).
proj_out	wie proj_osm	Abbildung für die georeferenzierten Ausgabekarten.
line_thickness_poly	"natural=coastline": 3, "default": 3	Umrisslinienstärke flächenhafter Signaturen in der Referenzkarte.
fill_polys	True	Alle flächenhaften Signaturen ausgefüllt zeichnen.
osm_image_size	[1000,850]	Die Zielgröße in Pixel der Referenzbilder (kann bei abweichender Form des Blattes variieren).
process_image_width	500	Die Bildbreite auf die Eingabe- und Referenzbilder für die Verarbeitung skaliert werden.
resizing_index_building	INTER_AREA	Skalierungsfunktion (OpenCV) für die Skalierung der Referenzbilder zur Merkmalsextraktion.
resizing_input	INTER_AREA	Skalierungsfunktion (OpenCV) für die Skalierung der Eingabebilder, wenn diese vorskaliert werden (hier nur für die Experimente mit unterschiedlichen Bildauflösungen verwendet).
resizing_index_query	INTER_AREA	Skalierungsfunktion (OpenCV) für die Skalierung der Eingabebilder zur Merkmalsextraktion.
resizing_register_query	INTER_AREA	Skalierungsfunktion (OpenCV) für die Skalierung der Eingabebilder für die Registrierung.
resizing_register_reference	INTER_CUBIC	Skalierungsfunktion (OpenCV) für die Skalierung der Referenzbilder für die Registrierung.

<code>index_img_width_query</code>	500	Die Zielbildbreite für die Eingabebilder zur Merkmalsextraktion.
<code>index_n_descriptors_query</code>	500	Die Anzahl der jeweils aus den Eingabebildern zu extrahierenden Merkmale.
<code>index_k_nearest_neighbours</code>	50	Die Anzahl der nächsten Nachbarn, die in der ANN-Suche ausgegeben werden sollen.
<code>index_voting_scheme</code>	antiprop	Das Auswahlverfahren der Hypothese aus der ANN-Suche (wie im Methodenkapitel beschrieben).
<code>index_lowes_test_ratio</code>	None	Möglicher Parameter, um Merkmalszuordnungen mit Lowe's test ratio zu verifizieren.
<code>index_img_width_train</code>	500	Die Zielbildbreite für die Referenzbilder zur Merkmalsextraktion.
<code>index_border_train</code>	30	30 px breiter Rand um die Referenzbilder, um Merkmalsextraktion an den Kanten zu ermöglichen.
<code>index_annoydist</code>	euclidean	Die Abstandsfunktion für die ANN-Suche (Euklidische/L2-Norm).
<code>index_n_descriptors_train</code>	300	Die Anzahl der jeweils aus den Referentbildern zu extrahierenden Merkmale.
<code>detector</code> <code>kp_detector</code>	kaze_upright wie detector	Der zu verwendende Detektor. Der zu verwendende Deskriptor.
<code>index_descriptor_length</code>	64	Die Dimensionalität des Deskriptors .
<code>index_num_trees</code>	10	Die Anzahl der Bäume für die ANN-Suche.
<code>reference_map_padding</code>	30	analog zu <code>index_border_train</code> .
<code>ransac_stop_probability</code>	0.99	Terminierungskriterium für RANSAC.

<code>ransac_random_state</code>	1337	Seed für Zufallszahlengenerator, um reproduzierbare RANSAC-Ergebnisse zu erreichen.
<code>skip_impossible_verification</code>	False	Ermöglicht Rechenzeit zu sparen bei bekannter Ground Truth.
<code>codebook_response_threshold</code>	None	Alternative Präemptionsheuristik in der Hypothesenverifikation vgl. Mit Lowe's Test Ratio, aber für die Anzahl der verifizierten Korrespondenzen.
<code>matching_norm</code>	NORM_L2	Die Abstandsfunktion für die Merkmalszuordnung (Euklidische/L2-Norm).
<code>matching_crosscheck</code>	True	Merkmale müssen sowohl von Eingabe zu Referenz, als auch von Referenz zu Eingabe zugeordnet werden können, um akzeptiert zu werden.
<code>warp_mode_retrieval</code>	similarity	Das Transformationsmodell für RANSAC.
<code>warp_mode_registration</code>	affine	Das Transformationsmodell für ECC.

B.3 Parameter für die KDR100

Name	Wert	Beschreibung
osm_query	[out:json]; (way (bbox) [natural=water] [name]; way (bbox) [natu- ral=coastline]; nwr (bbox) [water=lake]; nwr (bbox) [water=reservoir]; way (bbox) [water=river]; way (bbox) [waterway=river] [name]; way (bbox) [waterway=canal] [name]; way (bbox) [water- way=stream] [name]; way (bbox) [waterway=ditch]; way (bbox) [waterway=drain]; way (bbox) [water- way=riverbank]; way (bbox) [type=waterway] [name];); out body; >; out skel qt;	An Auflage B angepasste Overpass-Anfrage, um die Gewässersignaturen der Re- ferenzkarte auszuwählen. Mit Gräben (ditch, drain).
draw_ocean_polygon	False	Ozeane in den Referenzkarten nur als Küstenlinien zeichnen, ge- mäß Auflage A.
line_thickness_line	"waterway=river": 2, "natural=coastline": 5, "default": 1	Linienstärke der linienhafter Si- gnaturen in den Referenzkarten.
segmentation_steps	(convert,lab), (colourbalance,5), (blur,19), (threshold,[(0,0,10),(255, 90, 100)]), (open,5), (close,11)	Die Schritte des Segmentierungs- prozesses für die KDR100, wie im Methodenkapitel beschrieben.
ransac_max_trials	1000	maximale Iterationen für RAN- SAC.
registration_mode	both	Das eingesetzte Registrierungs- verfahren: Initialisierung mit RANSAC, danach ECC.
registration_ecc_iterations	500	Maximale ECC Iterationen.
registration_ecc_eps	1e-4	Mindestverbesserung des Kor- relationskoeffizienten, um eine ECC-Iteration zu akzeptieren.

B.3.1 Abweichende Parameter für Experimente unterschiedlicher Signaturen

B.3.1.1 Eisenbahnen

Name	Wert	Beschreibung
osm_query	[out:json]; (way (bbox) [rail- way=rail][!service];); out body; >; out skel qt	Nur linienhafte Eisenbahnsignaturen.
line_thickness_line	"default": 2	2 px breite Eisenbahnsignaturen.

B.3.1.2 Straßen

Name	Wert	Beschreibung
osm_query	[out:json]; (way (bbox) [highway=primary]; way (bbox) [highway=secondary]; way (bbox) [highway=tertiary]; way (bbox) [highway=residential]; way (bbox) [highway=unclassified];); out body; >; out skel qt;	Nur linienhafte Straßensignaturen.
line_thickness_line	"highway=primary": 2, "highway=secondary": 2, "highway=tertiary": 2, "highway=residential": 1, "highway=unclassified": 1, "default": 1	1–2 px breite Straßensignaturen.

B.4 Parameter für die DK50

Name	Wert	Beschreibung
osm_query	wie KDR100	
draw_ocean_polygon	False	Ozeane in den Referenzkarten nur als Küstenlinien zeichnen.

line_thickness_line	"waterway=river": 2, "natural=coastline": 5, "default": 1	Linienstärke der linienhafter Signaturen in den Referenzkarten.
segmentation_steps	(colourbalance,1), (blur,9), (convert,hsv), (threshold,[(80, 35, 100),(110, 170, 240)]), (open,5), (close,11)	Die Schritte des Segmentierungsprozesses für die DK50, wie im Methodenkapitel beschrieben.
ransac_max_trials	3000	maximale Iterationen für RANSAC.
registration_mode	ecc	Registrierung nur mit ECC, da RANSAC teilweise schlechte Initialisierungen lieferte.
registration_ecc_iterations	5000	Maximale ECC-Iterationen.
registration_ecc_eps	1e-10	Mindestverbesserung des Korrelationskoeffizienten, um eine ECC-Iteration zu akzeptieren.

B.5 Parameter für die TÜDR200

Name	Wert	Beschreibung
osm_query	[out:json]; (nwr (bbox) [water=lake]; nwr (bbox) [water=reservoir]; way (bbox) [natural=water] [name]; way (bbox) [type=waterway] [name]; way (bbox) [waterway=river] [name]; way (bbox) [waterway=canal] [name]; way (bbox) [water=river]; way (bbox) [waterway=stream] [name]; way (bbox) [natural=coastline]; way (bbox) [waterway=riverbank];); out body; >; out skel qt;	Wegen des kleineren Maßstabs werden entgegen der KDR100 und DK50 keine Gräben dargestellt.

draw_ocean_polygon	True	Ozeane in den Referenzkarten gefüllt zeichnen.
line_thickness_line	"waterway=river": 2, "natural=coastline": 0, "default": 1	Linienstärke linienhafter Signaturen in den Referenzkarten.
segmentation_steps	(colourbalance,1), (blur,9), (convert,hsv), (threshold,[(90, 35, 100),(110, 170, 240)]), (open,5), (close,11)	Die Schritte des Segmentierungsprozesses für die TÜDR200, wie im Methodenkapitel beschrieben.
ransac_max_trials	3000	maximale Iterationen für RANSAC.
registration_mode	both	Registrierung mit Initialisierung via RANSAC, dann ECC.
registration_ecc_iterations	5000	Maximale ECC-Iterationen.
registration_ecc_eps	1e-10	Mindestverbesserung des Korrelationskoeffizienten, um eine ECC-Iteration zu akzeptieren.

Literaturverzeichnis

- [Agrawal *et al.* 2008] Motilal Agrawal, Kurt Konolige und Morten Rufus Blas. Cen-SurE: Center Surround Extremas for Realtime Feature Detection and Matching, Bd. 5305 in *Lecture Notes in Computer Science*, S. 102–115. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. 50
- [Ahlers 2013] Dirk Ahlers. *Assessment of the Accuracy of GeoNames Gazetteer Data*. In Proceedings of the 7th Workshop on Geographic Information Retrieval - GIR '13, S. 74–81, Orlando, FL, USA, 2013. ACM Press. 16
- [Alcantarilla *et al.* 2012] Pablo Fernández Alcantarilla, Adrien Bartoli und Andrew J. Davison. *KAZE Features*. In Andrew Fitzgibbon, Svetlana Lazebnik, Pietro Perona, Yoichi Sato und Cordelia Schmid, (Hrsg.), Proceedings of the 12th European Conference on Computer Vision, Bd. 4 in *Lecture Notes in Computer Science*, S. 214–227, Florenz, Italien, 2012. Springer. 19, 47, 49, 50
- [Alcantarilla *et al.* 2013] Pablo Alcantarilla, Jesus Nuevo und Adrien Bartoli. *Fast Explicit Diffusion for Accelerated Features in Nonlinear Scale Spaces*. In Proceedings of the British Machine Vision Conference 2013, S. 13.1–13.11, Bristol, VK, 2013. British Machine Vision Association. 19, 47
- [Ardanuy *et al.* 2019] Mariona Coll Ardanuy, Katherine McDonough, Amrey Krause, Daniel C S Wilson, Kasra Hosseini und Daniel van Strien. *Resolving Places, Past and Present: Toponym Resolution in Historical British Newspapers using Multiple Resources*. In Proceedings of the 13th Workshop on Geographic Information Retrieval, GIR '19, S. 1–6, New York, NY, USA, Nov 2019. Association for Computing Machinery. 3, 5, 16
- [Arriaga-Varela & Takahashi 2019] Enrique J. Arriaga-Varela und Toru Takahashi. *Automatic Georeferencing of Heterogeneous Historic and Illustrated Maps*. Abstracts of the ICA, Bd. 1, S. 1–2, Jul 2019. 14, 17
- [Arundel *et al.* 2022] Samantha T. Arundel, Trenton P. Morgan und Phillip T. Thiem. *Deep Learning Detection and Recognition of Spot Elevations on Historical Topographic Maps*. *Frontiers in Environmental Science*, Bd. 10, Feb 2022. 3, 28
- [Bahgat & Runfola 2021] Karim Bahgat und Dan Runfola. *Toponym-assisted Map Georeferencing: Evaluating the Use of Toponyms for the Digitization of Map Collections*. *PLOS ONE*, Bd. 16, Nr. 11, Nov 2021. 5, 14, 17, 20, 113, 114, 115, 116

- [Barron *et al.* 2014] Christopher Barron, Pascal Neis und Alexander Zipf. *A Comprehensive Framework for Intrinsic OpenStreetMap Quality Analysis*. Transactions in GIS, Bd. 18, Nr. 6, S. 877–895, 2014. 125
- [Barvir & Vozenilek 2020] Radek Barvir und Vit Vozenilek. *Developing Versatile Graphic Map Load Metrics*. ISPRS International Journal of Geo-Information, Bd. 9, Nr. 1212, Dez 2020. 123
- [Bay *et al.* 2008] Herbert Bay, Andreas Ess, Tinne Tuytelaars und Luc Van Gool. *Speeded-Up Robust Features (SURF)*. Computer Vision and Image Understanding, Bd. 110, Nr. 3, S. 346–359, Jun 2008. 19, 50
- [Bessel 1841] Friedrich Wilhelm Bessel. *Über einen Fehler in der Berechnung der französischen Gradmessung und seinen Einfluß auf die Bestimmung der Figur der Erde*. Astronomische Nachrichten, Bd. 19, Nr. 438, S. 97–116, Dez 1841. 29, 36
- [Briggs & Li 2006] Ronald Briggs und Yan Li. *Automated Georeferencing Based on Topological Point Pattern Matching*. In Proceedings of AutoCarto, 2006. 17, 20, 23
- [Bucha *et al.* 2005] Victor Bucha, Sergey Ablameyko und Tony Pridmore. *Semi-Automatic Extraction and Vectorisation of Multicoloured Cartographic Objects*. In Proceedings of the IEE International Conference on Visual Information Engineering (VIE 2005), S. 115–120, Glasgow, Apr 2005. 25
- [Buckley 2019] Aileen R. Buckley. *Sharing Collections of Historical Maps Online*. Abstracts of the ICA, Bd. 1, Jul 2019. 2
- [Budig & van Dijk 2015] Benedikt Budig und Thomas C. van Dijk. Active Learning for Classifying Template Matches in Historical Maps, Bd. 9356 in *Lecture Notes in Computer Science*, S. 33–47. Springer International Publishing, 2015. 18
- [Budig & van Dijk 2017] Benedikt Budig und Thomas C. van Dijk. *Journeys of the Past: A Hidden Markov Approach to Georeferencing Historical Itineraries*. In Proceedings of the 11th Workshop on Geographic Information Retrieval, Bd. 7, S. 1–10, New York, NY, USA, Nov 2017. Association for Computing Machinery. 18
- [Budig *et al.* 2016] Benedikt Budig, Thomas C van Dijk und Alexander Wolff. *Matching Labels and Markers in Historical Maps: an Algorithm with Interactive Postprocessing*. ACM Transactions on Spatial Algorithms and Systems (TSAS), Bd. 2, Nr. 4, S. 1–24, Nov 2016. 16
- [Burt *et al.* 2019] James Burt, Jeremy White, Gregory Allord, Kenneth Then und A-Xing Zhu. *Automated and Semi-Automated Map Georeferencing*. Cartography and Geographic Information Science, Bd. 47, Nr. 1, S. 46–66, Mai 2019. 5, 13, 17, 18, 23, 113, 114, 115, 116

- [Cajthaml & Janata 2017] Jiří Cajthaml und Tomáš Janata. *Georeferencing of First Military Mapping Survey Maps in the Area of Bohemia Using Polynomial Method*. e-Perimetron, Bd. 12, Nr. 4, S. 181–188, 2017. 20, 22, 104, 111, 123, 131
- [Canny 1986] John Canny. *A Computational Approach to Edge Detection*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI), Bd. 8, S. 679–698, Dez 1986. 19
- [Carter *et al.* 2018] E. C. Carter, János Schanda, Robert Hirschler, Sophie Jost, Ming Ronnier Luo, Manuel Melgosa, Yoshi Ohno, Michael R. Pointer, Daniel Catton Rich, Françoise Viénot, Lilly Whitehead und Jan H. Wold. *CIE 015:2018 Colorimetry, 4th Edition*. 2018. 44
- [Chazalon *et al.* 2021] Joseph Chazalon, Edwin Carlinet, Yizi Chen, Julien Perret, Bertrand Duménieu, Clément Mallet, Thierry Géraud, Vincent Nguyen, Nam Nguyen, Josef Baloun, Ladislav Lenc und Pavel Král. *ICDAR 2021 Competition on Historical Map Segmentation*. In Proceedings of the 16th International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR'21), Lecture Notes in Computer Science, S. 693–707, Lausanne, Schweiz, 2021. Springer International Publishing. 15, 117, 123
- [Chen *et al.* 2004] Ching-Chien Chen, Craig A. Knoblock, Cyrus Shahabi, Yao-Yi Chiang und Snehal Thakkar. *Automatically and Accurately Conflating Orthoimagery and Street Maps*. In Proceedings of the 12th annual ACM international workshop on Geographic information systems (ACM-GIS), S. 47–56. ACM Press, 2004. 17, 22, 23, 25, 31
- [Chen *et al.* 2006] Ching-Chien Chen, Craig A. Knoblock und Cyrus Shahabi. *Automatically Conflating Road Vector Data with Orthoimagery*. GeoInformatica, Bd. 10, Nr. 4, S. 495–530, Dec 2006. 17, 22, 23, 25, 31
- [Chen *et al.* 2016] I-Wen Chen, Hou-Ren Chen und Yi-Hsing Tseng. *Automatic Image Matching and Georeferencing of Digitized Historical Aerial Photographs*. 37th Asian Conference on Remote Sensing, ACRS 2016, Bd. 2, S. 1100–1108, 2016. 19, 22
- [Chen *et al.* 2021] Yizi Chen, Edwin Carlinet, Joseph Chazalon, Clément Mallet, Bertrand Duménieu und Julien Perret. *Vectorization of Historical Maps Using Deep Edge Filtering and Closed Shape Extraction*. In Josep Lladós, Daniel Lopresti und Seiichi Uchida, (Hrsg.), Document Analysis and Recognition - ICDAR 2021, Lecture Notes in Computer Science, S. 510–525, Cham, 2021. Springer International Publishing. 25
- [Chiang & Knoblock 2009] Yao-Yi Chiang und Craig A. Knoblock. *A Method for Automatically Extracting Road Layers from Raster Maps*. In 10th International Conference on Document Analysis and Recognition, S. 838–842. IEEE, 2009. 18

- [Chiang *et al.* 2014] Yao-Yi Chiang, Stefan Leyk und Craig A. Knoblock. *A Survey of Digital Map Processing Techniques*. ACM Computing Surveys, Bd. 47, Nr. 1, Mai 2014. 11, 25
- [Chiang *et al.* 2016] Yao-Yi Chiang, Stefan Leyk, Narges Honarvar Nazari, Sima Moghaddam und Tian Xiang Tan. *Assessing the Impact of Graphical Quality on Automatic Text Recognition in digital maps*. Computers & Geosciences, Bd. 93, S. 21–35, Aug 2016. 16, 31
- [Chiang *et al.* 2020] Yao-Yi Chiang, Weiwei Duan, Stefan Leyk, Johannes H. Uhl und Craig A. Knoblock. *Historical Map Applications and Processing Technologies*, S. 9–36. SpringerBriefs in Geography. Springer International Publishing, Cham, 2020. 19
- [Christoph *et al.* 2016] Andreas Christoph, Michael Ammon, Wolfgang Crom und Holger Przibytzin. *Digitalisierung - Verortung - Recherche / Neue Perspektiven für historische Karten*. KN - Journal of Cartography and Geographic Information, Bd. 66, Nr. 3, S. 115–122, Mai 2016. 1, 3, 4, 28
- [Chui & Rangarajan 2003] Haili Chui und Anand Rangarajan. *A New Point Matching Algorithm for Non-Rigid Registration*. Computer Vision and Image Understanding, Bd. 89, Nr. 2-3, S. 114–141, Feb 2003. 23
- [Cléri *et al.* 2014] Isabelle Cléri, Marc Pierrot-Deseilligny und Bruno Vallet. *Automatic Georeferencing of a Heritage of Old Analog Aerial Photographs*. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Bd. 2, Nr. 3, S. 33–40, Aug 2014. 19, 22
- [Crom 2016] Wolfgang Crom. *Kartendigitalisierung - buntes Bild oder Mehrwert*. Kartographische Nachrichten, Bd. 66, Nr. 5, S. 243–248, 2016. 2
- [Csurka *et al.* 2004] Gabriela Csurka, Christopher Dance, Lixin Fan, Jutta Willamowski und Cédric Bray. *Visual Categorization with Bags of Keypoints*. In Proceedings of the European Conference on Computer Vision, Prag, Tschechische Republik, 2004. 53
- [Dalal & Triggs 2005] N. Dalal und B. Triggs. *Histograms of Oriented Gradients for Human Detection*. In 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05), Bd. 1, S. 886–893, San Diego, CA, USA, 2005. IEEE. 19
- [Duan *et al.* 2017] Weiwei Duan, Yao-Yi Chiang, Craig A. Knoblock, Vinil Jain, Dan Feldman, Johannes H. Uhl und Stefan Leyk. *Automatic Alignment of Geographic Features in Contemporary Vector Data and Historical Maps*. In Proceedings of the 1st Workshop on Artificial Intelligence and Deep Learning for Geographic Knowledge Discovery - GeoAI '17, S. 45–54. ACM Press, 2017. 15, 23

- [Duan *et al.* 2020] Weiwei Duan, Yao-Yi Chiang, Stefan Leyk, Johannes H. Uhl und Craig A. Knoblock. *Automatic Alignment of Contemporary Vector Data and Georeferenced Historical Maps using Reinforcement Learning*. International Journal of Geographical Information Science, Bd. 34, Nr. 4, S. 824–849, Apr 2020. 15, 23
- [Dubey 2022] Shiv Ram Dubey. *A Decade Survey of Content Based Image Retrieval Using Deep Learning*. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, Bd. 32, Nr. 5, S. 2687–2704, 2022. 24
- [Duchon 1977] Jean Duchon. *Splines Minimizing Rotation-Invariant Semi-Norms in Sobolev Spaces*. In Walter Schempp und Karl Zeller, (Hrsg.), Constructive Theory of Functions of Several Variables, Lecture Notes in Mathematics, S. 85–100, Berlin, Heidelberg, 1977. Springer. 22, 169
- [Duda & Hart 1972] Richard O. Duda und Peter E. Hart. *Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures*. Communications of the ACM, Bd. 15, Nr. 1, S. 11–15, Jan 1972. 12
- [Eitz *et al.* 2011] M. Eitz, K. Hildebrand, T. Boubekeur und M. Alexa. *Sketch-Based Image Retrieval: Benchmark and Bag-of-Features Descriptors*. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Bd. 17, Nr. 11, S. 1624–1636, Nov 2011. 24
- [Evangelidis & Psarakis 2008a] Georgios D. Evangelidis und Emmanouil Z. Psarakis. *Parametric Image Alignment Using Enhanced Correlation Coefficient Maximization*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Bd. 30, Nr. 10, S. 1858–1865, Oct 2008. 23, 64, 89, 166
- [Evangelidis & Psarakis 2008b] Georgios D. Evangelidis und Emmanouil Z. Psarakis. *Projective Image Alignment by Using ECC Maximization*. In Proceedings of the Third International Conference on Computer Vision Theory and Applications, Bd. 1, S. 413–420, Funchal, Portugal, Jan 2008. 23, 64
- [Fischler & Bolles 1981] Martin A. Fischler und Robert C. Bolles. *Random Sample Consensus: a Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography*. Communications of the ACM, Bd. 24, Nr. 6, S. 381–395, Jun 1981. 21, 22, 58, 60, 168
- [Fleet 2019] Chris Fleet. *An Open-Source Web-Mapping Toolkit for Libraries*. e-Perimtron, Bd. 14, Nr. 2, S. 59–76, 2019. 2
- [Floros *et al.* 2013] Georgios Floros, Benito van der Zander und Bastian Leibe. *OpenStreetSLAM: Global Vehicle Localization using OpenStreetMaps*. In 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, S. 1054–1059, Karlsruhe, Mai 2013. IEEE. 23, 131

- [Förstner & Gülch 1987] Wolfgang Förstner und Eberhard Gülch. *A Fast Operator for Detection and Precise Location of Distinct Points, Corners and Centres of Circular Features*. In Proceedings of the ISPRS intercommission conference on fast processing of photogrammetric data, Bd. 6, S. 281–305, 1987. 19
- [Goel *et al.* 2011] Aman Goel, Matthew Michelson und Craig A. Knoblock. *Harvesting Maps on the Web*. International Journal on Document Analysis and Recognition (IJ DAR), Bd. 14, Nr. 4, S. 349–372, 2011. 24
- [Haar 1910] Alfred Haar. *Zur Theorie der orthogonalen Funktionensysteme*. Mathematische Annalen, Bd. 69, Nr. 3, S. 331–371, Sep 1910. 50
- [Hajek & Kriz 2018] Benedikt Hajek und Karel Kriz. *Topographic Maps based on OpenStreetMap Data - Optimising Depiction of Water Streams*. In Proceedings of the 11th Mountain Cartography Workshop, Mai 2018. 125
- [Hake *et al.* 2013] Günter Hake, Dietmar Grünreich und Liqiu Meng. Kartographie, Kap. Grundlagen kartographischer Modellbildung, S. 105–197. De Gruyter, Mar 2013. 32
- [Harrie & Stigmar 2010] Lars Harrie und Hanna Stigmar. *An Evaluation of Measures for Quantifying Map Information*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Bd. 65, Nr. 3, S. 266–274, Mai 2010. 123
- [Harris & Stephens 1988] Chris Harris und Mike Stephens. *A Combined Corner and Edge Detector*. In Proceedings of the Alvey Vision Conference 1988, S. 147–152, Manchester, VK, 1988. Alvey Vision Club. 19
- [Heitzler & Hurni 2020] Magnus Heitzler und Lorenz Hurni. *Cartographic Reconstruction of Building Footprints from Historical Maps: A Study on the Swiss Siegfried Map*. Transactions in GIS, Bd. 24, Jan 2020. 5, 17, 18, 19, 25
- [Heitzler *et al.* 2018] Magnus Heitzler, Charalampos Gkonos, Angeliki Tsorlini und Lorenz Hurni. *A Modular Process to Improve the Georeferencing of the Siegfried Map*. e-Perimtron, Bd. 13, Nr. 2, S. 85–100, 2018. 13, 113, 114, 116, 123
- [Herfort *et al.* 2022] Benjamin Herfort, Sven Lautenbach, João Porto de Albuquerque, Jennings Anderson und Alexander Zipf. *Inequalities in the Completeness of OpenStreetMap Buildings in Urban Centers*. In Proceedings of the Academic Track at State of the Map 2022, S. 38–41, Florenz, Italien, Aug 2022. Zenodo. 125
- [Herrault *et al.* 2013] P.-A. Herrault, D. Sheeren, M. Fauvel und M. Paegelow. Automatic Extraction of Forests from Historical Maps Based on Unsupervised Classification in the CIE Lab Color Space, S. 95–112. Springer International Publishing, 2013. 25

- [Howe *et al.* 2019] Nicholas R. Howe, Jerod Weinman, John Gouwar und Aabid Shamji. *Deformable Part Models for Automatically Georeferencing Historical Map Images*. In Proceedings of the 27th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems, S. 540–543. Association for Computing Machinery, Nov 2019. 14, 17, 23, 24, 26, 113, 114, 115, 116, 117
- [Howe 2013] Nicholas R. Howe. *Part-Structured Inkball Models for One-Shot Handwritten Word Spotting*. In Proceedings of the 2013 12th International Conference on Document Analysis and Recognition, ICDAR '13, S. 582–586. IEEE Computer Society, Aug 2013. 14
- [Howe 2015] Nicholas R. Howe. *Inkball Models for Character Localization and Out-of-Vocabulary Word Spotting*. In Proceedings of the 2015 13th International Conference on Document Analysis and Recognition, ICDAR '15, S. 381–385. IEEE Computer Society, Aug 2015. 14
- [Hwooi & Sabri 2017] Stephen Khor Wen Hwooi und Aznul Qalid Md Sabri. *Enhanced Correlation Coefficient as a Refinement of Image Registration*. In 2017 IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications (ICSIPA), S. 216–221, Sep 2017. 22, 64
- [Höhn & Schommer 2017] Winfried Höhn und Christoph Schommer. *Georeferencing of Place Markers in Digitized Early Maps by Using Similar Maps as Data Source*. In Abstracts of Digital Humanities 2017, S. 473–475, Montréal, Kanada, Aug 2017. 18, 21, 23
- [Höhn *et al.* 2013] Winfried Höhn, Hans-Günter Schmidt und Hendrik Schöneberg. *Semiautomatic Recognition and Georeferencing of Places in Early Maps*. In Proceedings of the 13th ACM/IEEE-CS joint conference on Digital libraries - JCDL '13, S. 335–338. ACM Press, 2013. 14, 18
- [Ignjatić *et al.* 2018] Jelena Ignjatić, Bojana Nikolić, Aleksandar Rikalović und Du-bravko Ćulibrk. *Deep Learning for Historical Cadastral Maps Digitization: Overview, Challenges and Potential*. In Proceedings of the 26th International Conference on Computer Graphics, S. 42–47, 2018. 25
- [Indyk & Motwani 1998] Piotr Indyk und Rajeev Motwani. *Approximate Nearest Neighbors: Towards Removing the Curse of Dimensionality*. In Proceedings of the 30th annual ACM symposium on Theory of computing - STOC '98, S. 604–613. ACM Press, 1998. 54
- [Irschara *et al.* 2009] Arnold Irschara, Christopher Zach, Jan-Michael Frahm und Horst Bischof. *From Structure-from-Motion Point Clouds to Fast Location Recognition*. 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, S. 2599–2606, Jun 2009. 23, 53, 60, 131

- [Janata & Cajthaml 2020] Tomáš Janata und Jiri Cajthaml. *Georeferencing of Multi-Sheet Maps Based on Least Squares with Constraints—First Military Mapping Survey Maps in the Area of Czechia*. Applied Sciences, Bd. 11, S. 1–13, Dez 2020. 129, 131
- [Jenny & Hurni 2011] Bernhard Jenny und Lorenz Hurni. *Cultural Heritage: Studying Cartographic Heritage: Analysis and Visualization of Geometric Distortions*. Computers & Graphics, Bd. 35, S. 402–411, Apr 2011. 109
- [Jiao *et al.* 2020] Chenjing Jiao, Magnus Heitzler und Lorenz Hurni. *Extracting Wetlands from Swiss Historical Maps with Convolutional Neural Networks*. In Automatic Vectorisation of Historical Maps: International workshop organized by the ICA Commission on Cartographic Heritage into the Digital, S. 33–38. Department of Cartography and Geoinformatics ELTE, 2020. 25, 130
- [Jiao *et al.* 2021] Chenjing Jiao, Magnus Heitzler und Lorenz Hurni. *A Survey of Road Feature Extraction Methods from Raster Maps*. Transactions in GIS, 2021. 11, 25
- [Johns & Yang 2015] Edward Johns und Guang-Zhong Yang. *RANSAC with 2D Geometric Cliques for Image Retrieval and Place Recognition*. In CVPR Workshop, S. 4321–4329, 2015. 22
- [Kalantidis *et al.* 2011] Yannis Kalantidis, Giorgos Tolias, Yannis Avrithis, Marios Phinikettos, Evaggelos Spyrou, Phivos Mylonas und Stefanos Kollias. *VIRaL: Visual Image Retrieval and Localization*. Multimedia Tools and Applications, Bd. 51, Nr. 2, S. 555–592, Jan 2011. 60
- [Keyes & Winstanley 2001] Laura Keyes und Adam Winstanley. *Topographic Object Recognition Through Shape*, Technical Report. Ordnance Survey, Southampton, VK, 2001. 40
- [Koldrack & Bill 2015] Nils Koldrack und Ralf Bill. *Automatisierte Georeferenzierung alter topographischer Karten - Algorithmus und Qualitätsanalyse*. zfv - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Nr. 5/2015, S. 290–296, 2015. 12, 17, 111, 123
- [Korte & Constable 2011] Monika Korte und Catherine Constable. *Improving Geomagnetic Field Reconstructions for 0-3ka*. Physics of the Earth and Planetary Interiors, Bd. 188, Nr. 3, S. 247–259, Oct 2011. 124
- [Kowal & Pridal 2012] Kimberly C. Kowal und Petr Pridal. *Online Georeferencing for Libraries: The British Library Implementation of Georeferencer for Spatial Metadata Enhancement and Public Engagement*. Journal of Map & Geography Libraries, Bd. 8, Nr. 3, S. 276–289, Sep 2012. 3, 110

- [Kreßner 2008] Lutz Kreßner. *Georeferenzierte Altkarten aus Mecklenburg als Basis moderner Kulturlandschaftsforschung mittels Geo-Informationssystemen*. Kartographische Nachrichten, Bd. 58, Nr. 3, S. 129–135, Mai 2008. 2, 22, 29, 31, 104, 111, 123, 124
- [Kreßner 2009] Lutz Kreßner. *Digitale Analyse der Genauigkeit sowie der Erfassungs- und Darstellungsqualität von Altkarten aus Mecklenburg Vorpommern - dargestellt an den Kartenwerken von Wiebeking (ca. 1786) und Schmettau (ca. 1788)*. Dissertation, Universität Rostock, 2009. 29, 109
- [Kreßner 2010] Lutz Kreßner. *Kartographiegeschichtliche Einordnung und qualitative Untersuchung der Landeskartenwerke von Wiebeking und Schmettau über den Mecklenburger Raum des 18. Jahrhunderts*. Kartographische Nachrichten, Bd. 60, Nr. 1, S. 28–35, Feb 2010. 29, 32, 109, 123, 124
- [Landesaufnahme 1931] Reichsamt für Landesaufnahme. Das Reichsamt für Landesaufnahme und seine Kartenwerke, Kap. XIX D: Die Karte des Deutschen Reiches 1 : 100 000, S. 174–259. Verlag des Reichsamtes für Landesaufnahme, 1931. 32, 35
- [Leutenegger *et al.* 2011] Stefan Leutenegger, Margarita Chli und Roland Y. Siegwart. *BRISK: Binary Robust Invariant Scalable Keypoints*. In 2011 International Conference on Computer Vision, S. 2548–2555, Nov 2011. 19, 47
- [Leyk & Boesch 2010] Stefan Leyk und Ruedi Boesch. *Colors of the Past: Color Image Segmentation in Historical Topographic Maps Based on Homogeneity*. GeoInformatica, Bd. 14, Nr. 1, S. 1–21, 2010. 25
- [Li & Briggs 2012] Yan Li und Ronald Briggs. *An Automated System for Image-to-Vector Georeferencing*. Cartography and Geographic Information Science, Bd. 39, Nr. 4, S. 199–217, Jan 2012. 17, 20, 23
- [Lin & Chiang 2018] Haowen Lin und Yao-Yi Chiang. *Automatic Extraction of Phrase-Level Map Labels from Historical Maps*. SIGSPATIAL Special, Bd. 9, Nr. 3, S. 14–15, Jan 2018. 16
- [Lindeberg 2009] Tony Lindeberg. Scale-space, S. 2495–2504. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 2009. 49
- [Liu *et al.* 2019] Tiange Liu, Pengfei Xu und Shihui Zhang. *A Review of Recent Advances in Scanned Topographic Map Processing*. Neurocomputing, Bd. 328, S. 75–87, Feb 2019. 11, 25
- [Liu *et al.* 2022] Yizhang Liu, Yanping Li, Luanyuan Dai, Taotao Lai, Changcai Yang, Lifang Wei und Riqing Chen. *Motion Consistency-Based Correspondence Growing for Remote Sensing Image Matching*. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Bd. 19, S. 1–5, 2022. 19

- [Lowe 2004] David G. Lowe. *Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints*. International Journal of Computer Vision, Bd. 60, S. 91–110, 2004. 19, 47, 53, 90
- [Luft & Schiewe 2021a] Jonas Luft und Jochen Schiewe. *Automatic Content-based Georeferencing of Historical Topographic Maps*. Transactions in GIS, Bd. 25, Nr. 6, S. 2888–2906, Aug 2021. 46, 107, 113, 114, 115, 116, 117
- [Luft & Schiewe 2021b] Jonas Luft und Jochen Schiewe. *Content-based Image Retrieval for Map Georeferencing*. Proceedings of the ICA, Bd. 4, S. 1–8, Dez 2021. 25, 122
- [Luft 2020] Jonas Luft. *Automatic Georeferencing of Historical Maps by Geocoding*. In Automatic Vectorisation of Historical Maps: International workshop organized by the ICA Commission on Cartographic Heritage into the Digital, S. 77–89. Department of Cartography and Geoinformatics ELTE, Mar 2020. 5, 16, 17, 116
- [Luhmann 2018a] Thomas Luhmann. *Ausgleichungsverfahren*, Bd. 4, S. 107–134. Wichmann, Berlin, 2018. 20, 45
- [Luhmann 2018b] Thomas Luhmann. *Bildzuordnung und 3D-Objektrekonstruktion*, Bd. 4, S. 487–531. Wichmann, Berlin, 2018. 26
- [Matas *et al.* 2004] J Matas, O Chum, M Urban und T Pajdla. *Robust Wide-Baseline Stereo from Maximally Stable Extremal Regions*. Image and Vision Computing, Bd. 22, Nr. 10, S. 761–767, Sep 2004. 46
- [Mattyus *et al.* 2017] Gellert Mattyus, Wenjie Luo und Raquel Urtasun. *DeepRoad-Mapper: Extracting Road Topology from Aerial Images*. In 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), S. 3458–3466, Venedig, Italien, Oct 2017. IEEE. 25
- [Michelson *et al.* 2008] Matthew Michelson, Aman Goel und Craig A. Knoblock. *Identifying Maps on the World Wide Web*. Lecture Notes in Computer Science, S. 249–260, Sep 2008. 24
- [Mohammed *et al.* 2018] Hussein Mohammed, Volker Märgner und H. Siegfried Stiehl. *Writer Identification for Historical Manuscripts: Analysis and Optimisation of a Classifier as an Easy-to-Use Tool for Scholars from the Humanities*. In 2018 16th International Conference on Frontiers in Handwriting Recognition (ICFHR), S. 534–539, Aug 2018. 20
- [Mohammed *et al.* 2021] Hussein Mohammed, Volker Märgner und Giovanni Ciotti. *Learning-free Pattern Detection for Manuscript Research*. International Journal on Document Analysis and Recognition (IJDAR), Bd. 24, Nr. 3, S. 167–179, Sep 2021. 20

- [Molnár *et al.* 2014] Gábor Molnár, Gábor Timár und Előd Biszak. *Can the First Military Survey Maps of the Habsburg Empire (1763-1790) be Georeferenced by an Accuracy of 200 Meters?* In Proceedings of the 9th International Workshop on Digital Approaches to Cartographic Heritage, Bd. 9, S. 127–132, Budapest, Ungarn, Sep 2014. 111, 123
- [Mukherjee & Lall 2017] Prerana Mukherjee und Brejesh Lall. *Saliency and KAZE Features Assisted Object Segmentation*. Image and Vision Computing, Bd. 61, Nr. C, S. 82–97, Mai 2017. 49
- [Mukherjee *et al.* 2017] Tanmoy Mukherjee, Makoto Yamada und Timothy M. Hospedales. *Deep Matching Autoencoders*. arXiv preprints, Nr. 1711.06047, Nov 2017. arXiv:1711.06047 [cs, stat]. 127
- [Narin & Gullu 2021] Omer Gokberk Narin und Mevlut Gullu. *Evaluating the Planimetric Accuracy of a Historical Map (Europe and the Mediterranean Sea by Piri Reis): A New Method and Cartographic Analysis*. The Cartographic Journal, Bd. 58, Nr. 4, S. 341–352, Oct 2021. 124
- [Overell 2011] Simon Overell. *The Problem of Place Name Ambiguity*. SIGSPATIAL Special, Bd. 3, Nr. 2, S. 12–15, 2011. 16
- [Papakosta *et al.* 2012] Chryssa Papakosta, Charalabos Ioannidis und Dimitra Vasiliaki. *The use of Linear Features as Ground Control Information for the Georeferencing of Old Aerial Photos*. In Proceedings of the FIG Working Week 2012, S. 1–12, 2012. 20, 23
- [Peller 2018] Peter Peller. *From Paper Map to Geospatial Vector Layer*. IASSIST Quarterly, Bd. 42, S. 1–24, Dez 2018. 40
- [Perd'och *et al.* 2009] Michal Perd'och, Ondrej Chum und Jiri Matas. *Efficient Representation of Local Geometry for Large Scale Object Retrieval*. In 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, S. 9–16, Jun 2009. 61
- [Piechl 2020] Anna Piechl. *(Semi-)Automatic Vector Extraction of Administrative Borders from Historical Raster Maps*. In Automatic Vectorisation of Historical Maps: International workshop organized by the ICA Commission on Cartographic Heritage into the Digital. Budapest - 13 March, 2020, S. 47–54. Department of Cartography and Geoinformatics ELTE, 2020. 3, 4, 5, 28
- [Podobnikar 2009] Tomaž Podobnikar. *Georeferencing and Quality Assessment of Josephine Survey Maps for the Mountainous Region in the Triglav National Park*. Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica, Bd. 44, Nr. 1, S. 49–66, 2009. 111, 123

- [Pápay 1990] Gyula Pápay. Tilemann Stella und die wissenschaftliche Erforschung Mecklenburgs in der Geschichte. Wilhelm-Pleck-Universität Rostock, Sektion Geschichte, Rostock, 1990. Open Library ID: OL898010M. 32
- [Rother *et al.* 2004] Carsten Rother, Vladimir Kolmogorov und Andrew Blake. *GrabCut: Interactive Foreground Extraction using Iterated Graph Cuts*. ACM Transactions on Graphics, Bd. 23, Nr. 3, S. 309–314, Aug 2004. 15
- [Rublee *et al.* 2011] Ethan Rublee, Vincent Rabaud, Kurt Konolige und Gary Bradski. *ORB: An Efficient Alternative to SIFT or SURF*. In 2011 International Conference on Computer Vision, S. 2564–2571, Nov 2011. 19, 47
- [Sattler *et al.* 2012] Torsten Sattler, Tobias Weyand, Bastian Leibe und Leif Kobbelt. *Image Retrieval for Image-Based Localization Revisited*. In Proceedings of the British Machine Vision Conference 2012, S. 76.1–76.12, Surrey, VK, 2012. British Machine Vision Association. 23, 41, 53, 57, 61, 131
- [Schlegel 2019] Inga Schlegel. *Empirical Study for a Deployment of a Methodology for Improving the Comparability Between Historical and Current Maps*. KN - Journal of Cartography and Geographic Information, Bd. 69, Nr. 2, S. 121–130, Jun 2019. 3, 5
- [Schlegel 2021] Inga Schlegel. *Automated Extraction of Labels from Large-Scale Historical Maps*. AGILE: GIScience Series, Bd. 2, S. 1–14, Jun 2021. 5
- [Schmidt 1783] Ludwig Schmidt. Vorschriften zu Militairischen Plan- und Carten-Zeichnungen / Entworfen von Müller Lieut.Ing, gezeichnet v. Engelbrecht, gestochen von Lud. Schmidt. Zentrum für Militärgeschichte und Sozialwissenschaften der Bundeswehr, 1783. 30
- [Schröder 2013] Jörg Schröder. *Georeferenzierung und Entzerrung der brandenburgischen Kartenblätter des Schmettauschen Kartenwerks*. Vermessung Brandenburg, Nr. 2, S. 14–23, 2013. 3, 28
- [Shimizu & Fuse 2003] Eihan Shimizu und Takashi Fuse. *Rubber-Sheeting of Historical Maps in GIS and its Application to Landscape Visualization of Old-Time Cities: Focusing on Tokyo of the Past*. Proceedings of the 8th International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management, Nr. 11, 2003. 22
- [Smeulders *et al.* 2000] A.W.M. Smeulders, M. Worring, S. Santini, A. Gupta und R. Jain. *Content-based Image Retrieval at the End of the Early Years*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Bd. 22, Nr. 12, S. 1349–1380, Dez 2000. 23
- [Sotiras *et al.* 2013] Aristeidis Sotiras, Christos Davatzikos und Nikos Paragios. *Deformable Medical Image Registration: A Survey*. IEEE Transactions on Medical Imaging, Bd. 32, Nr. 7, S. 1153–1190, Jul 2013. 22, 125

- [Sumbul *et al.* 2021] Gencer Sumbul, Jian Kang und Begüm Demir. Deep Learning for Image Search and Retrieval in Large Remote Sensing Archives, S. 150–160. John Wiley & Sons, Ltd, 2021. 24
- [Taquet *et al.* 2011] Maxime Taquet, Benoît Macq und Simon K. Warfield. *Spatially Adaptive Log-Euclidean Polyaffine Registration based on Sparse Matches*. Medical image computing and computer-assisted intervention: MICCAI ... International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, Bd. 14, Nr. Pt 2, S. 590–597, 2011. 125
- [Tran *et al.* 2019] Ngoc-Trung Tran, Dang-Khoa Le Tan, Anh-Dzung Doan, Thanh-Toan Do, Tuan-Anh Bui, Mengxuan Tan und Ngai-Man Cheung. *On-device Scalable Image-based Localization via Prioritized Cascade Search and Fast One-Many RANSAC*. IEEE Transactions on Image Processing, Bd. 28, Nr. 4, S. 1675–1690, Apr 2019. arXiv: 1802.03510. 22, 23, 131
- [Trias-Sanz *et al.* 2007] Roger Trias-Sanz, Marc Pierrot-Deseilligny, Jean Louchet und Georges Stamon. *Methods for Fine Registration of Cadastre Graphs to Images*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Bd. 29, Nr. 11, S. 1990–2000, 2007. 19
- [Uhl *et al.* 2017] J.H. Uhl, S. Leyk, Yao-Yi Chiang, Weiwei Duan und C.A. Knoblock. *Extracting Human Settlement Footprint from Historical Topographic Map Series Using Context-Based Machine Learning*. In 8th International Conference of Pattern Recognition Systems (ICPRS 2017), S. 15 (6 .)–15 (6 .). Institution of Engineering and Technology, 2017. 25
- [Uhl *et al.* 2021] Johannes Uhl, Stefan Leyk, Zekun Li, Weiwei Duan, Basel Shbita, Yao-Yi Chiang und Craig Knoblock. *Combining Remote-Sensing-Derived Data and Historical Maps for Long-Term Back-Casting of Urban Extents*. Remote Sensing, Bd. 13, Sep 2021. 3, 5
- [Viergever *et al.* 2016] Max A. Viergever, J. B. Antoine Maintz, Stefan Klein, Keelin Murphy, Marius Staring und Josien P. W. Pluim. *A Survey of Medical Image Registration – Under Review*. Medical Image Analysis, Bd. 33, S. 140–144, Oct 2016. 22
- [Walter & Bill 2015] Kai Walter und Ralf Bill. *Aufbau eines crowdsourcingbasierten Verzeichnisses für historische Ortsnamen*. AGIT Journal Angew. Geoinformatik, Bd. 1, S. 432–439, 2015. 3
- [Wang & Hu 2019] Jimin Wang und Yingjie Hu. *Are we there yet?: Evaluating State-of-the-Art Neural Network Based Geoparsers using EUPEG as a Benchmarking Platform*. In Proceedings of the 3rd ACM SIGSPATIAL International Workshop on Geospatial Humanities - GeoHumanities '19, S. 1–6. ACM Press, 2019. 16

- [Wang *et al.* 2008] Caixia Wang, Peggy Agouris und Anthony Stefanidis. *An Attribute-driven Approach for Image Registration using Road Networks*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Bd. 37, Jan 2008. 17, 23, 25, 31
- [Wang *et al.* 2012] Caixia Wang, Anthony Stefanidis und Peggy Agouris. *Spatial Content-based Scene Similarity Assessment*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Bd. 69, S. 103–120, 2012. 17, 23, 25, 31
- [Weinman *et al.* 2019] Jerod Weinman, Ziwen Chen, Ben Gafford, Nathan Gifford, Abyaya Lamsal und Liam Niehus-Staab. *Deep Neural Networks for Text Detection and Recognition in Historical Maps*. In 2019 International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR), S. 902–909. IEEE, Sep 2019. 17
- [Weinman 2013] Jerod Weinman. *Toponym Recognition in Historical Maps by Gazetteer Alignment*. In 2013 12th International Conference on Document Analysis and Recognition, S. 1044–1048. IEEE, Aug 2013. 5, 13, 20
- [Weinman 2017] Jerod Weinman. *Geographic and Style Models for Historical Map Alignment and Toponym Recognition*. In 2017 14th IAPR International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR), S. 957–964. IEEE, Nov 2017. 5, 14, 16, 17, 20
- [White & Griffin 1985] Marvin S. White und Patricia Griffin. *Piecewise Linear Rubber-Sheet Map Transformation*. The American Cartographer, Bd. 12, Nr. 2, S. 123–131, Jan 1985. 22, 125
- [White 2013] Andrea P. White. *X Marks the Spot: Extracting Data from Historical Maps to Locate Archaeological Sites*. Journal of Map & Geography Libraries, Bd. 9, Nr. 1-2, S. 140–156, Jan 2013. 3, 4, 5, 28
- [Winstanley 2000] Adam Winstanley. *Applying Computer Vision Techniques to Topographic Objects*. International Archives of Photogrammetry, Jan 2000. 40
- [Wolter *et al.* 2017] Diedrich Wolter, Daniel Blank und Andreas Henrich. *Georeferencing River Networks Using Spatial Reasoning*. In Proceedings of the 11th Workshop on Geographic Information Retrieval - GIR'17. ACM Press, 2017. 19, 23, 24, 25, 32
- [Wu *et al.* 2022a] S. Wu, M. Heitzler und L. Hurni. *A Closer Look at Segmentation Uncertainty of Scanned Historical Maps*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Bd. XLIII-B4-2022, S. 189–194, Jun 2022. 25, 130
- [Wu *et al.* 2022b] Sidi Wu, Magnus Heitzler und Lorenz Hurni. *Leveraging Uncertainty Estimation and Spatial Pyramid Pooling for Extracting Hydrological*

- Features from Scanned Historical Topographic Maps*. GIScience & Remote Sensing, Jan 2022. 25, 130
- [Wu *et al.* 2022c] Sidi Wu, Raimund Schnürer, Magnus Heitzler und Lorenz Hurni. *Unsupervised Historical Map Registration by a Deformation Neural Network*. In Proceedings of the 5th ACM SIGSPATIAL International Workshop on AI for Geographic Knowledge Discovery, GeoAI '22, S. 76–81, New York, NY, USA, Nov 2022. Association for Computing Machinery. 125
- [Wu *et al.* 2023] Sidi Wu, Konrad Schindler, Magnus Heitzler und Lorenz Hurni. *Domain Adaptation in Segmenting Historical Maps: A Weakly Supervised Approach Through Spatial Co-occurrence*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Bd. 197, S. 199–211, Feb 2023. 25, 130
- [Wyawahare *et al.* 2009] Medha V. Wyawahare, Pradeep M. Patil und Hemant K. Abhyankar. *Image Registration Techniques: An Overview*. Image Processing and Pattern Recognition, Bd. 2, S. 11–28, 2009. 22
- [Yang & Newsam 2013] Yi Yang und Shawn Newsam. *Geographic Image Retrieval Using Local Invariant Features*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Bd. 51, Nr. 2, S. 818–832, Feb 2013. 24
- [Yang *et al.* 2011] Jinzhong Yang, James P. Williams, Yiyong Sun, Rick S. Blum und Chenyang Xu. *A Robust Hybrid Method for Nonrigid Image Registration*. Pattern Recognition, Bd. 44, Nr. 4, S. 764–776, 2011. 125
- [Yilmaz & Gullu 2012] I. Yilmaz und M. Gullu. *Georeferencing of Historical Maps Using Back Propagation Artificial Neural Network*. Experimental Techniques, Bd. 36, Nr. 5, S. 15–19, Sep 2012. 125
- [Zardiny *et al.* 2020] Ali Zare Zardiny, Farshad Hakimpour und Mozhdeh Shahbazi. *Sketch Maps for Searching in Spatial Data*. Transactions in GIS, Bd. 24, Nr. 3, S. 780–808, 2020. 24
- [Zheng & Zheng 2014] Shudan Zheng und Jianghua Zheng. *Assessing the Completeness and Positional Accuracy of OpenStreetMap in China*, S. 171–189. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Springer International Publishing, Cham, 2014. 125
- [Zitová & Flusser 2003] Barbara Zitová und Jan Flusser. *Image Registration Methods: a Survey*. Image and Vision Computing, Bd. 21, Nr. 11, S. 977–1000, Oct 2003. 22, 64

Abbildungsverzeichnis

1.1	Georeferenzierung als Image-Retrieval-Problem	7
3.1	KDR100: Vergleich Blatt 258 von 1902 und 1925	33
3.2	Gewässersignaturen in der KDR100	34
4.1	Übersicht Georeferenzierungsprozess	40
4.2	Segmentierungsprozess	43
4.3	Beispiel Interestpunkte	46
4.4	Vergleich Merkmalsdeskriptoren	48
4.5	Vergleich Merkmalsdeskriptoren Laufzeit	49
4.6	Visualisierung von KAZE-Deskriptoren	51
4.7	Erstellung der Referenzbilder	52
4.8	Indexaufbau aus Referenzkarten	55
4.9	Visualisierung des Indexaufbaus mit <i>annoy</i>	55
4.10	Visualisierung der ANN-Suche mit <i>annoy</i>	56
4.11	Überblick Indexsuche	59
4.12	Lokale vs. nicht-lokale Struktur	60
4.13	Prozess der Hypothesenverifikation	62
5.1	Referenzkarte vs. Referenzbild	73
5.2	Messung der Registrierungsgenauigkeit	75
5.3	Eingabebild Idealbedingungen	76
5.4	Eingabebild Signaturen	77
5.5	Vergleich der Georeferenzierungsqualität bei unterschiedlichen syn- thetischen Datensätzen	78
5.6	Eingabebild Rauschen	79
5.7	Eingabebild Verdeckung	81
5.8	Eingabebild KDR100	82
5.9	Georeferenzierungsgenauigkeit KDR100	83
5.10	Eingabebild DK50	84
5.11	Eingabebild TÜDR200	85
5.12	Anzahl der verifizierten Hypothesen und erreichbare Trefferquote . .	87
5.13	Abschätzung der Lokalisierungskonfidenz	90
5.14	Grenzwertoptimierungskurve Konfidenz	91
6.1	Fehlerverteilung geographisch	97
6.2	Stichproben für die qualitative Fehleranalyse	98
6.3	Qualitative Fehleranalyse Blatt 388	98
6.4	Qualitative Fehleranalyse Blatt 389	99
6.5	Qualitative Fehleranalyse Blatt 413	100

6.6	Qualitative Fehleranalyse Blatt 414	101
6.7	Qualitative Fehleranalyse Blatt 553	101
6.8	Qualitative Fehleranalyse Blatt 554	102
6.9	Qualitative Fehleranalyse Blatt 568	103
6.10	Qualitative Fehleranalyse Blatt 569	103
6.11	Fehlerfälle Idealbedingungen	105
6.12	Vergleich Küste	106
6.13	Vergleich Auflagen	107
6.14	Vergleich der Trefferquote mit bisherigen Verfahren	113
6.15	Vergleich der Genauigkeit mit bisherigen Verfahren	114

Tabellenverzeichnis

2.1	Vergleich bisheriger Georeferenzierungsverfahren	17
5.1	Genauigkeit bei Rauschen	80
5.2	Trefferquote und Genauigkeit bei Verdeckung	80
5.3	Genauigkeit bei Verkleinerung	82
5.4	Laufzeit der Hypothesenverifikation	87
5.5	Vergleich der Lokalisierungsergebnisse	88
5.6	Vergleich der Ergebnisqualität aller Experimente	94

Verzeichnis der Quelltexte

5.1	Overpass-Anfrage für die Referenzsignaturen passend zur KDR100 Auflage B und DK50.	72
5.2	Overpass-Anfrage für die Referenzsignaturen passend zur TÜDR200.	72

Glossar

Ähnlichkeitsabbildung Engl. *similarity transform*. Eine Funktion, um die Verzerrung von Bildern unter Skalierung und Rotation zu beschreiben.

Affintransformation Eine Funktion, um die Verzerrung von Bildern unter Skalierung, Rotation und Scherung zu beschreiben.

Aliasing Der Effekt von „stufigen“ bzw. – nach Ausgleich durch *Anti-Aliasing* – unscharfen Linien durch die Abtastung von Bildern, insbesondere bei der Rasterung von Vektordaten oder nach Verkleinerung der Bildauflösung.

Altkarte Engl. oft ungenau: *historical map*. Nicht klar definierter Begriff, der vor allem den Unterschied zu „historischen Karten“ verdeutlichen soll, also Karten, die mit modernen Methoden erzeugt werden, aber Begebenheiten zu einer früheren Zeit abbilden. In dieser Arbeit ist eine A. eine Karte, die nicht aus digitalen Geodaten oder Befliegungen erzeugt wurde, sondern nach „klassischer Weise“ aus den Ergebnissen einer Aufnahme gezeichnet oder gedruckt wurde.

Aufnahme Auch *topographische A.* Engl. *survey*. Das Vermessen der Erdoberfläche und/oder seiner künstlichen Objekte, zwecks Darstellung in einer Karte oder heutzutage in Geodaten.

Bag of Words Auch *Bag of Visual Words*. Beschreibung des Bildinhalts als eine Menge (Bag) von Bildmerkmalen (Words). Ursprünglich aus der Computerlinguistik.

Bildmerkmal Engl. *image feature*. Algorithmische Beschreibung von Bildinhalt um einzelne markante Punkte. Um Bildmerkmale zu extrahieren, wird erst ein Detektor und dann ein Deskriptor eingesetzt. Bildmerkmale werden entworfen, deskriptiv und wiederholbar zu sein und sind deshalb gut für die Zuordnung von Bildern geeignet.

Binarisierung Die Umwandlung etwa eines Dreikanal-Farbbildes in ein Binärbild.

Binärbild Ein Schwarzweißbild, in dem jeder Pixel nur einen von zwei Werten annehmen kann: Vordergrund oder Hintergrund.

Blattschnitt Die Aufteilung eines topographischen Kartenwerks in mehrere Kartenblätter. Darin sind für jedes Blatt die Ausdehnung bestimmt und ein eindeutiger Name oder eine Nummer vergeben.

BoW Siehe Bag of Words.

CBIR Content-based Image Retrieval.

CNN Convolutional Neural Network.

Datum Auch *Geodätisches D*. Der Referenzort für das geographische Koordinatensystem. Das D. bestimmt, in welcher Region das Erdellipsoid am besten zum tatsächlichen Erdkörper passt.

Deskriptor D. bezeichnet entweder die mathematische Beschreibung des Bildinhalts um einen Interestpunkt oder den Algorithmus, um diese Beschreibung herzustellen. Vgl. auch Bildmerkmal.

DK50 Die Deutsche Karte im Maßstab 1 : 50 000.

ECC Enhanced Correlation Coefficient. Ein flächenbasiertes Registrierungsverfahren. Siehe [Evangelidis & Psarakis 2008a].

Eingabekarte Die Karte bzw. das digitale Kartenbild, das georeferenziert werden soll. Dazu werden Passpunkte genutzt, die einer Referenzkarte zugeordnet werden.

Einzelkarte Eine Karte, die nicht Teil eines Kartenwerks ist.

Ellipsoid Auch *Erdellipsoid*. Die mathematische Beschreibung des Erdkörpers, die einer Kartenabbildung zugrunde gelegt wird.

Flächenmuster Eine flächenhafte Signatur, die nicht durch eine einheitliche Füllfarbe dargestellt wird, sondern durch regelmäßige Piktogramme.

Geolokalisierung Die Herstellung eines groben Raumbezugs für ein digitales Kartenbild ohne Rektifizierung und ggf. ohne räumliches Bezugssystem. In dieser Arbeit bedeutet G. festzustellen, welches Blatt im Blattschnitt die Eingabekarte darstellt.

Georeferenzierung Die Herstellung des Raumbezugs für ein digitales Kartenbild. Dies beinhaltet einerseits eine Abbildung, die jedem Bildpixel eine Weltkoordinate zuweist und andererseits das passende räumliche Bezugssystem. Gegebenenfalls wird das Kartenbild durch die G. rektifiziert.

GIS Geoinformationssystem.

Ground Truth Als G. T. bezeichnet man in der Bildverarbeitung die „wahre Lösung“ einer Aufgabe, die genutzt werden kann, den Fehler eines neuen Verfahrens zu messen. Für die Georeferenzierung könnte dies etwa eine manuell durchgeführte und auf Freiheit von Verzerrung geprüfte Georeferenzierung einer Karte sein.

Image Retrieval Verfahren zur Suche von relevanten Bildern in großen Mengen von Bildern.

Interest-Operator Auch *Detektor*. Ein Algorithmus, um Interestpunkte in einem Bild zu finden.

Interestpunkt Engl. *keypoint*. Ein markanter Punkt im Bild, der durch besondere Eigenschaften (wie Skalierungsinvarianz usw.) besonders gut geeignet ist, den relevanten Bildinhalt für eindeutige Zuordnungen zu finden. Vgl. auch Bildmerkmal.

IR Siehe Image Retrieval.

Kartenabbildung Auch *Projektion* oder *Kartennetzentwurf*. Die Vorschrift, wie die gekrümmte dreidimensionale Erdoberfläche auf eine zweidimensionale Karte abgebildet wird.

Kartenartefakt Das tatsächliche physische Exemplar einer Altkarte im Archiv.

Kartenbild Nicht zu verwechseln mit dem Karteninhalt. Eine Karte, die als digitales Bild vorliegt. Entweder ein Kartendigitalisat, oder ein rasterisierter Ausschnitt einer Vektorkarte.

Kartenblatt Einzelnes Kartenartefakt oder Kartenbild aus einem Kartenwerk.

Kartendigitalisat Das digitale Bild eines Kartenartefaktes. Im Idealfall hochauflösend und farbkorrigiert eingescannt.

Karteninhalt Wird in der Kartographie auch Kartenbild genannt. Der Teil einer Karte zwischen den Kartenrändern, in dem die Signaturen dargestellt werden.

Kartenwerk Eine Karte, die aus mehreren Teilkarten, sog. Kartenblättern, besteht. Die Aufteilung des Kartenwerks in Kartenblätter geschieht dabei nach dem Blattschnitt. In der Regel topographische Karten als Resultat flächendeckender Landesvermessung.

KDR100 Die Karte des Deutschen Reiches (Generalstabskarte) im Maßstab 1 : 100 000.

Korrespondenz Auch *Zuordnung*. Paar von homologen Passpunkten oder Bildmerkmalen in zwei Karten bzw. Bildern.

MAE Mean Average Error.

Marginalia Engl. *marginal information*. Informationen auf dem Kartenrand. Üblicherweise Titel, Beschriftung der Gitterlinien mit Koordinatenangaben, Legende und weitere Metadaten.

Missweisung Auch *Deklination*. Der Unterschied zwischen dem magnetischen und geographischen Nordpol, bedingt durch das unregelmäßige und veränderliche Magnetfeld der Erde. Bei Nichtbeachtung drohen Fehler in der Aufnahme.

natürliches Bild Bild einer natürlichen Szene, landläufig Foto, als Unterscheidung gegenüber dem Digitalisat eines Dokuments oder einer Karte. Bildverarbeitung beschäftigt sich überwiegend mit n. B., die Verarbeitung etwa von Dokumenten und Karten sind Spezialfälle, die teils andere Anforderungen haben.

OCR Optical Character Recognition. Siehe Texterkennung.

OSM OpenStreetMap, siehe <https://openstreetmap.org>.

Passpunkt Engl. *ground control point* (korrekter: *tie point*). Korrespondierende Punkte in zwei Karten, die genutzt werden, eine Transformation zu errechnen, mit denen diese Karten miteinander in Passung gebracht werden können.

Perspektivtransformation Auch *projektive Abbildung*. Engl. *homography (transform)*. Eine Funktion, um perspektivische Verzerrung von Bildern zu beschreiben.

Phänomen Auch *Geographisches P.* Der tatsächliche physische Ort, bzw. das künstliche oder natürliche Objekt, das in einer Karte durch eine Signatur repräsentiert wird.

RANSAC Random Sampling Consensus. Siehe [Fischler & Bolles 1981].

Rasterkarte Die digitale Repräsentation von räumlichen Daten auf Basis farbiger Pixel. In der Regel Luftbilder, aber auch Kartendigitalisate.

Rasterung Die Umwandlung von Vektordaten in Rasterdaten. Hier die Umwandlung einer Vektorkarte in ein binäres Kartenbild.

Referenzkarte Ein Karte mit bekanntem geodätischen Bezugssystem, dem die Passpunkte der Eingabekarte zugeordnet werden können, um einen Raumbezug herzustellen.

Registrierung Die R. bezeichnet in der Bildverarbeitung den Vorgang mithilfe verschiedener Algorithmen eine Abbildung von einem Ursprungsbild in ein Zielbild zu finden, mit denen das Ursprungsbild so verzerrt werden kann, dass es bestmöglich mit dem Zielbild kongruent ist.

Rektifizierung Die Entzerrung einer Karte oder eines Luftbildes, um die räumlichen Beziehungen innerhalb des Bildes zu korrigieren. Also ein Ausgleich von Schrägdraufsicht oder Verzerrungen durch fehlerhafte Aufnahme oder die Beschädigung des Kartenartefakts.

RMSE Root-Mean-Square Error.

Räumliches Bezugssystem Engl. *spatial reference system*. Die Summe der Informationen, die notwendig sind, um einen Punkt auf der Erde korrekt auf einer Karte darzustellen, bestehend i. d. R. aus der Kartenabbildung und dem Datum.

Segmentierung Die Klassifizierung der Bildpixel nach ihrer Zugehörigkeit zu den abgebildeten Objekten. In dieser Arbeit vor allem semantische S, also die Zugehörigkeit zu einer Klasse von Objekten bzw. Signaturen.

Signatur Engl. *map symbol*. Die kartographische Repräsentation eines geographischen Phänomens. Als Symbol, Linie oder Fläche.

Template Matching Die Suche nach dem Auftreten einer vordefinierten Schablone (Template) im Bild.

Texterkennung Engl. *OCR*. Automatische Verfahren zur Erkennung und Identifikation von Schriftzeichen in Bildern.

Toponym Ortsname, insbesondere als Beschriftung im Karteninhalt. I. d. R. für Siedlungen, aber auch als Name von Flüssen, Fluren oder anderer menschengemachter Phänomene.

TPS Thin Plate Splines. Ein elastisches Transformationsmodell. Siehe [Duchon 1977].

Transformation im geodätischen Sinne: Umrechnung von einem räumlichen Bezugssystem in ein anderes. In der Bildverarbeitung: Verzerrung eines Bildes, um den Inhalt mit dem eines anderen kongruent zu machen. Vgl. Ähnlichkeitsabbildung, Affintransformation und Perspektivtransformation.

TÜDR200 Die Topographische Übersichtskarte des Deutschen Reiches im Maßstab 1 : 200 000.

Überzeichnung Engl. *overedge*. Der Teil des Karteninhalts, der über den Kartenrand hinausgeht. Wird gelegentlich genutzt, wenn der Blattschnitt nicht perfekt auf die darzustellende Fläche aufgeht.

Ursprungsbild Engl. *source image*. In der Bildregistrierung das Bild, das transformiert werden soll, um Passung mit dem Zielbild herzustellen.

Vektorkarte Die digitale Repräsentation von räumlichen Daten auf Basis von Koordinaten. Häufig getrennt nach Geometriety: Punkten, Linien und Polygonen.

visuelle Variable Die verschiedenen Gestaltungsmöglichkeiten einer einzelnen Signatur, um deren Bedeutung zu kodieren. U. a.: Farbe, Linienstil und Größe.

Weltkoordinaten Die Lokalisierung eines Punktes auf der Erdoberfläche. In der Regel angegeben in Grad Länge und Breite, kann sich aber je nach räumlichen Bezugssystem unterscheiden.

WGS84 World Geodetic System, 1984. Ein räumliches Bezugssystem.

Zielbild Engl. *target image*. In der Bildregistrierung das Bild, das als Ziel der Transformation für das anzupassende Ursprungsbild dient.