

Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung

Extraktion von Straßennetzen aus optischen Satellitenbilddaten

Christian Wiedemann

Vollständiger Abdruck
der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitzende: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Liqiu Meng

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heinrich Ebner
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing., Dr.-Ing. habil. Christian Heipke,
Universität Hannover

Die Dissertation wurde am 26.09.2001 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 14.11.2001 angenommen.

Der Weg ist das Ziel.

Zusammenfassung

Diese Arbeit stellt ein Verfahren zur automatischen Extraktion von Straßennetzen aus optischen Satellitenbilddaten und Methoden zur Bewertung von Extraktionsergebnissen vor. Dabei wird die Netzwerkeigenschaft von Straßen explizit für ihre Extraktion genutzt. Die Bewertung umfaßt sowohl die Bewertung der Richtigkeit der extrahierten Straßen anhand aus der Literatur bekannter Maße, als auch die Bewertung der Netzwerkeigenschaft des extrahierten Straßennetzes anhand neu entwickelter Maße. Die praktischen Untersuchungen zeigen, daß sich die Nutzung der Netzwerkeigenschaft von Straßen für ihre Extraktion in einer stark verbesserten Netzwerkeigenschaft der Extraktionsergebnisse niederschlägt. Als Eingangsdaten dienen optische Luft- oder Satellitenbilddaten mit einer Bodenpixelgröße von ca. $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ und ggf. mehreren spektralen Kanälen.

Das Verfahren zur Straßenextraktion besteht aus zwei Teilschritten: der vorläufigen Extraktion und der Verbesserung der Extraktion. Im ersten Schritt wird ein vorläufiges Straßennetz extrahiert. Das zugrundeliegende Modell beinhaltet neben lokalen (Radiometrie) und regionalen (Geometrie) Aspekten insbesondere die globale Verbindungsfunktion von Straßen (Topologie). Diese Eigenschaft von Straßennetzen wird durch die Suche nach langen, zusammenhängenden Straßenstücken realisiert. Im zweiten Schritt erfolgt die Verbesserung des vorläufig extrahierten Straßennetzes aufgrund weiterer Netzwerkeigenschaften. Zwei wesentliche Eigenschaften von Straßennetzen werden hierfür eingesetzt. Zum einen ist das Straßennetz unter gewissen Randbedingungen so optimiert, daß man von einem beliebigen Punkt aus jeden anderen Punkt des Straßennetzes auf möglichst kurzem Weg erreichen kann. Dies ist ein wesentlicher Grund für die Netzstruktur von Straßen und damit eine wesentliche Netzwerkeigenschaft, die durch die Analyse von Pfadlängen innerhalb des vorläufig extrahierten Straßennetzes für die Verbesserung genutzt wird. Andererseits wird die Netzstruktur von Straßen erst durch Kreuzungen ermöglicht, da sie unterschiedliche Straßen miteinander verbinden. Durch eine explizite Rekonstruktion der Kreuzungen können Fehler der vorläufigen Extraktion eliminiert und ein optisch ansprechendes und topologisch korrektes Ergebnis erzielt werden.

Die Bewertung der Extraktionsergebnisse erfolgt durch einen Vergleich mit Referenzdaten. Zuerst werden die Extraktionsergebnisse und die Referenzdaten einander zugeordnet. Aus den Zuordnungsergebnissen werden Qualitätsmaße zur Bewertung der Extraktion abgeleitet. Die Bewertung wird für Straßen und Kreuzungen separat durchgeführt. In dieser Arbeit wird ein neues Verfahren zur Bewertung der Netzwerkeigenschaften der Extraktionsergebnisse entwickelt. Es basiert einerseits auf der Analyse von Pfadlängen und andererseits auf der Topologie der Extraktionsergebnisse, jeweils im Vergleich zu den Referenzdaten. Es ergänzt die bestehenden Arbeiten zur Bewertung von Extraktionsergebnissen um den für Straßennetze wichtigen Bereich der Netzwerkeigenschaften.

Anhand experimenteller Untersuchungen wird die Leistungsfähigkeit der entwickelten Verfahren nachgewiesen. Hierfür werden exemplarisch anhand eines Beispiels der Ablauf der Extraktion dargestellt sowie die Ergebnisse bewertet und diskutiert. Im Anschluß werden die Stärken und Schwächen der entwickelten Verfahren diskutiert. Ein Ausblick schließt die Arbeit ab.

Summary

This thesis presents an approach for the automatic extraction of road networks from optical satellite imagery and for the evaluation of the extraction results. For the extraction of the roads, road network characteristics are explicitly used. The evaluation comprises the quality of the extracted roads, using measures, known from literature. The network characteristics themselves are evaluated based on newly developed quality measures. Tests show that the use of the network characteristics for road extraction leads to results with much better network characteristics. Input data are optical aerial or satellite images with a ground pixel size of about $2\text{ m} \times 2\text{ m}$, possibly having more than one spectral channel.

The approach for road extraction consists of two parts: the preliminary extraction and the improvement of the extraction. In the first part, a preliminary road network is extracted. The used model comprises local (radiometric) and regional (geometric) aspects, as well as the connection property of roads (topological aspects). This property of road networks is implemented through the search for long connected road segments. In the second part, the improvement of the extraction result based on further network characteristics is performed. On the one hand, among ancillary conditions, the road network is optimized such that there exists a connection as short as possible between any pair of points lying on the road network. This is a major reason for the network structure of roads and, therefore, an important network characteristic. This characteristic is implemented by locally analyzing the path lengths within the extracted road network. On the other hand, the network structure of roads depends on the crossings which connect roads. By means of an explicit reconstruction of crossings, some errors of the preliminary extraction are eliminated and, a visually pleasing and topologically correct result can be obtained.

The evaluation of the extraction results is carried out by a comparison with reference data. First, the extraction results are matched to the reference data. Then, quality measures for the evaluation of the extraction are derived from the matching results. The evaluation is carried out separately for roads and crossings. A new approach for the evaluation of the network characteristics of the extraction results is presented in this thesis. It is based on the analysis of path lengths as well as on the topology of the extraction results, in each case with respect to the reference data. It supplements the existing approaches for the evaluation of extraction results by adding the evaluation of network characteristics which are especially important for road networks.

The complete process is illustrated on the basis of one example and the results are evaluated and discussed. Subsequent, the strengths and weaknesses of the developed approaches are discussed. The obtained results prove the capability of the developed approaches for the extraction of road networks. An outlook concludes the thesis.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Einführung in die Thematik	1
1.2	Zielsetzung und Inhalt der Arbeit	1
2	Verfahren zur Extraktion von Straßen aus optischen Luft- und Satellitenbilddaten und zur Bewertung der Extraktionsergebnisse	4
2.1	Straßen in optischen Luft- und Satellitenbilddaten	4
2.2	Lokale Modellierung	7
2.2.1	Straßendetektion und -verfolgung	7
2.2.2	Snakes	8
2.2.3	Gruppierung	9
2.2.4	Weitere Ansätze	10
2.3	Globale Modellierung	11
2.3.1	Gruppierung	11
2.3.2	Netzbildung	12
2.4	Verwendung von GIS Information	13
2.5	Rekonstruktion von Kreuzungen	15
2.6	Externe Bewertung	15
2.7	Zusammenfassung	17
3	Vorläufige Extraktion von Straßennetzen aus optischen Satellitenbilddaten	18
3.1	Modell für Straßennetze in optischen Satellitenbilddaten	18
3.2	Algorithmus zur Gruppierung linearer Strukturen	20
3.2.1	Anforderungen an die Gruppierung linearer Strukturen	20
3.2.2	Qualitätsmaße für Linien und Verknüpfungen	22
3.2.3	Auswahl und Verknüpfung der Linien	23
3.3	Extraktionsstrategie	23
3.4	Aspekte der Realisierung	28
4	Verbesserung der extrahierten Straßennetze	29
4.1	Vervollständigung von Straßennetzen	29
4.1.1	Charakterisierung der Lücken	30
4.1.2	Verbindungshypothesen innerhalb von Zusammenhangskomponenten	30
4.1.3	Verbindungshypothesen zwischen unterschiedlichen Zusammenhangskomponenten	32

4.1.4	Verifikation der Verbindungshypothesen	34
4.1.5	Einfügen verifizierter Verbindungshypothesen	34
4.1.6	Ablauf der Vervollständigung	36
4.2	Rekonstruktion von Kreuzungen	36
4.2.1	Modell für Kreuzungen	36
4.2.2	Rekonstruktion der Topologie	37
4.2.3	Rekonstruktion der Geometrie	38
4.2.3.1	Hauptstraßen	39
4.2.3.2	Abzweigungen	39
4.2.3.3	Bewertung der Kreuzungen	39
5	Externe Bewertung	41
5.1	Zuordnung	41
5.1.1	Prinzip der Puffermethode unter Berücksichtigung von Richtungsunterschieden	42
5.1.2	Aspekte der Realisierung	42
5.2	Bewertung der Straßen	45
5.3	Bewertung des Netzwerks	46
5.3.1	Verbindungsfunktion	46
5.3.2	Topologie	48
5.4	Bewertung der Kreuzungen	49
5.5	Parameter des Bewertungsverfahrens	50
5.5.1	Pufferbreite	50
5.5.2	Maximale Richtungsabweichung	51
5.5.3	Hilfsknotenabstand	51
5.5.4	Minimale Entfernungsdifferenz Δl	52
6	Ergebnisse	54
6.1	Testdatensatz	54
6.2	Anwendung der entwickelten Verfahren auf ein Farbluftbild	55
6.2.1	Vorläufige Extraktion	55
6.2.2	Vervollständigung	63
6.2.3	Rekonstruktion von Kreuzungen	68
6.2.4	Diskussion	70
6.3	Anwendung der entwickelten Verfahren auf ein panchromatisches Luftbild	74
6.4	Anwendung einer lokalen Gruppierung auf ein Farbluftbild	77
6.5	Anwendung einer Gruppierung mit harten Schwellwerten auf ein Farbluftbild	80
6.6	Vergleich der unterschiedlichen Endergebnisse	83
6.7	Diskussion der Bewertung	85

7	Diskussion der entwickelten Verfahren zur Extraktion von Straßennetzen und Ausblick	89
7.1	Zusammenstellung der neuen Verfahren	89
7.2	Wertung der neuen Verfahren	90
7.3	Ausblick	93
A	Extraktion linearer Strukturen aus digitalen Bilddaten	95
B	Fuzzy-Logik	96
C	Graphentheorie	98
C.1	Die Definition eines Graphen	98
C.2	Weitere Definitionen	98
C.3	Zusammenhang und Zyklen	98
C.4	Darstellung einiger Algorithmen	99
C.4.1	Traversierungsverfahren	99
C.4.2	Bestimmung der Zusammenhangskomponenten	100
C.4.3	Bestimmung des kürzesten Pfades in einem gewichteten Graphen	100
C.4.3.1	Algorithmus von Dijkstra	100
C.4.3.2	A* Algorithmus	101
C.4.3.3	F* Algorithmus	101
	Literaturverzeichnis	103

1. Einleitung

1.1 Einführung in die Thematik

Thema der Arbeit ist die automatische Extraktion von Straßennetzen aus optischen Satellitenbilddaten. Dieses Thema ist aus folgenden Gründen wichtig: Straßen sind wesentliche Objekte unserer Umgebung. Sie verbinden Städte und Ortschaften, oder allgemeiner, bedeutsame Plätze miteinander. Damit ermöglichen sie die Kommunikation und den Transport von Personen und Gütern zwischen diesen Plätzen. „Für das national und international verflochtene gesellschaftliche Leben und die Erhaltung der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit sind ausreichende Verbindungsstraßen unerlässlich. (PIETZSCH 1989).“ Um die vorhandenen Verkehrswege effektiv nutzen und neue Verkehrswege sinnvoll planen zu können, werden schon seit Alters her detaillierte Informationen über diese Verkehrswege in Karten niedergelegt. Besonders wichtig ist dabei, daß diese Karten auch tatsächlich mit der Realität übereinstimmen. Straßen sind von besonderer Bedeutung, da sie der Teil des Verkehrsnetzes sind, der dem zunehmenden Individualverkehr zur Verfügung steht. Um die Aufgabe der Erfassung und Aktualisierung von Straßenkarten, bzw. der seit einigen Jahren digital in Geographischen Informationssystemen (GIS) vorliegenden Straßendaten, durchführen zu können, reicht das bisher effizienteste Vorgehen, Straßen manuell aus Luft- bzw. Satellitenbilddaten zu digitalisieren, nicht aus, da die damit erzielbaren Erfassungs- und Nachführungsraten zu gering sind (KONECNY 1995). Durch eine Automatisierung kann die Datenerfassung beschleunigt werden. Als Datengrundlage eignen sich Satellitenbilddaten (IKONOS 1 2001, EROS A1 2001), da sie weltweit auch für größere Gebiete flächendeckend verfügbar sind bzw. erfaßt werden können.

In dieser Arbeit wird ein neues Verfahren zur automatischen Extraktion von Straßennetzen aus Satellitenbilddaten entwickelt, das die globale Verbindungsfunktion und die Netzwerkeigenschaften der Straßen berücksichtigt. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt dabei auf der Nutzung dieser globalen Aspekte des Straßennetzes für die Extraktion. Lokale Erscheinungen wie Verdeckungen der Straßen durch Häuser, Bäume oder Fahrzeuge werden nicht explizit berücksichtigt. Desweiteren wird ein Verfahren zur Bewertung der Extraktionsergebnisse anhand von Referenzdaten entwickelt. Es umfaßt die Bewertung der extrahierten Straßen, ihrer Netzwerkeigenschaften sowie der Kreuzungen. Beide Komplexe, die Extraktion und die Bewertung, sind in ihrer Anwendung nicht auf Satellitenbilddaten beschränkt. Die Extraktion ist so gestaltet, daß sie auf Verfahren übertragbar ist, die höherauflösende Bilddaten verwenden und hierfür das lokale Erscheinungsbild der Straße explizit modellieren. Die Bewertung ist generell unabhängig von der Herkunft der zu vergleichenden Datensätze.

Mögliche Anwendungsgebiete für die entwickelten Extraktionsverfahren sind neben der automatischen Extraktion von Straßen zur Erfassung und Aktualisierung von Karten und GIS, die automatische Geokodierung von Bilddaten durch Zuordnung von extrahierten Straßen und GIS-Daten (CHRISTMAS et al. 1995) oder auch die Unterstützung von flächenhaften Klassifikationsverfahren bei der Szeneninterpretation (HELLWICH und WIEDEMANN 2000). Das entwickelte Bewertungsverfahren kann allgemein zum Vergleich von linearen Datensätzen angewendet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird es zur Qualitätskontrolle der extrahierten Straßennetze verwendet. Es kann aber z.B. auch zur Aufdeckung von Unterschieden zwischen neu extrahierten und bestehenden Straßendaten im Rahmen der Aktualisierung von GIS herangezogen werden.

1.2 Zielsetzung und Inhalt der Arbeit

Seit über 20 Jahren befassen sich weltweit verschiedene Forschungsgruppen mit der automatischen Extraktion von Straßen aus Luft- und Satellitenbilddaten. Die bisherigen Ergebnisse sind aber noch

nicht zufriedenstellend. Ein wesentlicher Grund hierfür ist, daß noch nicht geklärt ist, welchen Umfang das der Extraktion zugrundeliegende Straßenmodell haben muß, d.h., in welchem Detaillierungsgrad Straßen und andere Objekte, wie z.B. Autos oder die Straße verdeckende Gebäude, modelliert werden müssen. Insbesondere die Modellierung der globalen Verbindungsfunktion und der Netzwerkeigenschaften von Straßen ist bisher noch nicht ausreichend untersucht. Ein Schwerpunkt dieser Arbeit liegt darin, diese bisher unterbewerteten Komplexe dahingehend zu analysieren, ob sie einen Beitrag zur Verbesserung der Extraktionsergebnisse leisten können, also in das Straßenmodell aufgenommen werden müssen. Der zweite Schwerpunkt der Arbeit befaßt sich mit der automatischen Bewertung der Extraktionsergebnisse. Aussagen über die Qualität der Extraktionsergebnisse sind einerseits für die Weiterentwicklung der Algorithmen hilfreich, andererseits sind sie Voraussetzung für die Beurteilung der Extraktionsverfahren hinsichtlich ihrer praktischen Anwendbarkeit. Die Bewertung erfolgt dabei durch Vergleich der Extraktionsergebnisse mit Referenzdaten. Sie umfaßt sowohl die Vollständigkeit und die Korrektheit der Extraktionsergebnisse als auch ihre Netzwerkeigenschaften.

Ergebnisse der entwickelten Verfahren werden in Form eines Funktionsnachweises dargestellt. Hierfür wird ein auflösungsreduziertes Luftbild verwendet. Die auf diesem Testdatensatz erzielten Ergebnisse zeigen, daß in der Nutzung der Netzwerkeigenschaften bisher ungenutztes Potential liegt, wobei die Verbesserungen hauptsächlich bei der topologischen Qualität der Daten auftreten.

Aufteilung der Arbeit

Die Arbeit ist wie folgt gegliedert, wobei in den Kapiteln 3 bis 7 die eigenen Arbeiten dargestellt werden:

- In Kapitel 2 wird das Erscheinungsbild von Straßen in Luft- und Satellitenbildern diskutiert und ein Überblick über die relevante Literatur zur Extraktion von Straßen aus Bilddaten sowie zur Bewertung der Extraktionsergebnisse gegeben.
- In Kapitel 3 wird ein neues Verfahren zur vorläufigen Extraktion von Straßennetzen aus Satellitenbilddaten entwickelt. Dieses Verfahren basiert auf der Verwendung der globalen Verbindungsfunktion von Straßen und wird als Algorithmus zur Gruppierung von linearen Strukturen beschrieben. Dieser Algorithmus verwendet als grundlegende Datenstruktur einen Graphen, in dem die gesuchten Verbindungen mit bekannten graphentheoretischen Algorithmen bestimmt werden können.
- Die Verbesserung der vorläufigen Extraktionsergebnisse wird in Kapitel 4 dargestellt. Das Kapitel gliedert sich in zwei Teile, in denen jeweils ein wesentlicher Aspekt der Straßennetze bearbeitet wird. Dies sind einerseits die Netzwerkeigenschaft, also die Eigenschaft von Straßennetzen, daß man von einem beliebigen Punkt aus jeden anderen Punkt des Straßennetzes auf möglichst kurzem Weg erreichen kann und andererseits die Kreuzungen, die die einzelnen Straßen zu einem Netz verbinden.
- In Kapitel 5 wird ein Verfahren zur Bewertung der Extraktionsergebnisse entworfen. Es wird einerseits die Zuordnung zwischen den extrahierten Daten und den Referenzdaten beschrieben und andererseits die Bestimmung von Qualitätsmaßen zur Bewertung der Richtigkeit der extrahierten Straßen und Kreuzungen sowie der Netzwerkeigenschaften des extrahierten Straßennetzes.
- Die Ergebnisse der entwickelten Verfahren werden in Kapitel 6 dargestellt und diskutiert. Nach einer Beschreibung des Testdatensatzes erfolgt die ausführliche Darstellung der Ergebnisse bei Verwendung des vollständigen Testdatensatzes und aller im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahren. Hieran schließt sich die Darstellung von Ergebnissen an, die man erhält, wenn Teile der Testdaten nicht verwendet und/oder manche der entwickelten Methoden nicht angewendet werden. Ein Vergleich der unterschiedlichen Ergebnisse schließt das Kapitel ab.
- Kapitel 7 enthält eine Zusammenfassung sowie eine Wertung der erzielten Ergebnisse, sowohl im Hinblick auf die wissenschaftlich interessanten Aspekte der Arbeit als auch im Hinblick

auf eine praktische Einsetzbarkeit der Verfahren. Darüberhinaus werden Vorschläge für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten gemacht.

Im Anhang wird eine kurze Einführung in das in dieser Arbeit verwendete Verfahren zur Extraktion linearer Strukturen aus digitalen Bilddaten gegeben. Darüberhinaus werden das Konzept der Fuzzy-Logik sowie elementare Strukturen und Algorithmen aus der Graphentheorie erläutert.

2. Verfahren zur Extraktion von Straßen aus optischen Luft- und Satellitenbilddaten und zur Bewertung der Extraktionsergebnisse

Die automatische Extraktion von Straßen aus digitalen Luft- und Satellitenbilddaten wird seit über 20 Jahren von verschiedenen Forschungsgruppen untersucht. Dies hat zu einer großen Anzahl von Veröffentlichungen zu diesem Thema geführt. Im folgenden wird ein Überblick über die wesentlichen Forschungsrichtungen gegeben, die auf diesem Gebiet verfolgt wurden. Einleitend wird hierzu das Erscheinungsbild von Straßen in Luft- und Satellitenbilddaten dargestellt. Darauf aufbauend werden die verschiedenen Verfahren zur Extraktion von Straßen beschrieben. Hierbei wird eine Unterscheidung getroffen in Verfahren, die Straßen lokal oder das Straßennetz global modellieren sowie in Verfahren, die zusätzliche Informationen, meist GIS-Daten, verwenden. Im Anschluß werden Verfahren zur Bewertung der Extraktionsergebnisse vorgestellt. Das Kapitel wird durch eine Zusammenfassung und eine Diskussion abgeschlossen.

2.1 Straßen in optischen Luft- und Satellitenbilddaten

Allen im folgenden vorgestellten Verfahren ist gemeinsam, daß sie nicht für jedes Bild gleichermaßen geeignet sind. Entscheidend für die Anwendbarkeit der Verfahren ist das Erscheinungsbild der Straßen in den Bilddaten, das stark vom Kontext beeinflusst ist.

Schon (VAN CLEYNENBREUGEL et al. 1990, VAN CLEYNENBREUGEL et al. 1991) heben hervor, daß das globale Erscheinungsbild von Straßen sehr stark von der Landnutzung, der Geländeform und dem Verlauf von Gewässern, also der — auch großräumigen — Umgebung der Straßen, abhängt. In bergigen Gegenden verlaufen Straßen z.B. häufig entlang von Höhenlinien oder Bachläufen und weisen daher oft stärkere Krümmungen auf als Straßen in ebenem Gelände. Es wird daher vorgeschlagen, für die Extraktion von Straßen, je nach Umgebung, unterschiedliche Modelle zugrunde zu legen. Der Begriff „Umgebung“ wird später in (BAUMGARTNER et al. 1997, BORDES et al. 1997b) als globaler Kontext bezeichnet. Alle Straßenextraktionsverfahren sind in der Regel für bestimmte globale Kontextgebiete entwickelt oder sind zumindest nur in bestimmten globalen Kontextgebieten zufriedenstellend anwendbar. Dieser Aspekt wird zwar nur in wenigen Veröffentlichungen direkt angesprochen, ist aber oft aus der Extraktionsstrategie, den verwendeten Testdaten sowie den darauf erzielten Ergebnissen ableitbar. Wird der globale Kontext explizit angesprochen, so erfolgt oft eine Einteilung in die drei globalen Kontextgebiete „Wald“, „Siedlung“ und „offenes Gelände“ (siehe Abb. 2.1). In manchen Veröffentlichungen wird als viertes globales Kontextgebiet „Gewässer“ genannt.

Das lokale Erscheinungsbild von Straßen in optischen Luft- und Satellitenbildern ist im wesentlichen von drei Faktoren geprägt:

- Sensoreigenschaften, vor allem geometrische Auflösung
- Lokaler Kontext
- Straßenspezifische geometrische und radiometrische Parameter

In Bilddaten mit einer niedrigen Auflösung (z.B. einer Bodenpixelgröße von 3 m, siehe Abb. 2.2a) erscheinen Straßen als wenige Pixel breite Linien, wohingegen sie in Bilddaten mit hoher Auflösung (z.B. einer Bodenpixelgröße von 0.2 m, siehe Abb. 2.2b) flächenhaft erscheinen und Details wie Straßenmarkierungen usw. sichtbar sind.

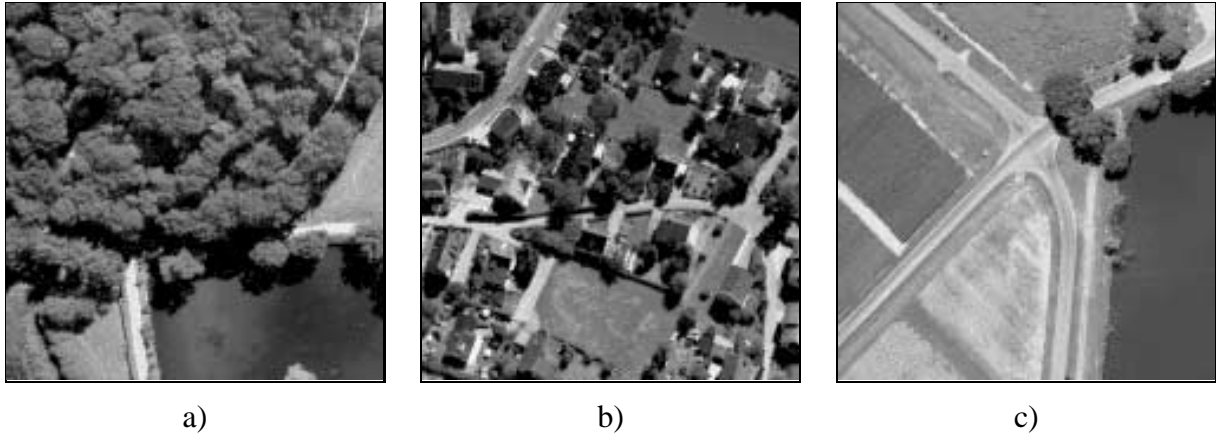


Abbildung 2.1. Beispiele für globalen Kontext: a) Wald, b) Siedlung, c) offenes Gelände



Abbildung 2.2. Beispiele für verschiedene Auflösungen: a) Niedrige Auflösung (3 m), b) Hohe Auflösung (0.2 m), Ausschnitt aus a)

Mit lokalem Kontext wird meist die nähere Umgebung der Straße bezeichnet bzw. Objekte die Einfluß auf das Erscheinungsbild der Straße haben. Solche Objekte sind z.B. Gebäude (siehe Abb. 2.3a) oder Bäume und Fahrzeuge (siehe Abb. 2.3b), die die Straße verdecken und/oder Schatten auf die Straße werfen. Auch der Kontrast zwischen Straße und Umgebung wird durch die der Straße direkt benachbarten Objekte mitbestimmt.

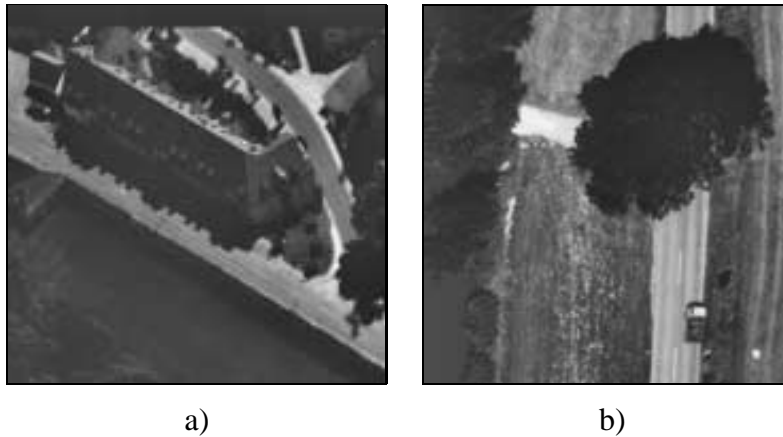


Abbildung 2.3. Beispiele für lokalen Kontext: a) Gebäude, b) Bäume und Fahrzeug

Straßenspezifische geometrische und radiometrische Parameter betreffen u.a. die Breite, Länge und Geradlinigkeit der Straßen und die Baumaterialien bzw. deren radiometrische Eigenschaften. Aus letzteren ergibt sich, zusammen mit den radiometrischen Eigenschaften der direkten Umgebung, der Kontrast zwischen Straßen und ihrer Umgebung (siehe Abb. 2.4). Liegen Farb- oder Multispektralbilder vor, kann der Kontrast in den einzelnen Kanälen variieren.

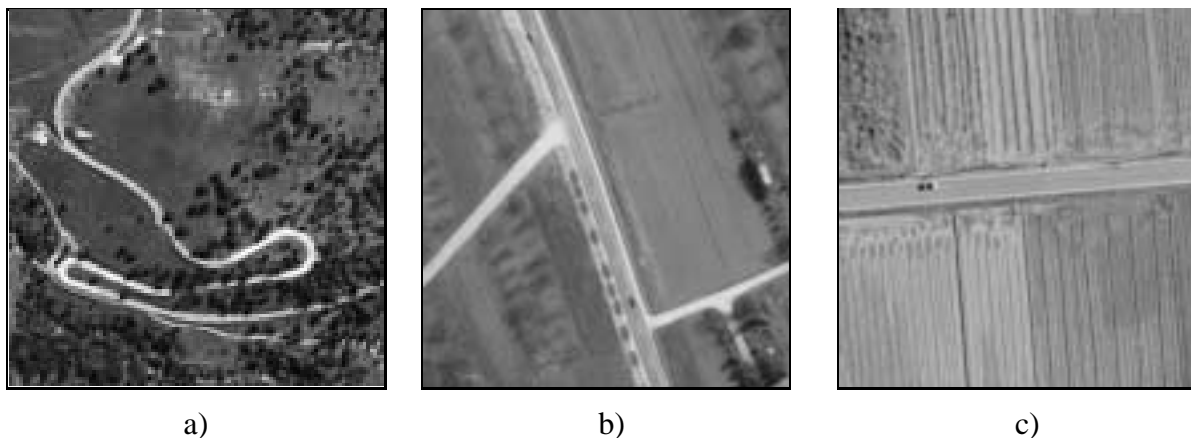


Abbildung 2.4. Beispiele für straßenspezifische Parameter: a) Starke Krümmung, heller als die Umgebung, b) Geradlinigkeit, heller bzw. dunkler als die Umgebung, c) Schwacher Kontrast zwischen Straße und Umgebung

Lokaler Kontext und straßenspezifische geometrische und radiometrische Parameter sind zum Teil stark vom globalen Kontext abhängig. Das heißt, durch die Angabe des globalen Kontextes sind Teile des lokalen Erscheinungsbildes beschrieben. Zum Beispiel ist im globalen Kontext „Wald“ mit starken Verdeckungen und Schattenwurf durch Bäume zu rechnen. Im globalen Kontext „Siedlung“ sind Straßen oft durch Fahrzeuge, Bäume und Gebäude verdeckt und das Straßennetz ist sehr engmaschig. Diese Objekte des lokalen Kontextes erschweren bzw. verhindern die Extraktion der Straßen, wenn sie nicht explizit modelliert werden. Im „offenen Gelände“ sind Verdeckungen usw. seltener. Dies ist der Grund, warum sich viele Arbeiten mit der Extraktion von Straßen im „offenen Gelände“ befassen.

2.2 Lokale Modellierung

Im Bereich der lokalen Modellierung existieren sehr viele verschiedene Ansätze zur Extraktion von Straßen. Daher wird die Darstellung dieser Ansätze nochmals unterteilt. Die Untergliederung erfolgt hierbei anhand der zur Extraktion verwendeten Methodik. Zuerst werden Verfahren der Straßenverfolgung vorgestellt, woran sich die Darstellung von Ansätzen anschließt, die Snake-basierte Verfahren verwenden. Danach werden Verfahren beschrieben, die im Wesentlichen auf der Gruppierung von Segmentierungsergebnissen (Linien, Kanten, usw.) basieren.

2.2.1 Straßendetektion und -verfolgung

Verfahren zur Straßenverfolgung benötigen immer einen Startpunkt und die Richtung der Straße in diesem Punkt. Diese Information kann manuell oder durch spezielle Verfahren zur Detektion von deutlichen Straßenstücken vorgegeben werden. Basierend auf dieser Information wird in einer gewissen Entfernung vom Startpunkt in der vorgegebenen Richtung ein neuer Straßenpunkt prädiert. Dieser wird auf Basis der Bilddaten verifiziert und in seiner geometrischen Position an die Bilddaten angepaßt. Wird der neue Straßenpunkt angenommen, dient er im nächsten Schritt als Startpunkt. Die neue Straßenrichtung wird aus den letzten Straßenpunkten bestimmt. Wird ein Straßenpunkt abgelehnt, können verschiedene Mechanismen, wie z.B. Variation der Schrittweite, Variation der Straßenrichtung oder Variation des zugrundeliegenden lokalen Straßenmodells, eingesetzt werden. Führt auch das nicht zum Erfolg, wird die Extraktion abgebrochen.

Ein sehr häufig zitierter Ansatz zur Straßenverfolgung stammt von (MCKEOWN und DENLINGER 1988). Er verwendet hochaufgelöste Bilddaten, in denen Straßen als langgestreckte, homogene Flächen mit parallelen Kanten erscheinen. Um ein zuverlässiges Ergebnis zu erhalten werden zwei unabhängige Straßenverfolger kombiniert. Der erste (QUAM 1978) basiert auf dem Grauwertprofil der Straßen und der zweite (NEVATIA und BABU 1980) auf den Straßenrändern, die sich oft als Grauwertkanten im Bild zeigen. Solange beide Verfolger innerhalb einer gewissen Toleranz identische Ergebnisse liefern, laufen sie unabhängig voneinander weiter. Unterscheiden sich die Ergebnisse, wird aufgrund interner Qualitätsmaße geprüft, welcher Verfolger mit höherer Wahrscheinlichkeit das richtige Ergebnis liefert. Der fehlgelaufene Verfolger wird dann auf dem Pfad des korrekten Verfolgers neu gestartet. Kann keiner der beiden Verfolger ein korrektes Ergebnis liefern, wird die Straßenverfolgung abgebrochen. Die Startpunkte für die beiden Straßenverfolger werden mit dem Verfahren von (AVIAD und CARNINE 1992) bestimmt. Neuere Entwicklungen (MCKEOWN JR. et al. 1996, HARVEY 1999) erlauben die Kombination von mehr als zwei unterschiedlichen Straßenverfolgern sowie die Straßenverfolgung im Objektraum. Durch die Kombination mehrerer komplementärer Verfahren wird die Extraktion stabiler. So ist es möglich, Straßen trotz kleinerer Störungen, z.B. durch Autos, zu verfolgen.

(TON et al. 1989) bestimmen potentielle Linienpixel durch Template-Matching. Ausgehend von Startpunkten werden die Linienpixel zu Pixelketten verbunden. Eine regelbasierte Bewertung und Vereinigung dieser Pixelketten führt zu Straßenstücken, die, wiederum basierend auf Regeln, in verschiedene Straßenklassen gruppiert werden. In Landsat TM Bilddaten mit einer Bodenpixelgröße von 30 m konnten damit breite Straßen in offenem Gelände relativ vollständig extrahiert werden.

(GEMAN und JEDYNAK 1993, JEDYNAK und ROZÉ 1995, GEMAN und JEDYNAK 1996) führen die Straßenverfolgung in SPOT Daten mit 10 m Bodenpixelgröße durch. Sie verwenden sehr einfache Methoden zur lokalen Suche nach linienhaften Strukturen. Diese werden einem komplexen, rekursiven Entscheidungsprozeß zugeführt, der zum Ziel hat, die Unsicherheit über den weiteren Verlauf der Straße zu minimieren. Ist die Straße lokal schlecht sichtbar, führt dies zu einer Aufweitung des Suchbereiches. Dabei werden zeitweise mehrere Pfade gleichzeitig verfolgt, von denen schließlich derjenige ausgewählt wird, für den die Unsicherheit über den weiteren Verlauf der Straße minimal ist. Auf diese Weise können Störungen überbrückt werden.

In (GROCH 1982) werden die Straßen in Bilddaten mittlerer Auflösung (z.B. bei einer Bodenpixelgröße von 2 m) im Anschluß an eine Extraktion von Startpunkten basierend auf dem Grauwertprofil verfolgt. Wird diese Verfolgung abgebrochen, wird eine größere Fläche nach der möglichen Weiterführung der Straße durchsucht. Können damit schlecht erkennbare Straßenstücke überbrückt werden, erfolgt die weitere Verfolgung wieder mittels des Grauwertprofils. Die Stärke dieses Ansatzes liegt in der Kombination von lokalen und regionalen Methoden innerhalb eines Straßenverfolgers.

Das von (BARZOHAR und COOPER 1995, BARZOHAR und COOPER 1996, BARZOHAR und COOPER 1997) für hochauflösende Bilddaten vorgeschlagene Straßenmodell entspricht etwa dem von (MCKEOWN und DENLINGER 1988) verwendeten Modell. Es wird hier durch Markov-Zufallsfelder realisiert. Straßen werden mittels einer lokalen Maximum A posteriori Probability (MAP) Schätzung detektiert und durch Verschiebung von Fenstern verfolgt. Als Ergebnis werden die Straßenränder bestimmt. Hat die Straße einen Mittelstreifen, so wird auch dieser erkannt.

2.2.2 Snakes

Snakes (KASS et al. 1987) sind Verfahren, mit denen z.B. lineare Strukturen in Bilddaten extrahiert werden können. Hierfür muß mindestens Anfangs- und Endpunkt der zu extrahierenden Struktur vorgegeben werden. Es wird dann eine Kurve bestimmt, die diese beiden Punkte optimal — in Bezug auf ein zugrundeliegendes geometrisches und radiometrisches Modell — miteinander verbindet. Der Kurve wird dabei eine Energie zugeordnet, die abnimmt, je besser die Kurve mit dem geometrischen (z.B. geringe Krümmung) und radiometrischen Modell (z.B. helle Linie in den Bilddaten) übereinstimmt. Die Gesamtenergie ist dabei die Summe der zwei Komponenten *innere Energie* (Geometrie) und *äußere Energie* (Radiometrie und ggf. zusätzliche vorgegebene Bedingungen). Die Optimierung, d.h. Minimierung der Energie, erfolgt iterativ. Snakes müssen in der Regel relativ genau initialisiert werden, da sonst bei der Optimierung nicht das globale Minimum gefunden wird. Diese Initialisierung erfolgt meist manuell durch das Angeben von Punkten, die in der Nähe des erwarteten Kurvenverlaufes liegen.

Die sogenannten Ziplock-Snakes (NEUENSCHWANDER et al. 1995), eine Variante der von (KASS et al. 1987) eingeführten Snakes, verringert das Initialisierungsproblem dadurch, daß die Optimierung schrittweise von den Endpunkten der Snake zur Mitte hin erfolgt. Bei diesem Vorgehen bestehen gewisse Parallelen zur Straßenverfolgung.

(TRINDER und LI 1995, GRUEN et al. 1995, GRUEN und LI 1996, GRUEN und LI 1997) verlagern die Optimierung der Snakes vom Bildraum in den Objektraum. Es können damit mehrere sich überlappende Bilder gemeinsam ausgewertet und damit dreidimensionale Koordinaten gewonnen werden. Die gemeinsame Verwendung mehrerer Bilder hat zudem den Vorteil, daß — weil Verdeckungen i.a. nicht in allen Bildern auftreten — eine korrekte Extraktion z.T. auch in Bereichen gewährleistet ist, die in manchen Bildern verdeckt sind.

die zu extrahierenden Objekte in mehreren Bildern abgebildet sind und dadurch eventuell auftretende Verdeckungen in einzelnen Bildern kompensiert werden können.

Durch die Initialisierung der Snakes durch zuvor extrahierte Bildprimitive umgehen (LAPTEV 1997, MAYER et al. 1998) die manuelle Initialisierung und setzen Snakes damit in einem vollautomatischen System ein (siehe auch Kapitel 2.2.3).

In (ZAFIROPOULOS und SCHENK 1998, ZAFIROPOULOS und SCHENK 1999) wird das Konzept der Snakes auf die Verwendung von Farbbildern erweitert. Hierfür wird ein Farbbild als eine Funktion angesehen, die die zweidimensionale räumliche Information (Pixelkoordinaten) in einen dreidimensionalen Farbraum (Intensität in den drei Farbkanälen rot, grün und blau) abbildet. In dem so definierten Vektorfeld wird die Stärke und Richtung des Gradienten berechnet.

2.2.3 Gruppierung

Das Ziel von Gruppierungsverfahren besteht darin, für aus den Bilddaten extrahierte Primitive wie z.B. Linien oder Kanten zu entscheiden, welche der Primitive dem gesuchten Objekt (z.B. dem Straßennetz) angehören und welche nicht. Die Primitive, die dem Objekt angehören, sollen zu möglichst zusammenhängenden Teilen verbunden werden. Die übrigen Primitive, die dem gesuchten Objekt nicht angehören, sollen eliminiert werden. In der Regel werden hierzu benachbarte Primitive basierend auf gewissen, meist geometrischen Kriterien daraufhin untersucht, ob sie zu einer Einheit verbunden werden können. Primitive, die nicht mit anderen Primitiven verbunden werden, werden oft als nicht dem Objekt angehörig angesehen und daher eliminiert.

In Bilddaten niedriger Auflösung, z.B. mit einer Bodenpixelgröße größer als 4 m, erscheinen die meisten Straßen als oft helle, wenige Pixel breite Linien. Deswegen werden in den Arbeiten zur Straßenextraktion die sich mit niedrig aufgelösten Bilddaten befassen, Straßen als Linien modelliert. In dieser Auflösung ist nur sehr wenig lokale Evidenz für Straßen vorhanden. Daher werden Attribute meist für ganze Linienstücke bestimmt und bei der Gruppierung berücksichtigt.

Die frühe Arbeit von (BAJCSY und TAVAKOLI 1976) zur Extraktion von Straßen besticht vor allem durch das umfassende Modell für den Inhalt der gesamten Szene. Hieraus werden die Straßen zur Extraktion ausgewählt. Aufgrund der Verwendung von Landsat-1-Daten mit einer Bodenpixelgröße von $57\text{ m} \times 79\text{ m}$ können allerdings nur sehr breite Straßen und auch diese nur als Linien erkannt werden. Dementsprechend einfach ist hier auch die Extraktionsstrategie, die sich im Wesentlichen auf die Extraktion und Verlängerung von Linien beschränkt. Interessant ist allerdings, daß schon in dieser frühen Arbeit explizit die Notwendigkeit einer gesonderten Extraktion von Kreuzungen angesprochen wird.

(WANG und NEWKIRK 1988, WANG et al. 1992) verwenden Landsat-TM-Daten mit einer Auflösung von 30 m. Auch hier erscheinen Straßen als Linien. Nach der Extraktion von Linienstücken mit den Attributen Länge, Richtung und mittlerer Grauwert werden die Linienstücke unter Berücksichtigung ihrer Attribute basierend auf Regeln verlängert und miteinander verbunden. Die dabei entstehenden Straßenstücke werden auf Basis der Attribute der Linien bewertet. Das Verfahren liefert gute Ergebnisse für relativ komplexe Bilddaten (Vorstadtbereich), in denen die Straßen allerdings breit und sehr hell erscheinen.

Das Straßenmodell von (BUSCH 1996) für multispektrale SPOT XS Daten mit einer Bodenpixelgröße von 20 m umfaßt neben der linearen Erscheinungsform der Straßen auch deren spektrale Eigenschaften. Straßen werden als Linien extrahiert. Diese können durch Verlängerung verknüpft werden. Größere Lücken werden nur geschlossen, wenn die Attribute, z.B. die spektralen Eigenschaften, der beiden zu verbindenden Linien übereinstimmen. Bei diesem Ansatz ist insbesondere die explizite Verwendung der spektralen Eigenschaften der zu extrahierenden Objekte zur Steuerung der Gruppierung hervorzuheben.

In (VASUDEVAN et al. 1988) werden Straßenstücke z.B. durch den in (FISCHLER et al. 1981) beschriebenen „Duda-Straßenextraktor“ extrahiert, der — maskenbasiert — lineare Strukturen mit homogenem Grauwert und hohem Kontrast zur Umgebung ermittelt. Benachbarte Straßenstücke werden lokal, basierend auf ihrer Nähe und Kollinearität, verknüpft. Durch die Auswahl von Ketten miteinander verknüpfter Straßenstücke wird das Straßennetz extrahiert.

(MUKHERJEE et al. 1994, MUKHERJEE et al. 1996) verwenden Satellitenbilddaten mit einer Bodenpixelgröße von etwa 10 m und modellieren Straßen als lange, dünne und geradlinige Linien mit homogenem Grauwert. Die Ergebnisse einer Template-basierten Linienextraktion werden durch lokale Gruppierung zu längeren Straßenstücken verknüpft. Liefert ein Sensor auch Infrarot(IR)-Daten, so werden diese trotz ihrer meist geringeren geometrischen Auflösung bevorzugt verwendet, da sich Straßen im IR-Kanal besonders gut abzeichnen.

In Ansätzen, die Bilddaten höherer Auflösung, z.B. gescannte Luftbilder mit einer Bodenpixelgröße von 0.25 m verwenden, erscheinen Straßen als flächenhafte Objekte. Hier werden häufig die Straßenränder als Grauwertkanten extrahiert und zu (anti-)parallelen bzw. rechtwinkligen Strukturen gruppiert, wie z.B. in (FORLANI et al. 1996). Nach einer relativ einfachen Kantenextraktion werden aus den Kanten aufgrund lokaler Kriterien wie Kollinearität, Parallelität oder Rechtwinkligkeit sich z.T. widersprechende Gruppen gebildet. Um die Mehrdeutigkeiten aufzulösen, werden die Gruppen hinsichtlich ihrer Länge, der Anzahl enthaltener Kanten und der Anzahl von Kanten, die auch in anderen Gruppen enthalten sind, untersucht. Gruppen, die aufgrund dieser Analyse wahrscheinlich keine Straßen darstellen werden eliminiert. Diese Extraktionsstrategie führt im offenen Gelände und bei gutem Kontrast zwischen Straßenfläche und Umgebung zu meist sehr guten Ergebnissen. Probleme treten aber in bebauten Gebieten auf, da hier aufgrund der meist rechtwinkligen Gebäude sehr viele parallele Kanten existieren und die Unterscheidung zwischen Straße und anderen Objekten schwierig wird. Auch Verdeckungen oder Schatten stören die Extraktion, da sie dazu führen, daß z.T. keine parallelen Kanten gefunden werden können.

Ein Ansatz, der verschiedene Auflösungsstufen verwendet und den Kontext berücksichtigt, wird in (MAYER et al. 1998, BAUMGARTNER et al. 1999b) vorgestellt. Mittels einer texturbasierten Analyse wird das Bild in die globalen Kontextregionen „Wald“, „Siedlung“ und „offenes Gelände“ unterteilt. Für die Straßenextraktion im offenen Gelände werden Linien in einem auflösungsreduzierten Bild (Bodenpixelgröße: 2 m) und Kanten im ursprünglichen Bild hoher Auflösung (Bodenpixelgröße: 0.2–0.5 m) extrahiert. Unter Verwendung beider Auflösungsstufen und expliziten Wissens über Straßen werden Hypothesen für Straßenabschnitte generiert. Diese werden in einem iterativen Verfahren lokal zu langen Straßenstücken gruppiert. Neben reinen Gruppierungsverfahren werden zum Schließen von Lücken auch Wissen über den lokalen Kontext und sogenannte „Ribbon“-Snakes genutzt (MAYER et al. 1997). Die Vernetzung der Straßenstücke erfolgt durch die Extraktion von Kreuzungen. Durch die Verwendung unterschiedlicher Auflösungsstufen und die explizite Modellierung von Kontext können sichere Straßenstücke gefunden werden, auch im Falle von Störungen durch Schatten oder Verdeckungen.

Sehr hochauflösende Bilddaten, z.B. mit einer Bodenpixelgröße von weniger als 0.1 m sowie ein digitales Oberflächenmodell (DOM) werden in (HINZ et al. 1999, HINZ und BAUMGARTNER 2000) zur Straßenextraktion in Städten verwendet. Durch eine Analyse des DOM werden potentielle Straßenregionen (Häuserschluchten) detektiert. Hier wird in den Bilddaten nach Markierungen gesucht, die zu Fahrspurbegrenzungen und anschließend zu Fahrbahnen gruppiert werden. Annähernd senkrecht zu den Fahrbahnen verlaufende Markierungen stellen Haltelinien an Kreuzungen dar und sind für eine korrekte Rekonstruktion der Kreuzungen wichtig. Durch die Extraktion von Fahrzeugen können Störungen der homogenen Straßenfläche erklärt werden. Durch die Verwendung der sehr hoch auflösenden Bilddaten ist es möglich, ein sehr detailliertes Ergebnis zu erzeugen, Straßen werden z.B. nicht durch ihre Mittelachse repräsentiert, sondern durch die einzelnen Fahrbahnen.

Ein Straßenmodell speziell für streng rechtwinklig angelegte Städte wie sie z.B. in Amerika anzutreffen sind, wird in (PRICE 2000, PRICE 1999) vorgeschlagen. Nach der Initialisierung einer Straßenmasche die einen Häuserblock umgibt werden die benachbarten Straßenmaschen hypothetisiert und anschließend in hochauflösenden Bildern basierend auf den Grauwertkanten verifiziert und geometrisch angepaßt. Durch die Verwendung mehrerer Bilder kann das Problem der Verdeckungen durch hohe Gebäude verringert werden, indem immer das Bild verwendet wird, in dem der jeweilige Straßenrand am besten sichtbar ist.

2.2.4 Weitere Ansätze

Aufgrund des flächenhaften Erscheinungsbildes von Straßen in Bilddaten höherer Auflösung, also mit einer Bodenpixelgröße von weniger als 0.5 m, gehen (ZHANG und BALTSAVIAS 1999) davon

aus, daß durch eine reine Linien- und/oder Kantenextraktion die Bildinformation nicht vollständig genutzt wird. Daher wird hier ein flächenbasiertes Vorgehen vorgeschlagen. Zuerst werden potentielle Straßenbereiche durch eine ISODATA Klassifikation (HALL und BALL 1965) bestimmt. Diese Bereiche werden durch mathematische Morphologie miteinander verknüpft (closing) oder eliminiert (opening). Im Ergebnis auftretende Lücken aufgrund von Schatten oder Verdeckungen werden durch nochmalige Analyse der ursprünglichen Klassifikationsergebnisse geschlossen. Die für Vorstadtbereiche dargestellten Ergebnisse sind semantisch sehr gut. Die geometrische Genauigkeit hingegen ist nur gering, sie könnte beispielsweise durch die explizite Extraktion der Straßenränder verbessert werden. Unklar ist, wie der Ansatz reagiert, wenn innerhalb eines Bildes Straßen mit unterschiedlichen Fahrbahnbelägen enthalten sind, die durch die ISODATA Klassifikation nicht einer Klasse zugeordnet werden können.

(SCHLÜTER 2000) schlägt vor, Straßen durch eine überwachte Multispektralklassifikation zu erkennen. Die hierfür notwendigen Trainingsgebiete werden automatisch aus den Bilddaten bestimmt. Hierzu werden zuerst Linien in einem auflösungsreduzierten Bild extrahiert. Solche Linien, die dem zugrundeliegenden Straßenmodell (Geradlinigkeit, Homogenität der Grauwerte, u.a.) entsprechen werden als Trainingsgebiete für die Klasse Straße verwendet.

2.3 Globale Modellierung

Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Verfahren, die auf einer lokalen Modellierung des Objekts Straße beruhen, wird in einigen Arbeiten hervorgehoben, daß eine korrekte Entscheidung aufgrund lokaler Kriterien oft nicht möglich ist. In (YUILLE und COUGHLAN 2000) wird dies für den in Kapitel 2.2.1 vorgestellten Ansatz von (GEMAN und JEDYNAK 1996) explizit nachgewiesen. Die im folgenden beschriebenen Ansätze basieren auf der Annahme, daß lokal lediglich Bewertungen vorgenommen werden können, Entscheidungen aber erst aufgrund globaler Kriterien getroffen werden dürfen. Ein solches Kriterium ist z.B. die Eigenschaft von Straßen, weit voneinander entfernte Orte zu verbinden.

2.3.1 Gruppierung

Der Ansatz von (FISCHLER et al. 1981, FISCHLER und WOLF 1983) wurde für Bilder niedriger Auflösung mit Beschränkung auf die offene Landschaft (Wiesen, Felder, Brachland, etc.) entwickelt. Straßen erscheinen in den verwendeten Bilddaten als Linien. Sie werden durch verschiedene Extraktoren, wie z.B. den in (FISCHLER et al. 1981) beschriebenen „Duda-Straßenextraktor“ erkannt. Die Extraktoren werden in zwei Typen unterschieden. Typ I Extraktoren extrahieren nur Straßen, d.h., das Ergebnis enthält keine Fehlextraktionen, dafür aber auch nicht alle Straßen. Typ II Extraktoren hingegen sollen alle Straßen finden, klassifizieren aber u.U. auch Bereiche als Straße, die keine sind. Zur automatischen Bestimmung des Suchbereichs werden die Ergebnisse der Typ I Operatoren zu Linien kombiniert, die mit relativ hoher Wahrscheinlichkeit Straßen entsprechen. Nahe beieinander liegende sichere Linien werden zu Clustern verknüpft in denen minimale spannende Bäume (siehe Anhang C) bestimmt werden. In diesen wird nach Pfaden maximaler Länge gesucht. Diese Pfade sind Hypothesen für Straßen und geben für die weitere Analyse den Suchbereich und die Anfangs- bzw. Endpunkte der Straßen vor. Um die in den Ergebnissen der Typ I Extraktoren fehlenden Straßenstücke aufzufüllen, werden die Ergebnisse der Typ II Extraktoren verwendet. Diese werden so normiert, daß sie in Bereichen, in denen sie mit den Ergebnissen der Typ I Extraktoren übereinstimmen, eine maximale Bewertung erhalten. Dann werden innerhalb des Suchbereichs zwischen Anfangs- und Endpunkt in allen Ergebnissen der Typ II Extraktoren mittels des sogenannten F^* -Algorithmus (siehe Anhang C.4.3.3) optimale Pfade bestimmt, von denen der mit den niedrigsten Kosten das endgültige Extraktionsergebnis darstellt. Um mehr als eine Straße in einem Bereich zu

extrahieren, werden bereits gefundene Straßen ausmaskiert. Die getrennt extrahierten Straßen werden durch Kreuzungen verbunden.

In (FISCHLER 1994, HELLER et al. 1998) wird der Ansatz von (FISCHLER et al. 1981) dahingehend erweitert, daß die aus Bilddaten niedriger Auflösung extrahierten Straßen in hochauflösenden Bilddaten verifiziert, attribuiert (z.B. Straßenbreite) und bewertet werden. Desweiteren ist eine interaktive Kontrolle des extrahierten Straßennetzes vorgesehen, bei der die Kreuzungen und die Straßenstücke einem Operateur aufgrund einer internen Bewertung so vorgelegt werden, daß einerseits Teile, die eher unsicher extrahiert wurden, zuerst bearbeitet werden und andererseits der Operateur möglichst effizient geführt wird. Für ein Testbeispiel wird die notwendige Interaktionszeit um den Faktor zehn kleiner angegeben, als die Zeit, die ein Operateur für eine komplett manuelle Erfassung der Daten benötigt.

In (MERLET und ZERUBIA 1993, MERLET und ZERUBIA 1996) wird der von (FISCHLER et al. 1981) verwendete F^* -Algorithmus um Cliques und Nachbarschaften höherer Ordnung erweitert. Hierdurch können Attribute wie Kontrast und Krümmung bestimmt und bei der Suche nach dem optimalen Pfad berücksichtigt werden.

In (STEGER et al. 1997) wird die Notwendigkeit einer globalen Gruppierung anstatt einer lokalen Bestimmung des Straßenverlaufs hervorgehoben. Zuerst werden Linien als potentielle Straßenstücke extrahiert. Jede mögliche Verknüpfung zwischen den Endpunkten von potentiellen Straßenstücken wird als Verknüpfungshypothese betrachtet. Jede Verknüpfungshypothese wird aufgrund von Kriterien wie Länge und Kollinearität (bezogen auf die zu verknüpfenden potentiellen Straßenstücke) bewertet. Ein gewichteter Graph wird aus den potentiellen Straßenstücken und den Verknüpfungshypothesen aufgebaut. Die Kosten der Kanten des Graphen werden aus der Länge der potentiellen Straßenstücke sowie aus der Bewertung der Verknüpfungshypothesen abgeleitet. Potentielle Straßenstücke am Bildrand werden als Startstücke verwendet. Zwischen jedem Paar von Startstücken wird der kürzeste Pfad durch den gewichteten Graphen bestimmt. Verknüpfungshypothesen und potentielle Straßenstücke werden nur dann in das endgültige Ergebnis übernommen, wenn sie auf einem dieser kürzesten Pfade liegen. Auf diese Weise wird die Auswahl der Straßenstücke und ihrer Verknüpfungen auf globaler Ebene durchgeführt. Durch die explizite Nutzung der Verbindungsfunktion von Straßen findet dieser Algorithmus auch Straßen in Bereichen, in denen lokale Gruppierungsalgorithmen versagen, z.B. bei lokalen Störungen des Erscheinungsbildes der Straße. Problematisch ist aber die Auswahl der Startstücke und die strenge Abhängigkeit von den extrahierten Linien. So wird beispielsweise nicht bewertet, wie gut die einzelnen Linien dem Straßenmodell entsprechen und es können keine Kreuzungen entlang einer durchgehend extrahierten Linie gebildet werden. Ein weiterer Schwachpunkt ist, daß die Verknüpfungshypothesen lediglich aufgrund geometrischer Kriterien bewertet werden, nicht jedoch aufgrund der Bilddaten.

(AMIR und LINDENBAUM 1998) formulieren eine globale Gruppierung als Problem der Zerlegung eines Graphen, das durch Clusterbildung gelöst wird. Verknüpfungshypothesen zwischen zwei Primitiven werden lokal mittels anwendungsabhängiger Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen bewertet. Eine sogenannte „Cue Enhancement Procedure“ verbessert die Bewertung einer Verknüpfungshypothese, wenn diese durch die Bewertung benachbarter Verknüpfungshypothesen unterstützt wird. Der resultierende gewichtete Graph wird schließlich durch eine Clusterbildung zerlegt. Die Auswahl von zuverlässigen Clustern basiert auf Schwellwertbildung.

2.3.2 Netzbildung

Eine wesentliche Eigenschaft von Straßen ist ihre Vernetzung untereinander. Die Vernetzung ist eine Folge der Funktion von Straßen, unterschiedliche Orte möglichst effizient miteinander zu verbinden. Ein wichtiges Element des Straßennetzes sind Kreuzungen, da diese die einzelnen Straßenstücke miteinander verknüpfen. In den bisher beschriebenen Ansätzen wird die Netzeigenschaft lediglich

durch die Forderung nach langen, zusammenhängenden Straßenstücken und/oder die lokale Generierung von Kreuzungen umgesetzt. In den folgenden Ansätzen wird hervorgehoben, daß durch diese Vorgehensweise die Netzwerkeigenschaften nicht ausreichend für die Extraktion genutzt werden.

Der sehr umfangreiche Ansatz von (RUSKONÉ et al. 1994, RUSKONÉ 1996) basiert im wesentlichen auf einer Straßenverfolgung. Er zeigt aber auch die Nutzung der Netzwerkeigenschaften für die Bildung des Straßennetzes auf. Zu Beginn werden in hochauflösenden Bilddaten schmale, langgestreckte Flächen, mit homogenem Grauwert bestimmt und als sichere Straßenstücke betrachtet. Die Mittelpunkte der gefundenen Straßenstücke dienen als Startpunkte für eine auf Homogenität basierende Straßenverfolgung. Dazu wird in Richtung der Straßenstücke ein Suchbaum mit Pfaden bestehend aus geraden Linien mit einer Länge zwischen 50 und 150 m generiert. Der Pfad, der ein Maximum an Homogenität, Langgestrecktheit und Geradheit bzw. Rechtwinkligkeit aufweist, wird als Straßenachse betrachtet. Anschließend werden Kanten detektiert und dazu verwendet, die Lage der Straßenachse zu verbessern, indem diese zwischen parallele Kanten eingepaßt wird. Die Verfolgung wird abgebrochen, wenn entweder die Pfade des Suchbaumes zu weit auseinanderlaufen (z.B. in einem homogenen Feld), oder wenn es keinen Pfad mit einer ausreichenden Homogenität gibt. Die durch die Verfolgung der Straße entstandenen Straßenstücke sind noch nicht miteinander verbunden. Zur Bildung der Topologie werden benachbarte und vor allem kollineare Linien miteinander verknüpft. Hierfür werden die Linien zuerst in Punkten mit hoher Krümmung aufgeschnitten. Danach wird für jedes resultierende Linienteil geprüft, ob es durch eine lokale Gruppierung mit einem anderen Linienteil verknüpft werden kann. Dieser Schritt muß iterativ durchgeführt werden, weil das Ergebnis einer Verknüpfung die Verknüpfung weiterer Linien ermöglichen kann. Die Konsistenz der Verknüpfungen wird aufgrund der Netzwerkeigenschaft von Straßen überprüft. Hierzu werden zwischen den Endpunkten einer Verknüpfung die zwei kürzesten Wege durch das Netzwerk bestimmt. Nur wenn der Weg über die neue Verknüpfung deutlich kürzer ist, als der nächstkürzeste Weg durch das Netzwerk, wird die Verknüpfung angenommen. Die zugrunde liegende Annahme ist dabei, daß in einem Straßennetz zwei benachbarte Punkte selten durch zwei nahezu gleich kurze Pfade verbunden sind. Zuletzt wird der lokale Kontext interpretiert. Die verknüpften Linien werden in kurze Stücke unterteilt, denen neben Straßenstück auch verschiedene andere Bedeutungen, wie z.B. Kreuzung, Schatten oder Baum, zugewiesen werden können.

2.4 Verwendung von GIS Information

Wie in Kapitel 2.1 bereits erläutert, spielen für die Extraktion von Straßen, neben den Straßen inhärenten Eigenschaften wie Geradlinigkeit, Parallelität der Ränder, Länge, etc., auch zusätzliche Informationen über den Kontext eine Rolle. Die Kontextinformation (lokal und global) kann entweder aus den Bilddaten extrahiert werden oder aus anderen Quellen stammen. Oft werden hier in GIS gespeicherte Informationen verwendet. Zusätzlich zu dieser Kontextinformation können aber auch Informationen über bereits erfaßte, gegebenenfalls zu aktualisierende Straßen aus GIS entnommen werden.

Vermehrt werden Verfahren entwickelt, die bestehende GIS Daten verwenden, um die Extraktion zu erleichtern. Ziel dieser Verfahren ist es, die bestehenden GIS Daten zu aktualisieren, d.h., ihre geometrische Genauigkeit zu verbessern, fehlerhafte GIS Daten zu eliminieren und fehlende Teile hinzuzufügen.

In (BORDES et al. 1995, BORDES et al. 1997a) wird die Genauigkeit und Zuverlässigkeit von GIS-Daten analysiert. Für die untersuchten Daten der französischen BDCarto (BDCARTO 2001) zeigt sich u.a., daß Straßensegmente geometrisch genauer sind als Kreuzungen. Dies liegt einerseits an der Generalisierung der Kreuzungen in BDCarto und andererseits daran, daß die Abweichung bei Straßenstücken nur in eine Richtung (senkrecht zur Straße) gemessen werden kann, bei Kreuzungen dagegen in 2D bestimmt wird. Die gewonnenen Erkenntnisse werden genutzt, um eine automatische

Extraktion von Straßen zu steuern. Dies erfolgt dadurch, daß als zuverlässig angesehene Teile der GIS-Daten auf Basis der Bilddaten geometrisch verbessert werden und dann als Startpunkte für eine Straßenverfolgung verwendet werden.

(KLANG 1998, FISET et al. 1996, FISET et al. 1998) verifizieren GIS-Daten dadurch, daß zuerst die Kreuzungen überprüft und geometrisch verbessert werden und im Anschluß daran die Straßenstücke, die die Kreuzungen verbinden. (KLANG 1998) führt eine Template-basierte Zuordnung der Kreuzungen durch und überprüft die Straßenstücke mittels Ziplock-Snakes (NEUENSCHWANDER et al. 1995). (FISET et al. 1996, FISET et al. 1998) führen die Zuordnung von Kreuzungen und Straßenstücken mittels einem künstlichen neuronalen Netz durch. Im Anschluß an die Überprüfung der alten GIS-Daten wird in beiden Fällen nach neuen Straßen gesucht, die mit dem alten Straßennetz verbunden sind.

In (SOLBERG 1992) wird ein System zur halbautomatischen Aktualisierung von GIS-Daten mittels Satellitenbilddaten beschrieben. Zuerst werden lineare Strukturen aus den Bildern extrahiert und mit den bestehenden Straßendaten verglichen. Linien, die mit den GIS-Daten übereinstimmen, werden eliminiert. Aus den verbleibenden Linien werden Hypothesen für neue Straßen bestimmt. Für die Aktualisierung ergeben sich somit vier unterschiedliche Klassen: (1) GIS-Daten sind unverändert, (2) GIS-Daten sind verändert, (3) GIS-Daten sind zu löschen und (4) neue Straßen sind einzufügen. Dem Operateur werden die vier Klassen farblich codiert dargestellt.

In (DHÉRÉTÉ und DESACHY 1999) wird die Genauigkeit der GIS-Daten durch Vergleich mit SPOT-Bilddaten verbessert. Die Ergebnisse mehrerer low-level Extraktoren werden mit den GIS-Daten — abhängig von dem Datentyp (Straße, Kanal, Eisenbahn) und der Sicherheit der GIS-Daten — mittels der Regel von Dempster-Shafer fusioniert. In dem Fusionsergebnis wird der beste Pfad durch Anwendung des F^* -Algorithmus bestimmt, der anschließend durch Snakes geglättet wird.

(WALTER 1998, WALTER 1999) generiert aus den GIS-Daten Trainingsgebiete für eine Multispektralklassifikation. Die Bilddaten werden anschließend klassifiziert und die Klassifikationsergebnisse mit den GIS-Daten verglichen. Abweichungen deuten auf Fehler in den GIS-Daten hin. Dieses Verfahren benötigt, vor allem für Straßen, eine ausreichende geometrische und radiometrische Auflösung der Bilddaten. Die notwendige geometrische Auflösung wird mit ≤ 2 m, die radiometrische mit ≥ 3 spektralen Kanälen, davon einer im nahen Infrarot, angegeben.

(DOUCETTE et al. 1999, DOUCETTE et al. 2000) verwenden künstliche neuronale Netze um lineare GIS-Daten geometrisch zu verbessern. Hierfür wird zuerst eine Multispektralklassifikation durchgeführt, um diejenigen Pixel zu bestimmen, die mit hoher Wahrscheinlichkeit auf den Straßen liegen. Die Initialisierung der künstlichen neuronalen Netze, die gewisse Ähnlichkeiten mit Snakes aufweisen, erfolgt dann durch die GIS-Daten. Als Ergebnis erhält man die geometrisch verbesserten Straßenachsen. Es erfolgt keine Überprüfung, ob die GIS-Daten semantisch korrekt sind.

(PLIETKER 1994) verifiziert GIS-Straßen indem er in hochauflösenden Bildern zur GIS-Straßenachse parallele Kanten sucht und zu Straßenrändern gruppiert. Wird ein gewisser Prozentsatz der Straßenränder gefunden, wird die GIS-Straße als unverändert angesehen.

In (DE GUNST 1996, VOSELMAN und DE GUNST 1997, DE GUNST et al. 1991) wird die Aktualisierung von GIS-Daten beschrieben. Hierzu werden die Bauvorschriften für Straßen als detailliertes Wissen über das gesuchte Objekt genutzt. Es kann gezeigt werden, daß dieses Wissen die Extraktion der gesuchten Objekte erleichtert.

Ein bisher nicht gelöstes aber wesentliches Problem dieser Ansätze ist, daß nicht klar ist, wie sich fehlerhafte GIS-Daten auf die Extraktionsergebnisse auswirken. Das bedeutet, daß die Abhängigkeit der extrahierten Daten, die zur Aktualisierung verwendet werden, von den zu aktualisierenden Daten nicht bekannt ist und daher bei der Aktualisierung nicht modelliert werden kann. Eine Möglichkeit zur Lösung dieses Problems ist die rigorose Modellierung der Unsicherheiten aller verwendeter Datenquellen und Verarbeitungsmethoden z.B. durch ein Bayes-Netz. Hierzu ist es allerdings notwendig, die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der GIS-Daten einerseits (BORDES et al. 1995) und

der Extraktionsergebnisse andererseits (HARALICK 1994, FÖRSTNER 1996) zu kennen. Werden zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommene Bilddaten verwendet, so sind überdies noch mögliche Veränderungen der Objekte zu modellieren.

2.5 Rekonstruktion von Kreuzungen

Bisher befassen sich relativ wenige Arbeiten mit der expliziten Modellierung von Kreuzungen. Die Problematik bei der Extraktion von Kreuzungen liegt hauptsächlich in der sehr großen Vielfältigkeit der Erscheinungsform von Kreuzungen. Dies führt dazu, daß das für die Extraktion einer Kreuzung nutzbare Vorwissen geringer ist als z.B. bei Straßen. So können Störungen wie Schatten oder Verdeckungen bei der Straßenextraktion teilweise aufgrund des Wissens über parallele Straßenränder und die Geradlinigkeit von Straßen überbrückt werden. Bei Kreuzungen ist in solchen Fällen aufgrund der schwächeren geometrischen Bedingungen oft nicht klar, ob es sich um eine Störung oder um den Straßenrand handelt.

(TEOH und SOWMYA 2000) verwenden ein regelbasiertes System zur Erkennung von Straßenkreuzungen in Luftbildern. Die Regeln betreffen Attribute wie die Anzahl der einmündenden Straßen, Grauwert- und Breitenunterschiede dieser Straßen sowie deren Abstände und Richtungsunterschiede. Die Wertebereiche für diese Attribute werden aus Trainingsdaten bestimmt. Da bisher nur sehr wenig Trainingsdaten verwendet und nur wenige Tests durchgeführt wurden, sind noch keine genauen Aussagen über die Qualität der Ergebnisse möglich.

In (BOICHIS et al. 1998, BOICHIS et al. 2000) wird ein wissensbasiertes System zur Extraktion von Straßenkreuzungen aus Luftbildern vorgestellt. Hypothesen für eine Kreuzung sowie für ihren Aufbau aus Hauptstraßen und Abzweigungen werden aus einem GIS entnommen und im Bild durch lokale Gruppierungsverfahren verifiziert und gegebenenfalls verändert. Insbesondere werden auch spezielle Kreuzungstypen wie der Kreisverkehr oder sich aufspaltende Straßen im Kreuzungsbereich modelliert. Die Methodik ist sehr erfolgversprechend, was durch die dargestellten Ergebnisse unterstrichen wird. Eine Schwachstelle ist, daß die Bildinformation relativ wenig genutzt wird. So wird u.a. bei der Rekonstruktion der Hauptstraßen keine Bildinformation aus dem engeren Kreuzungsbereich verwendet, sondern nur geometrisch interpoliert. Abzweigungen werden lediglich durch eine gerade Verlängerung der einmündenden Straße bis zum Schnittpunkt mit der Hauptstraße gebildet.

2.6 Externe Bewertung

Die Bewertung der Extraktionsergebnisse hat zum Ziel, Qualitätsmaße für die extrahierten Objekte bereitzustellen. Grundsätzlich wird dabei in interne und externe Bewertung unterschieden.

Die Aufgabe der internen Bewertung ist es, die geometrische und semantische Genauigkeit der extrahierten Objekte im Zuge der Extraktion mitzubestimmen. Diese Information muß also aus Redundanzen in den zur Extraktion verwendeten Daten abgeleitet werden. Damit ist die interne Bewertung ein integraler Bestandteil des jeweiligen Extraktionsverfahrens. Wichtig sind interne Qualitätsmaße insbesondere, wenn die Extraktionsergebnisse untereinander bzw. mit anderen Daten kombiniert werden sollen, z.B., wenn die Extraktionsergebnisse mit den Ergebnissen anderer Extraktionsverfahren fusioniert oder wenn sie zur Aktualisierung von GIS-Daten verwendet werden sollen. Auf die interne Bewertung wird in dieser Arbeit nicht näher eingegangen.

Bei der externen Bewertung werden für die Extraktionsergebnisse möglichst objektive, auf die tatsächlich vorhandenen Objekte bezogene Qualitätsmaße bestimmt. Dies erfolgt durch den Vergleich der Extraktionsergebnisse mit Referenzdaten, die geometrisch und semantisch von übergeordneter

Qualität sein müssen. Daher ist die externe Bewertung prinzipiell unabhängig von dem Extraktionsverfahren, d.h., daß Ergebnisse unterschiedlicher Extraktionsverfahren mit dem selben Bewertungsverfahren bewertet werden können. Externe Qualitätsmaße werden einerseits zum Vergleich unterschiedlicher Extraktionsverfahren verwendet (WIEDEMANN et al. 1998b), andererseits werden sie zur Bewertung der Qualität von Extraktionsergebnissen herangezogen, um Stärken und Schwächen der Verfahren deutlich zu machen und z.B. die Tauglichkeit der Verfahren für praktische Anwendungen zu überprüfen.

Neben der internen Bewertung wird auch die externe Bewertung der erzielten Extraktionsergebnisse immer wichtiger. Im wesentlichen gibt es hierfür zwei Gründe: Zum einen werden durch die externe Bewertung die Schwachstellen der Verfahren möglichst objektiv aufgedeckt, was zu gezielten Weiterentwicklungen und Verbesserungen führt. Zum anderen werden die Extraktionsverfahren in naher Zukunft ein Qualitätsniveau erreichen, das zumindest halbautomatische Verfahren für die Praxis interessant macht. Für die Einschätzung der Praxistauglichkeit von Extraktionsverfahren ist der Vergleich zu den bisherigen manuellen Erfassungsmethoden extrem wichtig. Für halbautomatische Verfahren sind neben der Bewertung der Extraktionsergebnisse auch die Zeitersparnis gegenüber einer rein manuellen Erfassung und die Nutzerfreundlichkeit des Programmes wesentliche Kriterien. Für vollautomatische Verfahren ist im wesentlichen eine Bewertung der erzielten Ergebnisse ausreichend.

In einem ersten Schritt müssen die extrahierten Daten den Referenzdaten zugeordnet werden. Dies kann manuell oder automatisch erfolgen. Automatische Zuordnungsverfahren reichen von einfachen, rasterbasierten Verschneidungen bis hin zu einer relationalen Zuordnung der Straßenstücke. Im zweiten Schritt können dann aus den Zuordnungsergebnissen die Qualitätsmaße abgeleitet werden. In praktisch allen Arbeiten, die sich mit der Bewertung von Straßenextraktionsergebnissen befassen werden die beiden Qualitätsmaße „Vollständigkeit“ und „Korrektheit“ verwendet. Vollständigkeit beschreibt dabei den Prozentsatz der Referenzdaten, die durch die Extraktion gefunden wurden, Korrektheit den Prozentsatz der extrahierten Daten, die mit den Referenzdaten übereinstimmen, also korrekt extrahierte Straßen darstellt. In manchen Arbeiten wird auch die Redundanz der Extraktion bestimmt. Die Redundanz gibt Auskunft darüber, ob Straßen teilweise doppelt bzw. mehrfach extrahiert wurden. Darüberhinaus werden z.T. noch weitere Qualitätsmaße wie „Qualität“, „Rank Faktor“ und „Branch Faktor“ bestimmt, die sich alle unter der Annahme, daß die Extraktion nicht redundant ist (Redundanz = 0) aus der Vollständigkeit und der Korrektheit direkt berechnen lassen. Ihr Vorteil liegt darin, daß sie Vollständigkeit und Korrektheit in einem Maß vereinigen. Der Vorteil, Vollständigkeit und Korrektheit getrennt anzugeben, liegt darin, daß es sich hier um sehr intuitive Maße handelt, die sofort zu einer relativ guten Einschätzung der Qualität der Extraktionsergebnisse führen. Desweiteren wird häufig die geometrische Genauigkeit der Extraktion durch die Root-Mean-Square (RMS) der Differenzen angegeben.

Im folgenden werden Besonderheiten der einzelnen Arbeiten zur externen Bewertung von Straßenextraktionsergebnissen angesprochen.

In (HELLER et al. 1998) wird zusätzlich zu Vollständigkeit, Korrektheit und Qualität auch die Zeitersparnis erfaßt, die sich gegenüber einer rein manuellen Erfassung der Straßen ergibt. Für das vorgestellte Extraktionssystem (siehe auch Kapitel 2.3.1) wird bei einem Bild mittlerer Komplexität eine Zeitersparnis vom Faktor 10 angegeben.

In (FUA 1996, FUA 1997, FUA und BRECHBÜHLER 1996, FUA 1998) wird der Aufwand der Interaktion durch Zählen der Mausklicks gemessen.

(CMU 1997, HARVEY 1999, SHUFELT 1999) beschränken sich auf die oben genannten Maße Vollständigkeit, Korrektheit und Qualität bzw. Rank Faktor und Branch Faktor, da sie die Ergebnisse vollautomatischer Systeme bewerten. Die Zuordnung erfolgt durch Verschneidung der extrahierten Straßenstücke mit einer Maske um die Referenz (Puffer). Liegt ein extrahiertes Straßenstück zu mindestens 75% innerhalb des Puffers, wird es als korrekt angesehen. In (GUÉRIN et al. 1995, AIRAULT et al. 1996, RUSKONÉ 1996) erfolgt die Zuordnung entsprechend, nur werden hier die

extrahierten Straßen vor der Zuordnung in 10 m lange Stücke unterteilt. Hier werden die o.g. Maße teilweise auch für Kreuzungen bestimmt.

In (GOODCHILD und HUNTER 1997) wird die Zuordnung von Extraktion und Referenz durch Standard-GIS-Funktionen rasterbasiert implementiert. Aus den Zuordnungsergebnissen werden Vollständigkeit und Korrektheit berechnet, was eine schnelle Überprüfung neuer, in den GIS-Datenbestand zu übernehmender Datensätze ermöglicht.

2.7 Zusammenfassung

Die Darstellung der in der Literatur beschriebenen Ansätze zur Extraktion von Straßen aus digitalen Bildern zeigt, daß eine Vielzahl von Verfahren — sowohl für Satellitenbilddaten als auch für Luftbilder — existiert. In letzter Zeit kommen immer mehr Verfahren dazu, welche zusätzliche Informationen, z.B. Kontext oder Wissen über vorhandene Straßen, benutzen. Die Verwendung dieser Informationen kann die Extraktionsergebnisse verbessern.

Insgesamt läßt sich feststellen, daß die Modellierung der Straßen und die Extraktionsstrategie von der Auflösung der verwendeten Bilddaten abhängt. Für die Extraktion aus hochaufgelösten Luftbildern werden die Straßen häufig über ihre Ränder, die dazwischenliegende Fläche sowie ggf. den lokalen Kontext oder Details wie Markierungen beschrieben. Im Rahmen der Extraktion werden hauptsächlich Grauwertkanten bzw. homogene Flächen gesucht, die nach meist lokalen Kriterien zu Straßenstücken gruppiert werden. Für niedrig aufgelöste Bilddaten werden die Straßen als dünne lineare Objekte modelliert, die als Linien aus den Bildern extrahiert werden. Bei der Gruppierung der Linien zu längeren, zusammenhängenden Straßen werden erste Versuche unternommen, globale Aspekte der Straßen, wie ihre Verbindungsfunktion und die Netzwerkeigenschaften, zu nutzen. Diese Aspekte werden aber bisher nur unzureichend modelliert und für die Extraktion verwendet. Insbesondere für die Extraktion von Straßen aus Satellitenbilddaten sind globale Aspekte von sehr hoher Bedeutung, da die lokale Evidenz für Straßen aufgrund der geringen geometrischen Auflösung der Bilddaten nur schwach ist. Aber auch für die Extraktion von Straßen aus hochaufgelösten Bilddaten bringt die Nutzung der Netzwerkeigenschaften zusätzliche Information, die die Extraktionsergebnisse verbessern kann.

Ein Ansatz für die Verwendung der Netzwerkeigenschaften ist in (RUSKONÉ et al. 1994, RUSKONÉ 1996) zu finden. Allerdings erfolgt die Generierung der Verknüpfungshypothesen — wie in den anderen Ansätzen auch — auf Basis lokaler, geometrischer Kriterien. Lediglich für die Verifikation der Verknüpfungshypothesen wird die Netzwerkeigenschaft der Straßen verwendet. In (STEGER et al. 1997) wird die Verbindungsfunktion der Straßen hervorgehoben und mittels einer globalen Gruppierung für die Straßenextraktion verwendet. Auch hier werden die Verknüpfungshypothesen lokal generiert und bewertet, um dann auf der Basis globaler Kriterien verifiziert zu werden. Die bisherigen Arbeiten legen nahe, der Frage nachzugehen, ob eine explizite Nutzung der Netzwerkeigenschaften von Straßen ihre Extraktion tatsächlich verbessert.

Desweiteren ist festzustellen, daß die Qualität der Ansätze oft nur durch die Darstellung von Extraktionsergebnissen, die den Bilddaten überlagert sind, erkennbar ist. Eine quantitative Bewertung im Vergleich zu Referenzdaten wird noch selten durchgeführt. Da die Netzwerkeigenschaften der Straßen für die Extraktion bisher nur unzureichend genutzt werden, ist verständlich, daß die Extraktionsergebnisse auch diesbezügliche nicht bewertet werden.

3. Vorläufige Extraktion von Straßennetzen aus optischen Satellitenbilddaten

Ziel der vorläufigen Extraktion des Straßennetzes ist es, unter Verwendung der einzelnen Komponenten des Straßenmodells große Teile des Straßennetzes möglichst vollständig und korrekt zu extrahieren.

Wie im vorausgegangenen Kapitel dargestellt wurde, erscheinen Straßen in Satellitenbilddaten in der Regel als lineare Strukturen. Um die Erscheinungsform von Straßen in Satellitenbilddaten zu präzisieren, wird in diesem Kapitel ein Straßenmodell für Satellitenbilddaten aufgestellt, das neben lokalen (radiometrischen) und regionalen (geometrischen) auch globale (funktionale und topologische) Eigenschaften des Straßennetzes beschreibt.

Für die Extraktion des Straßennetzes werden zuerst Linien aus den Bilddaten extrahiert. Dann werden diejenigen Linien ausgewählt, die mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit Straßen darstellen. Diese ausgewählten Linien werden unter Verwendung der übrigen Linien zu einem Netzwerk verbunden. Die vorläufige Extraktion wird daher als Gruppierung beschrieben. Hierzu wird ein Algorithmus zur Gruppierung linearer Strukturen vorgeschlagen, der nicht nur lokale Gruppierungskriterien wie Entfernung und Kollinearität, sondern auch globale Verbindungseigenschaften berücksichtigt. Der Algorithmus ist eine Weiterentwicklung des in (STEGER et al. 1997) beschriebenen und in Kapitel 2 diskutierten Verfahrens.

Im Anschluß wird die Extraktionsstrategie erläutert, d.h., es werden die einzelnen Schritte der vorläufigen Extraktion dargestellt.

3.1 Modell für Straßennetze in optischen Satellitenbilddaten

Im Webster's Dictionary (WEBSTER'S 1913) ist eine Straße folgendermaßen beschrieben:

A road is "a place where one may ride; an open way or public passage for vehicles, persons, and animals; a track for travel, forming a means of communication between one city, town, or place, and another"

Diese Definition ist überwiegend von funktionalen Beschreibungen gekennzeichnet, wie z.B. daß eine Straße befahren werden kann oder daß sie als Transportweg und Kommunikationsmittel dient. Für die Ableitung eines Straßenmodells ist diese Beschreibung alleine jedoch nur bedingt tauglich, da die Funktionalität im Bild nicht direkt sichtbar ist. Doch lassen sich aus den funktionalen Merkmalen einer Straße in Verbindung mit Wissen über die reale Welt geometrische, radiometrische und topologische Merkmale ableiten. Das Straßenmodell für die reale Welt enthält folgende Komponenten:

1. Straßen besitzen eine **annähernd konstante, nach oben und unten begrenzte Breite**, da sie einerseits üblichen Verkehrsmitteln ausreichend Platz bieten müssen und andererseits topographische, ökonomische und ökologische Bedingungen einen übermäßigen Ausbau einschränken.
2. Straßen besitzen einen **harten Ober- und Unterbau**, da sie Transportlasten standhalten müssen.
3. Straßen sind **statische Objekte** und unterliegen in funktionstüchtigem Zustand meist keiner signifikanten Veränderung.
4. Straßen besitzen eine **glatte und homogene Oberfläche**, da sie sonst nicht so gut von Fahrzeugen befahrbar wären.
5. Straßen sind **langgestreckt**, da sie als Verbindungswege dienen.

6. Straßen sind aus ökonomischen und technischen Gründen **geradlinig** mit einer **beschränkten Krümmung**.
7. Straßen sind aus technischen Gründen **nahezu eben** (geringe Steigung).
8. Straßen treten in Relation mit benachbarten Objekten wie Siedlungsbereichen, unbebautem Gelände, Fahrzeugen, Markierungen usw. auf (**lokaler Kontext**).
9. Straßen bilden ein **hierarchisches Netzwerk**, das verschiedene Orte in Abhängigkeit ihrer Bedeutung miteinander verbindet.
10. Die Erscheinungsform von Straßen ist abhängig von ihrer großräumigen Umgebung, z.B. Gebirgsregionen, Steppenlandschaften oder Ballungszentren (**globaler Kontext**).

Geht man von diesem Straßenmodell für die reale Welt auf ein Straßenmodell für Bilddaten über, sind die Sensoreigenschaften zu berücksichtigen. Die geometrischen Merkmale können bei bekannter Abbildungsgeometrie in den Bildraum übertragen werden. Physikalische Eigenschaften werden teilweise durch die Radiometrie erfaßt. Allerdings ist die differenzierte Erkennung von physikalischen Stoffen in Bildern anhand ihres spezifischen Reflexionsverhaltens wegen vieler Effekte, wie z.B. dem Einfluß der Atmosphäre, Mischpixel u.a., auch bei Verwendung vieler spektraler Kanäle, schwierig (ALBERTZ 1991). Auch in (HAZARIKA et al. 2000) wird hervorgehoben, daß die räumliche Auflösung für die Erkennbarkeit von Straßen wichtiger ist, als die spektrale Auflösung. Die Topologie kann, da nur ein Ausschnitt des Straßennetzes im Bild erscheint, durch die Abbildung verändert werden.

Überträgt man das oben beschriebene Straßenmodell für die reale Welt in ein Straßenmodell für optische Satellitenbilddaten, ergeben sich folgende Modellkomponenten (Numerierung wie oben):

1. Mit Kenntnis der Bodenpixelgröße ergeben sich **schmale Linien mit konstanter, näherungsweise bekannter Breite**. Allerdings muß wegen der niedrigen Auflösung von Satellitenbilddaten mit Mischpixeln und einer relativ schlechten Bestimmbarkeit der Linienbreite gerechnet werden.
2. Ein harter Ober- und Unterbau bedeutet, daß nur bestimmte Baumaterialien in Frage kommen, die im Bild wiederum bestimmte spektrale Eigenschaften besitzen. Dies entspricht Kriterien für **absolute Grauwertbereiche**. Wie oben bereits erwähnt, ist dies als wenig stabil anzusehen. Daher wird im weiteren auf die Verwendung absoluter Grauwertbereiche verzichtet.
3. Von der Tatsache, daß Straßen unbewegte Objekte sind, kann durch die **Verwendung verschiedener Bilder**, die zu unterschiedlichen Zeiten aufgenommen wurden („multitemporal“), Gebrauch gemacht werden. Diese Möglichkeit wird in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.
4. Eine glatte und homogene Oberflächenstruktur ist hauptsächlich durch wenig Textur, d.h., entlang der Straße durch **homogene Grauwerte** gekennzeichnet.
5. Aufgrund ihrer Langgestrecktheit erscheinen Straßen im Bild als **lange Linien**.
6. Die Krümmung bleibt bei Senkrechtaufnahmen von nicht allzu bewegtem Gelände näherungsweise erhalten. Satellitenbilder können diesbezüglich als weitgehend verzerrungsfrei betrachtet werden. Daher sind die Linien **geradlinig** und haben eine **beschränkte Krümmung**.
7. Die Neigung der Straßen ist nicht direkt aus den Bildern ersichtlich. Sie kann aber unter Verwendung eines aus mehreren Bildern abgeleiteten **digitalen Oberflächenmodells (DOM)** bzw. eines bereits vorhandenen DOM bestimmt werden. In diesem Ansatz wird kein DOM verwendet, da die Einbeziehung zusätzlicher Daten nicht Ziel dieser Arbeit ist.
8. Relationen zwischen Straßen und benachbarten Objekten (**lokaler Kontext**) zeigen sich auch in Bildern. Dies explizit zu nutzen, setzt allerdings die Erkennung der Objekte voraus, was aus Satellitenbildern wegen der geringen Auflösung z.T. äußerst schwierig zu automatisieren ist. Daher wird dies hier nicht eingesetzt.

9. Die Linienstücke, die das Straßennetz formen, sind topologisch derart miteinander verknüpft, daß die funktionale Eigenschaft von Straßen als **Verbindung bedeutungsvoller Punkte** erfüllt ist. Da im Rahmen dieser Arbeit keine Extraktion von Ortschaften erfolgt, kommt deutlich erkennbaren **Straßenstücken** und ihren Verbindungen dabei große Bedeutung zu. Außerdem ist zu beachten, daß im Bild nur ein Ausschnitt der realen Welt und damit auch nur ein Ausschnitt des Straßennetzes dargestellt wird. Der abgebildete Teil des Straßennetzes kann daher in mehrere Zusammenhangskomponenten zerfallen, die im Bild nicht miteinander verbunden sind. Die Hierarchie der Straßen wird in dieser Arbeit nicht betrachtet.
10. Der in verschiedenen großräumigen Umgebungen (**globaler Kontext**) typische Straßencharakter wird durch eine **Anpassung des Straßenmodells** an das verwendete Bildmaterial repräsentiert. Dies kann über veränderte Parametereinstellungen erfolgen.

Betrachtet man die Modellkomponenten des Straßenmodells für optische Satellitenbilddaten genauer, so stellt man fest, daß sie sich in drei Gruppen bzw. Ebenen einteilen lassen:

Die lokale Ebene (Modellkomponenten 1–3) beschreibt die Eigenschaften einzelner Pixel, wie z.B. den Grauwert oder ob sie Teil einer Linie (Linienpixel) sind. Auf der regionalen Ebene (Modellkomponenten 4–8) werden geometrische und radiometrische Eigenschaften für zusammenhängende Folgen von Linienpixeln (Linien) betrachtet und auf der globalen Ebene (Modellkomponenten 9–10) die funktionale Eigenschaft, daß Straßen verschiedene Orte miteinander verbinden und ihr Erscheinungsbild vom globalen Kontext abhängt.

Lokal spielt die Linienhaftigkeit die größte Rolle. Eine Straße wird hier als Linie einer bestimmten Breite modelliert. Diese Linie kann heller oder dunkler als die Umgebung sein.

Auf regionaler Ebene wird das *Straßenstück* eingeführt. Es stellt ein Stück Straße einer gewissen Länge durch eine Linie, also eine Folge von Linienpixeln, wie sie auf lokaler Ebene definiert wurden, dar. Da es neben Straßen viele andere lineare Strukturen gibt, werden Attribute wie Länge, Breite, Geradlinigkeit, Helligkeit, usw. zur Charakterisierung der Straßenstücke verwendet. Liegen Straßenstücke vor, die aus anderen Quellen, z.B. einer Extraktion aus höher aufgelösten Bilddaten, stammen, können auch diese Straßenstücke verwendet werden (HINZ et al. 1999).

Global werden Straßen durch ihre Funktion beschrieben, d.h., dadurch, daß sie verschiedene Orte miteinander verbinden. Dabei bilden sie ein Straßennetz. Allerdings kann dieses Straßennetz innerhalb eines Bildes in mehrere Teilnetze zerfallen, da das Bild nur einen Ausschnitt aus dem gesamten Netzwerk abbildet.

3.2 Algorithmus zur Gruppierung linearer Strukturen

3.2.1 Anforderungen an die Gruppierung linearer Strukturen

Die aus digitalen Bildern extrahierten linearen Strukturen (Linien) sind im allgemeinen fragmentiert, d.h., sie weisen Lücken (false negatives) in Bezug auf das gesuchte Objekt auf. Das bedeutet, sie umfassen nicht das gesamte Objekt, gleichgültig wie aufwendig die Linienextraktion ist. Oft sind Verdeckungen durch andere Objekte oder fehlender Kontrast in Bezug auf die Umgebung die Ursache hierfür. In der Regel kann der Extraktionsalgorithmus solche Probleme nicht lösen, da sie nicht in seinem low-level Modell der Linie enthalten sind. Desweiteren werden neben den gesuchten auch andere Objekte extrahiert, die eine ähnliche Erscheinungsform haben (false positives).

Die Gruppierung von linearen Strukturen hat daher zwei Ziele: Einerseits soll das gesamte Objekt so gut wie mögliche aus den extrahierten Linien rekonstruiert werden. Das bedeutet, daß die korrekt extrahierten Strukturen untereinander verknüpft werden müssen, um die Lücken zu überbrücken.

Andererseits sollen die zuviel extrahierten Linien eliminiert werden. Der Algorithmus muß die Linien sorgfältig auswählen, die er dem Endergebnis hinzufügt.

Viele der Gruppierungsalgorithmen, die in Kapitel 2 beschrieben wurden, verknüpfen sämtliche Linien in allen möglichen Kombinationen lediglich auf Basis lokaler Kriterien wie Entfernung und Kollinearität sowie unter der Verwendung fester Schwellwerte. Das Problem dieser Ansätze ist, daß es manchmal nahezu unmöglich ist, auf lokaler Basis zu entscheiden, welche Linien verknüpft werden sollen. Abbildung 3.1 stellt eine hierfür typische Situation dar. Unter der Annahme, daß die obere Linie in der Bildmitte ein false positive ist, würde ein typischer Gruppierungsalgorithmus, je nach Wahl der Schwellwerte, entweder zwei Verbindungen zwischen den Punkten A und B erstellen, oder keine. Das Ergebnis enthält daher entweder zu viele Linien und Verknüpfungen oder zu wenige.

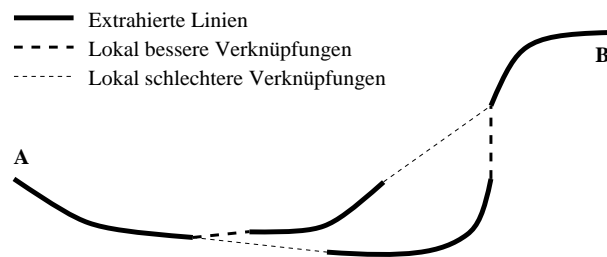


Abbildung 3.1. Mögliche Probleme, die auftreten, wenn lineare Strukturen basierend auf lokalen Kriterien und festen Schwellwerten gruppiert werden. (Aus: (STEGER et al. 1997))

Dieses Problem läßt sich durch die Verwendung der Verbindungsfunktion lösen, d.h. durch das Wissen, daß in Abb. 3.1 eine Verbindung existiert, über die man von A nach B gelangen kann. Diese Verbindungsfunktion ist insbesondere für die in dieser Arbeit betrachteten Straßennetze von großer Bedeutung. Die Frage, welches der richtige Weg von A nach B ist, kann durch eine lokale Bewertung der Linien und Verknüpfungen sowie eine anschließende globale Suche nach der besten Verbindung beantwortet werden. Damit hängt die Entscheidung, ob zwei Linien verknüpft werden, von dem gesamten Ergebnis der Linienextraktion ab.

Aus dem bisher Genannten werden folgende Anforderungen an einen Gruppierungsalgorithmus abgeleitet:

- Feste Schwellwerte sollen vermieden werden. Statt dessen sollen sowohl die extrahierten Linien wie auch die ggf. einzufügenden lokalen Verknüpfungen (Verknüpfungshypothesen) durch ein Qualitätsmaß bewertet werden.
- Sowohl für die Bewertung der Linien als auch für die Bewertung der Verknüpfungshypothesen sind die Bewertungskriterien aus einem Objektmodell abzuleiten.
- Die Gruppierung der Linien soll die Verbindungsfunktion berücksichtigen.

Die grundlegende Idee ist, daß lokal lediglich Bewertungen vorgenommen werden und Entscheidungen erst auf globaler Ebene getroffen werden. Basierend auf den Bewertungen der Linien und der Verknüpfungshypothesen soll der Algorithmus optimale Pfade zwischen Linien, die mit hoher Wahrscheinlichkeit dem Objekt angehören (Startstücke), extrahieren. Da die Qualitätsmaße bewerten, wie gut eine Linie dem (Straßen-)Modell entspricht, d.h. zu dem gesuchten Objekt paßt, wird angenommen, daß der extrahierte, bezüglich den Bewertungen optimale Pfad zwischen den Startstücken auch dem Objekt angehört. Das Ergebnis ist dann eine Teilmenge der extrahierten Linien, die untereinander verknüpft sind.

Bevor das Vorgehen für die Bewertung der Linien und der Verknüpfungshypothesen dargestellt werden kann, muß festgelegt werden, wie die Objektteile repräsentiert werden. Für viele Objekte,

wie z.B. dem Straßennetz, ist ein Graph, dessen Knoten die Endpunkte der Linien und dessen Kanten die Linien selbst bzw. die Verknüpfungshypothesen sind, eine natürliche Repräsentationsart. Diese Repräsentationsart ist für alle Auflösungsstufen gültig und hat daher den Vorteil, daß Objektteile, die in unterschiedlichen Auflösungen extrahiert wurden, einfach fusioniert werden können.

Basierend auf dieser Datenstruktur sind die zu bewertenden Elemente alle Knotenpaare des Graphen. Das Ziel dabei ist, unter Anwendung verschiedener Kriterien zu testen, ob zwei Knoten miteinander verbunden sind und wie gut diese Verbindung mit dem Objektmodell übereinstimmt. Die Verbindung kann dabei entweder durch eine Linie oder eine Verknüpfungshypothese realisiert sein. Die zur Anwendung kommenden Kriterien müssen eine Bedeutung in Bezug auf das Objekt haben. Darüberhinaus sollte die Bewertung nicht in einem einzigen, komplexen Schritt, sondern in modularer Weise erfolgen, so daß weitere Kriterien einfach hinzugefügt werden können, wenn entsprechende Informationen verfügbar sind.

3.2.2 Qualitätsmaße für Linien und Verknüpfungen

Aufgrund der oben gestellten Anforderungen wurde die *Fuzzy Set* Theorie (ZADEH 1965, ZADEH 1989, MENDEL 1995) als Methode zur Bewertung der Verbindungen gewählt. Durch die *Fuzzy Set* Theorie wird die Art und Weise angenähert, wie ein Mensch das Problem angehen würde (siehe Anhang B). Zum Beispiel ist das Kriterium der Entfernung eine typische Fuzzy-Variable. Am Beispiel der Straßennetze sind zwei Knoten im Hinblick auf eine einzufügende Verknüpfungshypothese sicherlich nahe beisammen (Fuzzy-Wert 1) wenn sie maximal 10 m voneinander entfernt sind, wogegen sie mit Sicherheit nicht nahe beisammen sind (Fuzzy-Wert 0), wenn sie mehr als 100 m auseinander liegen. Zwischen diesen beiden Extremen fällt der Fuzzy-Wert für die Entfernung von 1 nach 0 ab. Eine Fuzzy-Funktion ist daher ein ideales Mittel, um solche unscharfen Kriterien zu modellieren (MENDEL 1995). Darüberhinaus hat die Fuzzy-Theorie den Vorteil, daß unterschiedliche Kriterien sehr leicht kombiniert werden können. Die Verwendung der Fuzzy *und*, *oder* und *nicht* Operatoren erleichtert die Modularisierung der gesamten Bewertung.

Eine Fuzzy-Relation R für die Gesamtheit aller Knotenpaare (V, V) des Graphen wird folgendermaßen definiert:

$$R(V, V) = \{((v_i, v_j), \mu_R(v_i, v_j)) \mid (v_i, v_j) \in V \times V\} , \quad (3.1)$$

wobei $\mu_R(v_i, v_j)$ eine Fuzzy-Funktion beschreibt, die die Qualität der Verbindung zweier Knoten im Graphen bewertet. Das heißt, jeder Verbindung wird ein Fuzzy-Wert $r_{i,j} = \mu_R(v_i, v_j) \in [0, 1]$ zugewiesen. Wie oben beschrieben kann $\mu_R(v_i, v_j)$ eine Kombination unterschiedlicher Kriterien sein, z.B. absolute Entfernung (A), relative Entfernung (B) und Kollinearität (C). Diese Kombination kann z.B. als $\mu_R(v_i, v_j) = \mu_A(v_i, v_j) \wedge \mu_B(v_i, v_j) \wedge \mu_C(v_i, v_j)$ dargestellt werden, wobei \wedge den Fuzzy *und* Operator beschreibt.

Mit dieser Fuzzy-Relation wird ein gewichteter Graph aufgebaut. In einem ersten Schritt werden hierfür nur die Linien verwendet und in einem zweiten Schritt die Verknüpfungshypothesen eingefügt. Da das Gruppierungsverfahren auf der Annahme beruht, daß der zwischen jeweils zwei zuverlässigen Startstücken liegende kürzeste Pfad im gewichteten Graphen, d.h., der Pfad für den die Summe der Kosten seiner Kanten minimal ist, dem gesuchten Objekt angehört, müssen die Kosten passend gewählt werden. Sie sollen einerseits die tatsächliche Entfernung wiedergeben, aber andererseits von der Bewertung der Verbindung abhängen. Das heißt, offensichtlich schlechte Verbindungen sollen durch höhere Kosten gekennzeichnet werden, um ihre Verwendung unwahrscheinlicher zu machen. Wird eine Verbindung als ideal angesehen, d.h. hat sie den Fuzzy-Wert 1, wird ihre tatsächliche Länge als Kosten verwendet. Hat eine Verbindung den Fuzzy-Wert 0, sind ihre Kosten ∞ . Um dies umzusetzen wird folgende Formel für den Aufbau des gewichteten Graphen verwendet:

$$w_{i,j} = \begin{cases} l_{i,j}/r_{i,j} & \text{wenn Knoten } i \text{ und } j \text{ durch eine lineare Struktur der Länge} \\ & l_{i,j} \text{ verbunden sind und } r_{i,j} > 0 \\ d_{i,j}/r_{i,j} & \text{wenn } i \text{ und } j \text{ nicht durch eine lineare Struktur verbunden sind, aber } r_{i,j} > 0; \\ & d_{i,j} \text{ ist der Abstand der Knoten } i \text{ und } j \\ & d_{i,j}/r_{i,j} \text{ ist eine Schätzung der Kosten einer hypothetischen} \\ & \text{linearen Struktur die } i \text{ und } j \text{ verknüpft} \\ \infty & \text{sonst (d.h. es wird keine Kante in den Graphen eingefügt)} \end{cases} \quad (3.2)$$

wobei $w_{i,j}$ die Kosten der Kante zwischen den Knoten i und j sind. Die Kosten $w_{i,j}$ stellen die Länge einer Verbindung dar. Diese Länge wird künstlich angehoben (die Kosten werden erhöht), wenn die Linie bzw. die Verknüpfungshypothese, die diese Verbindung realisiert, nicht gut mit dem Straßenmodell übereinstimmt.

3.2.3 Auswahl und Verknüpfung der Linien

Nachdem der gewichtete Graph aufgebaut wurde, kann die Gruppierung in einem zweistufigen Verfahren durchgeführt werden. Zuerst werden Linien (Startstücke) ausgewählt, die mit hoher Wahrscheinlichkeit dem zu extrahierenden Objekt angehören. Dies ist von dem jeweiligen Objekt abhängig. In einem interaktiven System kann diese Auswahl auch manuell erfolgen. Dann werden die Startstücke untereinander verbunden. Dies erfolgt durch die Berechnung des kürzesten Pfades, d.h., des Pfades mit den geringsten Kosten im gewichteten Graphen, zwischen jedem Paar von Startstücken. Hierfür wird der Dijkstra Algorithmus (siehe Anhang C.4.3.1) verwendet. Bei den gegebenen Kosten der Kanten des Graphen gewährleistet dies die global optimale Auswahl und Verknüpfung der Linien. Natürlich können auch andere Algorithmen wie z.B. der Warshall Algorithmus (SEGEWICK 1997) zur Berechnung *aller* kürzester Pfade in einem dichten Graphen verwendet werden. Die topologisch korrekte Vereinigung aller so extrahierten Pfade stellt dann das Gruppierungsergebnis dar.

3.3 Extraktionsstrategie

Die Extraktionsstrategie basiert auf dem entwickelten Gruppierungsalgorithmus. Sie besteht aus mehreren Schritten (s. Abb. 3.2). Zuerst werden Linien aus den Bilddaten extrahiert und zu Straßenstücken weiterverarbeitet, die im Anschluß bewertet werden. Da bei Satellitenbilddaten meist mehrere spektrale Kanäle zur Verfügung stehen, wird die Möglichkeit vorgesehen, diese Schritte für jeden Kanal separat durchzuführen und die bewerteten Straßenstücke zu fusionieren. Im Rahmen dieser Fusion können auch Straßenstücke aus anderen Datenquellen integriert werden. Dann wird die in Kapitel 3.2 beschriebene Gruppierung angewendet: Ein gewichteter Graph wird aus den Straßenstücken und den Verknüpfungshypothesen aufgebaut. Danach werden Paare zuverlässiger Straßenstücke als Startstücke ausgewählt und der kürzeste Pfad, d.h., der Pfad mit den geringsten Kosten, zwischen ihnen berechnet. Das extrahierte Straßennetz ist die Vereinigungsmenge aller dieser kürzesten Pfade. Im folgenden wird jeder Schritt ausführlich beschrieben.

Die Linienextraktion wird mit dem Ansatz von STEGER (1998a) durchgeführt (siehe Anhang A). Dieser differentialgeometrische Ansatz berücksichtigt die lokalen radiometrischen Eigenschaften des Straßenmodells. Das Ergebnis sind Pixelketten (Linien) und Kreuzungspunkte, jeweils mit Subpixelgenauigkeit. Linien repräsentieren nicht notwendigerweise nur eine Objektart, sondern können in einem Teil eine Straße darstellen und in einem anderen Teil eine andere lineare Struktur, z.B. schmale Felder. Da bei der nachfolgenden Bewertung der potentiellen Straßenstücke diese nur als ganzes bewertet werden, sollten sie jeweils nur eine Objektart, d.h., entweder eine Straße oder andere lineare

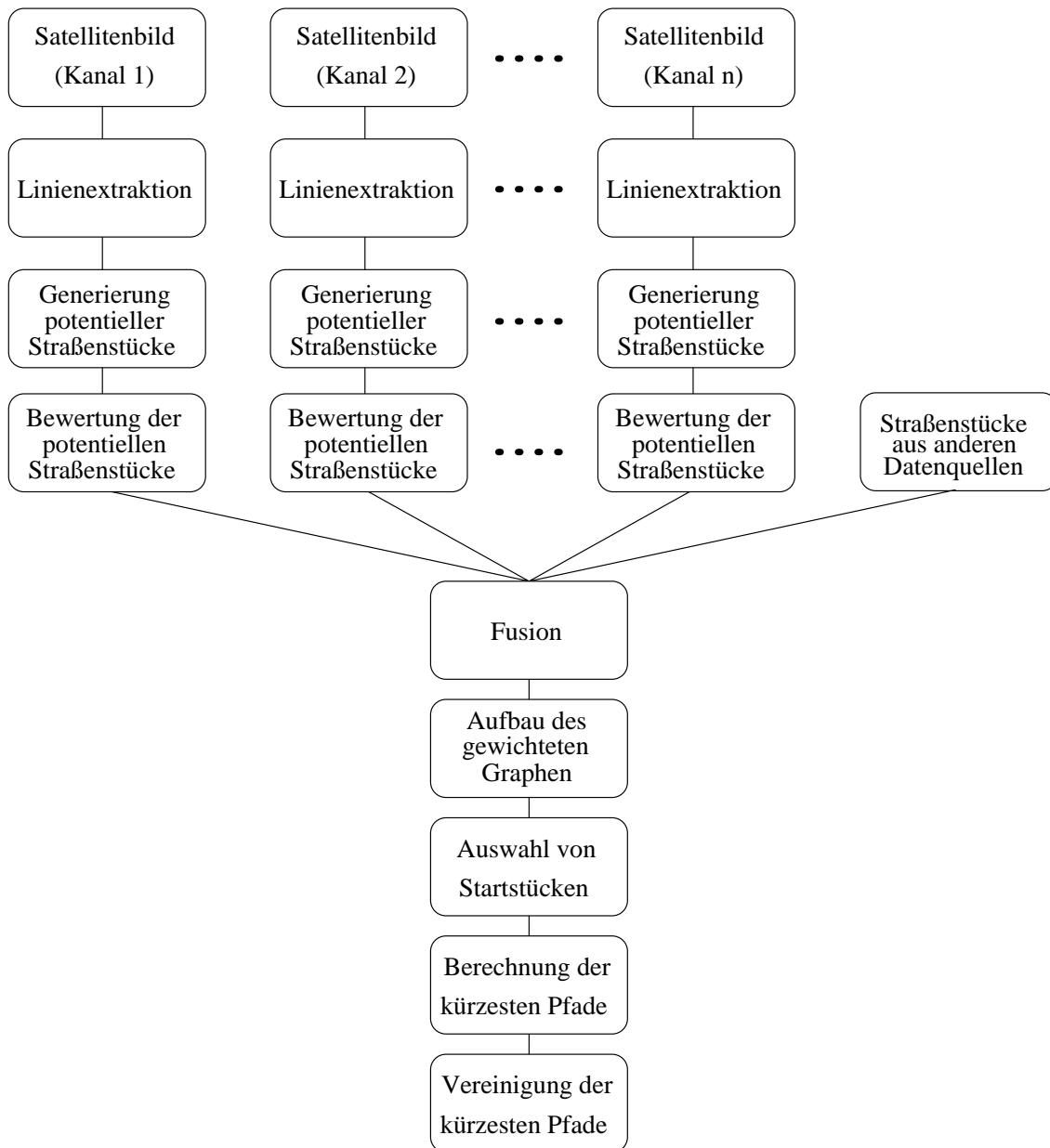


Abbildung 3.2. Ablauf der vorläufigen Extraktion

Strukturen, darstellen. Hierzu werden die Linien an Stellen aufgeschnitten, an denen sie wahrscheinlich ihre Bedeutung ändern. Eine Analyse unterschiedlicher Kriterien hat ergeben, daß eine starke Krümmung der Linien ein gutes Kriterium dafür ist, daß eine Linie ihre Bedeutung ändert. Daher werden die Linien an Stellen mit hoher Krümmung aufgeschnitten. Durch diese Nachbearbeitung der Linien entstehen potentielle Straßenstücke.

Um mehr Evidenz für das Vorhandensein von Straßen in den Gruppierungsvorgang einführen zu können, ist mehr Information notwendig, als durch die reine Extraktion der Linienposition gegeben ist. Hierfür wird zusätzliche Information (Breite und Richtung der Linie, Grauwert und Kontrast) für jedes Linienpixel bestimmt.

Unter der Annahme, daß die Auflösung des Bildes bekannt ist, werden die folgenden Attribute für jedes Straßenstück berechnet, um eine erweiterte Beschreibung der Straßenstücke zu erhalten:

- Länge des Straßenstückes.

- Geradlinigkeit des Straßenstückes (Standardabweichung der Richtung).
- Breite des Straßenstückes (Mittelwert der Breite).
- Konstanz der Breite des Straßenstückes (Standardabweichung der Breite).
- Konstanz des Reflexionsgrades des Straßenstückes (Standardabweichung der Grauwerte).
- Ebenheit des Straßenstückes (Mittelwert des absoluten Gradienten entlang des Straßenstückes; nur wenn Höheninformation verfügbar ist).

Um die potentiellen Straßenstücke zu bewerten werden die Attribute durch lineare Fuzzy-Funktionen in vorläufige Fuzzy-Werte transformiert. Diese vorläufigen Fuzzy-Werte werden mittels des Fuzzy *and* Operators zu einem Fuzzy-Wert vereinigt.

Statt der Verwendung linearer Fuzzy-Funktionen und des Fuzzy *and* Operators zur Vereinigung der vorläufigen Fuzzy-Werte könnten auch kompliziertere Fuzzy-Funktionen und Operatoren verwendet werden. Diese sind in der Regel durch mehrere Parameter festgelegt und können daher feiner angepaßt werden. Um ein möglichst intuitives Einstellen der Parameter (siehe Anhang B) zu gewährleisten, wird hier auf die Verwendung komplizierterer Fuzzy-Funktionen verzichtet.

Die bisher beschriebenen Schritte werden auf jedem Kanal separat durchgeführt, so daß man n verschiedene Sätze bewerteter potentieller Straßenstücke erhält. Diese werden durch folgende Vorgehensweise zu einem konsistenten Satz fusioniert: Zuerst werden alle potentiellen Straßenstücke in einer Liste zusammengefaßt und nach ihrer Bewertung sortiert. Das beste potentielle Straßenstück wird direkt in das vorläufige Fusionsergebnis übernommen. Dann wird jeweils für das nächstbeste potentielle Straßenstück geprüft, ob es sich mit einem oder mehreren potentiellen Straßenstücken des vorläufigen Fusionsergebnisses ganz oder teilweise überlappt¹. Ist dies der Fall, werden die sich überlappenden Teile nicht in das vorläufige Fusionsergebnis übernommen, da hier bereits ein Straßenstück an der entsprechenden Stelle vorhanden ist. Die Bewertung des entsprechenden Straßenstückes des vorläufigen Fusionsergebnisses wird erhöht, da es durch das (nicht zu übernehmende) Straßenstück der sortierten Liste gestützt wird. Die übrigen (sich nicht überlappenden) Teile werden in das vorläufige Fusionsergebnis übernommen. Sind alle potentiellen Straßenstücke der sortierten Liste abgearbeitet, ist die Fusion abgeschlossen.

Um im Rahmen der Gruppierung die Rekonstruktion von Kreuzungen zu ermöglichen, werden potentielle, bisher nicht extrahierte Kreuzungspunkte eingefügt. Hierzu werden die Straßenstücke daraufhin überprüft, ob ein anderes Straßenstück in der Nähe endet. Ist dies der Fall, wird das Straßenstück am Fußpunkt des Lotes vom Endpunkt des anderen Straßenstückes auf das überprüfte Straßenstück aufgeschnitten.

Basierend auf den bewerteten potentiellen Straßenstücken wird ein vorläufiger ungewichteter Graph aufgebaut. Die Straßenstücke sind dabei die Kanten des Graphen und die Endpunkte der Straßenstücke die Knoten. Um die korrekte Topologie zu bewahren werden im Fall von Kreuzungen, d.h., wenn mehrere Straßenstücke in einem Knoten enden, diese Endpunkte nur durch einen Knoten mit entsprechendem Knotengrad repräsentiert.

Die Bewertung (Fuzzy-Wert) der potentiellen Straßenstücke wird verwendet, um die Qualität der Verbindung zweier Knoten zu bestimmen (Gleichung 3.1). Der Fuzzy-Wert wird unter Anwendung von Gleichung 3.2 in Kosten transformiert, die der entsprechenden Kante des Graphen zugewiesen werden.

Da die Straßenstücke in Bezug auf das Straßennetz nicht vollständig sondern lückenhaft sind, besteht der Graph aus vielen Zusammenhangskomponenten. Das gesuchte Straßennetz hingegen besteht in der Regel aus einer Zusammenhangskomponente. Die Straßenstücke müssen also verknüpft werden. Hierzu werden zwischen allen Paaren von zueinander nicht adjazenten Knoten des Graphen,

¹Die Überlappung wird dabei mit der in Kapitel 5.1.1 dargestellten Puffermethode unter Berücksichtigung von Richtungsunterschieden bestimmt.

also zwischen Knoten, die nicht bereits durch eine Kante (ein Straßenstück) verbunden sind, Verknüpfungshypothesen eingefügt.

Für jede Verknüpfungshypothese werden folgende Attribute berechnet:

- Richtungsdifferenzen zwischen den zu verknüpfenden Straßenstücken und der Verknüpfungshypothese.
- Absolute Länge der Verknüpfungshypothese.
- Relative Länge der Verknüpfungshypothese (verglichen mit der Länge des schlechter bewerteten der beiden zu verknüpfenden Straßenstücke).
- Ebenheit der Verknüpfungshypothese (Mittelwert des absoluten Gradienten entlang der Verknüpfung; nur wenn Höheninformation verfügbar ist)
- Eine Bedingung, die verhindert, daß eine Verknüpfungshypothese eine bessere Bewertung erhält, als eines der beiden zu verknüpfenden Straßenstücke.

Wie oben beschrieben, werden lineare Fuzzy-Funktionen verwendet, um vorläufige Fuzzy-Werte aus den Attributen abzuleiten. Ein Sonderfall ist hierbei die Bewertung der Richtungsdifferenz zwischen zwei Straßenstücken: Um sowohl geradlinige Fortsetzungen innerhalb einer Straße als auch rechtwinklige Einmündungen an Kreuzungen zu unterstützen, wird hier eine Fuzzy-Funktion verwendet, die sowohl bei Kollinearität als auch bei Rechtwinkligkeit den Wert 1 liefert (siehe Abbildung 3.3). Da eine Verknüpfungshypothese nur eine dieser beiden Bedingungen erfüllen kann (Straße oder Kreuzung), kann diese Untersuchung der Richtungsdifferenz auch als Klassifikation der Verknüpfungshypothese in Straße bzw. Kreuzung verstanden werden. In Abhängigkeit von dieser Klassifikation können unterschiedliche Parameter für die Definition der übrigen Fuzzy-Funktionen gewählt werden, z.B. für die Bewertung der absoluten Entfernung. Diese Unterscheidung kann mittels des Fuzzy *oder* Operators realisiert werden. Die vorläufigen Fuzzy-Werte werden wiederum mit dem Fuzzy *und* Operator zu einem Fuzzy-Wert vereinigt.

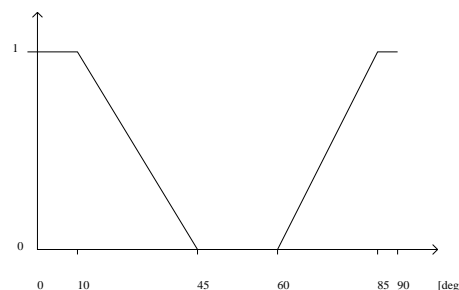


Abbildung 3.3. Fuzzy-Funktion für die Bewertung der Richtungsdifferenz

Die Berechnung der Kosten für die einzelnen Verknüpfungshypothesen wird analog der Berechnung der Kosten für die Straßenstücke durchgeführt: Zuerst wird die tatsächliche (euklidische) Entfernung zwischen den Knoten — die Länge der Verknüpfungshypothese — als Näherung für die Länge des (fehlenden) Straßenstückes angesehen. Dann wird diese Länge basierend auf der Bewertung der Verknüpfungshypothesen skaliert, d.h. in Kosten transformiert. Hierfür wird wieder Gleichung 3.2 verwendet. Diese Skalierung hat zur Folge, daß der beste Pfad zwischen zwei zuverlässigen Straßenstücken mit hoher Wahrscheinlichkeit keine (lokal) schlechten Verknüpfungen enthält, außer dies ist aus globaler Sicht zur Verbindung der Startstücke vorteilhaft.

Die vorläufige Extraktion des Straßennetzes benötigt Startstücke, die dann durch den kürzesten Pfad miteinander verbunden werden. Diese Startstücke sollten mit hoher Wahrscheinlichkeit Teil des Straßennetzes sein. Eine Abschätzung für die Wahrscheinlichkeit, ob ein potentielles Straßenstück

Teil des Straßennetzes ist, ist durch seine Bewertung gegeben. Daher werden alle Straßenstücke, deren Fuzzy-Wert über einem bestimmten Schwellwert liegt als vorläufige Startstücke betrachtet. Dieser Schwellwert kann durch Anwendung der Inversen der oben definierten Fuzzy-Funktionen in bedeutungsvolle Einheiten transformiert werden, z.B. in die Mindestlänge eines Straßenstückes, das als Startstück verwendet wird.

Es kann vorkommen, daß mehrere untereinander nicht verbundene Teilnetze anstatt eines gesamten Straßennetzes im Bild abgebildet sind. Die Strategie zur Extraktion des Straßennetzes muß auch dieser Situation gerecht werden, d.h., es müssen mehrere nicht verbundene Teilnetze extrahiert werden können. Dabei sollte aber trotzdem die Funktion der Straßen, weit voneinander entfernte Orte zu verbinden, berücksichtigt werden. Um dies zu gewährleisten, werden aus allen möglichen Paaren der vorläufigen Startstücke nur diejenigen ausgewählt, die eine gewisse Mindestlänge des resultierenden Pfades (z.B. 1 km) gewährleisten. Diese Mindestlänge setzt sich aus der Länge der beiden Straßenstücke (S_1 und S_2 in Abb. 3.4) sowie der Länge des Verbindungsstückes (c in Abb. 3.4) zusammen. Eine untere Grenze für die Länge des Verbindungsstückes c ist durch den Minimalen Abstand der Endpunkte der zu verbindenden Startstücke gegeben. Durch diese Auswahl der Startstückpaare können isolierte Teile des Straßennetzes extrahiert werden, ohne die postulierte Globalität des Straßenmodells aufzugeben.

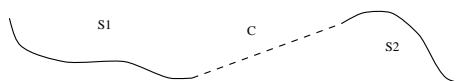


Abbildung 3.4. Minimale Pfadlänge: $l_{min} = l_{S_1} + l_{S_2} + l_c$

Startpunktpaare können auch interaktiv gewählt oder aus zusätzlicher Information, wie GIS, abgeleitet werden: Es können z.B. Siedlungen, wichtige Gebäude, Industriegebiete usw. als Startpunkte gewählt werden, die durch Straßen untereinander verbunden werden sollen.

Das resultierende Netzwerk ist in Bezug auf die geometrische Genauigkeit inhomogen, da Teile nicht von der Linienextraktion stammen, sondern nur durch die Verknüpfung von Straßenstücken entstanden sind. Diese Teile sind auch nicht direkt im Bild verifiziert. Die Verifikation der Verknüpfungen ist implizit dadurch gegeben, daß sie auf dem global besten Pfad zwischen zwei zuverlässigen Straßenstücken liegen. Die Verifikation erfolgt also anhand der Funktion der eingefügten Verknüpfung und nicht anhand der Bildinformation. Dies ist ein Schwachpunkt, der bereits in dem Verfahren von STEGER et al. (1997) enthalten ist, das dieser Arbeit zugrunde liegt. Er wird hier nicht behoben, da er bei einer Beschränkung auf relativ kurze Verknüpfungshypothesen keinen entscheidenden Einfluß auf das Extraktionsergebnis haben dürfte und das Ziel dieser Arbeit die Nutzung globaler Aspekte des Straßennetzes, nicht aber eine Analyse des lokalen Kontextes ist, die für eine zuverlässige Verifikation in vielen Fällen notwendig wäre (BAUMGARTNER et al. 1999b).

Oft ist solche Zusatzinformation, wie hochaufgelöste Bilddaten oder GIS, nicht verfügbar. Daher sollte das extrahierte Straßennetz mit Qualitätsmaßen bewertet sein, die aussagen, wie sicher das jeweilige Teilstück extrahiert wurde. Allgemeiner ausgedrückt, sollte jedes automatische System interne Qualitätsmaße für die Bewertung der automatisch erzielten Ergebnisse zur Verfügung stellen, insbesondere, wenn es praktisch angewendet werden soll. Eine solche interne Bewertung der Extraktionsergebnisse könnte z.B. aus den für den Aufbau des gewichteten Graphen bestimmten Bewertungen der Linien und Verknüpfungen abgeleitet werden. Diese Möglichkeit wurde im Rahmen dieser Arbeit aber nicht weiter verfolgt.

3.4 Aspekte der Realisierung

Im allgemeinen steigt die Komplexität eines Gruppierungsalgorithmus exponentiell mit der Anzahl der zu gruppierenden Elemente. In dem hier beschriebenen Fall werden im Rahmen der Bewertung lediglich Knotenpaare betrachtet ($O(n^2)$, mit: n = Anzahl der Knoten). Der auf die Bewertung folgende Dijkstra-Algorithmus (siehe Anhang C.4.3.1) hat die Komplexität $O(n \cdot \log n)$ für die Ermittlung eines kürzesten Pfades zwischen zwei Knoten. Somit hat der vorgeschlagene Ansatz im ungünstigsten Fall die Komplexität $O(n^2 + m \cdot n \cdot \log n)$, wobei m die Anzahl der Startstückpaare ist. Daher sollten Beschränkungen des Suchraumes, die keine Auswirkung auf das Endergebnis haben, soweit möglich vorgenommen werden. In der im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Implementierung wurden folgende, die Laufzeit reduzierende, Beschränkungen umgesetzt:

- Immer wenn lokale Beziehungen zwischen benachbarten Strukturen untersucht werden, werden diese benachbarten Strukturen über eine Bereichssuche (SEDGWICK 1997) ermittelt. Linien werden hierfür in kurze Segmente zerlegt. Die Vereinigung aller umschließenden Rechtecke der Segmente einer Linie bestimmt den Bereich in der Suchmatrix, in dem die Linie auftritt.
- Die Bewertungskriterien für Verknüpfungen werden in der Reihenfolge berechnet, daß die Kriterien, die schnell berechnet werden können, bzw. am häufigsten zu einer Ablehnung der Verknüpfung führen (z.B. die absolute Entfernung) zuerst berechnet werden. Wird eine Verknüpfung abgelehnt, werden die folgenden Kriterien nicht mehr berechnet.
- Für die Ermittlung der Startstücke wird der Graph in seine Zusammenhangskomponenten zerlegt. Startstückpaare werden nur dann gebildet, wenn beide Startstücke innerhalb der selben Zusammenhangskomponente liegen, also auch wirklich ein Pfad zwischen den beiden Startstücken existiert. Die Effizienz dieser Vorgehensweise hängt von der Anzahl und Größe der Zusammenhangskomponenten ab. Der Aufwand für deren Berechnung kann vernachlässigt werden, da die Einsparungen in aller Regel deutlich größer sind.
- Die Liste der Startstückpaare wird so sortiert, daß zuerst die (potentiell) längsten Pfade berechnet werden. Jedes folgende Startstückpaar, dessen Startstücke beide auf *einem* bereits extrahierten Pfad liegen, wird eliminiert, da die Verbindung zwischen diesen beiden Startstücken keine neue Information mehr liefern kann.

4. Verbesserung der extrahierten Straßennetze

Das in Kapitel 3 vorgestellte Verfahren zur vorläufigen Extraktion liefert bereits ein Straßennetz als Ergebnis. Das Netz ist jedoch in der Regel unvollständig und hat Schwächen in den Kreuzungsbereichen. In diesem Kapitel werden Verfahren zur Verbesserung der vorläufigen Extraktion dargestellt. Diese sind eng mit der Netzwerkeigenschaft und der Funktion von Straßen verbunden. Im ersten Abschnitt dieses Kapitels wird ein Verfahren zur Vervollständigung von Straßennetzen dargestellt, welches fehlende Verbindungen innerhalb des Netzwerkes aufgrund der Analyse von Pfadlängen und der Anzahl potentieller Verbindungen zwischen Punkten des Straßennetzes aufdecken kann. Der zweiten Abschnitt dieses Kapitels widmet sich einer weiteren wichtigen Komponente des Straßennetzes, den Kreuzungen. Durch eine explizite Modellierung einfacher Kreuzungen in Form von Hauptstraßen und Abzweigungen, können die Extraktionsergebnisse deutlich verbessert werden.

4.1 Vervollständigung von Straßennetzen

Eines der Hauptprobleme von Bildanalyse-Systemen, und damit auch von Systemen zur Extraktion von Straßen, ist, daß die Ergebnisse der Extraktion der Bildprimitive (z.B. Linien im Falle von Straßen) unvollständig sind (STEGER et al. 1997). Um dieses Problem zu lösen, werden verschiedene Gruppierungsansätze angewendet, die bedeutungsvolle Einheiten aus dem Extraktionsergebnis extrahieren sollen. In Systemen zur automatischen Extraktion von Straßen werden Hypothesen für Verknüpfungen zwischen den extrahierten Primitiven in der Regel auf der Basis geometrischer Kriterien wie Nähe und Kollinearität erstellt. Die Hypothesen werden anschließend in den Bildern verifiziert. Trotzdem sind die Extraktionsergebnisse im allgemeinen unvollständig und fragmentiert (HARVEY 1999, MAYER 1998, WIEDEMANN et al. 1998b). Ein Grund für die Unvollständigkeit ist, daß für die Gruppierung nur lokale Informationen, nicht aber die Netzwerkeigenschaft des Straßennetzes, d.h. die Eigenschaft des Straßennetzes zwischen beliebigen Punkten möglichst kurze bzw. effiziente Verbindungen bereitzustellen, verwendet werden. Aber sogar die Ergebnisse der in Kapitel 3 vorgeschlagenen vorläufigen Straßenextraktion, die ja bereits die Verbindungsfunktion von Straßen berücksichtigt, sind meist unvollständig und fragmentiert. Dies liegt im wesentlichen an der Auswahl der Startstücke, da eine Straße nur dann extrahiert wird, wenn sie die kürzeste Verbindung zwischen zwei Startstücken darstellt (siehe auch Kapitel 7.2).

Die Vollständigkeit und der Zusammenhang der extrahierten Netzwerke kann durch die Verwendung der globalen Netzwerkeigenschaft, die unter anderem auch ein Ergebnis der Straßenfunktion ist, verbessert werden (MAYER 1998). Dies ist insbesondere — aber nicht ausschließlich — für die Extraktion von Straßen aus Bilddaten niedriger Auflösung (z.B. Bodenauflösung > 1 m) wichtig, da hier nur wenig lokale Evidenz für Straßen aus den Bilddaten gewonnen werden kann.

Außerhalb bebauter Gebiete haben Straßen vorwiegend Verbindungsfunktion zum möglichst wirtschaftlichen Transport von Personen und Gütern (PIETZSCH 1989). Neben dieser Anforderung gibt es noch viele weitere Einflüsse auf die Gestaltung des Straßennetzes, wie z.B. Geländeform, Landnutzung und Umweltschutz. All diese Kriterien werden für die Planung des Straßennetzes (als Teil des gesamten Transportnetzes) verwendet. Sie sollten daher auch — soweit nötig — für die Extraktion des Straßennetzes aus digitalen Bilddaten genutzt werden.

In diesem Kapitel wird ein neuer Ansatz vorgeschlagen, der die Netzwerkeigenschaften des Straßennetzes für die Detektion von bisher noch nicht extrahierten Teilstücken (Lücken) des Straßennetzes ausnutzt und entsprechende Verbindungshypothesen aufstellt. Diese werden anschließend im Bild verifiziert und — sofern sie nicht abgelehnt werden — in das bestehende Netzwerk eingefügt.

4.1.1 Charakterisierung der Lücken

Die im vorläufig extrahierten Straßennetz auftretenden Lücken können in zwei Kategorien eingeteilt werden: (1) Lücken innerhalb von Zusammenhangskomponenten (Abb. 4.1, Lücke A–B) und (2) Lücken zwischen zwei unterschiedlichen Zusammenhangskomponenten (Abb. 4.1, Lücken A–C und B–C).

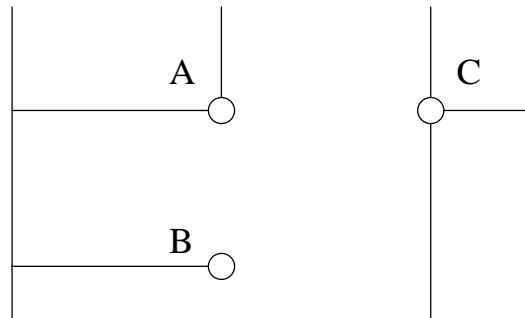


Abbildung 4.1. Unterschiedliche Kategorien von Lücken: Innerhalb von Zusammenhangskomponenten (A–B) und zwischen unterschiedlichen Zusammenhangskomponenten (A–C, B–C)

Um die Lücken zu schließen, müssen neue Verbindungen in das vorläufig extrahierte Straßennetz eingefügt werden. Im folgenden wird die Generierung von Verbindungshypothesen für die beiden Kategorien von Lücken erläutert.

4.1.2 Verbindungshypothesen innerhalb von Zusammenhangskomponenten

Das Ziel der Suche nach Verbindungshypothesen ist, daß das Straßennetz nach dem Einfügen der Verbindungen funktioneller — im Sinne der oben genannten Anforderungen — wird.

Das Vorgehen basiert auf folgender Beobachtung: Fehlende Teile des Straßennetzes führen dazu, daß die Entfernung zwischen zwei Punkten des Netzwerkes — gemessen entlang der kürzesten Verbindung innerhalb des Netzwerkes — größer ist, als wenn das Straßennetz vollständig ist. Der Umweg, der sich durch den fehlenden Teil des Straßennetzes ergibt, kann dazu genutzt werden, dieses fehlende Teil zu lokalisieren. Durch einen Vergleich der tatsächliche Entfernung entlang des Netzwerkes mit der entsprechenden geschätzten, optimalen Entfernung läßt sich der Umweg näherungsweise bestimmen.

Abbildung 4.2a) zeigt ein Beispielnetzwerk das aus vier Knoten (A, B, C, D) und drei Kanten (AB, BC, CD) besteht. Im ersten Schritt wird die kürzeste Entfernung zwischen jedem Paar von Knoten (N_i, N_j) entlang dem vorliegenden Netzwerk (*Netzwerkentfernung*, ne_{ij}) bestimmt und entlang einer hypothetischen, optimalen Verbindung zwischen den beiden Knoten (*optimale Entfernung*, oe_{ij}) geschätzt. Dabei ist z.B. ne_{BD} die Summe von ne_{BC} und ne_{CD} (siehe Abb. 4.2b)). Diese Entfernungen sollen die oben genannten Forderungen nach schnellen und günstigen Transporten sowie die übrigen Einflußfaktoren repräsentieren.

Im zweiten Schritt werden vorläufige Verbindungshypothesen zwischen jedem Paar von Knoten definiert. Für jede vorläufige Verbindungshypothese wird ein *Umwegfaktor* nach folgender Definition berechnet:

$$\text{Umwegfaktor} = \frac{\text{Netzwerkentfernung}}{\text{optimale Entfernung}}$$

In Abb. 4.2c) sind die *Umwegfaktoren* für alle vorläufigen Verbindungshypothesen dargestellt. Zur Vereinfachung sind hier sowohl die *Netzwerkentfernung* als auch die *optimale Entfernung* durch den Euklidischen Abstand zwischen den entsprechenden Knoten dargestellt.

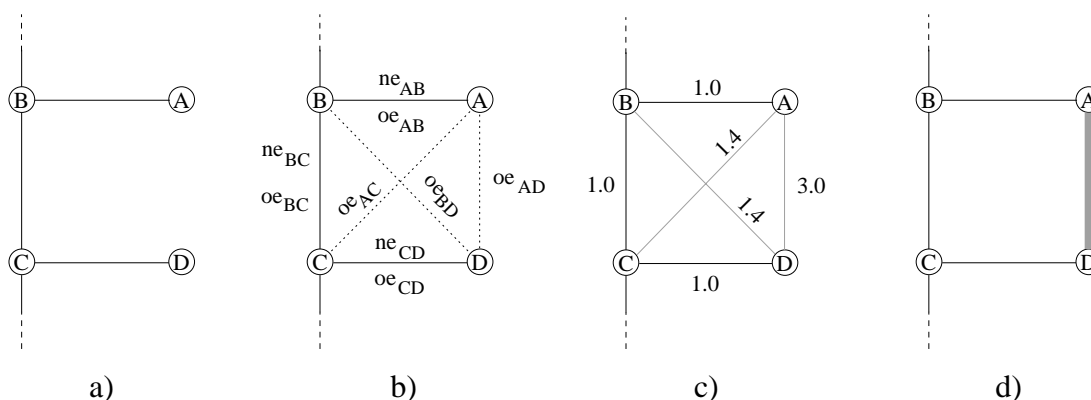


Abbildung 4.2. Generierung von Verbindungshypothesen: a) Beispielnetzwerk; b) Netzwerkentfernung und optimale Entfernung; c) Umwegfaktoren für alle vorläufigen Verbindungshypothesen; d) Verbindungshypothese

Im dritten Schritt wird der Satz vorläufiger Verbindungshypothesen anhand ihres *Umwegfaktors* auf potentiell relevante Verbindungshypothesen reduziert. Es wird hierzu angenommen, daß nur Verbindungshypothesen, deren *Umwegfaktor* lokal maximal ist, von Interesse sind und, daß es keine bevorzugte Richtung innerhalb des Netzwerkes gibt. Unter diesen Annahmen wird eine Non-Maximum-Suppression (NMS) durchgeführt: Eine vorläufige Verbindungshypothese wird nur dann übernommen, wenn es keine konkurrierende Verbindungshypothese mit einem höheren *Umwegfaktor* gibt. Konkurrierende Verbindungshypothesen sind vorläufige Verbindungshypothesen zwischen einem Endpunkt (Knoten) der untersuchten vorläufigen Verbindungshypothese und einem zum anderen Endpunkt benachbarten Knoten im Netzwerk. Knoten sind benachbart (adjacent), wenn sie durch eine einzige Kante im Graphen verbunden sind. In Abb. 4.2 sind beispielsweise die Verbindungshypothesen AC und BD zur Verbindungshypothese AD konkurrierende Verbindungshypothesen. In Tabelle 4.1 sind die Umwegfaktoren für jede vorläufige Verbindungshypothese sowie für die jeweils konkurrierenden Verbindungshypothesen angegeben.

In dem oben eingeführten Beispiel wird lediglich die Verbindungshypothese AD übernommen (siehe Abb. 4.2d). Im Allgemeinen werden mehrere Verbindungshypothesen übernommen. Diese werden nach ihrem Umwegfaktor sortiert. Die Verbindungshypothese mit dem höchsten Umwegfaktor wird an ein Modul übergeben, welches die Verifikation der Verbindungshypothese basierend auf den Bilddaten durchführt. Wird die Verbindungshypothese abgelehnt, so wird die nächste (diejenige mit dem nächsthöheren Umwegfaktor) dem Verifikationsmodul übergeben. Wird eine Verbindungshypothese angenommen (und aufgrund der Bildinformation geometrisch verbessert), wird sie in das bestehende Netzwerk eingefügt. Da hierdurch die Eigenschaften des Netzwerkes verändert werden, was Auswirkungen auf die einzelnen *Netzwerkentfernungen* haben kann, wird die Generierung von Verbindungshypothesen neu gestartet. Bereits abgelehnte Verbindungshypothesen werden dabei nicht mehr berücksichtigt. Das iterative Vorgehen der Generierung und Verifikation von Verbindungshypothesen wird abgebrochen, wenn erwartet werden kann, daß keine weiteren Verbindungshypothesen mehr von dem Verifikationsmodul angenommen werden. Im Allgemeinen kann dies nicht zuverlässig vorhergesagt werden, allerdings kann eine grobe Abschätzung über den höchsten Umwegfaktor erfolgen, der in der aktuellen Iteration auftritt.

Die Knoten, zwischen denen die vorläufigen Verbindungshypothesen definiert werden, setzen sich zusammen aus allen Knoten des Netzwerkes deren Knotengrad ungleich zwei ist sowie aus

zu untersuchende vorläufige Verbindungshypothese		konkurrierende Verbindungshypothese		Ist Verbindungs- hypothese lokal maximal?
von – nach	Umfwegfaktor	von – nach	Umfwegfaktor	
AB	1.0	AC	1.4	nein
AC	1.4	AB	1.0	nein
		AD	3.0	
		BC	1.0	
		CD	1.0	
AD	3.0	AC	1.4	ja
		BD	1.4	
BC	1.0	AC	1.4	nein
		BD	1.4	
BD	1.4	AB	1.0	nein
		AD	3.0	
		BC	1.0	
		CD	1.0	
CD	1.0	BD	1.4	nein

Tabelle 4.1. Non-Maximum-Suppression für vorläufige Verbindungshypothesen

zusätzlichen Hilfsknoten (mit Knotengrad zwei), die in gleichmäßigem Abstand (Hilfsknotenabstand) in das Netzwerk eingefügt werden. Dies dient dazu, daß Verbindungshypothesen nicht nur zwischen Kreuzungen und Endpunkten von Straßen eingefügt werden können, sondern ggf. auch durchgehende Straßenstücke miteinander verbunden werden.

Die Berechnung des Umwegfaktors für alle vorläufigen Verbindungshypothesen ist wegen der Suche nach der kürzesten Verbindung innerhalb des Netzwerks rechenaufwendig. Im Allgemeinen ist es nicht notwendig, vorläufige Verbindungshypothesen zwischen weit voneinander entfernten Knoten aufzustellen. Daher werden sie nur zwischen Knoten aufgestellt, deren *optimale Entfernung* unterhalb einer gegebenen Schranke (*maximale optimale Entfernung*) liegt.

Die grundlegende Annahme bei der Generierung von Verbindungshypothesen innerhalb von Zusammenhangskomponenten ist, daß das Straßennetz möglichst kurze Verbindungen zwischen unterschiedlichen Orten bereitstellt. Aufgrund dieser Annahme werden auch Verbindungshypothesen vorgeschlagen, die durch eine Gruppierung, die auf lokalen geometrischen Kriterien beruht, nicht erzeugt würden. Da dem Straßenbau aber, neben der Bereitstellung möglichst effizienter Verbindungen, auch andere Kriterien zugrunde liegen, werden von dem vorgeschlagenen Verfahren auch Verbindungshypothesen in Bereichen vorgeschlagen, in denen im Straßennetz keine Verbindung besteht. Typische Beispiele hierfür sind Verbindungshypothesen im Bereich von Flüssen und Seen, über die es keine oder nur wenige Verbindungen gibt sowie in gebirgigen Regionen, in denen der Straßenverlauf sehr stark an die Geländeform angepaßt ist. Im Rahmen der Verifikation der Verbindungshypothesen sollen die fehlerhaft vorgeschlagenen Verbindungshypothesen eliminiert werden. Durch die Verwendung zusätzlicher Information, wie z.B. eines DGM, könnte die Generierung solcher Verbindungshypothesen zumindest teilweise vermieden werden.

4.1.3 Verbindungshypothesen zwischen unterschiedlichen Zusammenhangskomponenten

Die in Kapitel 4.1.2 dargestellte Methode kann Verbindungshypothesen nur innerhalb von Zusammenhangskomponenten generieren, da für die Berechnung des Umwegfaktors die Entfernung entlang des bestehenden Netzwerkes bestimmt werden muß. Für die Generierung von Verbindungshypothesen zwischen unterschiedlichen Zusammenhangskomponenten muß daher ein anderes Kriterium verwendet werden. Aufbauend auf der Tatsache, daß die Anzahl aller miteinander verbundenen Paare von

Punkten des Netzwerkes abnimmt, wenn das Netzwerk aufgrund von fehlenden Teilen in mehrere Zusammenhangskomponenten zerfällt, wird folgendes Vorgehen vorgeschlagen:

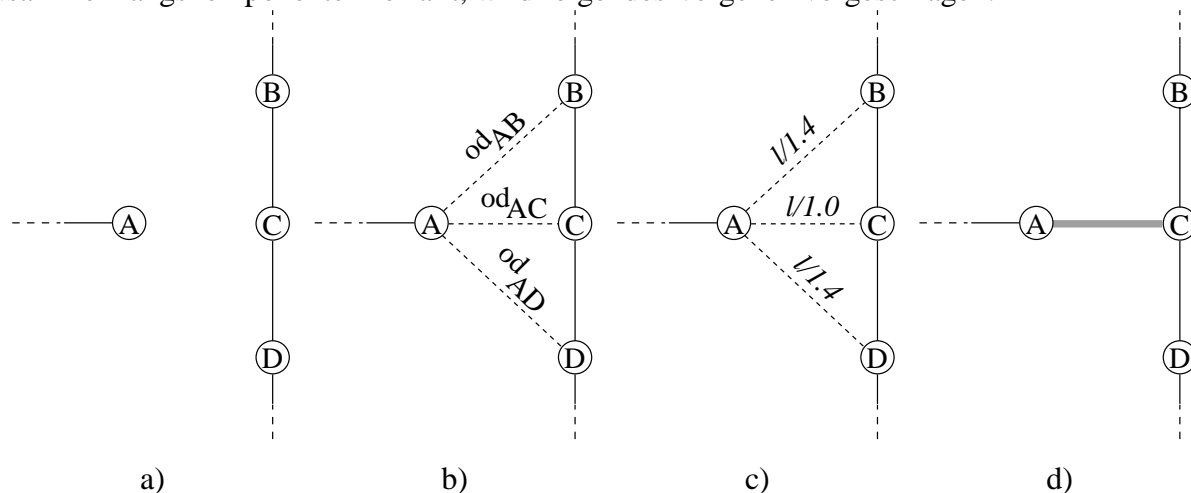


Abbildung 4.3. Generierung von Verbindungshypothesen zwischen unterschiedlichen Zusammenhangskomponenten: a) Beispielnetzwerk; b) Optimale Entfernung; c) Verbindungsfaktoren für alle vorläufigen Verbindungshypothesen ($l=l_i \cdot l_j$); d) Verbindungshypothese

Im ersten Schritt (Abb. 4.3b) werden für jedes Paar von Knoten (N_i, N_j) für die gilt, daß N_i und N_j in unterschiedlichen Zusammenhangskomponenten liegen, die Längen l_i und l_j der jeweiligen Zusammenhangskomponente i und j sowie die optimale Entfernung od_{ij} zwischen N_i und N_j bestimmt. Unter der Annahme, daß miteinander zu verbindende Punkte gleichmäßig über das gesamte Straßennetz verteilt sind, charakterisieren l_i und l_j die Anzahl der zu verbindenden Punkte in den jeweiligen Zusammenhangskomponenten.

Im zweiten Schritt (Abb. 4.3c) werden vorläufige Verbindungshypothesen zwischen jedem Paar von Knoten definiert. Für jede vorläufige Verbindungshypothese wird ein *Verbindungsfaktor* nach folgender Definition berechnet:

$$\text{Verbindungsfaktor} = \frac{l}{\text{optimale Entfernung}}$$

mit:

$$l = l_i \cdot l_j$$

$$l_i, l_j = \text{Gesamtlänge der Zusammenhangskomponente } i \text{ bzw. } j$$

Das Produkt $l_i \cdot l_j$ im Zähler des *Verbindungsfaktors* charakterisiert die Anzahl von zusätzlichen Verbindungen zwischen Punkten des Straßennetzes, die durch das Einfügen einer Verbindungshypothese zwischen den beiden Zusammenhangskomponenten entstehen würden. Die im Nenner stehende *optimale Entfernung* bewirkt, daß kurze Verbindungshypothesen bevorzugt werden. Anschaulich läßt sich dies so darstellen, daß zuerst Verbindungshypothesen zwischen großen Zusammenhangskomponenten, die nahe beieinander liegen, generiert werden.

Der *Verbindungsfaktor* wird im weiteren Verlauf analog dem in Kapitel 4.1.2 definierten *Umwegfaktor* verwendet. Das heißt, aus der Menge der vorläufigen Verbindungshypothesen werden mittels NMS die potentiell relevanten Verbindungshypothesen ausgewählt. Die Verbindungshypothese mit dem maximalen *Verbindungsfaktor* (Abb. 4.3d) wird dem Verifikationsmodul übergeben. Wird sie angenommen, wird sie in das bestehende Netzwerk eingefügt, andernfalls wird die Verbindungshypothese mit dem nächsthöheren *Verbindungsfaktor* an das Verifikationsmodul übergeben. Wenn die Verbindungshypothese in das Netzwerk eingefügt wird, ändert sich hierdurch die Netzwerktopologie. Somit ist auch hier ein iteratives Vorgehen notwendig.

Der Generierung von Verbindungshypothesen zwischen unterschiedlichen Zusammenhangskomponenten liegt zugrunde, daß alle Straßen miteinander zu einem Netzwerk verbunden sind, daß es also praktisch keine vom übrigen Straßennetz isolierten Straßen gibt. Abweichungen von dieser Annahme sind z.B. Straßennetze auf Inseln, die nur durch Fähren erreichbar sind, aber auch der Umstand, daß in einem Bild immer nur ein Ausschnitt des Straßennetzes abgebildet ist, der durchaus aus mehreren Zusammenhangskomponenten bestehen kann. Durch die heuristische Vorgehensweise, daß zuerst große, nahe beieinanderliegenden Zusammenhangskomponenten miteinander verbunden werden und, daß die Verbindungshypothesen zuerst in dem Bereich vorgeschlagen werden, in dem der Abstand zwischen den Zusammenhangskomponenten am kleinsten ist, wird in vielen Fällen schnell ein relativ gut zusammenhängendes Extraktionsergebnis erzielt. Es kann dabei aber nicht verhindert werden, daß auch viele Verbindungshypothesen generiert werden, die im Zuge der Verifikation abgelehnt werden müssen.

4.1.4 Verifikation der Verbindungshypothesen

Verbindungshypothesen stellen lediglich einen Hinweis dar, daß aufgrund der Netzwerkeigenschaften, in dem Bereich, in dem die Verbindungshypothese vorgeschlagen wird, eine Verbindung sinnvoll wäre, bzw. zu erwarten ist. Es ist aber durchaus möglich, daß in diesem Bereich keine Verbindung im Straßennetz besteht, u.a., weil die Bereitstellung möglichst effizienter Verbindungen zwischen unterschiedlichen Orten nicht das einzige Optimierungskriterium für den Straßenbau darstellt und auch nur ein Ausschnitt des gesamten Straßennetzes betrachtet wird. Deshalb ist es besonders wichtig, daß die Verbindungshypothesen verifiziert werden. Im Gegensatz zu den relativ kurzen und mittels geometrischer Kriterien bewertbaren Verknüpfungen, die im Rahmen der vorläufigen Extraktion eingefügt werden, kann eine Verbindung länger sein und ihr tatsächlicher Verlauf kann meist nicht ausreichend genau durch eine Gerade zwischen den Endpunkten der entsprechenden Verbindungshypothese dargestellt werden. Daher muß für jede Verbindungshypothese, die im Rahmen der Verifikation nicht abgelehnt wird, auch der Verlauf der Straße, die die Verbindung darstellt, bestimmt werden.

Die Verifikation der Verbindungshypothesen wird auf Basis der Bilddaten durchgeführt. Aufgrund des modularen Aufbaus des Ansatzes kann prinzipiell jedes System zur Extraktion von Straßen zur Verifikation verwendet werden, das in der Lage ist, eine Straße zwischen zwei gegebenen Punkten zu extrahieren und das Extraktionsergebnis zu bewerten, um entscheiden zu können, ob die Verbindung angenommen werden kann oder abgelehnt werden muß. Im Rahmen dieser Arbeit wird das in Kapitel 3 beschriebene System zur Extraktion von Straßen zur Verifikation verwendet, wobei der Suchbereich aus Gründen der Rechenzeit auf einen Bereich um die zu verifizierende Verbindungshypothese eingeschränkt wird. Im Gegensatz zu dem Vorgehen in Kapitel 3 werden als Startstücke bzw. Startpunkte die Endpunkte der Verbindungshypothese verwendet und es fällt die Beschränkung bezüglich der Mindestlänge des zu extrahierenden Pfades weg. Die Parameterwerte werden so eingestellt, daß auch Straßen extrahiert werden können, die nicht so deutlich in den Bilddaten erscheinen. Dies führt allerdings auch dazu, daß ggf. mehr lineare Strukturen fälschlicherweise als Straßen extrahiert werden. Diese Parameterwahl ist aber aufgrund der Information aus der Netzwerkanalyse gerechtfertigt.

4.1.5 Einfügen verifizierter Verbindungshypothesen

Wenn eine Straße gefunden wurde, die die beiden Endpunkte der Verbindungshypothese verbindet, wird diese folgendermaßen in das bestehende Straßennetz eingefügt.

Zuerst werden alle redundanten Teilstücke der neuen Verbindung, d.h. Teile, die sich mit dem bestehenden Straßennetz überlappen¹ eliminiert (siehe Abb. 4.4). In den meisten Fällen bleibt *ein*

¹Die Überlappung wird dabei mit der in Kapitel 5.1.1 dargestellten Puffermethode unter Berücksichtigung von Richtungsunterschieden bestimmt.

großes Teilstück übrig. Dieses Teilstück wird dann in das bestehende Netzwerk so eingefügt, daß seine beiden Endpunkte direkt mit den entsprechend nächsten Punkten des Netzwerkes verbunden werden. Ist der nächste Punkt kein Endpunkt einer Straße oder keine Kreuzung, so wird an dieser Stelle eine neue Kreuzung eingefügt. Fragmente des bestehenden Straßennetzes können dazu führen, daß nach der Elimination der redundanten Teilstücke mehr als ein Teilstück übrig bleibt (Abb. 4.5). Ist dies der Fall, so wird jedes dieser Teilstücke wie oben beschrieben in das bestehende Straßennetz eingefügt. Auf diese Weise können die bereits extrahierte Fragmente in das Straßennetz eingebunden werden. Wird die gesamte Verbindung eliminiert, kann kein Teil in das Netzwerk eingefügt werden und die entsprechende Verbindungshypothese wird nachträglich abgelehnt.

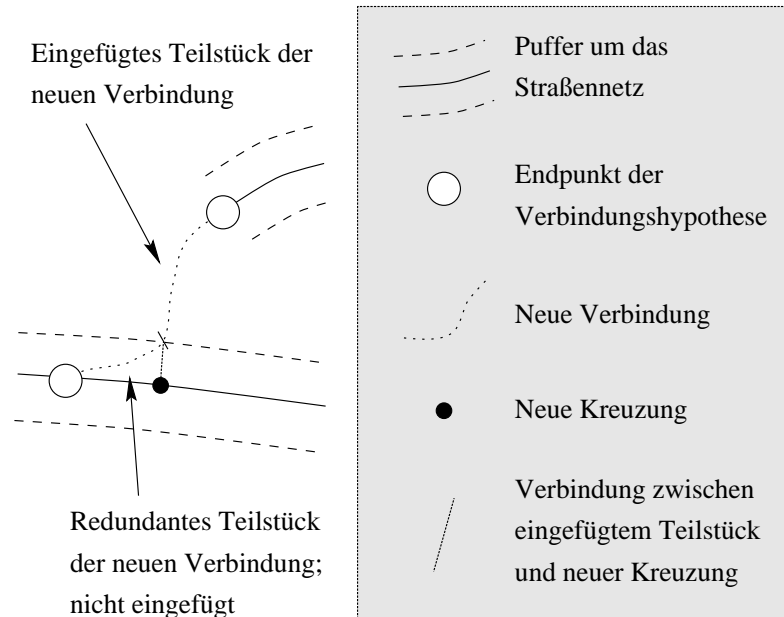


Abbildung 4.4. Einfügen einer neuen Verbindung

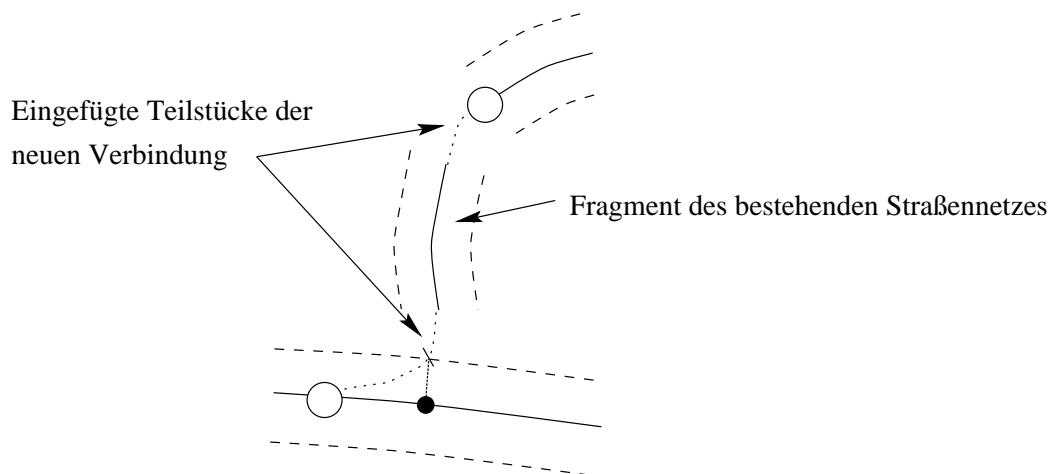


Abbildung 4.5. Einfügen mehrerer Teilstücke einer neuen Verbindung

4.1.6 Ablauf der Vervollständigung

Da der *Umwegfaktor* eine stärkere Aussagekraft besitzt als der *Verbindungsfaktor*, wird folgender Gesamtablauf bei der Vervollständigung von Straßennetzen vorgeschlagen (siehe Abb. 4.6): Zuerst werden alle Verbindungshypothesen innerhalb von Zusammenhangskomponenten gemäß dem in Kapitel 4.1.2 beschriebenen Vorgehen generiert, verifiziert und ggf. in das bestehende Netzwerk eingefügt. Kann durch dieses Vorgehen keine weitere Verbindungshypothese mehr generiert werden, bzw. liegt der *Umwegfaktor* unterhalb eines gegebenen Schwellwertes $Umwegfaktor_{min}$, werden Verbindungshypothesen zwischen unterschiedlichen Zusammenhangskomponenten generiert (Kapitel 4.1.3). Kann eine dieser Verbindungshypothesen angenommen und in das bestehende Netzwerk eingefügt werden, ändert sich die Netzwerktopologie grundlegend und es wird wieder mit der Generierung von Verbindungshypothesen innerhalb von Zusammenhangskomponenten begonnen, wobei sich die Untersuchungen auf die, durch das Einfügen der neuen Verbindung, neu entstandene Zusammenhangskomponente beschränken können. Kann keine weitere Verbindungshypothese zwischen unterschiedlichen Zusammenhangskomponenten generiert werden, bzw. liegt der *Verbindungsfaktor* unterhalb eines gegebenen Schwellwertes $Verbindungsfaktor_{min}$, ist die Vervollständigung abgeschlossen.

4.2 Rekonstruktion von Kreuzungen

Das in Kapitel 3 beschriebene Verfahren zur vorläufigen Extraktion von Straßennetzen weist Schwächen im Bereich von Kreuzungen und Einmündungen auf. Hier kann es — bedingt durch die Extraktionsstrategie — dazu kommen, daß statt der korrekten Kreuzung bzw. Einmündung (Abb. 4.7a) Zyklen im Kreuzungs- bzw. Einmündungsbereich (Abb. 4.7b) extrahiert werden.

Ursache hierfür ist, daß sich das Straßennetz aus der Vereinigung aller besten Pfade zwischen den Startstücken zusammensetzt und ein wesentliches Kriterium für die Bestimmung dieser Pfade ihre Länge ist. Daher werden abrupte Richtungswechsel, wie sie z.B. bei Einmündungen auftreten, ggf. „abgeschnitten“. Die Vereinigungsmenge dieser Abkürzungen ergibt die dargestellten Zyklen. Diese Extraktionsfehler treten auf, weil Kreuzungen bei der vorläufigen Extraktion nicht explizit modelliert sind. Da Kreuzungen aber einen elementaren Bestandteil des Straßennetzes darstellen, ist es notwendig, das vorläufige Extraktionsergebnis in den Kreuzungsbereichen zu verbessern.

Im folgenden wird zuerst das Modell beschrieben, das für die Rekonstruktion von Kreuzungen verwendet wird. Danach wird die Detektion und Eliminierung der Zyklen erläutert, woran sich die Beschreibung der Strategie für die Rekonstruktion der Kreuzungen anschließt.

4.2.1 Modell für Kreuzungen

Kreuzungen sind Punkte, in denen drei oder vier Straßenstücke miteinander verbunden sind. Kreuzungen, in denen nur drei Straßenstücke miteinander verbunden sind, werden auch Einmündung genannt. Von den Straßenstücken hängen mindestens zwei so zusammen, daß sie Teil einer durchgehenden Straße sind, die ohne größere Geschwindigkeitsanpassungen befahrbar ist. Jede durchgehende Straße wird im folgenden als „Hauptstraße“ bezeichnet, alle übrigen Straßenstücke als „Abzweigungen“. Die Mittelachsen der Hauptstraßen verlaufen — ohne Rücksicht auf Abzweigungen — in der Mitte der für den durchgehenden Verkehr zur Verfügung stehenden Verkehrsfläche. Die Mittelachsen der Abzweigungen münden möglichst orthogonal in die Mittelachse einer Hauptstraße oder einer anderen Abzweigung ein, wobei in letzterem Fall die Kreuzung in zwei Einmündungen zerfällt (Abb. 4.8c). Beispiele für Kreuzungen sind in Abb. 4.8 dargestellt.

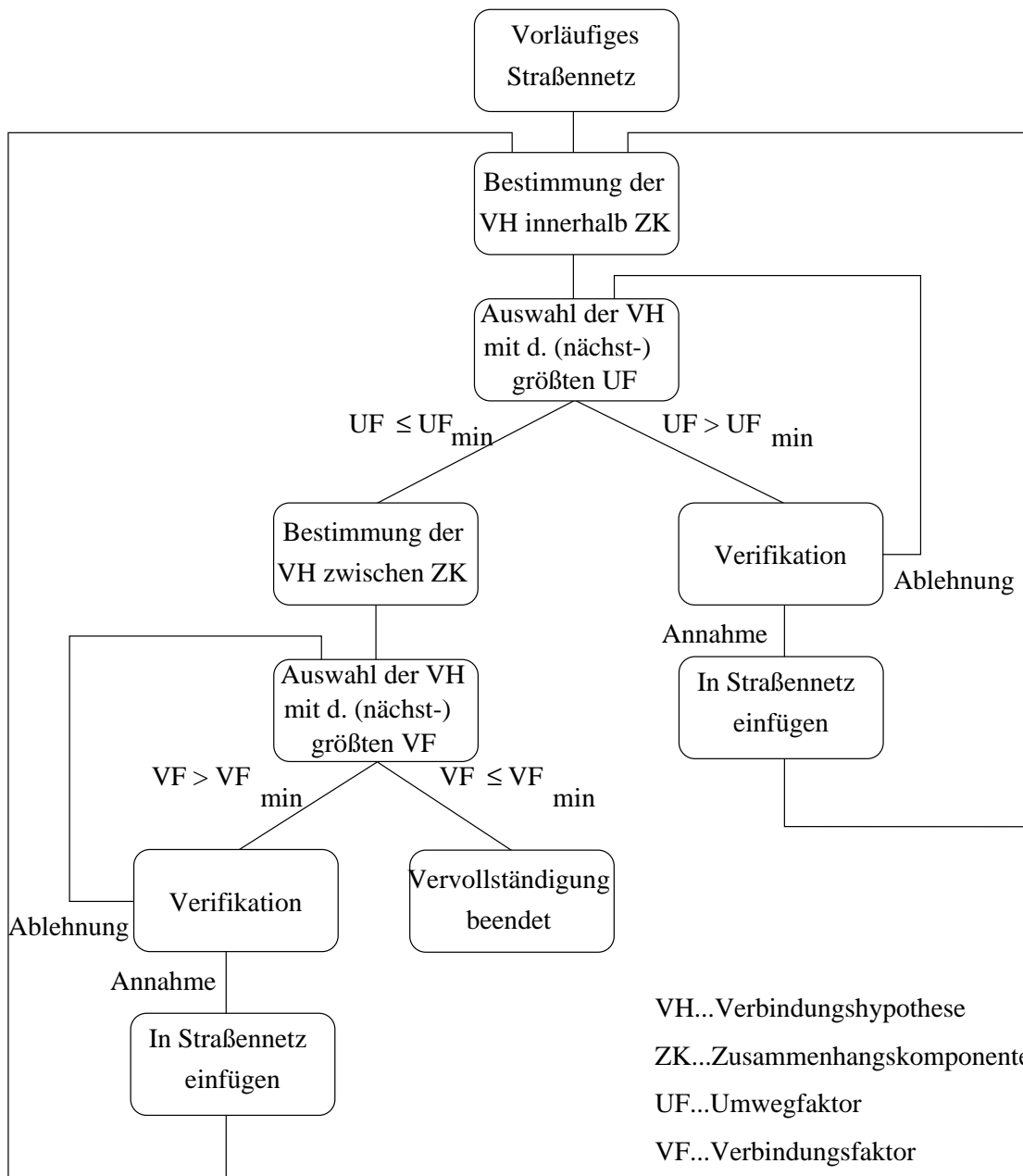
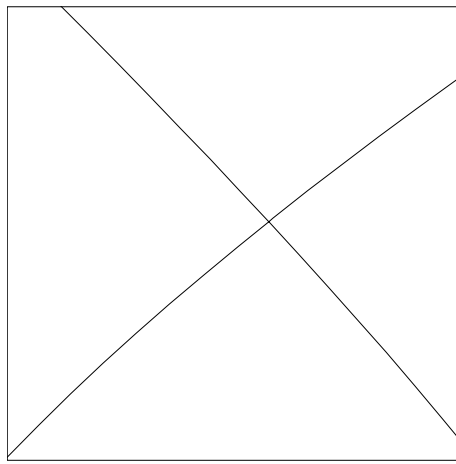


Abbildung 4.6. Ablauf der Vervollständigung von Straßennetzen

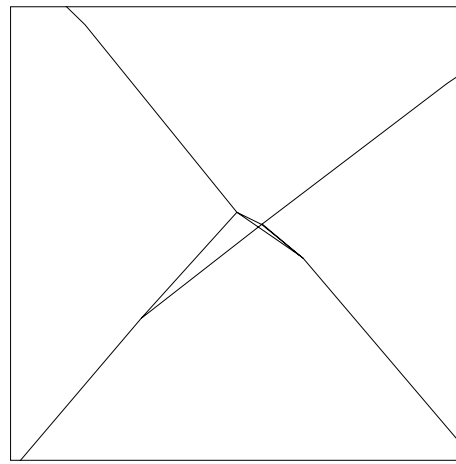
4.2.2 Rekonstruktion der Topologie

Ziel dieses Schrittes ist es, alle Zyklen, die im Bereich von Kreuzungen auftreten, zu detektieren und zu eliminieren. Hierzu werden zuerst alle minimalen Zyklen bestimmt. Das extrahierte Straßennetz wird hierfür als Graph repräsentiert. In jedem Knoten werden die mit diesem Knoten inzidenten Kanten der Richtung ihres Abgehens nach geordnet in eine zyklische Liste eingetragen. Um einen minimalen Zyklus zu finden, wird zuerst, beginnend mit einer beliebigen Kante, einer der beiden Knoten gewählt, mit dem die Kante inzident ist. In diesem wird dann die in der zyklischen Liste nächste Kante genommen und von dieser Kante der andere Knoten bestimmt usw. Wird auf diese Weise wieder der Anfangspunkt erreicht, so wurde ein minimaler Zyklus detektiert. Von allen detektierten Zyklen werden nur die ausgewählt, die eine kleine Fläche umschließen. Haben zwei Zyklen eine gemeinsame Kante, so werden sie durch Löschen dieser Kante zu einem Zyklus vereinigt.

Alle Knoten eines Zyklus, mit denen mindestens eine Kante inzident ist, die nicht dem Zyklus

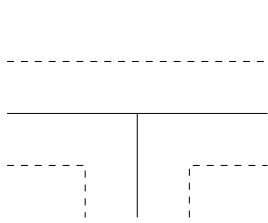


a) Korrekt extrahierte Kreuzung

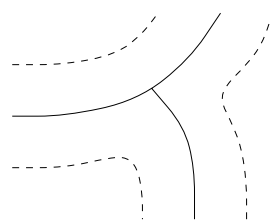
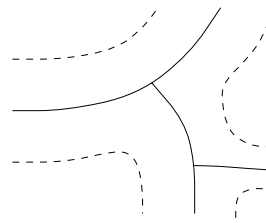
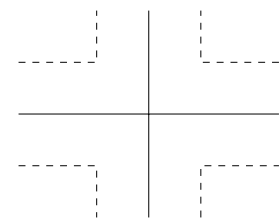


b) Mit Zyklen extrahierte Kreuzung

Abbildung 4.7. Extraktionsergebnisse im Bereich einer Kreuzung



a) Einmündung

b) Einmündung bei
abgelenkter Hauptstraßec) Abzweigung mündet
in Abzweigung

d) Kreuzung

Abbildung 4.8. Beispiele für Einmündungen und Kreuzungen (Straßenachse: durchgezogene Linie; Straßenrand: gestrichelte Linie)

angehört, werden als Randknoten bezeichnet. Zur Eliminierung des Zyklus werden alle Kanten und Knoten des Zyklus, bis auf seine Randknoten gelöscht. Ein neuer Knoten, der vorläufige Kreuzungsmittelpunkt, wird eingefügt und mit allen Randknoten durch jeweils eine Kante verbunden. Die Koordinaten dieses neuen Knotens können z.B. die Mittelwerte der Koordinaten der Randknoten sein. Durch diese Schritte ist die Topologie der modellierten Kreuzungen wiederhergestellt. Im nächsten Abschnitt wird die Geometrie der Kreuzung bestimmt.

4.2.3 Rekonstruktion der Geometrie

Pro Kreuzung werden alle nach dem verwendeten Modell für Kreuzungen möglichen Kombinationen von Hauptstraßen und Abzweigungen unter Verwendung der topologisch korrigierten Extraktionsergebnisse² und der Bilddaten gebildet und bewertet. Die Hauptstraßen und Abzweigungen entstehen dabei durch Glättung der Extraktionsergebnisse im Kreuzungsbereich, wobei im Falle von größeren Teilstücken, die nicht der Linienextraktion entstammen, die Bildinformation genutzt wird. Die Kombination von Hauptstraßen und Abzweigungen, die die beste Bewertung erhält, wird als endgültige Kreuzung betrachtet und an Stelle der vorläufigen Kreuzung in das Straßennetz eingefügt.

²Die topologisch korrigierten Extraktionsergebnisse enthalten in der Regel Kreuzungen, deren Topologie rekonstruiert wurde, da sie Zyklen enthielten, aber auch Kreuzungen, für die dieser Schritt nicht notwendig war, da sie bei der vorläufigen Extraktion ohne Zyklen extrahiert wurden.

4.2.3.1 Hauptstraßen

Hauptstraßen werden (im lokalen Umfeld von Kreuzungen) durch ein Kurvensegment dargestellt, das durch eine Funktion dritten Grades beschrieben ist. Da sich eine Hauptstraße aus zwei Straßenstücken zusammensetzt, die durchgehend befahrbar sind, werden diese beiden Straßenstücke gemeinsam durch *ein* solches Kurvensegment approximiert. Enthalten die Straßenstücke längere Abschnitte, für die aufgrund von Verknüpfungen oder der Eliminierung von Zyklen keine aus den Bilddaten extrahierten Linienpunkte vorliegen, so werden hier zur Bestimmung des Kurvensegments nochmals die Bilddaten verwendet. Dies erfolgt durch die Extraktion von Profilen senkrecht zur vorläufigen Straßenrichtung aus einem Bild, welches die Linienstärke in jedem Pixel darstellt. Auch diese zusätzlichen Punkte werden durch das Kurvensegment approximiert, wobei Punkte mit deutlicher Linieninformation höher gewichtet werden als Punkte mit schwacher Linieninformation.

Die Approximierung der Punkte durch das Kurvensegment wird durch eine Kleinste-Quadrate-Ausgleichung nach dem Modell der bedingten Ausgleichung mit Unbekannten vorgenommen.

Da die Hauptstraße Teil des gesamten Straßennetzes ist, werden Anfangs- und Endpunkt festgehalten. Die Richtungen der extrahierten Linien, die durch Anfangs- und Endpunkt verlaufen, können aufgrund von lokalen Störungen verfälscht sein. Diese Richtungen werden daher nicht zur Festlegung der Richtungen des Kurvensegments in diesen Punkten verwendet. Dies kann dazu führen, daß sich nach dem Einfügen des approximierten Kurvensegments in die ursprüngliche Extraktion am Anfangs- und Endpunkt des Kurvensegments Knickstellen ergeben.

4.2.3.2 Abzweigungen

Die Extraktion der Abzweigungen erfolgt in Anlehnung an die Extraktion der Hauptstraßen, wobei zwei wesentliche Unterschiede bestehen: (1) Eine Abzweigung besteht aus nur einem Straßenstück, (2) jede Abzweigung mündet möglichst orthogonal in eine Hauptstraße bzw. eine weitere Abzweigung.

Zur Umsetzung der Bedingung, daß eine Abzweigung in eine Hauptstraße mündet, ist folgende Anpassung des Ausgleichungsmodells notwendig:

Der Anfangspunkt wird nicht mehr festgehalten, sondern liegt auf der Hauptstraße. Die Position des Anfangspunktes der Abzweigung wird dabei im Rahmen der Ausgleichung mitgeschätzt. Die Orthogonalitätsbedingung wird durch eine Bedingungsgleichung eingeführt.

4.2.3.3 Bewertung der Kreuzungen

Die Bewertung der Hauptstraßen erfolgt anhand der folgenden Attribute:

- Mittlere Krümmung
- Mittlere Krümmungsänderung
- Homogenität der Grauwerte entlang der Mittelachse

Diese Attribute werden durch lineare Fuzzy-Funktionen in vorläufige Fuzzy-Werte transformiert. Diese vorläufigen Fuzzy-Werte werden mittels des Fuzzy *und* Operators zu einem Fuzzy-Wert vereinigt.

Die Bewertung der Abzweigungen erfolgt anhand der folgenden Attribute:

- Mittlere Krümmung
- Mittlere Krümmungsänderung

- Homogenität der Grauwerte entlang der Mittelachse
- Abweichung des Abzweigungswinkels von 90°

Diese Attribute werden ebenfalls durch lineare Fuzzy-Funktionen in vorläufige Fuzzy-Werte transformiert. Diese vorläufigen Fuzzy-Werte werden mittels des Fuzzy *und* Operators zu einem Fuzzy-Wert vereinigt.

Die endgültige Bewertung der Kreuzung erfolgt durch eine gewichtete Mittelbildung der Fuzzy-Werte für die Hauptstraße(n) und die Abzweigung(en). Setzt sich die Kreuzung aus zwei Einmündungen zusammen, d.h. besteht sie aus einer Hauptstraße und zwei Abzweigungen, wird zusätzlich der Abstand der beiden Einmündungen voneinander bewertet³. Der hierfür notwendige Parameter bestimmt, wie weit zwei Einmündungen voneinander entfernt sein müssen, damit sie nicht durch *eine* Kreuzung dargestellt werden.

Die Kreuzung, die die beste Bewertung erhalten hat, wird an Stelle der vorläufigen Kreuzung in das Straßennetz eingefügt. Hierzu werden die Kurvensegmente durch Pixelketten approximiert.

Die Modellierung der Kreuzungen beschränkt sich in dieser Arbeit auf relativ einfache, aber häufig auftretende Kreuzungstypen. Von den vorherrschenden Kreuzungstypen sind

- Kreisverkehr
- Kreuzungen mit mehr als vier einmündenden Straßen sowie
- Planfreie Kreuzungen

nicht modelliert. Im Falle des Kreisverkehrs und von planfreien Kreuzungen führt dies zu Fehlern in der Extraktion, da diese Kreuzungstypen nicht erkannt werden und daher nicht von der Verarbeitung ausgeschlossen werden können. Für Kreuzungen mit mehr als vier einmündenden Straßen erfolgt keine geometrische Rekonstruktion, d.h., es wird lediglich die topologische Rekonstruktion durchgeführt und der vorläufige Kreuzungsmittelpunkt in das Endergebnis übernommen.

³Als Abstand zweier Einmündungen voneinander wird der Abstand zwischen den beiden Knoten betrachtet, in denen die Abzweigungen in die Hauptstraße münden.

5. Externe Bewertung

Für die Praxisrelevanz automatischer Systeme sind interne Bewertung (Selbstdiagnose) sowie externe Bewertung der erzielten Extraktionsergebnisse von sehr hoher Bedeutung. Dies gilt auch für automatische Bildanalysesysteme im Bereich Photogrammetrie und Fernerkundung. Trotzdem existieren bisher vergleichsweise wenige Arbeiten zu dieser Thematik. Der Hauptgrund dürfte die Qualität der Extraktionsergebnisse sein, die für praktische Anwendungen meist noch nicht ausreicht. Erst in den letzten Jahren haben automatische Bildanalysesysteme einen Stand erreicht, der eine gewisse Aufmerksamkeit seitens der Praxis hervorruft. Dies führte dazu, daß die Bedeutung der Bewertung von Extraktionsergebnissen in zunehmendem Maße erkannt wird (RUSKONÉ 1996, PHILLIPS et al. 1997, BOWYER und PHILLIPS 1998, WIEDEMANN et al. 1998b, SHUFELT 1999, DAGM-WG 2001).

Die Bewertung sollte möglichst objektive, quantitative Ergebnisse liefern. Hierzu benötigt die externe Bewertung Referenzdaten, mit denen die Extraktionsergebnisse verglichen werden. Durch den Vergleich wird ermittelt, wie gut die Extraktionsergebnisse mit dem gewünschten Ergebnis (den Referenzdaten) übereinstimmen. Damit kann die Qualität des Extraktionsergebnisses bzw. die Tauglichkeit des Extraktionsalgorithmus für praktische Aufgaben abgeschätzt werden. Diese Abschätzung gilt, streng genommen, nur für das bei der Bewertung verwendete Datenmaterial, wobei angenommen wird, daß die Qualität der Extraktionsergebnisse für vergleichbares Datenmaterial ähnlich ist. In der Regel ist allerdings in diesem Zusammenhang die Bedeutung des Wortes „vergleichbar“ unklar und vom verwendeten Extraktionsalgorithmus abhängig.

Das in diesem Kapitel beschriebene Verfahren zur externen Bewertung der Ergebnisse der automatischen Straßenextraktion gliedert sich in zwei Schritte: (1) Zuordnung von Extraktion und Referenz und (2) Berechnung der Qualitätsmaße. Zwischen diesen beiden Schritten besteht eine Abhängigkeit: Je toleranter die Zuordnung ist, desto vollständiger und korrekter erscheint die Extraktion wobei die geometrische Genauigkeit abnimmt. Aus diesem Grund ist die Zuordnung als fester Bestandteil der Bewertung anzusehen.

Im folgenden wird zuerst das Zuordnungsverfahren beschrieben. Anschließend wird die Bestimmung der Qualitätsmaße zur externen Bewertung der extrahierten Straßen, der Netzwerkeigenschaften des Straßennetzes sowie der Kreuzungen dargestellt.

5.1 Zuordnung

Die Zuordnung liefert einerseits die Teile der Referenz, die mit der Extraktion übereinstimmen, d.h., die Teile des Straßennetzes, die extrahiert wurden sowie die Teile der Referenz, die nicht mit der Extraktion übereinstimmen, also nicht extrahiert wurden. Andererseits liefert sie die Teile der Extraktion, die mit der Referenz übereinstimmen, d.h. korrekt extrahiert wurden sowie die Teile der Extraktion, die nicht mit der Referenz übereinstimmen, also fehlerhaft extrahiert wurden.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten die Zuordnung zweier Netzwerke vorzunehmen. Insbesondere wenn die geometrische Transformation zwischen den beiden Netzen unbekannt ist, können relationale Zuordnungsverfahren erfolgreich eingesetzt werden (VOSSELMAN 1992, LI et al. 1992, CHRISTMAS et al. 1994, CHRISTMAS et al. 1995). Diese Verfahren sind sehr rechenintensiv und häufig auf 1:1 Zuordnungen beschränkt. Probleme ergeben sich bei dieser Zuordnung insbesondere dann, wenn die Referenz und die Extraktion topologisch unterschiedlich sind und wenn die Extraktion redundant ist. Eine Erweiterung für beliebige n:m Zuordnungen bei gleichzeitiger Einschränkung des Suchraumes ist in WALTER (1996) beschrieben, wobei nicht geklärt ist, wie diese Zuordnung für topologisch unterschiedliche Netzwerke allgemein definiert werden kann.

Ist die geometrische Transformation zwischen den Netzen bekannt, so können einfachere Verfahren angewendet werden. Bei der sog. „Puffer-Methode“ werden diejenigen Teile eines Netzes, die nicht weiter als eine bestimmte Strecke von dem anderen Netz entfernt sind, als zugeordnet betrachtet. Die Zuordnung wird dabei nicht von unterschiedlichen Netzwerktopologien beeinflusst. Nachteile dieser Methode sind, daß redundante Zuordnungen nicht direkt erkannt und Richtungsunterschiede zwischen den zugeordneten Teilen nicht berücksichtigt werden.

Für die Aufgabe der Bewertung automatischer Straßenextraktionsergebnisse ist die geometrische Transformation zwischen den beiden Netzen sehr gut bekannt. Daher wird die Zuordnung mittels der Puffer-Methode durchgeführt, wobei zusätzlich die Richtungsunterschiede zwischen Extraktion und Referenz berücksichtigt werden.

5.1.1 Prinzip der Puffermethode unter Berücksichtigung von Richtungsunterschieden

Das Prinzip der Puffermethode unter Berücksichtigung von Richtungsunterschieden besteht darin, daß alle Teile eines Datensatzes (z.B. der Extraktion), die nahe genug an Teilen des anderen Datensatzes (z.B. der Referenz) liegen, als zugeordnet betrachtet werden, wenn der Richtungsunterschied zwischen den sich entsprechenden Teilen der unterschiedlichen Datensätze klein genug ist. Zur Veranschaulichung des Vorgehens wird dieses im folgenden in zwei Teilschritten dargestellt:

Zuerst wird ein Puffer mit vorgegebener Breite (Pufferbreite) um die Referenzdaten gelegt (siehe Abb. 5.1a). Die Teile der Extraktion, die innerhalb des Puffers liegen und deren Richtungsunterschied zu dem entsprechenden Teil der Referenz nicht zu groß ist ($\alpha < \alpha_{max}$), werden als zugeordnet, d.h., als korrekt extrahiert angesehen. Entsprechend der Notation von (MCGLONE und SHUFELT 1994) und (CMU 1997) werden die zugeordneten Teile der Extraktion als *true positive* mit der Länge TP bezeichnet. Die nicht zugeordneten Teile der Extraktion werden als *false positive* mit der Länge FP bezeichnet.

Danach erfolgt die Zuordnung in die andere Richtung, d.h., der Puffer wird um die Extraktion gelegt (siehe Abb. 5.1b) und die Teile der Referenz, die innerhalb des Puffers um die Extraktion liegen und die Richtungsbeschränkung erfüllen werden zugeordnet. Die nicht zugeordnete Referenz wird als *false negative* mit der Länge FN bezeichnet.

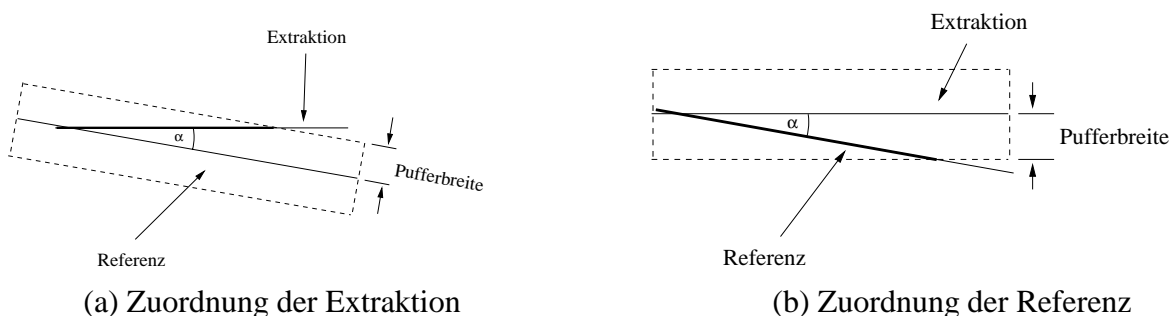


Abbildung 5.1. Prinzip der Zuordnung (Die breiter dargestellten Abschnitte der Extraktion (a) bzw. Referenz (b) stellen die zugeordneten Teile dar)

5.1.2 Aspekte der Realisierung

Die Zuordnung nach der Puffer-Methode läßt sich prinzipiell sehr gut rasterbasiert durchführen. Die Generierung der Puffer erfolgt dann durch Dilatation der aufgerasterten Linien, die Überprüfung, ob eine Linie innerhalb eines Puffers liegt durch Verschneidung der Linie mit dem Puffer. Allerdings ist die Berücksichtigung der Richtungsinformation schwierig zu integrieren. Sie müßte durch eine pixelweise Kodierung des Puffers erfolgen, was einerseits die Generierung des Puffers und andererseits

die Verschneidung aufwendiger machen würde. Auch eine Unterscheidung zwischen Straßenstücken und Kreuzungen ist nur durch ein getrenntes Aufrastern dieser beiden Bestandteile des Straßennetzes möglich. Aus diesen Gründen wurde die Zuordnung auf Vektorbasis implementiert.

Sowohl die Extraktion als auch die Referenz werden in die Zuordnung als Vektordaten in Form eines Graphen eingeführt. Sämtliche Knoten mit Knotengrad zwei werden eliminiert, d.h., die mit diesen Knoten inzidenten Kanten werden jeweils zu einer Kante verbunden. Danach werden ggf. Hilfsknoten mit Knotengrad zwei gezielt in beide Netzwerke eingefügt¹. Von jedem Knoten eines Netzwerkes wird der kürzeste Abstand zum anderen Netzwerk unter Berücksichtigung der Richtung berechnet (siehe unten). Ist dieser Abstand kleiner als die Pufferbreite, wird der Knoten als *zugeordnet* betrachtet, ansonsten als *nicht zugeordnet*.

Die Definition der kürzesten Entfernung legt die Form des Puffers fest, der für die Zuordnung verwendet wird. Im folgenden werden zwei mögliche Definitionen der kürzesten Entfernung einander gegenübergestellt (andere Definitionen sind möglich, werden aber hier nicht betrachtet).

Es sei \mathbf{m} das Netzwerk, dessen Knoten in Abhängigkeit von der Entfernung zu Netzwerk \mathbf{n} *zugeordnet* bzw. *nicht zugeordnet* werden. Für einen Knoten \mathbf{P} auf \mathbf{m} kann die Entfernung zu \mathbf{n} als Euklidischer Abstand zwischen \mathbf{P} und dem Schnittpunkt \mathbf{S} von \mathbf{n} mit der Geraden \mathbf{l} durch \mathbf{P} definiert werden. \mathbf{l} soll dabei entweder senkrecht zu \mathbf{m} in \mathbf{P} (Fall 1, siehe Abb. 5.2a)), oder senkrecht zu \mathbf{n} in \mathbf{S} (Fall 2, siehe Abb. 5.2b)) gewählt sein.

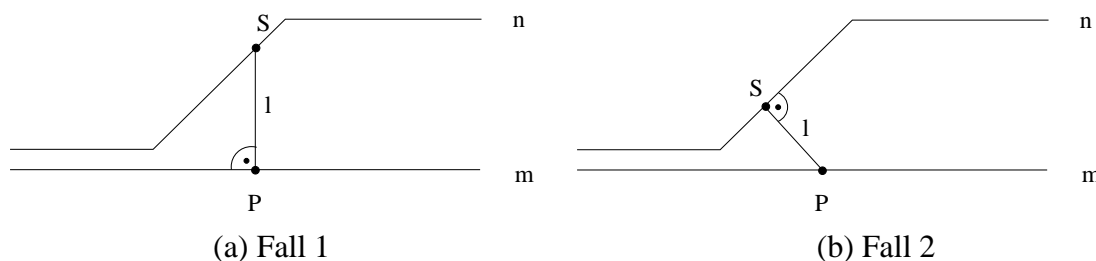


Abbildung 5.2. Entfernungsdefinitionen

Zur Bestimmung der Form des Puffers wird die Entfernung zu \mathbf{n} für jeden Knoten \mathbf{P} auf \mathbf{m} berechnet, wobei der Abstand der Knoten zueinander sehr klein (z.B. ein Pixel) ist. In Fall 1 ergibt sich der in Abb. 5.3a) dargestellte Puffer, dessen Form von der Richtungsdifferenz zwischen den beiden zuzuordnenden Netzwerken abhängt.

In Fall 2 ergibt sich der in Abb. 5.3b) dargestellte Puffer. Hierfür wird in dem Sonderfall, daß kein Schnittpunkt \mathbf{S} existiert, in dem \mathbf{l} senkrecht auf \mathbf{n} steht (Abb. 5.4a)), \mathbf{S} in den zu \mathbf{P} nächsten Knoten von \mathbf{n} gelegt (Abb. 5.4b)). In diesem Fall wird die Richtung von \mathbf{n} durch die Richtung der mit \mathbf{S} inzidenten Kante aus \mathbf{n} definiert, die die geringste Richtungsdifferenz mit \mathbf{m} in \mathbf{P} hat. Der in diesem Fall entstehende Puffer hat eine konstante Breite und ist somit unabhängig von Richtungsdifferenzen zwischen \mathbf{m} und \mathbf{n} .

Die in dieser Arbeit beschriebene externe Bewertung, basiert auf einer Implementierung von Fall 2 der Entfernungsdefinition, da hiermit eine strikte Trennung von Entfernung und Richtung möglich ist.

Für die Bewertung des Netzwerkes (Kapitel 5.3) ist die Zuordnung dahingehend erweitert, daß sie nicht nur bestimmt, ob ein Knoten zugeordnet ist, d.h., ob er innerhalb des Puffers um das andere Netzwerk liegt, sondern es wird darüberhinaus für jeden zugeordneten Knoten \mathbf{P} der Lotfußpunkt \mathbf{S} (siehe Abb. 5.2b)) gespeichert, der im folgenden als homologer Knoten zu \mathbf{P} bezeichnet wird.

¹Ob, und wenn ja in welchem Abstand Hilfsknoten eingefügt werden, hängt davon ab, für die Berechnung welcher Qualitätsmaße die Zuordnung durchgeführt wird. Diese Frage wird in den entsprechenden Kapitel (5.2, 5.3.1, 5.3.2, 5.4) diskutiert.

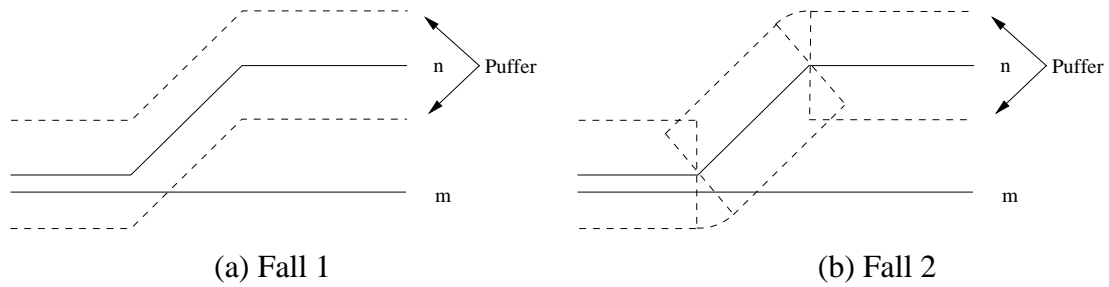


Abbildung 5.3. Resultierender Puffer

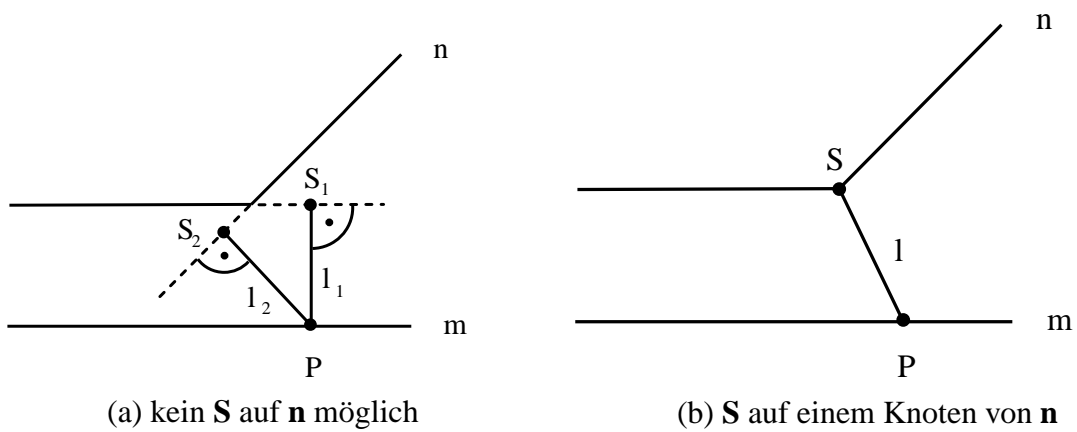


Abbildung 5.4. Sonderfall der Abstandsberechnung in Fall 2

5.2 Bewertung der Straßen

Die externe Bewertung der Straßen basiert auf der Zuordnung von Extraktionsergebnis und Referenzdaten, wie sie im vorangegangenen Kapitel dargestellt wurde. Aus den Zuordnungsergebnissen werden Qualitätsmaße abgeleitet, die die folgende Fragen beantwortet sollen: (1) Wie vollständig, (2) wie korrekt und (3) wie genau sind die Extraktionsergebnisse?

Für die Zuordnung werden Hilfsknoten in gleichmäßigem Abstand (Hilfsknotenabstand) in die Netzwerke eingefügt. Im folgenden werden lediglich diese Hilfsknoten, nicht aber die übrigen Knoten mit Knotengrad ungleich zwei verwendet. Jeder Knoten repräsentiert ein Teilstück des jeweiligen Netzwerkes. Da die Länge dieser Teilstücke bekannt ist (Hilfsknotenabstand), kann die Länge der *zugeordneten* und der *nicht zugeordneten* Teile des jeweiligen Netzwerkes durch Multiplikation der Anzahl *zugeordneter/nicht zugeordneter* Knoten mit dem Hilfsknotenabstand berechnet werden. Damit lassen sich die Qualitätsmaße Vollständigkeit und Korrektheit gemäß der folgenden Definition bestimmen.

- Vollständigkeit

$$\begin{aligned} \text{Vollständigkeit} &= \frac{\text{Länge der zugeordneten Referenz}}{\text{Länge der Referenz}} \\ &\approx \frac{\text{Anzahl der zugeordneten Knoten der Referenz}}{\text{Anzahl der Knoten der Referenz}} \\ \text{Vollständigkeit} &\in [0; 1] \end{aligned}$$

Die Vollständigkeit ist der Prozentsatz der Referenz, der mit der Extraktion übereinstimmt, d.h., innerhalb des Puffers um die Extraktion liegt. Die Vollständigkeit stellt damit den Prozentsatz des Straßennetzes dar, der extrahiert wurde.

Der optimale Wert der Vollständigkeit ist 1.

- Korrektheit

$$\begin{aligned} \text{Korrektheit} &= \frac{\text{Länge der zugeordneten Extraktion}}{\text{Länge der Extraktion}} \\ &\approx \frac{\text{Anzahl der zugeordneten Knoten der Extraktion}}{\text{Anzahl der Knoten der Extraktion}} \\ \text{Korrektheit} &\in [0; 1] \end{aligned}$$

Die Korrektheit ist der Prozentsatz der Extraktion, der mit der Referenz übereinstimmt, d.h., innerhalb des Puffers um die Referenz liegt. Die Korrektheit stellt damit die Wahrscheinlichkeit dar, daß ein beliebig herausgegriffenes Stück der Extraktion tatsächlich eine Straße darstellt.

Der optimale Wert der Korrektheit ist 1.

- RMS der Differenzen

$$\begin{aligned} \text{RMS} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l d(\text{Extr}_i; \text{Ref})^2}{l}} \\ l &= \text{Anzahl der zugeordneten Knoten der Extraktion} \\ d(\text{Extr}_i; \text{Ref}) &= \text{kürzeste Entfernung zwischen dem} \\ &\quad \text{i-ten zugeordneten Knoten der Extraktion und} \\ &\quad \text{der Referenz} \\ \text{RMS} &\in [0; \text{Pufferbreite}] \end{aligned}$$

Die RMS der Differenzen stellt den Abstand zwischen der zugeordneten Extraktion und der entsprechenden Referenz und somit die geometrische Genauigkeit der Extraktion dar. Der

Wert ist von der verwendeten Pufferbreite abhängig. Bei einer Gleichverteilung der Extraktion innerhalb des Puffers läßt sich zeigen, daß

$$RMS = \frac{1}{\sqrt{3}} * Pufferbreite$$

gilt.

Der optimale Wert für RMS ist 0.

5.3 Bewertung des Netzwerks

Neben der Bewertung der Straßen durch die intuitiv erfaßbaren Qualitätsmaße Vollständigkeit, Korrektheit und RMS Differenzen wird auch die Netzwerkeigenschaft der Extraktion im Vergleich zur Referenz bewertet. Hierzu werden vier neue Maße eingeführt: *Mittlerer Umwegfaktor* und *Mittlerer Abkürzungsfaktor* bewerten die Erfüllung der Funktion des Straßennetzes, effiziente Verbindungen zwischen voneinander entfernten Orten bereitzustellen. *Topologische Vollständigkeit* und *topologische Korrektheit* dienen zur Bewertung der Topologie der Extraktion im Vergleich zur Referenz, d.h., sie drücken aus, inwiefern sich der Zusammenhang der Extraktion von dem der Referenz unterscheidet.

5.3.1 Verbindungsfunktion

Mit den Maßen *Mittlerer Umwegfaktor* und *Mittlerer Abkürzungsfaktor* wird die Frage beantwortet, inwiefern das extrahierte Straßennetz — verglichen mit der Referenz — weniger effiziente Verbindungen (Umwege) bzw. effizientere Verbindungen (Abkürzungen) enthält. Umwege entstehen durch Lücken innerhalb von Zusammenhangskomponenten der Extraktion, Abkürzungen durch zusätzliche Verbindungen, die in der Extraktion enthalten sind.

Die Bewertung der Verbindungsfunktion steht in engem Zusammenhang mit der Vervollständigung innerhalb von Zusammenhangskomponenten eines vorläufig extrahierten Netzwerkes (siehe Kapitel 4.1.2). Im Falle der Vervollständigung ist der optimale Weg zwischen zwei Knoten des Netzwerkes unbekannt und muß daher geschätzt werden. Da für die Bewertung Referenzdaten vorliegen, kann der optimale Weg direkt aus den Referenzdaten bestimmt werden.

Für die Zuordnung wird die erweiterte Version des in Kapitel 5.1 beschriebenen Verfahrens verwendet, die für jeden zugeordneten Knoten eines Netzwerkes, den homologen Knoten auf dem anderen Netzwerk liefert.

Im Gegensatz zur Vervollständigung, bei der gleichabständige Hilfsknoten eingefügt werden, müssen bei der Zuordnung für die Bestimmung des *mittleren Umwegfaktors* und des *mittleren Abkürzungsfaktors* prinzipiell nur Knoten mit Knotengrad ungleich zwei verwendet werden. Laufen aber Extraktion und Referenz, z.B. am Ende einer Sackgasse soweit auseinander, daß die jeweiligen Endpunkte nicht mehr innerhalb des Puffers um das andere Netzwerk liegen, so würde das dazu führen, daß die Endpunkte der Sackgasse einander nicht zugeordnet werden und die gesamte Sackgasse daher bei der Bewertung nicht berücksichtigt würde. Um dies zu vermeiden, wird für alle Kanten, die mit einem Knoten inzident sind, der außerhalb des Puffers um das andere Netzwerk liegt, ausgehend von diesem Knoten, der erste Schnittpunkt der Kante mit dem Rand des Puffers um das andere Netzwerk bestimmt und hier ein Hilfsknoten eingefügt. In Abb. 5.5 ist dies für das Einfügen eines Hilfsknotens in die Extraktion dargestellt.

Die Maße *Mittlerer Umwegfaktor* und *Mittlerer Abkürzungsfaktor* sind für eine gegebene minimale Entfernungsdifferenz Δl folgendermaßen definiert: Für jedes Paar (i, j) , $i \neq j$ von Knoten der Referenz, das in der Referenz miteinander verbunden ist und dessen homologe Knoten in der Extraktion

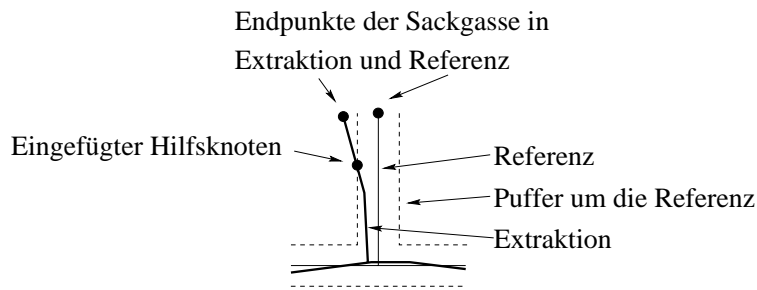


Abbildung 5.5. Einfügen eines Hilfsknotens für die Zuordnung zur Bestimmung des mittleren Umwegfaktors und des mittleren Abkürzungsfaktors

miteinander verbunden sind, wird die Entfernung entlang der Referenz ($\text{Netzwerkentfernung}^{\text{Ref}}$) und die Entfernung entlang der Extraktion ($\text{Netzwerkentfernung}^{\text{Extr}}$) berechnet. Dies erfolgt jeweils durch Bestimmung des kürzesten Pfades zwischen den jeweiligen Knoten. Ein Faktor q ist für jedes dieser Paare durch

$$q = \frac{\text{Netzwerkentfernung}^{\text{Extr}}}{\text{Netzwerkentfernung}^{\text{Ref}}}$$

definiert.

Ist

$$\text{Netzwerkentfernung}^{\text{Extr}} - \text{Netzwerkentfernung}^{\text{Ref}} > \Delta l$$

wird q als *Umwegfaktor* (Umwegfaktor in Bezug auf die Referenz) bezeichnet.

Ist

$$\text{Netzwerkentfernung}^{\text{Extr}} - \text{Netzwerkentfernung}^{\text{Ref}} < \Delta l$$

wird q als *Abkürzungsfaktor* (Abkürzungsfaktor in Bezug auf die Referenz) bezeichnet.

Ist

$$\left| \text{Netzwerkentfernung}^{\text{Extr}} - \text{Netzwerkentfernung}^{\text{Ref}} \right| \leq \Delta l$$

wird $q = 1.0$ gesetzt und für die folgenden Berechnungen sowohl als *Umwegfaktor* als auch als *Abkürzungsfaktor* betrachtet.

Der *Mittlere Umwegfaktor* ist der Mittelwert aller *Umwegfaktoren*. Um eine Verschiebung dieses Mittelwertes zu vermeiden, werden *Umwegfaktoren* mit $q = 1.0$, die nach obiger Definition auch als *Abkürzungsfaktoren* betrachtet werden, bei der Mittelbildung nur mit dem halben Gewicht der übrigen *Umwegfaktoren* berücksichtigt.

Der optimale Wert für den *Mittleren Umwegfaktor* ist 1.0.

Der *Mittlere Umwegfaktor* wird größer mit der Anzahl wichtiger Verbindungen, die in der Extraktion fehlen. Wichtig bedeutet in diesem Zusammenhang, daß ihr Fehlen einen großen Umweg bei dem jeweils kürzesten Pfad zwischen vielen Knotenpaaren verursacht. Darüberhinaus steigt der *Mittlere Umwegfaktor* mit dem Grad an, mit dem die Extraktion um die Referenz pendelt (siehe Abb. 5.6). Dieser Einfluß wird mit wachsendem Δl verringert.

Der *Mittlere Abkürzungsfaktor* ist der Mittelwert aller *Abkürzungsfaktoren*. Analog zum *Mittleren Umwegfaktor* werden *Abkürzungsfaktoren* mit $q = 1.0$ bei der Mittelbildung nur mit dem halben Gewicht der übrigen *Abkürzungsfaktoren* berücksichtigt.

Der optimale Wert für den *Mittleren Abkürzungsfaktor* ist 1.0.

Der *Mittlere Abkürzungsfaktor* wird mit der Anzahl wichtiger Verbindungen kleiner, die in der Extraktion zusätzlich enthalten sind. Wichtig bedeutet in diesem Zusammenhang, daß diese Verbindungen bei dem jeweils kürzesten Pfad zwischen vielen Knotenpaaren deutliche Abkürzungen erlauben. Darüberhinaus sinkt der *Mittlere Abkürzungsfaktor* mit dem Grad ab, mit dem die Extraktion gegenüber der Referenz generalisiert ist. Dieser Einfluß wird mit wachsendem Δl verringert.

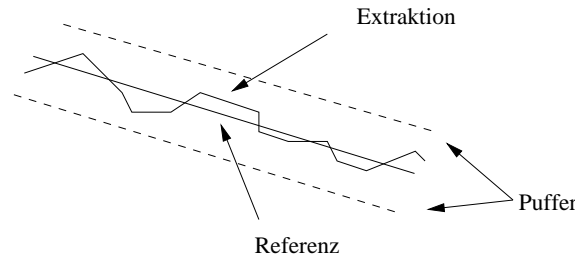


Abbildung 5.6. Extraktion pendelt um die Referenz

Durch die Wahl der minimalen Entfernungsdifferenz Δl läßt sich steuern, in welchem Maße Effekte, die durch eine um die Referenz pendelnde bzw. durch eine in Bezug auf die Referenz generalisierte Extraktion entstehen, bei der Bewertung unterdrückt werden.

5.3.2 Topologie

Mit den Maßen *Topologische Vollständigkeit* und *Topologische Korrektheit* wird die Frage beantwortet, inwiefern das extrahierte Straßennetz — verglichen mit der Referenz — zu wenige Verbindungen bzw. zu viele Verbindungen enthält. Topologische Unvollständigkeit entsteht durch fehlende Verbindungen zwischen Zusammenhangskomponenten, topologische Inkorrektheit durch Verbindungen zwischen Zusammenhangskomponenten, die in der Referenz nicht miteinander verbunden sind.

Die Bewertung der Topologie steht in engem Zusammenhang mit der Vervollständigung zwischen unterschiedlichen Zusammenhangskomponenten eines vorläufig extrahierten Netzwerkes (siehe Kapitel 4.1.3). Im Falle der Vervollständigung ist die Anzahl der möglichen Verbindungen im Straßennetz unbekannt und muß daher geschätzt werden. Da für die Bewertung Referenzdaten vorliegen, kann die Anzahl der Verbindungen direkt aus den Referenzdaten bestimmt werden.

Auch hier wird die erweiterte Version der Zuordnung verwendet, die homologe Knoten liefert. Da in der Regel keine Information über die zu verbindenden wichtigen Punkte des Straßennetzes vorliegt, wird eine gleichmäßige Verteilung dieser Punkte angenommen. Daher werden für die Zuordnung Hilfsknoten in gleichmäßigem Abstand in die Netzwerke eingefügt.

Für die Berechnung der *Topologischen Vollständigkeit* werden zunächst aus allen zugeordneten Knoten der Referenz alle Paare ermittelt, die in der Referenz miteinander verbunden sind, d.h., die in jeweils einer Zusammenhangskomponente liegen. Für diese **RV** Paare, die in der Referenz verbunden sind wird überprüft, ob ihre homologen Paare in der Extraktion miteinander verbunden sind. Das ergibt **BV^{Ref}** Paare, die in beiden Netzwerken verbunden sind. Mittels **RV** und **BV^{Ref}** ist die *Topologische Vollständigkeit* folgendermaßen definiert:

$$\begin{aligned} \text{Topologische Vollständigkeit} &= \frac{BV^{Ref}}{RV} \\ &= \frac{\# \text{ Paare, die in beiden Netzwerken verbunden sind}}{\# \text{ Paare, die in der Referenz insgesamt verbunden sind}} \end{aligned}$$

Der optimale Wert der *Topologischen Vollständigkeit* ist 100%. Die *Topologische Vollständigkeit* fällt mit zunehmender Fragmentierung der Extraktion in Bezug auf die Referenz ab.

Für die Berechnung der *Topologischen Korrektheit* werden zunächst aus allen zugeordneten Knoten der Extraktion alle Paare ermittelt, die in der Extraktion miteinander verbunden sind, d.h.,

die in der selben Zusammenhangskomponente liegen. Für diese **EV** Paare, die in der **Extraktion** verbunden sind, wird überprüft, ob ihre homologen Paare in der Referenz miteinander verbunden sind. Das ergibt **BV^{Extr}** Paare, die in beiden Netzwerken verbunden sind². Mittels **EV** und **BV^{Extr}** ist die *Topologische Korrektheit* folgendermaßen definiert:

$$\begin{aligned} \text{Topologische Korrektheit} &= \frac{BV^{Extr}}{EV} \\ &= \frac{\# \text{ Paare, die in beiden Netzwerken verbunden sind}}{\# \text{ Paare, die in der Extraktion insgesamt verbunden sind}} \end{aligned}$$

Der optimale Wert der *Topologischen Korrektheit* ist 100%. Die *Topologische Korrektheit* fällt mit steigender Anzahl wichtiger zusätzlicher, aber falscher Verbindungen in der Extraktion in Bezug auf die Referenz ab.

5.4 Bewertung der Kreuzungen

Kreuzungen stellen einen wichtigen Teil des Straßennetzes dar, da sie die Straßen miteinander zu einem Netzwerk verbinden. Die Bewertung der extrahierten Kreuzungen erfolgt analog zur Bewertung der Straßen, wie sie in Kapitel 5.2 beschrieben ist. Hierfür werden keine Hilfsknoten in die Netzwerke eingefügt.

Für die Zuordnung der Kreuzungen der Extraktion und der Referenz werden aus den beiden Netzwerken die Knoten mit einem Knotengrad von mindestens drei ausgewählt. Die Zuordnung wird mittels eines kreisförmigen Puffers durchgeführt, wobei innerhalb des Puffers nur nach Kreuzungen im jeweils anderen Straßennetz gesucht wird. Die Definition der kürzesten Entfernung zwischen den Kreuzungen der beiden Netzwerke vereinfacht sich hierbei auf den Euklidischen Abstand zwischen jeweils zwei Kreuzungen.

Die Qualitätsmaße zur Bewertung der Kreuzungen sind:

- Vollständigkeit_{Kreuzung}
- Korrektheit_{Kreuzung}
- Redundanz_{Kreuzung}

$$\text{Redundanz} = \frac{ZK^{Extr} - ZK^{Ref}}{ZK^{Extr}}$$

mit:

$$ZK^{Extr} = \text{Anzahl zugeordneter Kreuzungen der Extraktion}$$

$$ZK^{Ref} = \text{Anzahl zugeordneter Kreuzungen der Referenz}$$

Die Redundanz stellt den Prozentsatz der mehrfach korrekt extrahierten Kreuzungen dar.

Der optimale Wert der Redundanz ist 0.

- RMS_{Kreuzung} der Differenzen

Vollständigkeit, Korrektheit und RMS der Differenzen sind für die Kreuzungen analog zu den entsprechenden Qualitätsmaßen für Straßen definiert, die in Kapitel 5.2 eingeführt wurden, wobei jeweils die Form der Definitionen verwendet wird, die sich auf die Anzahl der Knoten bezieht.

²Hinweis: **BV^{Ref}** und **BV^{Extr}** sind identisch. Sie werden hier lediglich deswegen unterschiedlich bezeichnet, da dies für die Darstellung des Verfahrens günstig erscheint.

Als weitere Qualitätsmaße zur Bewertung der Kreuzungen wären u.a. auch die Übereinstimmung des Knotengrades der jeweils zugeordneten Kreuzung sowie ein Vergleich der Richtungen der von der Kreuzung abgehenden Straßenstücke denkbar. Zur Bewertung der in dieser Arbeit — basierend auf einer relativ einfachen Modellierung — extrahierten Kreuzungen erscheinen die oben genannten Qualitätsmaße jedoch ausreichend.

5.5 Parameter des Bewertungsverfahrens

In diesem Abschnitt werden die Parameter angesprochen, die die Bedeutung und die Genauigkeit der Qualitätsmaße maßgeblich beeinflussen. Zuerst werden die beiden Parameter „Pufferbreite“ und „maximale Richtungsabweichung“, die für die Zuordnung gewählt werden müssen, betrachtet. Anschließend wird der Hilfsknotenabstand diskutiert. Auch dieser Parameter steht in Verbindung mit der Zuordnung von Extraktion und Referenz. Darüberhinaus wird der Einfluß der minimalen Entfernungsdifferenz Δl auf die Qualitätsmaße exemplarisch für den mittleren Umwegfaktor und den mittleren Abkürzungsfaktor analysiert.

Aus diesen Betrachtungen werden Kriterien abgeleitet, wie die Parameter für die Bewertung gewählt werden sollten. Diese Kriterien beziehen sich auf den Verlauf der Qualitätsmaße, die als Funktion der Parameter betrachtet werden. Daher ist das Bewertungsverfahren mehrmals mit unterschiedlichen Parametereinstellungen durchzuführen. Durch die Analyse des Verlaufs der Qualitätsmaße kann dann der für die zu bewertenden Daten ideale Parametersatz ermittelt werden.

5.5.1 Pufferbreite

Bei der Wahl der Pufferbreite muß die erwartete Genauigkeit des Extraktionsverfahrens in Betracht gezogen werden. Wird die Pufferbreite zu groß gewählt, werden Fehlextraktionen nahe der tatsächlichen Straße fehlerhaft als korrekt betrachtet. Wird sie zu klein gewählt, werden korrekte Teile der Extraktion abgelehnt, wenn sie geometrisch leicht ungenau extrahiert wurden.

Eine Überprüfung, ob die Pufferbreite für die Genauigkeit des Extraktionsverfahrens passend gewählt wurde, läßt sich durchführen, indem man z.B. Vollständigkeit und Korrektheit als Funktion der Pufferbreite aufträgt (Abb. 5.7).

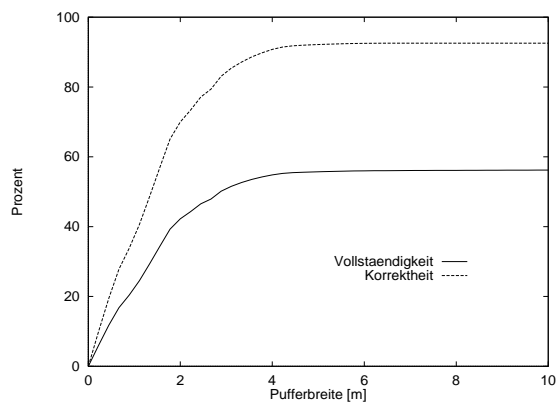


Abbildung 5.7. Vollständigkeit und Korrektheit als Funktion der Pufferbreite

Sowohl Vollständigkeit als auch Korrektheit steigen mit wachsender Pufferbreite an. Wenn das Extraktionsergebnis nur wenige Fehlextraktionen enthält, ändern sich die Qualitätsmaße bei wachsendem Puffer nur noch geringfügig, sobald der Puffer so breit ist, daß er die korrekt extrahierten

Straßen umfaßt. Für praktische Anwendungen ist die Pufferbreite meist durch die zu untersuchende Fragestellung vorgegeben. Die für die Bewertung gewählte Pufferbreite sollte dabei mindestens so groß sein, daß sie im flacheren Bereich der beiden Kurven liegt. Liegt sie noch im steileren Bereich, bedeutet das, daß die geometrische Genauigkeit der Extraktionsergebnisse nicht den durch die Pufferbreite dargestellten Anforderungen entspricht.

5.5.2 Maximale Richtungsabweichung

Manche Fehler können nur erkannt werden, wenn die Richtung der Straßenachsen mit in Betracht gezogen wird. Ein Beispiel hierfür ist in Abb. 5.8 dargestellt. Ohne Berücksichtigung der Richtungsinformation würden Teile der Extraktion, die innerhalb des Puffers um die Referenz liegen, zugeordnet, was offensichtlich falsch ist. Die in diesem Fall stark unterschiedlichen Richtungen der Extraktion und der Referenz weisen auf die fehlerhafte Zuordnung hin. Das Problem wird durch die Berücksichtigung der Richtungsdivergenz gelöst. Wenn die Richtungsdivergenz über dem Schwellwert (maximale Richtungsdivergenz) liegt, werden die beiden Teil einander nicht zugeordnet.

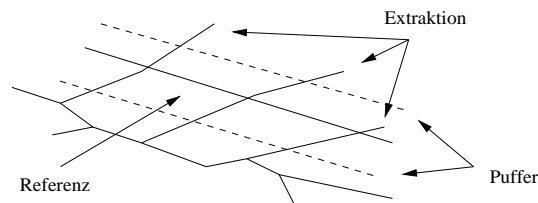


Abbildung 5.8. Fehlextraktionen, die sich im Bereich der Referenz durch ihre Richtung von der Referenz unterscheiden.

Die maximale Richtungsdivergenz sollte nicht zu klein gewählt werden, da die Richtung von Linien — insbesondere von kurzen und stark gekrümmten Linien — nicht sehr genau bestimmt ist. Empirische Untersuchungen haben ergeben, daß für die maximale Richtungsabweichung ein Wert von $\pm 30^\circ$ zu guten Ergebnissen führt, bei denen praktisch alle übereinstimmenden Teile von Extraktion und Referenz zugeordnet werden, nicht aber fehlerhafte Teile der Extraktion.

5.5.3 Hilfsknotenabstand

Das Einfügen von Hilfsknoten vor der Zuordnung ist für die Bewertung der Straßen sowie des Netzwerks notwendig. Bei der Bewertung der Verbindungsfunktion (Kap. 5.3.1) wurde das Einfügen der Hilfsknoten bereits ausführlich behandelt. Bei der Bewertung der Straßen (Kap. 5.2) sowie der Topologie (Kap. 5.3.2), also in den Fällen, in denen Hilfsknoten gleichabständig in die Netzwerke eingefügt werden, hat der Hilfsknotenabstand Einfluß auf die Genauigkeit der resultierenden Qualitätsmaße, aber auch auf den für die Zuordnung notwendigen Rechenaufwand.

Bei der Bewertung der Straßen steigt der Rechenaufwand linear mit der Anzahl der zuzuordnenden Knoten. Die Anzahl der Knoten ist somit für den Rechenaufwand nicht kritisch. Es kann problemlos ein Hilfsknotenabstand gewählt werden, der z.B. der Pixelgröße der Bilder entspricht, aus denen die Straßen extrahiert wurden. Damit ist der Einfluß der Diskretisierung auf die Qualitätsmaße praktisch ohne Bedeutung.

Da bei der Bewertung der Topologie Knotenpaare betrachtet werden, steigt der Rechenaufwand quadratisch mit der Anzahl der Knoten an. Wichtig für die Aussagekraft der Qualitätsmaße ist hierbei,

daß die Knoten gleichmäßig über das Netzwerk verteilt sind. Daraus folgt, daß der Hilfsknotenabstand deutlich kleiner sein sollte als die Länge der kürzesten isolierten Straße in Extraktion und Referenz, damit auch in diesen Teilen des Straßennetzes eine gleichmäßige Verteilung der Knoten gewährleistet ist. Wird der Hilfsknotenabstand zu groß gewählt, kann die Aussagekraft der Qualitätsmaße negativ beeinflußt werden, wenn die Extraktion viele kurze, isolierte Straßen enthält. Bei der mittlerweile erreichten Qualität der Extraktionsergebnisse treten aber in der Regel nur sehr wenige kurze, isolierte Straßen auf, so daß der Hilfsknotenabstand ausreichend groß gewählt werden kann, um einen relativ geringen Rechenaufwand zu gewährleisten. Empirische Untersuchungen belegen dies. In Abb. 5.9 ist die topologische Vollständigkeit für verschiedene Extraktionsergebnisse als Funktion des Hilfsknotenabstands aufgetragen. In diesem Beispiel ist zu erkennen, daß die topologische Vollständigkeit für Hilfsknotenabstände kleiner als etwa 15 m mehr oder weniger konstant bleibt. Wird ein größerer Hilfsknotenabstand gewählt, können die Qualitätsmaße instabil werden, was in dem hier dargestellten Beispiel nur schwach ausgeprägt ist. Es ist daher wichtig, den Hilfsknotenabstand aus dem stabilen Bereich aller zu vergleichenden Datensätze zu wählen.

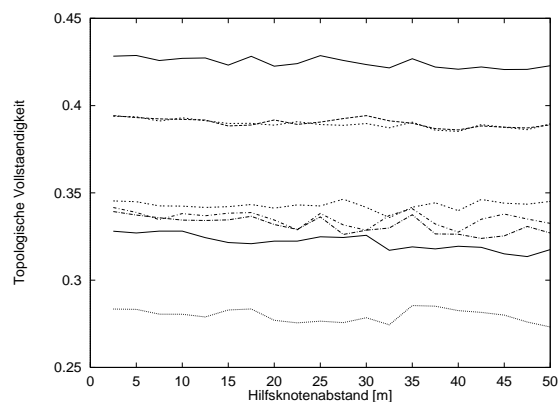


Abbildung 5.9. Topologische Vollständigkeit einiger Extraktionsergebnisse als Funktion des Hilfsknotenabstands

5.5.4 Minimale Entfernungsdifferenz Δl

Der Parameter Δl wurde eingeführt, um den Einfluß von kleinen Extraktionsungenauigkeiten auf die Qualitätsmaße *mittlerer Umwegfaktor* und *mittlerer Abkürzungsfaktor* zu verringern. Da die Extraktionsergebnisse in der Regel nur in sehr geringem Umfang um die Referenzdaten pendeln, kann davon ausgegangen werden, daß Δl relativ klein gewählt werden kann. Die in Abb. 5.10 dargestellten Ergebnisse empirischer Untersuchungen lassen sich folgendermaßen interpretieren: Meistens steigt der mittlere Umwegfaktor mit wachsendem Δl zuerst leicht an. Die Ursache hierfür ist, daß in zunehmendem Maße der mittlere Umweg- bzw. Abkürzungsfaktor für Umwege und Abkürzungen, bei denen der Unterschied der beiden Netzwerkentfernungen nur gering ist, zu Eins gesetzt wird. Dies hat zur Folge, daß diese Faktoren jeweils zur Hälfte bei der Berechnung des mittleren Umweg- und Abkürzungsfaktors eingeführt werden. Wenn der mittlere Umwegfaktor zuerst ansteigt (siehe Abb. 5.10, $\Delta l < 5$ m), bedeutet dies, daß mehr Umwegfaktoren als Abkürzungsfaktoren zu Eins gesetzt wurden, daß also die nahe bei Eins liegenden Umwegfaktoren schwächer gewichtet werden. Dies bedeutet, daß die Extraktion eher etwas zu lang als zu kurz ist, daß sie also leicht um die Referenz pendelt. Im folgenden Teil der Kurve fällt der mittlere Umwegfaktor wieder ab, was daher rührt, daß jetzt größere Umwegfaktoren zu Eins gesetzt werden, so daß der Effekt des „zu Eins setzens“ den des „schwächeren Gewichtens“ mehr als ausgleicht. Dieses Abfallen des mittleren Umwegfaktors stellt den gewünschten Effekt dar, da der Einfluß von geometrischen Extraktionsungenauigkeiten auf die Qualitätsmaße verringert wird. Der nächste Teil der Kurve verläuft relativ flach, was darauf hindeutet,

daß die Ungenauigkeiten der Extraktion ausgeglichen sind, die Umwege, die aus fehlenden Teilen der Extraktion resultieren, aber noch nicht von der Korrektur betroffen sind. Im hinteren Teil der Kurve fällt diese — meist in Stufen — ab. Die Ursache hierfür ist, daß jetzt auch diese Umwegfaktoren zu Eins gesetzt werden.

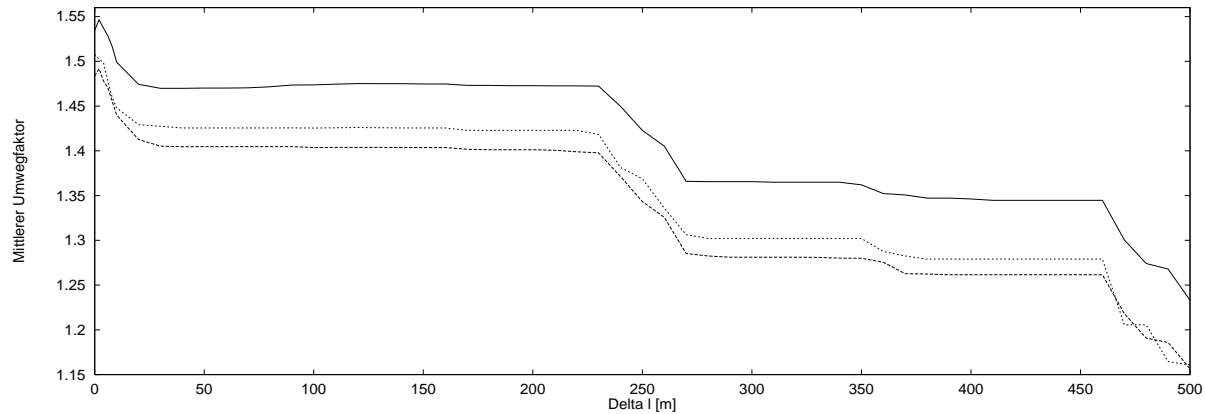


Abbildung 5.10. Mittlerer Umwegfaktor einiger Extraktionsergebnisse als Funktion der minimalen Entfernungsdifferenz Δl

Der Wert für die minimale Entfernungsdifferenz Δl sollte also möglichst im ersten größeren, relativ flachen Bereich der Kurve liegen.

6. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die in den Kapiteln 3 und 4 entwickelten Verfahren auf ein digitalisiertes Luftbild angewendet und mittels der in Kapitel 5 erstellten Bewertungsverfahren bewertet.

Ziel ist es, aufzuzeigen, wo die Stärken und Schwächen der einzelnen Verfahren liegen. Um dieses Ziel zu erreichen, ist es ausreichend, die Verfahren auf *ein* Bild anzuwenden, wenn dieses bei den Extraktionsergebnissen zu typischen Fehlern führt. Ergebnisse für andere Bilddatensätze sind u.a. in (WIEDEMANN et al. 1998a, WIEDEMANN und HINZ 1999, WIEDEMANN 1999, WIEDEMANN und EBNER 2000, HINZ et al. 2000) dargestellt. Da die Extraktionsergebnisse Fehler unterschiedlicher Art enthalten sollen, um die Stärken und Schwächen der Verfahren aufzuzeigen, wurde darauf verzichtet, die Parameter systematisch hinsichtlich eines möglichst vollständigen und korrekten Ergebnisses zu optimieren. Vielmehr wurde versucht, ein insgesamt gutes Ergebnis zu erzielen, das aber für die Verfahren typische Fehler enthält, die diskutiert werden. Dies ist auch aus Sicht der Anwendung sinnvoll, da ein optimales Einstellen der Parameter ohne Kenntnis des Soll-Ergebnisses nicht möglich ist.

Im folgenden wird zuerst der Testdatensatz vorgestellt. Danach wird das Ergebnis unter Verwendung aller Datenquellen und aller entwickelten Verfahren präsentiert. Im Anschluß daran werden Teile der Daten bzw. einzelne Verfahren nicht benutzt. Dies zeigt auf, daß die Anwendung aller im Rahmen dieser Arbeit verfügbaren Daten und Verfahren zu den besten Ergebnissen führt.

6.1 Testdatensatz

Als Testdatensatz dient das in Abb. 6.1a)–c) durch seine drei Farbkanäle dargestellte Farbluftbild. Das im Maßstab 1:4000 aufgenommene Bild wurde mit $15\ \mu\text{m}$ gescannt, was eine Bodenpixelgröße von 6 cm ergibt. Für die automatische Extraktion des Straßennetzes wurde die geometrische Auflösung der Bilddaten auf etwa 2 m reduziert. Der Grund, warum keine Satellitenbilddaten sondern ein Luftbild mit einer ursprünglich höheren geometrischen Auflösung verwendet wird, ist, daß damit die Erfassung der Referenzdaten in einer höheren Auflösung erfolgen kann als die automatische Extraktion des Straßennetzes. Dies ist wichtig, um sicherzustellen, daß die Referenzdaten geometrisch und semantisch von übergeordneter Qualität sind. Darüberhinaus können auf diese Weise bei der Visualisierung von Bereichen in denen Extraktionsprobleme auftreten, neben den Bilddaten, die zur Extraktion verwendet wurden, die entsprechenden Bildausschnitte auch mit höherer geometrischer Auflösung dargestellt werden. Dies erlaubt oft eine bessere Beurteilung der auftretenden Probleme. Aus methodischer Sicht besteht kein Unterschied zwischen der Verwendung von Satellitenbilddaten und der Verwendung eines auflösungsreduzierten Luftbildes.

Das verwendete Luftbild zeigt ländlichen Raum, im wesentlichen ohne Wald und Siedlungen. Eine relativ frisch geteerte Kreisstraße führt von der oberen Bildmitte nach rechts unten. Bei den übrigen Straßen handelt es sich vorwiegend um landwirtschaftliche Erschließungswege. Die Szene wurde gewählt, weil hier auf relativ engem Raum die Netzstruktur der Straßen deutlich zu erkennen ist.

Insgesamt ist diese Szene im Sinne der automatischen Extraktion von Straßen eher als einfach einzustufen, da sich die Straßen größtenteils gut von ihrer Umgebung abheben und nur wenige Störungen auftreten. Die Szene weist aber durchaus kritische Stellen auf, an denen die Extraktion versagt oder geometrisch ungenau wird. Die daraus resultierenden Extraktionsfehler werden diskutiert.

Die Bewertung der Ergebnisse erfolgt mit den in Kapitel 5 entwickelten Methoden anhand der manuell erzeugten in Abb. 6.1d) dargestellten Referenzdaten. Das der Referenzdatenerfassung zugrunde liegende Bild hat eine Bodenpixelgröße von 24 cm. Die Referenzdaten sind damit geometrisch

ausreichend genauer als die zu erwartenden Extraktionsergebnisse. Die semantische Genauigkeit läßt sich hingegen nicht so einfach bestimmen, da die Erfassung mancher Straßen von der individuellen Interpretation des Operateurs abhängt. (HELLER et al. 1998) haben zur Lösung dieses Problems zwei Klassen von Referenzdaten eingeführt: (1) Solche, die unbedingt extrahiert werden müssen und (2) solche, die nicht unbedingt erforderlich sind, die aber nicht als Fehlextraktion gewertet werden, wenn sie extrahiert werden. Die Unterscheidung dieser beiden Klassen bei der Erfassung der Referenzdaten ist allerdings nicht trivial. Eine Möglichkeit ist, die Erfassung mehrmals von unterschiedlichen Operateuren durchführen zu lassen und die erfaßten Daten auf Übereinstimmungen und Unterschiede zu analysieren. Auf eine solche Aufteilung der Referenz in zwei Klassen wurde hier verzichtet, da sie im Rahmen dieser Arbeit und der verwendeten Testdaten als nicht wesentlich erscheint. Prinzipiell kann diese Unterscheidung leicht mit den bestehenden Verfahren zur Bewertung realisiert werden.

Für die Bewertung wurden die in Tab. 6.1 zusammengestellten Parameter verwendet. Ihre Wahl wird in Kapitel 6.7 begründet.

Pufferbreite für Straßen und Netzwerk für Kreuzungen	6 m 8.5 m
Max. Richtungsabweichung	$\pm 30^\circ$
Hilfsknotenabstand für Straßen für Topologie	0.25 m 10 m
Minimale Entfernungsdifferenz Δl	20 m

Tabelle 6.1. Parameter der Bewertung

6.2 Anwendung der entwickelten Verfahren auf ein Farbluftbild

Im folgenden Test werden alle in dieser Arbeit entwickelten Verfahren zur Extraktion von Straßennetzen auf das in Kapitel 6.1 vorgestellte Farbluftbild angewendet. Hierbei wird nur nach hellen Straßen gesucht. Die gemeinsame Extraktion von hellen und dunklen Straßen ist zwar prinzipiell möglich, sie ist aber, aufgrund der hierfür nicht ausreichenden Modellierung, relativ anfällig gegenüber Fehlextraktionen (s. Kapitel 7.2). Die Extraktion der Linien, ihre Nachbearbeitung und die Bewertung der potentiellen Straßenstücke erfolgen für die drei spektralen Kanäle getrennt. Der Ablauf der Verfahren wird anhand von Zwischenergebnissen dargestellt und diskutiert.

6.2.1 Vorläufige Extraktion

In Abb. 6.2 sind die aus den drei spektralen Kanälen extrahierten hellen Linien dargestellt. An dem in Abb. 6.3 dargestellten Ausschnitt läßt sich der Nutzen, Linien in mehreren Kanälen zu extrahieren, gut erkennen. Eine Lücke, die — unterschiedlich lang — in den Kanälen rot und grün auftritt (Abb. 6.3a,b)), ist im blauen Kanal (Abb. 6.3c)) nicht vorhanden, dagegen tritt eine Lücke im blauen Kanal in den beiden anderen Kanälen nicht auf.

Die extrahierten Linien werden an Punkten mit hoher Krümmung aufgeschnitten. Die dabei entstehenden potentiellen Straßenstücke werden entsprechend ihrer Übereinstimmung mit dem regionalen Teil des Straßenmodells bewertet. Stücke, die gut mit dem Straßenmodell übereinstimmen, werden gut, Stücke, die schlecht übereinstimmen, schlecht bewertet.



a)



b)



c)



d)

Abbildung 6.1. Testdatensatz: a) Rotkanal, b) Grünkanal, c) Blaukanal, d) manuell erstellte Referenzdaten

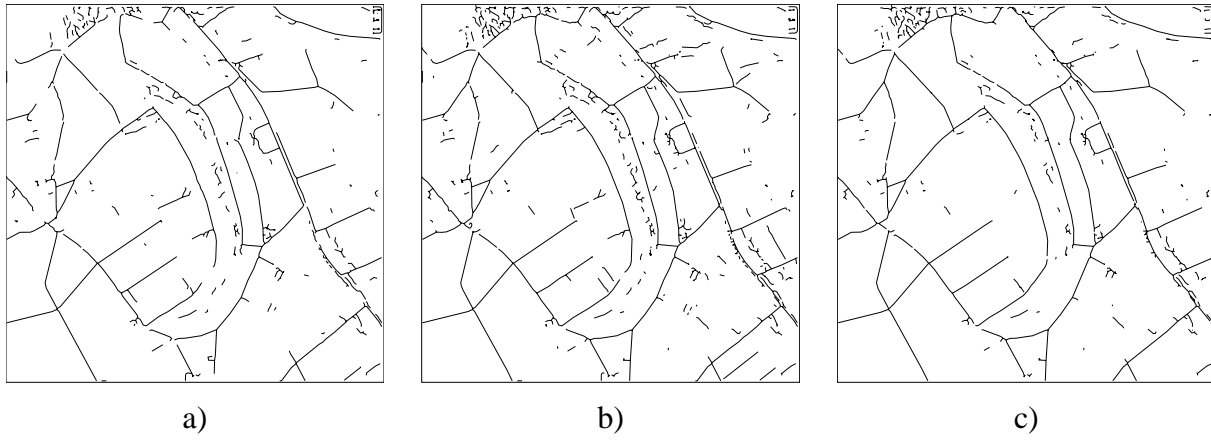


Abbildung 6.2. Liniextraktion in den drei Kanälen: a) rot, b) grün, c) blau

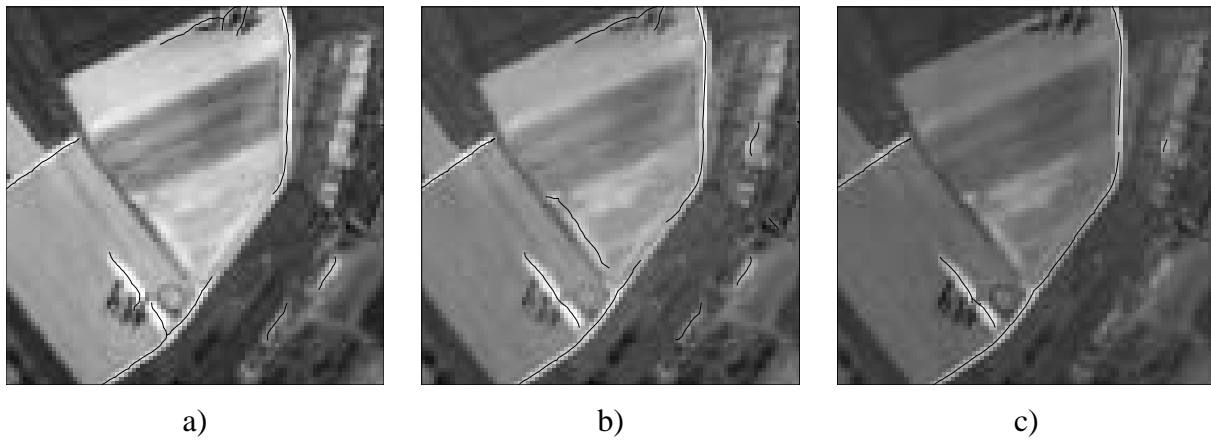


Abbildung 6.3. Liniextraktion in den drei Kanälen (Detail): a) rot, b) grün, c) blau

Die bewerteten potentiellen Straßenstücke sind in Abb. 6.4 dargestellt, gut bewertete Stücke dunkel und schlecht bewertete hell. Man erkennt, daß viele der potentiellen Straßenstücke, die auf einer Straße liegen gut und die meisten der fehlerhaft extrahierten Stücke schlecht bewertet wurden.

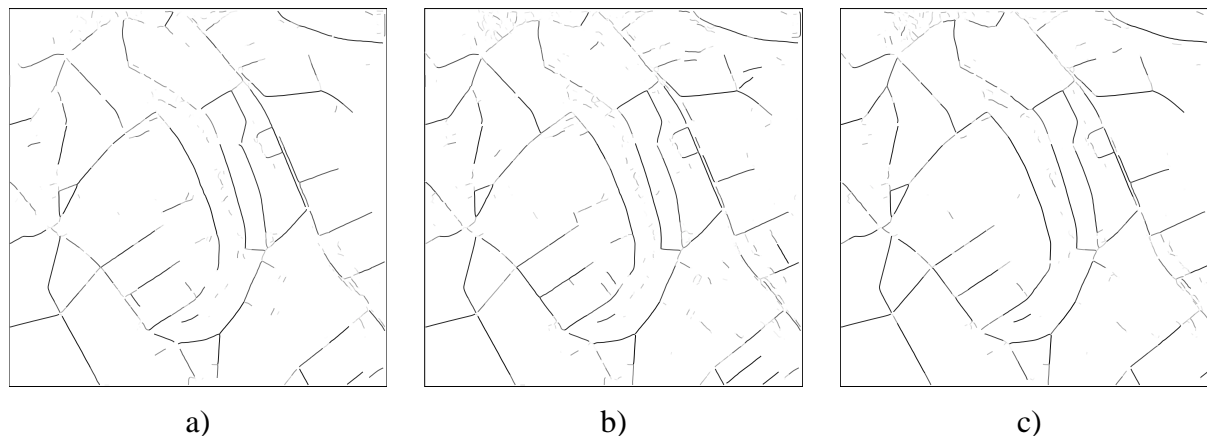


Abbildung 6.4. Bewertete potentielle Straßenstücke (gut bewertet: dunkel; schlecht bewertet: hell): a) rot-Kanal, b) grün-Kanal, c) blau-Kanal

Die bisher getrennt extrahierten und zu potentiellen Straßenstücken verarbeiteten Linien werden dann zu *einem* Datensatz fusioniert. Das Ergebnis der Fusion (Abb. 6.5a)) ist relativ vollständig, wobei die Stücke meist korrekt bewertet sind (Abb. 6.5b)). Abbildung 6.6 zeigt die Fusionsergebnisse für den in Abb. 6.3 dargestellten Ausschnitt. Durch die Fusion ergibt sich ein nahezu durchgehender Linienzug. Dies demonstriert das Potential der Fusion der aus unterschiedlichen Kanälen extrahierten Linien. Die kleine Lücke entsteht durch des Aufschneiden der entsprechenden Linien, die in den Puffer einer bereits vorhandenen Linie eindringen. Kleinen Lücken können im Rahmen der weiteren Verarbeitung durch das Einfügen von Verknüpfungshypothesen geschlossen werden.

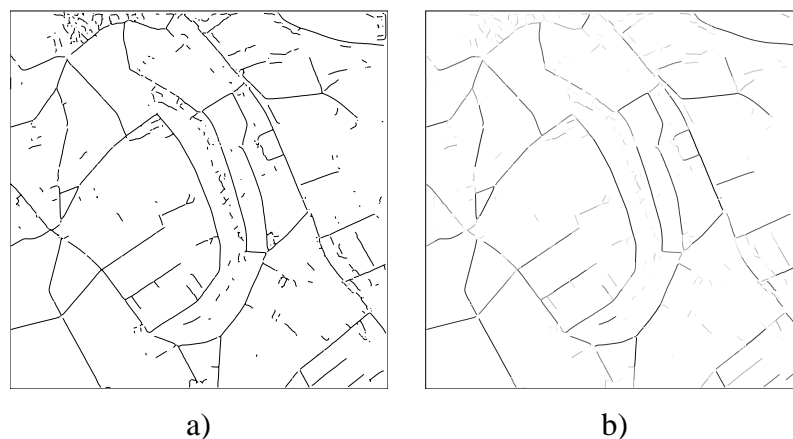


Abbildung 6.5. Fusionsergebnis: a) alle potentiellen Straßenstücke, b) Stücke mit guter Bewertung: dunkel, Stücke mit schlechter Bewertung: hell

Die fusionierten potentiellen Straßenstücke werden an Stellen aufgeschnitten, an denen ggf. eine Kreuzung gebildet werden kann. Daraufhin wird der gewichtete Graph aus den potentiellen Straßenstücken aufgebaut. Verknüpfungshypothesen werden generiert, bewertet und in den Graphen eingefügt. Startstückpaare werden bestimmt und zwischen ihnen die kürzesten Pfade durch den gewichteten Graphen ermittelt. Die Vereinigung dieser kürzesten Pfade stellt das vorläufige Extraktionsergebnis dar. Dieses ist in Abb. 6.7a) dem Luftbild überlagert. In Abb. 6.7b) ist das Ergebnis des Vergleichs mit den Referenzdaten dargestellt, wobei dünne Linien die korrekte Extraktion, breite Linien fehlende Teile und gestrichelte Linien fehlerhaft extrahierte Teile darstellen. In der Tabelle in

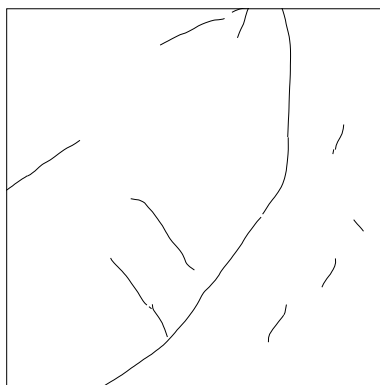


Abbildung 6.6. Fusionsergebnis (Detail)

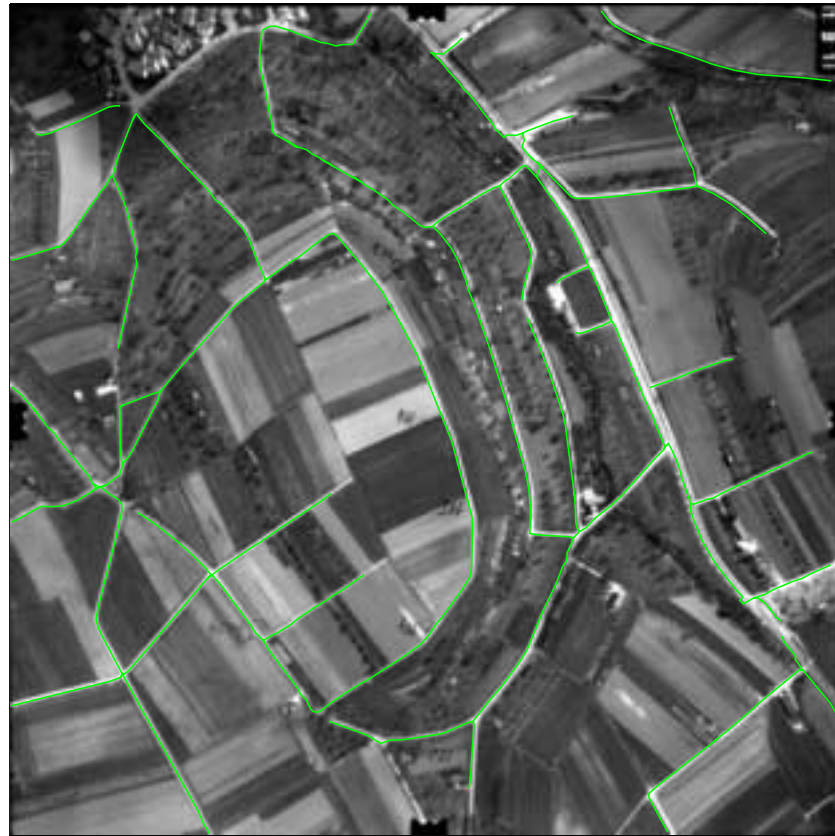
Abb. 6.7c) sind die Ergebnisse der Bewertung zusammengestellt. Die Vollständigkeit von 86.5 % zeigt an, daß einige Teile des Straßennetzes nicht extrahiert wurden. In Abb. 6.7b) kann man erkennen, daß es sich hierbei vorwiegend um Endstücke von Sackgassen bzw. Straßen, die aus dem Bild herausführen, handelt. Ursache hierfür ist die Lage der Startstücke. Befindet sich kein Startstück am Ende einer solchen Straße, so kann dieser Teil nicht extrahiert werden. Die Korrektheit der Extraktionsergebnisse ist mit 98.0 % sehr gut, ebenso wie die geometrische Genauigkeit, die bei etwa 0.75 Pixel liegt. Die Bewertung der Netzwerkeigenschaften zeigt, daß das Extraktionsergebnis einige Lücken aufweist — sowohl zwischen unterschiedlichen Zusammenhangskomponenten (Topologische Vollständigkeit) als auch innerhalb von Zusammenhangskomponenten (Mittlerer Umwegfaktor). Zusätzliche Verbindungen existieren dagegen praktisch nicht. Sämtliche Qualitätsmaße für die Kreuzungen weisen keine besonders guten Werte auf. Insbesondere die niedrige Korrektheit von 47.7 % und die mit 60.0 % hohe Redundanz fallen auf. Die zum Teil nicht so guten Werte bei der Bewertung der Netzwerkeigenschaften und der Kreuzungen zeigen, daß die vorläufige Extraktion in diesen Bereichen gewisse Defizite aufweist. Diese sollen durch die Vervollständigung des extrahierten Straßennetzes und die Rekonstruktion der Kreuzungen beseitigt werden.

Im folgenden werden typische Probleme der vorläufigen Extraktion anhand einzelner Ausschnitte beschrieben und diskutiert.

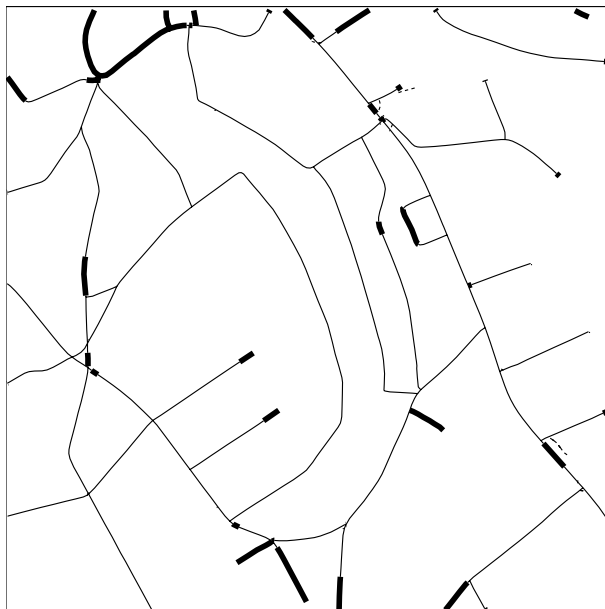
In Abb. 6.8 fehlen große Teile der Straße im Randbereich des bebauten Gebietes. Die Ursache für die fehlende Extraktion ist, daß eine Lücke in den extrahierten Linien im linken Kreuzungsbereich (s. Abb. 6.9a)) nicht geschlossen werden konnte. Aufgrund der schlechten Bewertung der Linien des gesamten fehlenden Abschnittes (s. Abb. 6.9b)) ist hier kein Startstück vorhanden. Dies führt dazu, daß der gesamte Abschnitt nicht extrahiert wird.

In Abb. 6.10 sind fehlerhafte Extraktionen zu erkennen. Ursache für diese Fehler ist, daß die breite Straße im Bild dunkel erscheint und somit nicht dem verwendeten Straßenmodell (in diesem Beispiel wurden nur helle Linien extrahiert) entspricht. Die Verbindungen zwischen korrekt extrahierten Teilen und zwischen fehlerhaft extrahierten Teilen sind folglich auch fehlerhaft. Allerdings ist das kurze, senkrecht zur dunklen Straße verlaufende extrahierte Stück topologisch wichtig, da es Teile des Straßennetzes miteinander verbindet.

In Abb. 6.11 ist ein Stück nicht extrahiert worden, da Schatten den Kontrast zwischen Straße und Umgebung sehr stark verringert.



a)



b)

Straßen	
Vollständigkeit	86.5 %
Korrektheit	98.0 %
RMS	1.55 m
Netzwerk	
Topologische Vollständigkeit	42.7 %
Topologische Korrektheit	100.0 %
Mittlerer Umwegfaktor	1.31
Mittlerer Abkürzungsfaktor	0.99
Kreuzungen	
Vollständigkeit	61.1 %
Korrektheit	47.4 %
Redundanz	60.0 %
RMS	4.71 m

c)

Abbildung 6.7. Extraktionsergebnis und Bewertung der vorläufigen Straßenextraktion. a) Extraktionsergebnis, b) Ergebnis des Vergleichs mit den Referenzdaten (dünne Linien: Korrekte Extraktion, breite Linien: Fehlende Extraktion, gestrichelte Linien: Fehlerhafte Extraktion), c) Qualitätsmaße

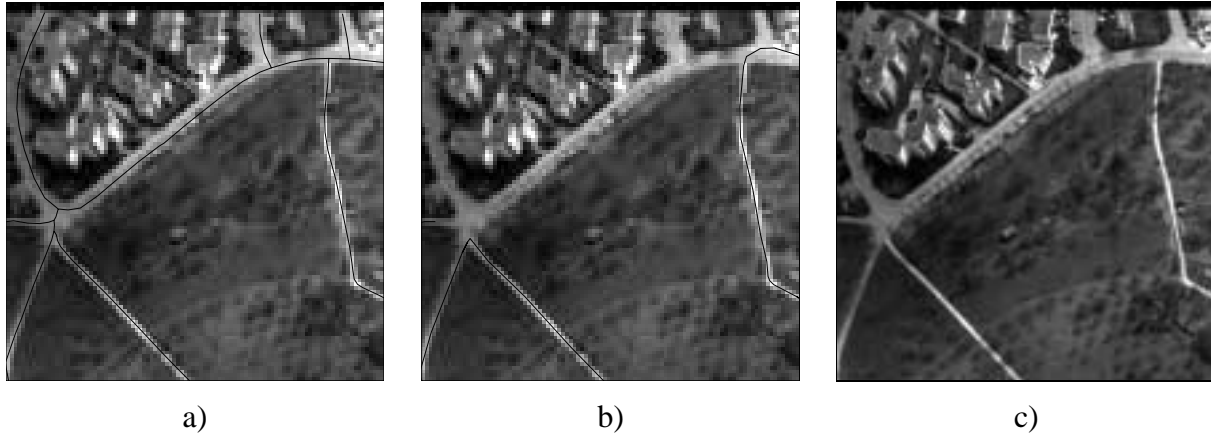


Abbildung 6.8. Fehle Extrakion: a) Referenz, b) Extraktion, c) Hochoaufgelöstes Bild

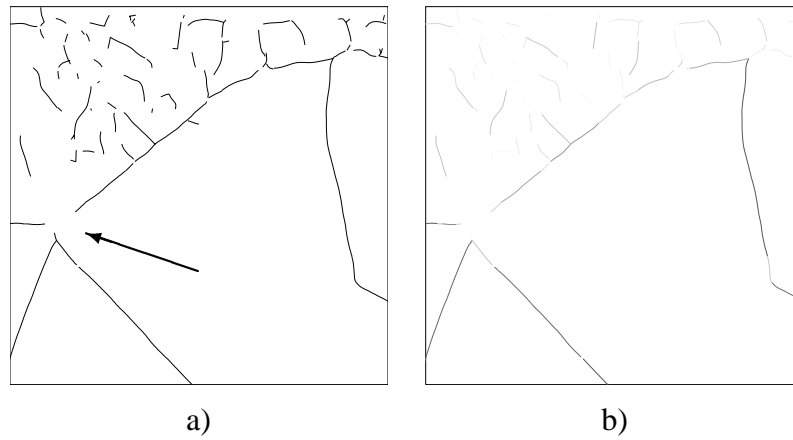


Abbildung 6.9. Fusionsergebnis (Detail): a) alle potentiellen Straßenstücke (der Pfeil deutet auf die im Text angesprochene Lücke), b) Stücke mit guter Bewertung: dunkel, Stücke mit schlechter Bewertung: hell

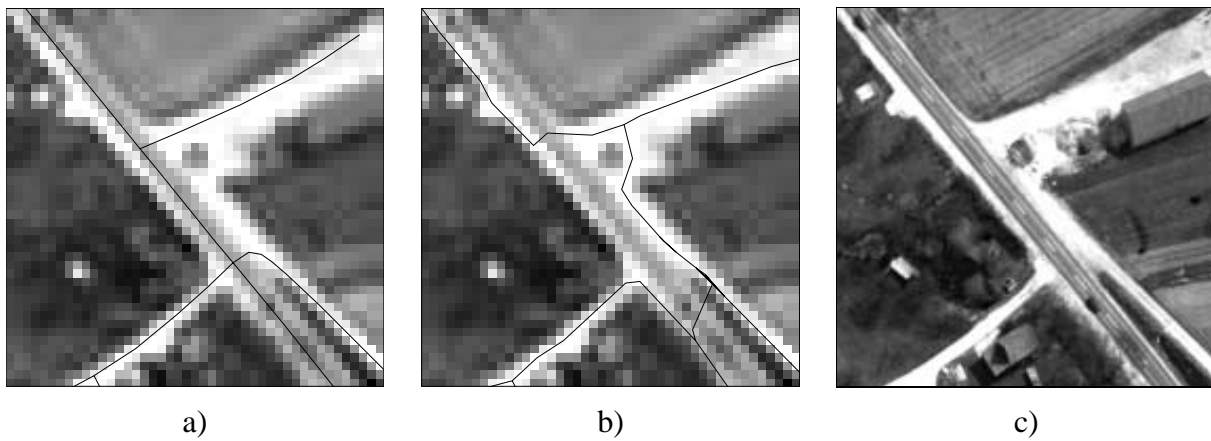


Abbildung 6.10. Z.T. fehlerhafte Extraktion: a) Referenz, b) Extraktion, c) Hochoaufgelöstes Bild

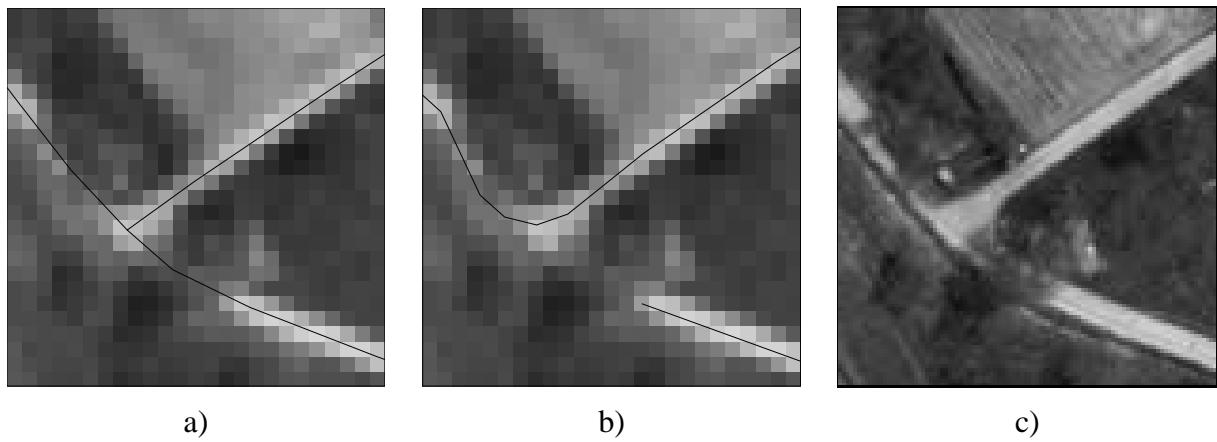


Abbildung 6.11. Fehlende Extraktion: a) Referenz, b) Extraktion, c) Hochaufgelöstes Bild

6.2.2 Vervollständigung

Durch die Analyse der Netzwerkeigenschaften anhand von Umweg- und Verbindungsfaktoren werden potentielle Lücken in der Extraktion aufgedeckt. Zum Schließen dieser Lücken werden Verbindungshypothesen generiert. Um die Verbindungshypothesen zu verifizieren, wird in den Bilddaten gezielt nach Straßen gesucht. Dies erfolgt hier durch die in Kapitel 3 entwickelten Verfahren, wobei die Schwellwerte etwas schwächer gewählt wurden. In Abb. 6.12 sind die ersten drei vom Algorithmus vorgeschlagenen Lücken durch die Ziffern 1 bis 3 gekennzeichnet. Ihre Umwegfaktoren betragen 44.1, 11.4 bzw. 10.7.



Abbildung 6.12. Vorläufige Extraktion mit Kennzeichnung der ersten drei Lücken

Für diese drei Verbindungshypothesen sind die Ergebnisse der Verifikation in Abb. 6.13 dargestellt. Dabei kennzeichnen die weißen Kreise die Endpunkte der jeweiligen Verbindungshypothese. Die vorläufige Extraktion ist schwarz, die eingefügte Verbindung weiß dargestellt. Insgesamt wurden 36 Verbindungshypothesen vorgeschlagen von denen 7 angenommen werden konnten. Die übrigen 29 Verbindungshypothesen wurden abgelehnt. Die eingefügten Verbindungen sind geometrisch zum Teil ungenau, da die Straße im Bereich einer Lücke oft schlechter erkennbar ist.

In Abb. 6.14 ist das Ergebnis der Vervollständigung dargestellt. Die Vollständigkeit wurde durch das Einfügen von Verbindungen leicht verbessert, die Korrektheit durch die geometrisch z.T. sehr ungenauen Verbindungen geringfügig verschlechtert. Das wesentliche Ergebnis der Vervollständigung ist, daß die Werte der topologischen Vollständigkeit und des mittleren Umwegfaktors stark verbessert wurden. Sämtliche Qualitätsmaße für Kreuzungen sind besser als bei der vorläufigen Extraktion. Der Grund hierfür ist, daß bei dem Einfügen der Verbindungen z.T. neue, bisher nicht extrahierte Kreuzungen gebildet wurden. In Abb. 6.15 ist die vervollständigte Extraktion dargestellt. Dabei kennzeichnen die dünnen Linien die vorläufige Extraktion und die breiten Linien die eingefügten Verbindungen.

Im folgenden werden die Veränderungen diskutiert, die sich in den in den Abb. 6.8 bis 6.11 dargestellten Problemfällen ergeben haben. Dabei werden die Möglichkeiten und Grenzen der Vervollständigung deutlich. In den hierzu gehörenden Abb. 6.16 bis 6.18 sind die Ergebnisse der

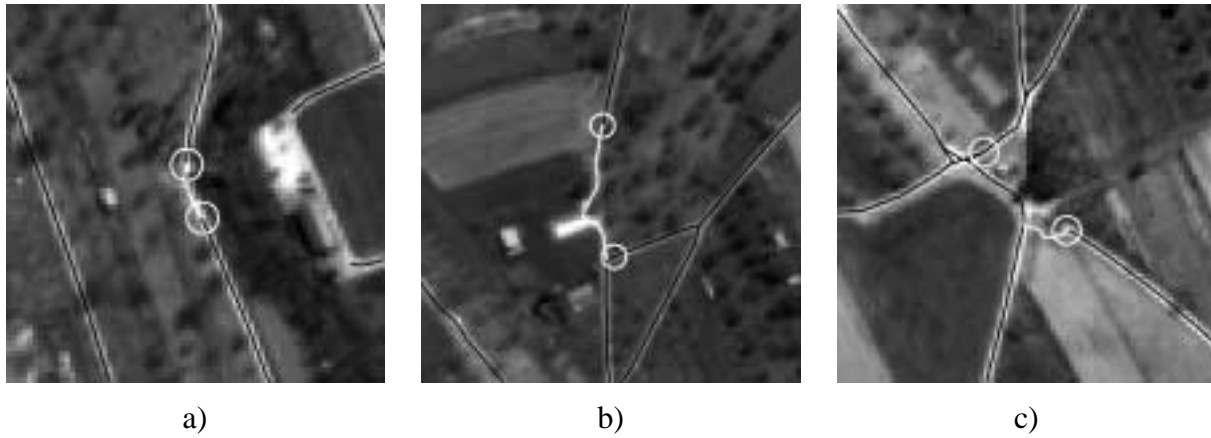


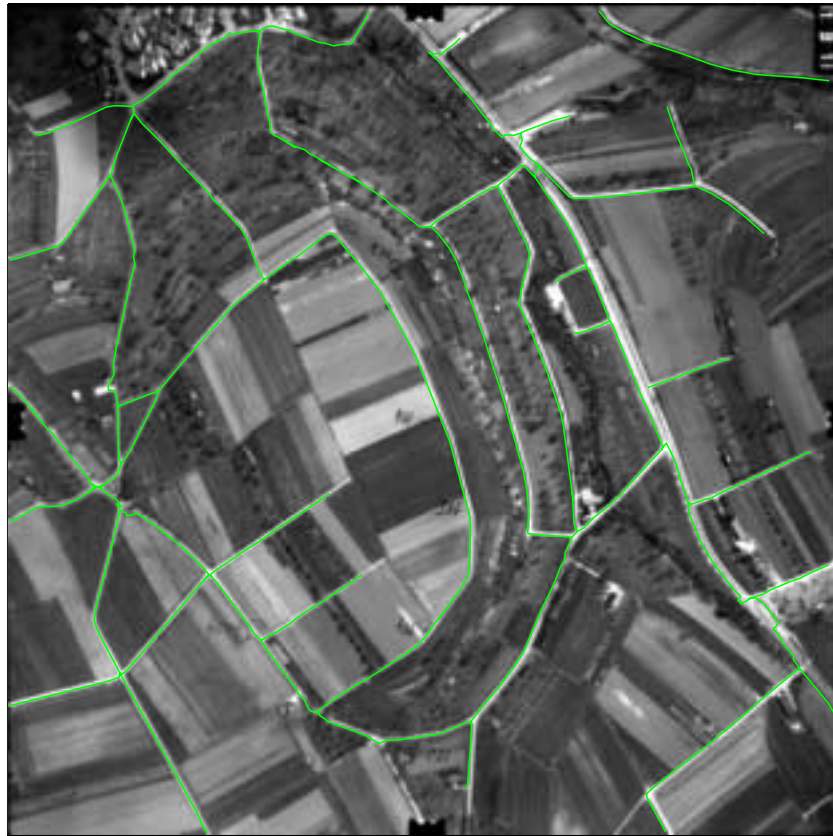
Abbildung 6.13. Ergebnisse der Verifikation der a) ersten, b) zweiten und c) dritten Verbindungshypothese. Der obere Endpunkt der dritten Verbindungshypothese liegt auf einem Knoten des Zyklus, der im benachbarten Kreuzungsbereich extrahiert wurde.

vorläufigen Extraktion schwarz und die im Rahmen der Vervollständigung eingefügten Teile weiß dargestellt.

Abb. 6.16 zeigt, daß durch die Wahl niedrigerer Schwellwerte bei der Linienextraktion und durch längere Verknüpfungshypothesen die Lücke im linken Kreuzungsbereich geschlossen werden konnte. Daher konnte der gesamte bisher fehlende Abschnitt extrahiert werden.

In Abb. 6.17 haben sich keine Veränderungen gegenüber Abb. 6.10 ergeben. Dies liegt daran, daß im Rahmen der Vervollständigung keine Korrekturen an bestehenden Daten vorgenommen, sondern lediglich fehlende Teile eingefügt werden.

In dem in Abb. 6.18 dargestellten Ausschnitt konnte die Lücke erfolgreich geschlossen werden. Dies ist wiederum auf die Wahl niedrigerer Schwellwerte, insbesondere bei der Linienextraktion, zurückzuführen.



a)



b)

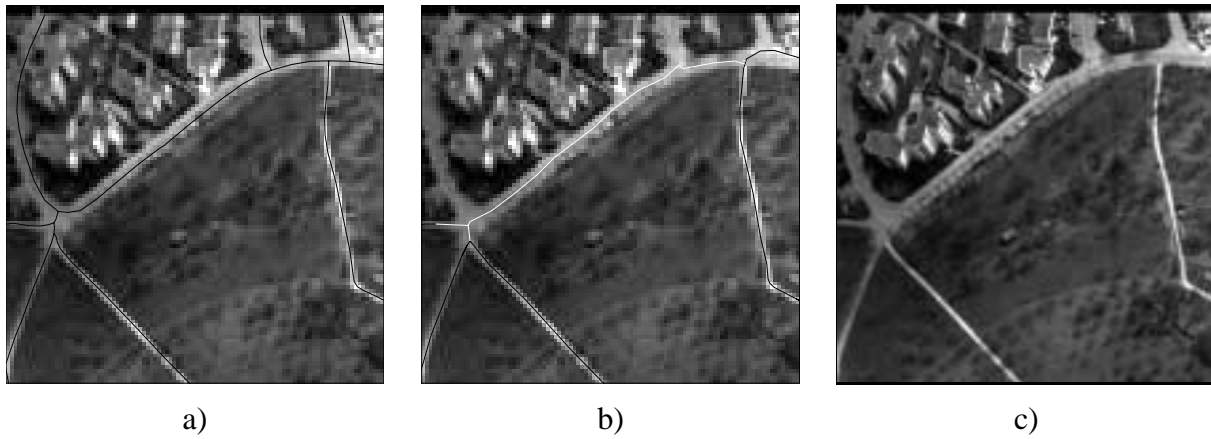
Straßen	
Vollständigkeit	89.7 %
Korrektheit	97.5 %
RMS	1.55 m
Netzwerk	
Topologische Vollständigkeit	97.4 %
Topologische Korrektheit	100.0 %
Mittlerer Umwegfaktor	1.03
Mittlerer Abkürzungsfaktor	0.99
Kreuzungen	
Vollständigkeit	69.4 %
Korrektheit	58.9 %
Redundanz	52.8 %
RMS	4.46 m

c)

Abbildung 6.14. Extraktionsergebnis und Bewertung der Vervollständigung. a) Extraktionsergebnis, b) Ergebnis des Vergleichs mit den Referenzdaten (dünne Linien: Korrekte Extraktion, breite Linien: Fehlende Extraktion, gestrichelte Linien: Fehlerhafte Extraktion), c) Qualitätsmaße



Abbildung 6.15. Differenz zwischen vorläufiger Extraktion und vervollständigter Extraktion (dünne Linien: vorläufige Extraktion, breite Linien: im Rahmen der Vervollständigung eingefügte Verbindungen)



a)

b)

c)

Abbildung 6.16. Die vorläufige Extraktion wurde vervollständigt : a) Referenz, b) Extraktion, c) Hochaufgelöstes Bild

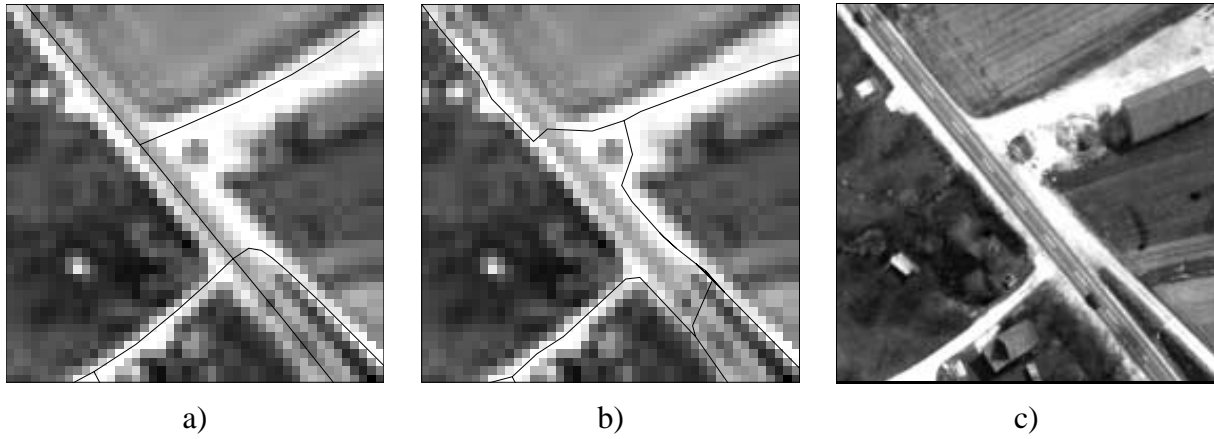


Abbildung 6.17. Fehler der vorläufigen Extraktion werden nicht korrigiert: a) Referenz, b) Extraktion, c) Hochoaufgelöstes Bild

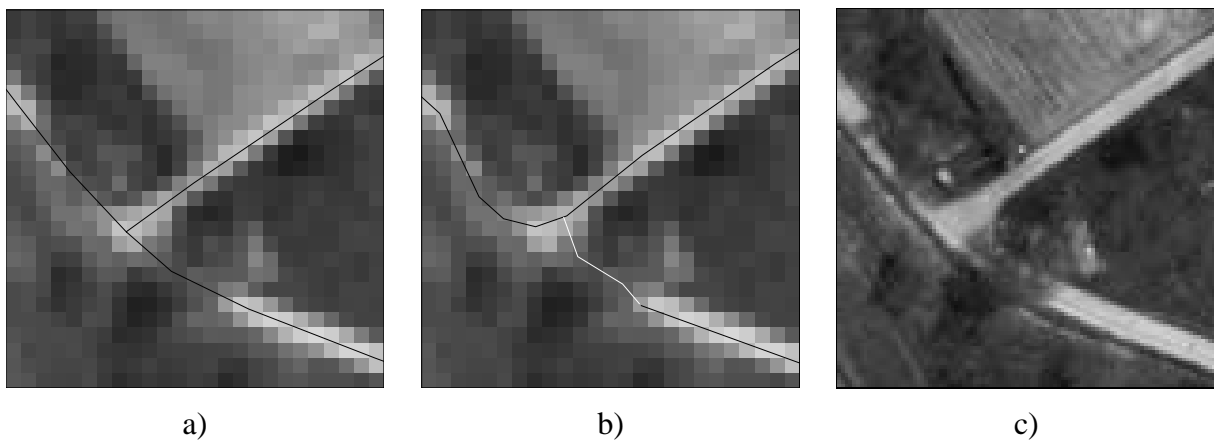


Abbildung 6.18. Die vorläufige Extraktion wurde vervollständigt: a) Referenz, b) Extraktion, c) Hochoaufgelöstes Bild

6.2.3 Rekonstruktion von Kreuzungen

Zuerst werden kleine Zyklen im extrahierten Straßennetz detektiert und eliminiert. Dann wird die Geometrie der Kreuzung rekonstruiert. Hierfür wird sowohl die bisherige Extraktion, als auch, in Bereichen, in denen der Extraktion bisher keine Bildinformation zugrunde lag, lokale Bildinformation verwendet.

Abbildung 6.19 zeigt drei Beispiele für die Verbesserungen der Extraktion durch die Rekonstruktion der Kreuzungen. In der oberen Reihe ist jeweils das Ergebnis nach der Vervollständigung des Straßennetzes, in der unteren Reihe nach der Rekonstruktion der Kreuzungen dargestellt. Abbildung 6.19a) und b) stellen jeweils eine Kreuzung dar, die — fehlerhaft — mit Zyklen extrahiert wurde. Diese Zyklen wurden erfolgreich eliminiert und die Geometrie der Kreuzungen korrekt rekonstruiert. Abbildung 6.19c) zeigt, daß die Rekonstruktion der Kreuzungen auch dann sinnvoll ist, wenn keine Zyklen eliminiert werden müssen. Die Rekonstruktion der Geometrie liefert meist ein geometrisch verbessertes und optisch ansprechenderes Ergebnis. Insbesondere in Abb. 6.19c) erkennt man aber, daß die Bedingung, daß Abzweigungen möglichst orthogonal in die Hauptstraße münden, nicht immer gerechtfertigt ist.

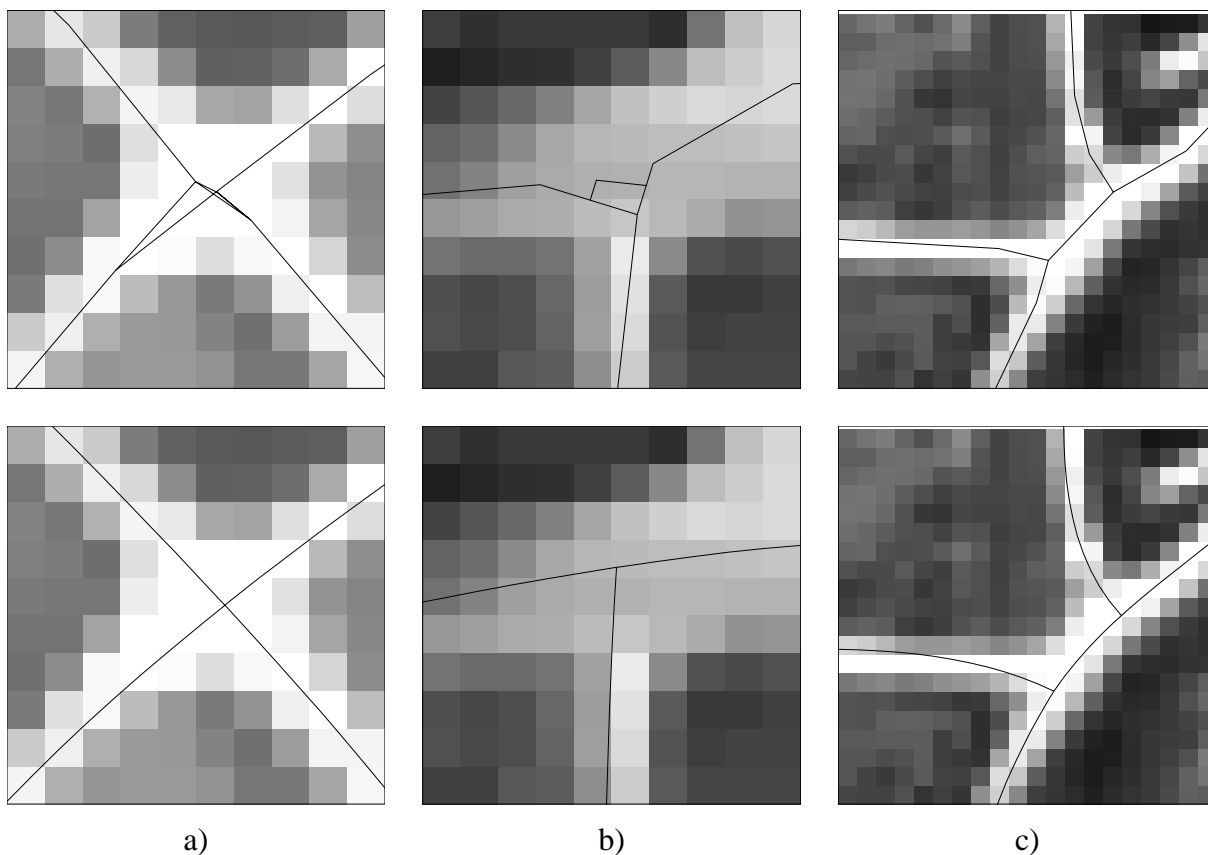
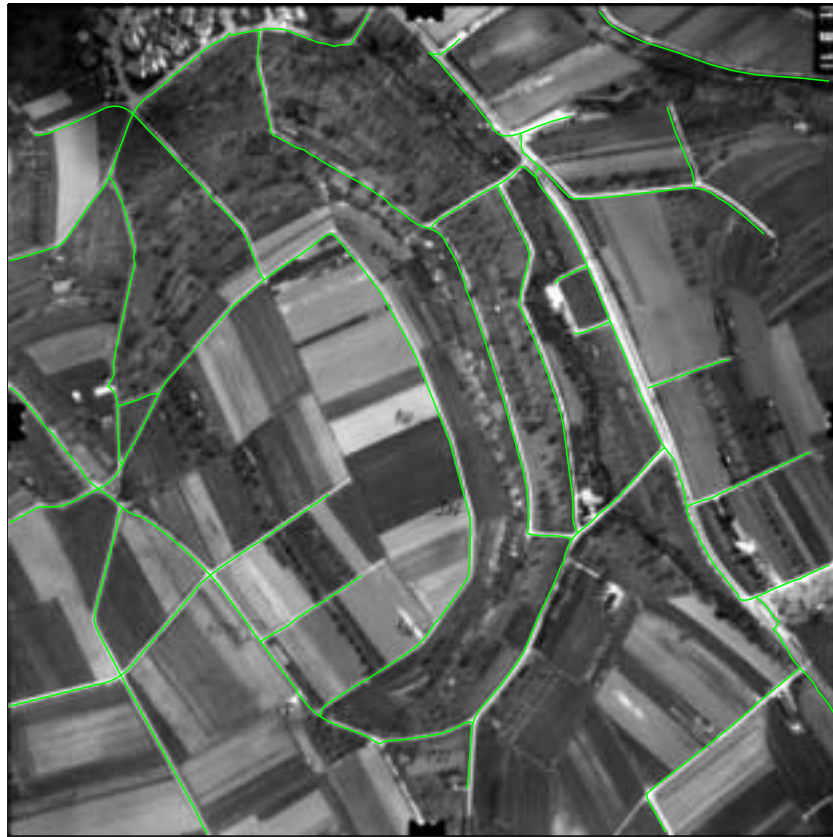


Abbildung 6.19. Beispiele für die Verbesserungen durch die Rekonstruktion der Kreuzungen. Oben vor und unten nach der Rekonstruktion.

In Abb. 6.20 ist das Ergebnis der Rekonstruktion der Kreuzungen für das gesamte Straßennetz dargestellt. Im Vergleich zum Ergebnis der Vervollständigung (Abb. 6.14) ergeben sich folgende Änderungen: Die Vollständigkeit der Kreuzungen fällt leicht ab, was u.a. auf die Zusammenfassung der im Bild oben links erkennbaren Kreuzung von fünf Straßen zu einer einzigen Kreuzung zurückzuführen ist. Diese Kreuzung ist in der Referenz durch drei einzelne Kreuzungen dargestellt (s. Abb. 6.16a). Dagegen steigt die Korrektheit der Kreuzungen stark an, was durch die Rekonstruktion der Topologie bewirkt wird, da viele Knotenpunkte der ursprünglich extrahierten Zyklen geometrisch sehr weit von dem entsprechenden Kreuzungspunkt der Referenz entfernt waren. Die hohe Redundanz, die durch



a)



b)

Straßen	
Vollständigkeit	89.3 %
Korrektheit	98.0 %
RMS	1.54 m
Netzwerk	
Topologische Vollständigkeit	97.4 %
Topologische Korrektheit	100.0 %
Mittlerer Umwegfaktor	1.03
Mittlerer Abkürzungsfaktor	0.99
Kreuzungen	
Vollständigkeit	63.9 %
Korrektheit	82.1 %
Redundanz	0.0 %
RMS	4.10 m

c)

Abbildung 6.20. Extraktionsergebnis und Bewertung nach Rekonstruktion der Kreuzungen. a) Extraktionsergebnis, b) Ergebnis des Vergleichs mit den Referenzdaten (dünne Linien: Korrekte Extraktion, breite Linien: Fehlende Extraktion, gestrichelte Linien: Fehlerhafte Extraktion), c) Qualitätsmaße

die vielen Kreuzungspunkte, die sich aus den Zyklen ergeben haben, bedingt war, fällt auf 0% ab. Auch dies ist auf die Rekonstruktion der Kreuzungstopologie, also die Eliminierung der Zyklen, zurückzuführen.

6.2.4 Diskussion

In diesem Kapitel werden die bisher erzielten Ergebnisse kritisch betrachtet und miteinander verglichen.

Zunächst werden für den entwickelten Ansatz typische Extraktionsfehler dargestellt und beschrieben. Diese lassen sich in zwei Arten einteilen: (1) Teile des Straßennetzes werden nicht extrahiert und (2) lineare Strukturen, die keine Straßen sind werden extrahiert. Die Ursachen für das Auftreten dieser Fehler sind vielfältig. Fehler der ersten Art können z.B. auftreten, wenn die Straße durch andere Objekte verdeckt ist, aber auch wenn der Kontrast zwischen Straße und Umgebung zu gering ist. Fehler der zweiten Art werden durch lineare Strukturen, die in ihrem Erscheinungsbild Straßen gleichen, hervorgerufen. Dies sind häufig schmale Felder, können aber auch Böschungen, lange, schmale Gebäude oder Streifen zwischen Schattenflächen sein.

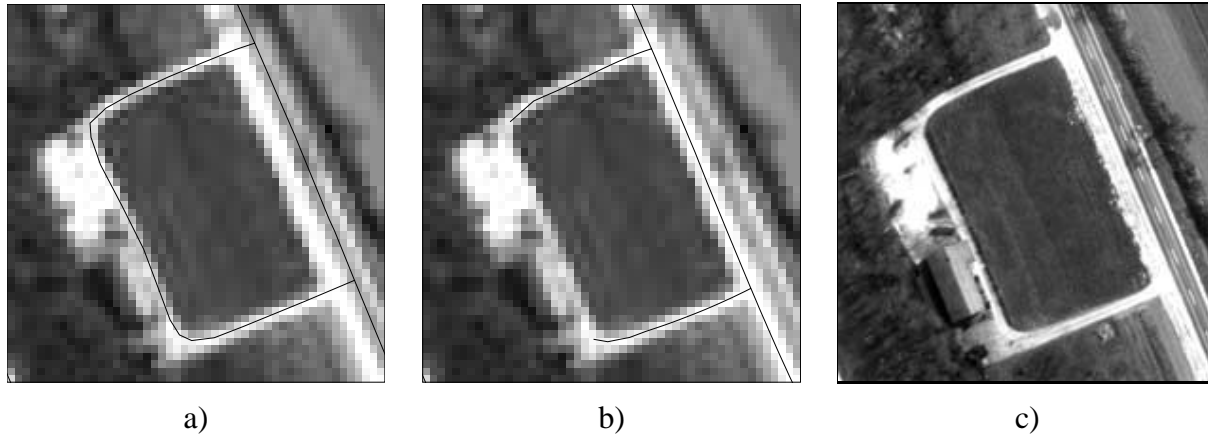


Abbildung 6.21. Lücke in der Extraktion: a) Referenz, b) Extraktion, c) Hochaufgelöstes Bild

Die fehlende Extraktion in dem in Abb. 6.21 dargestellten Bildausschnitt ist darauf zurückzuführen, daß dieser Straßenabschnitt teilweise leicht verdeckt ist und zum Teil einen nur sehr geringen Kontrast zur Umgebung aufweist. Es wurden hier zwar Linien extrahiert (Abb. 6.22a)), die daraus abgeleiteten potentiellen Straßenstücke wurden aber sehr schlecht bewertet (Abb. 6.22b)). Daher führt im gewichteten Graphen der kürzeste Pfad zwischen den beiden Endpunkten über die beiden Stichstraßen und den hellen Seitenstreifen der Teerstraße, was dazu führt, daß die — geometrisch — kürzere Verbindung nicht extrahiert wird.

Abbildung 6.23 zeigt einen Bildausschnitt, in dem im Kreuzungsbereich eine Lücke enthalten ist. Das fehlende Straßenstück ist in der für die Extraktion verwendeten Auflösung durch Verdeckungen nicht sichtbar. In der hohen Auflösung läßt es sich aufgrund des teilweise sichtbaren linken Randes erahnen. Das Fehlen dieses Verbindungsstückes führt auch zu Fehlern in der Rekonstruktion der Kreuzungen, da diese nun Knotengrad drei statt Knotengrad vier haben und daher die Abzweigung möglichst rechtwinkelig in die Hauptstraße mündet.

Bei dem in Abb. 6.24 dargestellten Fall ist der Kontrast zwischen Straße und Umgebung aufgrund von Schattenwurf und Verdeckungen durch Bäume lokal sehr gering. Darüberhinaus ergibt sich durch die lokale Anordnung der Bäume eine helle lineare Struktur neben der Straße, die besser bewertet und daher bei der globalen Gruppierung ausgewählt wurde.

Abbildung 6.25 zeigt ein Problem, das durch Unterschiede zwischen dem Modell und der Erscheinungsform des Objekts im Bild resultiert. Da nach hellen Straßen gesucht wurde, wird bei der Extraktion die helle lineare Struktur in diesem Bildbereich extrahiert. In der hohen Auflösung zeigt sich jedoch, daß die eigentliche Straße dunkel erscheint und der helle Streifen neben der

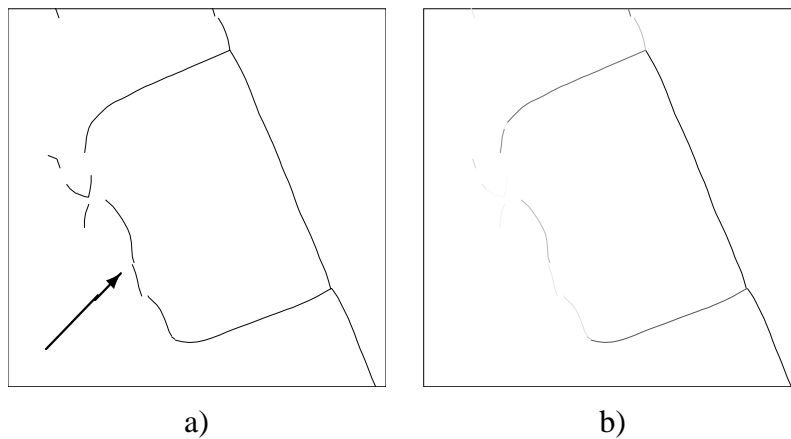


Abbildung 6.22. Fusionsresultat (Detail): a) alle potentiellen Straßenstücke (der Pfeil deutet auf den im Text angesprochenen Bereich), b) Stücke mit guter Bewertung: dunkel, Stücke mit schlechter Bewertung: hell

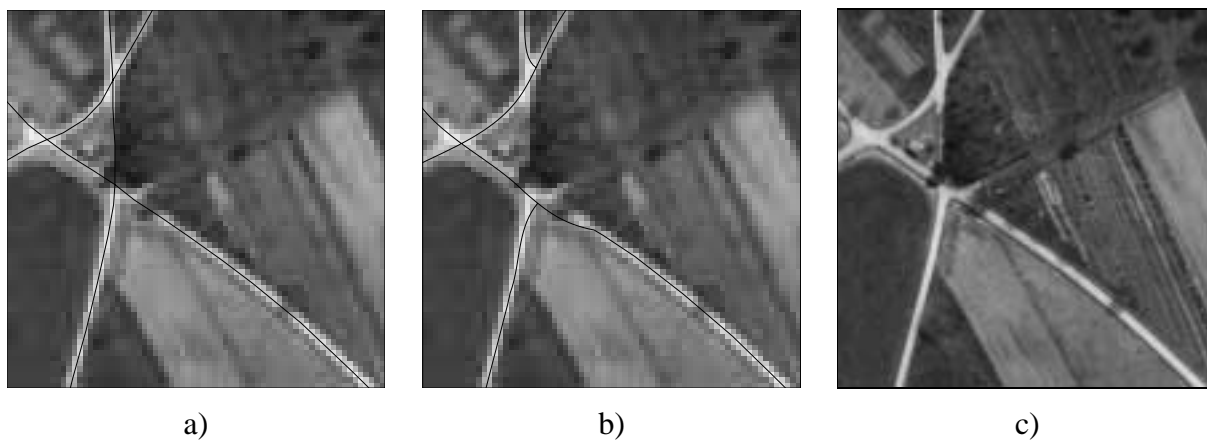


Abbildung 6.23. Lücke in der Extraktion: a) Referenz, b) Extraktion, c) Hochaufgelöstes Bild

Straße extrahiert wurde. Dies ist eindeutig darauf zurückzuführen, daß das Modell nicht mit der Erscheinungsform des Objekts übereinstimmt.

In Tabelle 6.2 werden die Ergebnisse der einzelnen Teilschritte einander gegenübergestellt. Fast alle Qualitätsmaße werden dabei schrittweise verbessert oder bleiben zumindest unverändert. Le-

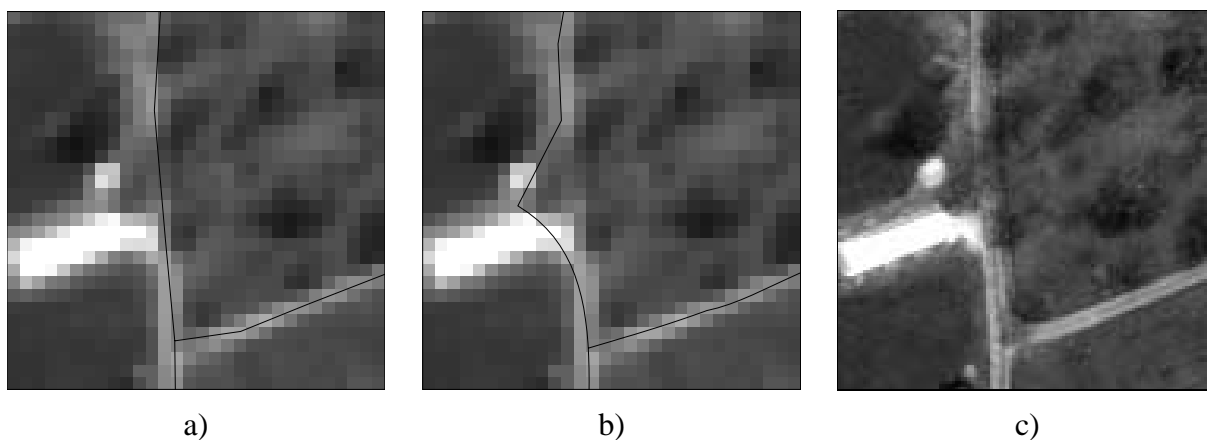


Abbildung 6.24. Extraktion anderer linearer Strukturen: a) Referenz, b) Extraktion, c) Hochaufgelöstes Bild

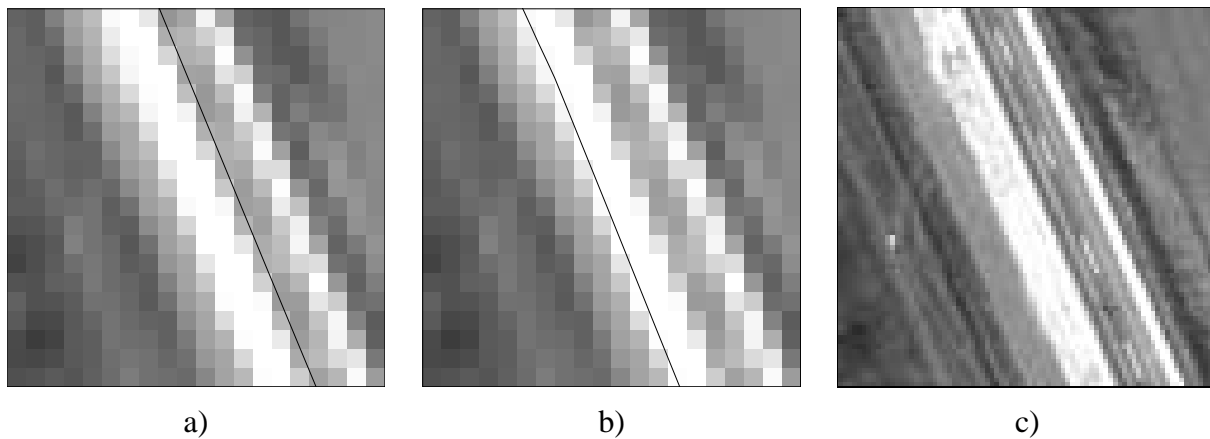


Abbildung 6.25. Extraktion anderer linearer Strukturen: a) Referenz, b) Extraktion, c) Hochaufgelöstes Bild

diglich die Korrektheit der Straßen nach der Vervollständigung und die Vollständigkeit von Straßen und Kreuzungen nach der Rekonstruktion der Kreuzungen sind etwas schlechter geworden. Die Ursache hierfür ist, daß, solange die Kreuzungen als Zyklen dargestellt werden, bedingt durch die Straßenstücke, die den Zyklus bilden mehr extrahierte Straßenstücke sowie Knotenpunkte im Kreuzungsbereich vorhanden sind. Teile dieser Straßenstücke oder einzelne Knotenpunkte können mit der Referenz übereinstimmen. Insbesondere für Kreuzungen, bei denen die extrahierte Kreuzung einen anderen Knotengrad als die in der Referenz enthaltene Kreuzung hat, kann es vorkommen, daß nach der Rekonstruktion der Kreuzungen weniger Straßenstücke oder Knotenpunkte mit der Referenz übereinstimmen, da in solchen Fällen ein anderer Kreuzungstyp rekonstruiert wird.

	vorl. Extraktion	Vervollständigung	Kreuzungen
Straßen			
Vollständigkeit	86.5 %	89.7 %	89.3 %
Korrektheit	98.0 %	97.5 %	98.0 %
RMS	1.55 m	1.55 m	1.54 m
Netzwerk			
Topologische Vollständigkeit	42.7 %	97.4 %	97.4 %
Topologische Korrektheit	100.0 %	100.0 %	100.0 %
Mittlerer Umwegfaktor	1.31	1.03	1.03
Mittlerer Abkürzungsfaktor	0.99	0.99	0.99
Kreuzungen			
Vollständigkeit	61.1 %	69.4 %	63.9 %
Korrektheit	47.4 %	58.9 %	82.1 %
Redundanz	60.0 %	52.8 %	0.0 %
RMS	4.71 m	4.46 m	4.10 m

Tabelle 6.2. Ergebnisse bei Verwendung eines Farbluftbildes

Die Qualität der dargestellten Ergebnisse ist für eine automatische Extraktion von Straßen sehr gut. Dies liegt auch daran, daß das verwendete Bildmaterial nicht sehr komplex ist. Probleme, die auftreten, sind meist lokal beschränkt, oder wirken sich nur auf die geometrische Genauigkeit aus. Die Erfahrung aus der Bearbeitung vieler Datensätze zeigt, daß die Qualität der Ergebnisse für Bilddaten, die mehr Störungen enthalten, geringer ist. In der Regel läßt sich aber nur sehr schwer vorhersagen, welche Qualität die Extraktion auf einem bestimmten Bildmaterial haben wird und

welche Parametereinstellungen ein optimales Extraktionsergebnis liefern.

Die Rechenzeiten sind von vielen Faktoren abhängig. Bei der vorläufigen Extraktion ist der wesentliche Faktor die Anzahl der extrahierten Linien. Liegen diese überdies dicht beieinander, wie es in Waldgebieten oder Siedlungen häufig der Fall ist, müssen extrem viele Verknüpfungshypothesen generiert und bewertet werden. Wald- und Siedlungsgebiete sollten daher, wenn möglich, bei der vorläufigen Extraktion ausgeschlossen werden. Die benötigte Zeit für die Vervollständigung hängt stark von der Anzahl von Lücken im zu bearbeitenden Straßennetz ab. Die Dauer der Rekonstruktion der Kreuzungen steigt nahezu linear mit der Anzahl zu rekonstruierender Kreuzungen an. Für das hier bearbeitete Beispiel liegt die gesamte Rechenzeit bei ca. 15 Minuten (Pentium III Prozessor mit 500 MHz Taktfrequenz).

6.3 Anwendung der entwickelten Verfahren auf ein panchromatisches Luftbild

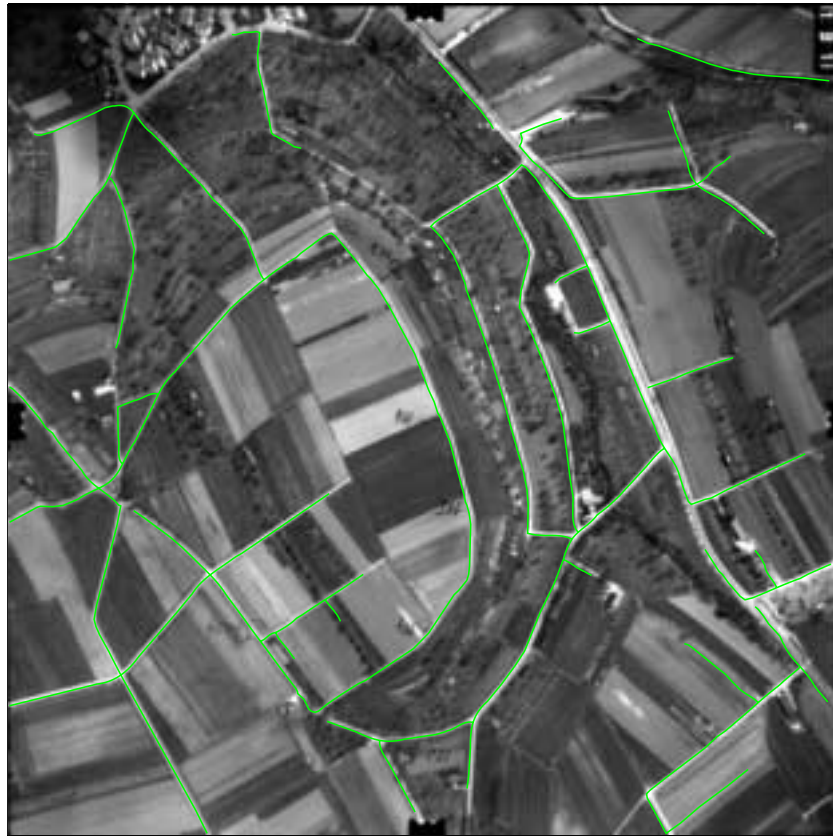
Werden die entwickelten Verfahren statt auf die drei Farbkanäle (rot, grün, blau) nur auf einen panchromatischen Kanal (hier simuliert durch Mittelbildung der drei Farbkanäle) angewendet, so erhält man die in Abb. 6.26 und Tab. 6.3 dargestellten Ergebnisse.

	vorl. Extraktion	Vervollständigung	Kreuzungen
Straßen			
Vollständigkeit	81.2 %	83.3 %	83.0 %
Korrektheit	93.8 %	93.9 %	94.0 %
RMS	1.59 m	1.57 m	1.57 m
Netzwerk			
Topologische Vollständigkeit	28.0 %	33.4 %	33.8 %
Topologische Korrektheit	100.0 %	100.0 %	100.0 %
Mittlerer Umwegfaktor	1.47	1.41	1.43
Mittlerer Abkürzungsfaktor	0.99	0.99	0.99
Kreuzungen			
Vollständigkeit	50.0 %	58.3 %	52.8 %
Korrektheit	51.0 %	72.1 %	79.2 %
Redundanz	30.8 %	32.3 %	0.0 %
RMS	4.27 m	4.77 m	4.34 m

Tabelle 6.3. Ergebnisse bei Verwendung eines panchromatischen Kanals

Vollständigkeit und Korrektheit der Straßen sind schlechter als bei Verwendung der drei spektralen Kanäle (Tab. 6.2). Das heißt, daß im Vergleich zum Ergebnis bei Verwendung der drei spektralen Kanäle, sowohl weniger Straßen gefunden werden, als auch mehr Fehlextraktionen auftreten. Insbesondere aber die topologische Vollständigkeit und der mittlere Umwegfaktor sind deutlich schlechter. Dies liegt daran, daß z.T. kleine Lücken in der Extraktion nicht geschlossen werden konnten. Diese Lücken führen zu einer Fragmentierung des Netzwerkes, die sich in den entsprechenden Qualitätsmaßen niederschlägt. Dagegen sind Korrektheit und Redundanz der Kreuzungen für die vorläufige Extraktion und die Vervollständigung besser als bei der Verwendung der drei spektralen Kanäle. Ursache hierfür ist, daß die potentiellen Straßenstücke, die aus den drei unterschiedlichen Kanälen stammen, insbesondere in den Kreuzungsbereichen nicht exakt zusammenpassen. Dies führt dazu, daß Kreuzungen bei Verwendung mehrerer Kanäle häufiger als Zyklen extrahiert werden. Die Knotenpunkte der Zyklen, die außerhalb des Puffers um die entsprechende Referenzkreuzung liegen, verringern die Korrektheit, wogegen die Knotenpunkte, die innerhalb des Puffers liegen die Redundanz erhöhen. Bei der Rekonstruktion der Kreuzungen werden diese Defizite wieder beseitigt, was dazu führt, daß alle Qualitätsmaße für Kreuzungen bei der Verwendung aller drei spektralen Kanäle besser sind als bei der Verwendung des panchromatischen Luftbildes.

Abbildung 6.27 zeigt die Unterschiede zwischen den Ergebnissen bei Verwendung der drei spektralen Kanäle und bei Verwendung eines panchromatischen Kanals. Dünne Linien stimmen in beiden Ergebnissen überein. Breite Linien stellen die Teile dar, die bei der Verwendung des panchromatischen Kanals nicht, gestrichelte Linien die Teile, die zusätzlich extrahiert wurden. Man erkennt hier, daß relativ viele Teile bei Verwendung des panchromatischen Kanals nicht extrahiert werden konnten. Das Extraktionsergebnis enthält aber auch zusätzlich extrahierte Teile, bei denen es sich allerdings zum überwiegenden Teil um Fehlextraktionen handelt.



a)



b)

Straßen	
Vollständigkeit	83.0 %
Korrektheit	94.0 %
RMS	1.57 m
Netzwerk	
Topologische Vollständigkeit	33.8 %
Topologische Korrektheit	100.0 %
Mittlerer Umwegfaktor	1.43
Mittlerer Abkürzungsfaktor	0.99
Kreuzungen	
Vollständigkeit	52.8 %
Korrektheit	79.2 %
Redundanz	0.0 %
RMS	4.34 m

c)

Abbildung 6.26. Extraktionsergebnis und Bewertung nach Rekonstruktion der Kreuzungen. a) Extraktionsergebnis, b) Ergebnis des Vergleichs mit den Referenzdaten (dünne Linien: Korrekte Extraktion, breite Linien: Fehlende Extraktion, gestrichelte Linien: Fehlerhafte Extraktion), c) Qualitätsmaße



Abbildung 6.27. Differenz zwischen den Ergebnissen bei Verwendung der drei spektralen Kanäle und bei Verwendung des panchromatischen Kanals (dünne Linien: Ergebnisse stimmen überein, breite Linien: Bei Verwendung des panchromatischen Kanals nicht extrahierte Teile, gestrichelte Linien: Bei Verwendung des panchromatischen Kanals zusätzlich extrahierte Teile)

6.4 Anwendung einer lokalen Gruppierung auf ein Farbluftbild

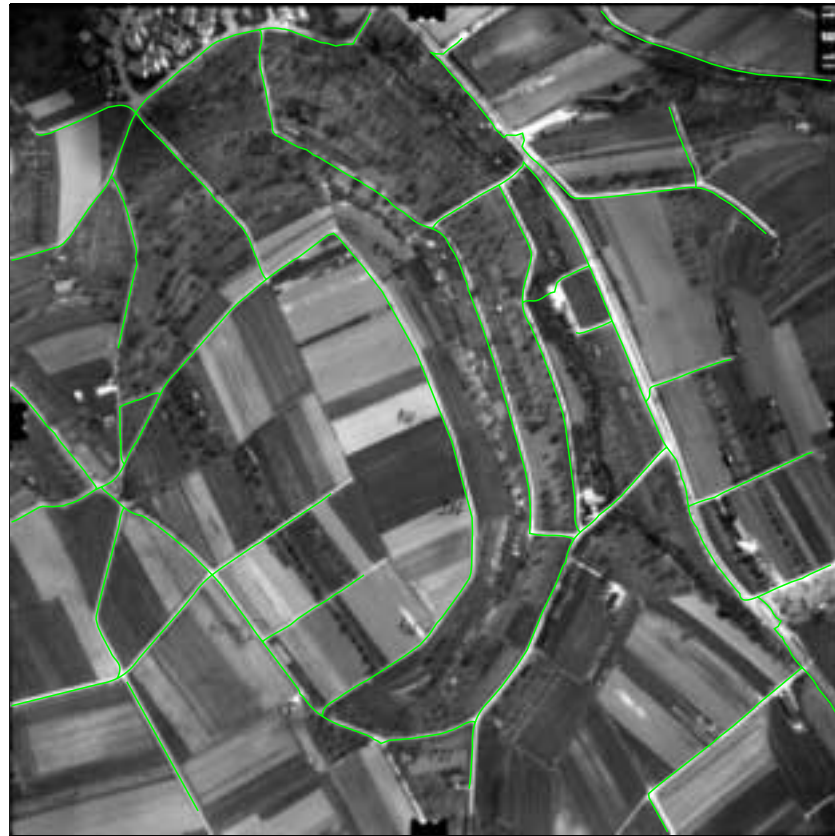
Eine lokale Gruppierung basiert auf dem Grundgedanken, daß bereits lokal entschieden werden kann, welche Verknüpfungen bei der Gruppierung eingefügt werden. Eine lokale Gruppierung läßt sich mittels einer leicht modifizierten Version des in dieser Arbeit entwickelten Verfahrens für die vorläufige Extraktion durchführen. Hierzu wird nach dem Einfügen der Verknüpfungshypothesen in den Graphen auf den Knoten des Graphen eine NMS bezüglich der in diesen Knoten endenden Verknüpfungshypothesen durchgeführt. Das heißt, sämtliche Verknüpfungshypothesen die nicht in mindestens einem ihrer Endpunkte, verglichen mit den ebenfalls dort endenden anderen Verknüpfungshypothesen, am besten bewertet wurden, werden wieder gelöscht. Die so modifizierte vorläufige Extraktion entspricht etwa dem Verfahren von (VASUDEVAN et al. 1988). In Abb. 6.28 und Tab. 6.4 sind die Ergebnisse dieser lokalen Gruppierung dargestellt.

	vorl. Extraktion	Vervollständigung	Kreuzungen
Straßen			
Vollständigkeit	85.8 %	88.5 %	88.2 %
Korrektheit	98.5 %	97.4 %	97.8 %
RMS	1.55 m	1.57 m	1.55 m
Netzwerk			
Topologische Vollständigkeit	34.2 %	81.8 %	81.4 %
Topologische Korrektheit	100.0 %	100.0 %	100.0 %
Mittlerer Umwegfaktor	1.35	1.10	1.10
Mittlerer Abkürzungsfaktor	0.99	0.99	0.99
Kreuzungen			
Vollständigkeit	58.3 %	69.4 %	63.9 %
Korrektheit	42.3 %	62.5 %	88.9 %
Redundanz	52.3 %	44.4 %	4.2 %
RMS	4.67 m	4.72 m	4.86 m

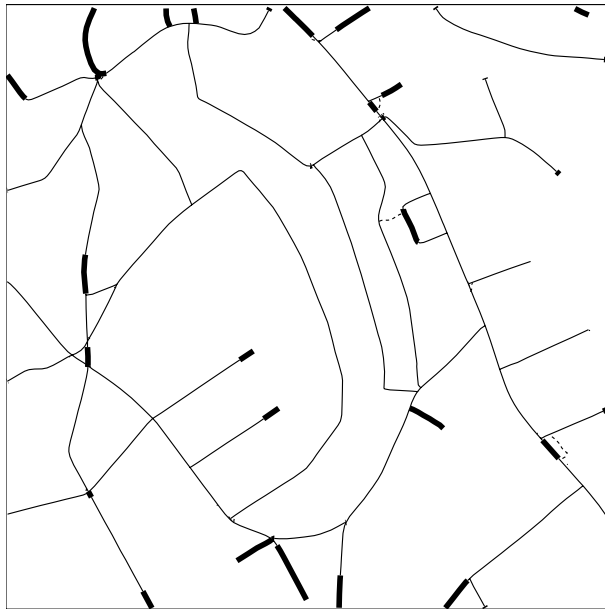
Tabelle 6.4. Ergebnisse bei Verwendung lokaler Gruppierung

Tabelle 6.4 zeigt, daß die Ergebnisse nur leicht schlechter ausfallen, als bei Anwendung der globalen Gruppierung (Tab. 6.2). Allein die Qualitätsmaße für das Netzwerk sind erwartungsgemäß deutlich schlechter. Das bedeutet, daß in den meisten Fällen — zumindest für dieses Testbeispiel — die lokale Entscheidung, welche Verknüpfungen verwendet werden, korrekt ist. Allerdings entstehen durch die Fehlentscheidungen kurze Lücken, die zu deutlichen Defiziten in der Netzstruktur der Extraktion führen. Die bei den Ergebnissen der lokalen Gruppierung etwas höhere Korrektheit der Kreuzungen ist darin begründet, daß die Ergebnisse der globalen Gruppierung einige fehlerhaft extrahierte Kreuzungen enthalten, die aber topologisch wichtige Verbindungen zwischen sonst voneinander getrennten Teilen des Straßennetzes herstellen und somit zu einer höheren topologischen Vollständigkeit führen (siehe hierzu auch Kap. 6.6).

Der in Abb. 6.29 dargestellte Vergleich zwischen den Ergebnissen bei Anwendung der globalen und der lokalen Gruppierung bestätigt die oben getroffene Aussage: Nur wenige Straßenstücke konnten nicht extrahiert werden und nur ein relativ kurzes zusätzliches Teilstück wurde fehlerhaft extrahiert. Warum sich diese Fehlextraktion, die eine Abkürzung innerhalb des Straßennetzes darstellt, praktisch nicht auf den mittleren Abkürzungsfaktor auswirkt, wird in Kap. 6.6 erläutert.



a)



b)

Straßen	
Vollständigkeit	88.2 %
Korrektheit	97.8 %
RMS	1.55 m
Netzwerk	
Topologische Vollständigkeit	81.4 %
Topologische Korrektheit	100.0 %
Mittlerer Umwegfaktor	1.10
Mittlerer Abkürzungsfaktor	0.99
Kreuzungen	
Vollständigkeit	63.9 %
Korrektheit	88.9 %
Redundanz	4.2 %
RMS	4.86 m

c)

Abbildung 6.28. Extraktionsergebnis und Bewertung nach Rekonstruktion der Kreuzungen. a) Extraktionsergebnis, b) Ergebnis des Vergleichs mit den Referenzdaten (dünne Linien: Korrekte Extraktion, breite Linien: Fehlende Extraktion, gestrichelte Linien: Fehlerhafte Extraktion), c) Qualitätsmaße



Abbildung 6.29. Differenz zwischen den Ergebnissen bei Anwendung der globalen und einer lokalen Gruppierung (dünne Linien: Ergebnisse stimmen überein, breite Linien: Bei lokaler Gruppierung nicht extrahierte Teile, gestrichelte Linien: Bei lokaler Gruppierung zusätzlich extrahierte Teile)

6.5 Anwendung einer Gruppierung mit harten Schwellwerten auf ein Farbluftbild

Im Gegensatz zu Fuzzy-Membership-Funktionen, die meist einen fließenden Übergang zwischen der Ablehnung einer Aussage (Fuzzy-Wert 0) und ihrer Annahme (Fuzzy-Wert 1) realisieren (siehe Anhang B), erfolgt dieser Übergang bei harten Schwellwerten sprunghaft. Die Aussage, ob ein Linienelement „lang“ ist, wird abgelehnt, wenn das Linienelement kürzer als z.B. 50 m ist und angenommen, wenn seine Länge größer oder gleich 50 m ist.

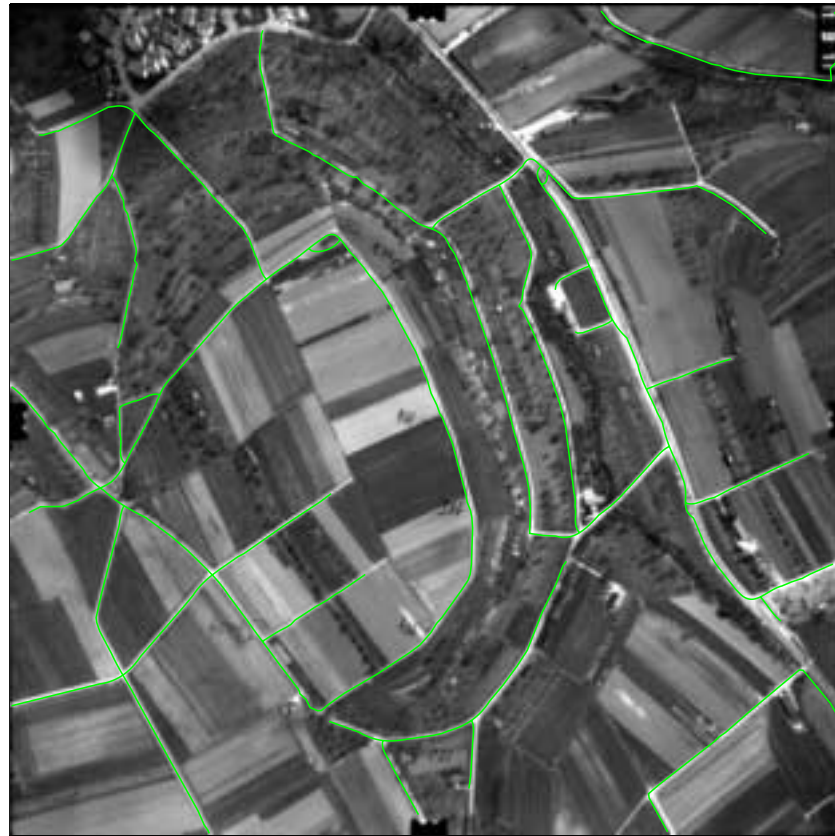
Wendet man im Rahmen der vorläufigen Extraktion zur Bewertung der Linien und der Verknüpfungshypothesen statt Fuzzy-Membership-Funktionen harte Schwellwerte an, erhält man das in Abb. 6.30 und Tab. 6.5 dargestellte Ergebnis.

	vorl. Extraktion	Vervollständigung	Kreuzungen
Straßen			
Vollständigkeit	81.2 %	81.8 %	81.7 %
Korrektheit	95.3 %	95.7 %	97.1 %
RMS	1.45 m	1.46 m	1.38 m
Netzwerk			
Topologische Vollständigkeit	32.8 %	39.2 %	39.3 %
Topologische Korrektheit	100.0 %	100.0 %	100.0 %
Mittlerer Umwegfaktor	1.12	1.17	1.20
Mittlerer Abkürzungsfaktor	0.98	0.98	0.98
Kreuzungen			
Vollständigkeit	55.6 %	58.3 %	55.6 %
Korrektheit	54.1 %	61.2 %	73.1 %
Redundanz	56.5 %	48.8 %	-5.3 %
RMS	4.80 m	4.83 m	4.63 m

Tabelle 6.5. Ergebnisse bei Verwendung von harten Schwellwerten

Die harten Schwellwerte wurden dabei so gewählt, das möglichst wenige Fehlextraktionen im Vergleich zu dem Ergebnis bei Verwendung von Fuzzy-Membership-Funktionen (Tab. 6.2) hinzukommen. Dafür wurden im Vergleich zu diesem Extraktionsergebnis weniger Straßen und Kreuzungen extrahiert, was zu einer sehr schlechten Netzstruktur der Extraktion führt. Lediglich die Korrektheit und die Redundanz der Kreuzungen weisen für die Ergebnisse der vorläufigen Extraktion und der Vervollständigung bessere Werte auf. Dies ist durch die restriktivere Bewertung der Linien und die dadurch geringere Anzahl extrahierter Kreuzungen begründet. Die bessere geometrische Genauigkeit der mit harten Schwellwerten extrahierten Straßen ist darauf zurückzuführen, daß insgesamt weniger Straßen extrahiert wurden, wobei es sich dabei um die leichter erkennbaren Straßen handelt, die mit höherer Genauigkeit extrahiert werden können. Der nach der Vervollständigung höhere mittlere Umwegfaktor kann so erklärt werden, daß unterschiedliche Zusammenhangskomponenten im Rahmen der Vervollständigung miteinander verbunden wurden (Anstieg der topologischen Vollständigkeit). In den daraus entstandenen neuen Zusammenhangskomponenten treten Lücken auf, die zuvor zwischen unterschiedlichen Zusammenhangskomponenten lagen. Einige dieser Lücken konnten im Rahmen der Vervollständigung nicht geschlossen werden, was zum Anstieg des mittleren Umwegfaktor führt. Die negative Redundanz der Kreuzungen ist darauf zurückzuführen, daß eine der korrekt extrahierten Kreuzungen zwei Kreuzungen der Referenz zugeordnet wurde.

Abbildung 6.31 zeigt den Unterschied zwischen den Ergebnissen bei Anwendung von Fuzzy-Membership-Funktionen und von harten Schwellwerten. Man erkennt, daß größere Teile der Extraktion fehlen und einige z.T. falsche Teile zusätzlich extrahiert wurden.



a)



b)

Straßen	
Vollständigkeit	81.7 %
Korrektheit	97.1 %
RMS	1.38 m
Netzwerk	
Topologische Vollständigkeit	39.3 %
Topologische Korrektheit	100.0 %
Mittlerer Umwegfaktor	1.20
Mittlerer Abkürzungsfaktor	0.98
Kreuzungen	
Vollständigkeit	55.6 %
Korrektheit	73.1 %
Redundanz	-5.3 %
RMS	4.63 m

c)

Abbildung 6.30. Extraktionsergebnis und Bewertung nach Rekonstruktion der Kreuzungen. a) Extraktionsergebnis, b) Ergebnis des Vergleichs mit den Referenzdaten (dünne Linien: Korrekte Extraktion, breite Linien: Fehlende Extraktion, gestrichelte Linien: Fehlerhafte Extraktion), c) Qualitätsmaße



Abbildung 6.31. Differenz zwischen den Ergebnissen bei Anwendung von Fuzzy-Membership-Funktionen und von harten Schwellwerten (dünne Linien: Ergebnisse stimmen überein, breite Linien: Bei Anwendung harter Schwellwerte nicht extrahierte Teile, gestrichelte Linien: Bei Anwendung harter Schwellwerte zusätzlich extrahierte Teile)

6.6 Vergleich der unterschiedlichen Endergebnisse

In diesem Kapitel werden die unterschiedlichen Endergebnisse einander gegenübergestellt und verglichen.

	Farbluftbild	Pan	Lokale Gruppierung	Harte Schwellwerte
Straßen				
Vollständigkeit	89.3 %	83.0 %	88.2 %	81.7 %
Korrektheit	98.0 %	94.0 %	97.8 %	97.1 %
RMS	1.54 m	1.57 m	1.55 m	1.38 m
Netzwerk				
Topologische Vollständigkeit	97.4 %	33.8 %	81.4 %	39.3 %
Topologische Korrektheit	100.0 %	100.0 %	100.0 %	100.0 %
Mittlerer Umwegfaktor	1.03	1.43	1.10	1.20
Mittlerer Abkürzungsfaktor	0.99	0.99	0.99	0.98
Kreuzungen				
Vollständigkeit	63.9 %	52.8 %	63.9 %	55.6 %
Korrektheit	82.1 %	79.2 %	88.9 %	73.1 %
Redundanz	0.0 %	0.0 %	4.2 %	-5.3 %
RMS	4.10 m	4.34 m	4.86 m	4.63 m

Tabelle 6.6. Gegenüberstellung der einzelnen Ergebnisse

Tabelle 6.6 zeigt, daß die Ergebnisse des kompletten Satzes der in dieser Arbeit entwickelten Verfahren, angewandt auf die drei Kanäle des Farbluftbildes, in fast allen Qualitätsmaßen die besten Werte erzielen. Lediglich bei der geometrischen Genauigkeit (RMS) der Straßen sowie bei der Korrektheit der Kreuzungen erzielen andere Verfahren bessere Ergebnisse. Die Extraktion mittels harter Schwellwerte, die eine höhere geometrische Genauigkeit hat, weist eine geringere Vollständigkeit auf. Es werden also nur die leichter und genauer erkennbaren Straßen extrahiert. Die höhere Korrektheit der Kreuzungen bei Anwendung der lokalen Gruppierung ist im wesentlichen auf die in Abb. 6.32 dargestellten Unterschiede der Extraktion in dem bereits in Kapitel 6.2 diskutierten Problembereich zurückzuführen. Zwei der drei im Ergebnis der globalen Gruppierung enthaltenen Kreuzungen (Abb. 6.32a)), die im Ergebnis der lokalen Gruppierung nicht enthalten sind (Abb. 6.32b)), gewährleisten die topologisch korrekte Verbindung der in Abb. 6.32b) voneinander getrennten Straßenstücke. Alle drei Kreuzungen sind aber im Vergleich zur Referenz (Abb. 6.32c)) falsch extrahiert, was zu der geringeren Korrektheit der Kreuzungen der globalen Gruppierung führt. Es sei an dieser Stelle aber noch einmal darauf hingewiesen, daß die globale Extraktion trotz der Fehler in der Geometrie und bei den Kreuzungen topologisch vollständiger ist.

Die lokale Gruppierung hat in dem untersuchten Testdatensatz bei den Qualitätsmaßen für die Straßen und Kreuzungen fast ebensogute Ergebnisse erzielt, wie die globale Gruppierung. Der Grund hierfür ist, daß die Straßen in den Testdaten ein relativ klares Erscheinungsbild haben, d.h., die Straßen können bereits durch die Linien relativ gut repräsentiert werden und in unmittelbarer Nähe zu Linien, die Straßen darstellen, wurden nur wenig andere Linien extrahiert. Das führt dazu, daß pro Linienende relativ wenige Verknüpfungshypothesen existieren. Der Vorteil der globalen Gruppierung liegt aber darin, daß eine lokal schlecht bewertete Verknüpfungshypothese einer gut bewerteten vorgezogen werden kann, wenn die globale Verbindungsfunktion der Straße dies erfordert. Existiert aber z.B. nur eine Verknüpfungshypothese oder ist die „korrekte“ Verknüpfungshypothese diejenige, die lokal am besten bewertet wurde, so ist die globale Gruppierung mit der lokalen Gruppierung identisch. Die z.T. sehr kurzen, bei dem Ergebnis der lokalen Gruppierung fehlenden Straßenstücke führen aber

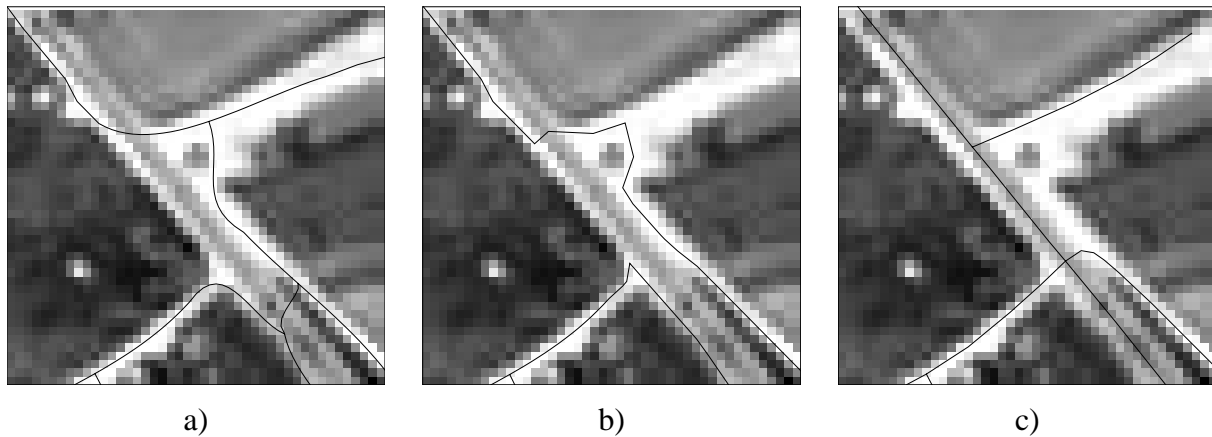


Abbildung 6.32. Bereich, in dem wesentliche Unterschiede bei der Extraktion der Kreuzungen auftreten: a) Globale Gruppierung, b) Lokale Gruppierung, c) Referenz

dazu, daß die Topologie des Extraktionsergebnisses schlechter ist als bei der globalen Gruppierung. Tests auf anderem Bildmaterial (HINZ et al. 1999) haben gezeigt, daß die Vorteile der globalen Gruppierung vor allem in Bereichen mit komplexem Bildinhalt, z.B. in Siedlungsgebieten, zum Tragen kommen. Hier kann unter gewissen Umständen eine Verbindung gefunden werden, die durch die Siedlung hindurchführt und die mittels rein lokaler Gruppierung, auch bei Verwendung höher aufgelöster Bilddaten, nicht extrahiert werden kann.

Auf den ersten Blick scheinen die Werte, die der mittlere Abkürzungsfaktor bei der lokalen Gruppierung und bei der Gruppierung mit harten Schwellwerten annimmt, nicht korrekt zu sein. Das Ergebnis der lokalen Gruppierung enthält eine offensichtlich falsche Abkürzung (siehe Abb. 6.33a), die ein Detail aus Abb. 6.28a) darstellt), die sich aber praktisch nicht in dem entsprechenden Qualitätsmaß niederschlägt (mittlerer Abkürzungsfaktor: 0.99). Dagegen scheint das Ergebnis der Gruppierung mit harten Schwellwerten keine wesentlichen Abkürzungen zu enthalten, hat aber mit einem mittleren Abkürzungsfaktor von 0.98 eine geringfügig schlechtere Bewertung als die übrigen Extraktionsergebnisse.

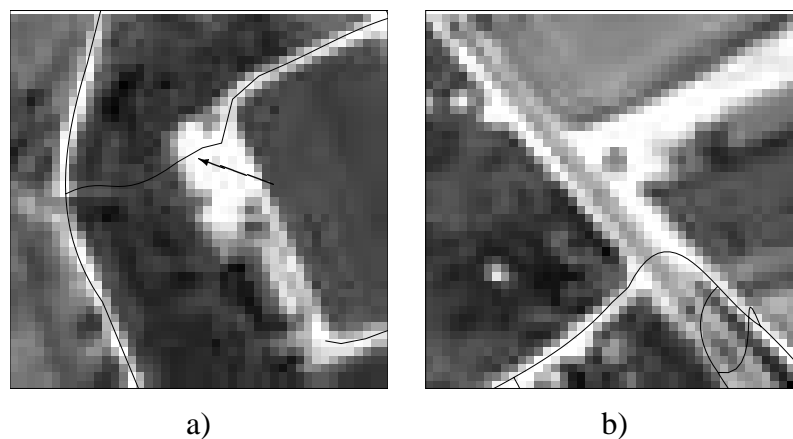


Abbildung 6.33. Wichtige Bereiche für die Berechnung des mittleren Abkürzungsfaktors: a) lokale Gruppierung (der Pfeil deutet auf die im Text angesprochene Abkürzung), b) Gruppierung mit harten Schwellwerten.

Um diesen Sachverhalt verstehen zu können, muß man sich vor Augen führen, daß der Abkürzungs- (bzw. Umweg-)faktor für jedes Paar von Knoten bestimmt wird, das die in Kapitel 5.3.1 genannten Bedingungen erfüllt. Aus den so bestimmten Abkürzungs- (und Umweg-)faktoren wird nun der Mittelwert berechnet. Das bedeutet aber, daß selbst deutliche Abkürzungen, die selten

verwendet werden, um auf dem kürzesten Weg von einem Knoten zum anderen zu gelangen, nur sehr geringen Einfluß auf den mittleren Abkürzungsfaktor haben. Genau dieser Fall tritt bei dem Ergebnis der lokalen Gruppierung auf. Betrachtet man das gesamte Extraktionsergebnis (siehe Abb. 6.28), kann man leicht feststellen, daß diese Abkürzung nur selten verwendet werden würde, wenn die entsprechende Straße tatsächlich existieren würde. Genau andersherum verhält es sich bei dem Ergebnis der Gruppierung mit harten Schwellwerten. Hier existiert eine relativ kleine Abkürzung: Durch die Fehlextraktionen bzw. die stark verschoben extrahierte Kreuzung (siehe Abb. 6.33b), die ein Detail aus Abb. 6.30a) darstellt) entsteht eine Verbindung zwischen den beiden nach rechts unten verlaufenden Straßen, die ca. 30 m kürzer ist, als die entsprechende Verbindung in der Referenz (Abb. 6.32c)). Da diese Abkürzung aber sehr häufig verwendet wird, schlägt sie sich auch in dem mittleren Abkürzungsfaktor nieder. Dies zeigt eine gewisse Schwäche der Qualitätsmaße auf, die in der globalen Bewertung des gesamten Extraktionsergebnisses begründet sind. Extraktionsfehler, die nur von lokaler Bedeutung sind, können durch die Qualitätsmaße nicht ausreichend wiedergegeben werden (s. Kap. 7.2).

6.7 Diskussion der Bewertung

Wie in Kapitel 5.5 herausgearbeitet wurde, sind die Parameter für die Bewertung mit Sorgfalt zu wählen. In dem o.g. Kapitel wurden auch Möglichkeiten aufgezeigt, die zu einer korrekten Wahl der Parameter führen. Hierzu ist es notwendig, die Bewertung mit unterschiedlichen Parametersätzen durchzuführen, um dann anhand dieser Ergebnisse die endgültigen Parameter festlegen zu können.

In Abb. 6.34 sind Vollständigkeit und Korrektheit als Funktion der Pufferbreite aufgetragen¹. Die für die Bewertung gewählte Pufferbreite von 6 m liegt sowohl für die Vollständigkeit als auch für die Korrektheit aller Ergebnisse im flachen Bereich der Kurven.

Auffällig ist in Abb. 6.34, daß bereits zwischen etwa 2 m und 4 m Pufferbreite ein relativ flacher Bereich existiert und zwischen 4 m und 5 m noch ein Anstieg der Kurven erfolgt. Dies bedeutet, daß der größte Teil der Extraktion bereits bei einer Pufferbreite von 2 m der Referenz zugeordnet wird, also maximal 2 m von der Referenz entfernt ist. Gewisse Teile der Extraktion liegen aber 4 m bis 5 m von der Referenz entfernt. Hierbei handelt es sich um den neben der dunkel erscheinenden Kreisstraße extrahierten hellen Streifen (siehe auch Abb. 6.25).

Der Hilfsknotenabstand bei der Bewertung der Topologie sollte so klein gewählt werden, daß die entsprechenden Qualitätsmaße noch nicht zu stark durch die mit wachsendem Hilfsknotenabstand verstärkt unregelmäßige Verteilung der Hilfsknoten verfälscht werden. Abbildung 6.35 zeigt, daß bei einem Hilfsknotenabstand von 10 m die topologische Vollständigkeit noch keine nennenswerten Änderungen gegenüber den Ergebnissen bei Verwendung kleinerer Hilfsknotenabstände aufweist².

In Abb. 6.36 ist der mittlere Umwegfaktor als Funktion der minimalen Entfernungsdifferenz Δl aufgetragen. In Kapitel 5.5.4 wurde erläutert, daß der Wert der minimalen Entfernungsdifferenz Δl im ersten größeren, relativ flachen Bereich dieser Kurven liegen soll. Der gewählte Wert von 20 m für den Parameter Δl erfüllt diese Bedingung bei praktisch allen Ergebnissen, die in dieser Arbeit miteinander verglichen wurden.

¹ Diese Abbildung zeigt lediglich den Verlauf der Qualitätsmaße für ansteigende Pufferbreiten. Die visuelle Trennbarkeit der einzelnen Kurven steht dabei im Hintergrund.

² Auch größere Werte wären hier akzeptabel, da die Schwankungen relativ gering ausfallen.

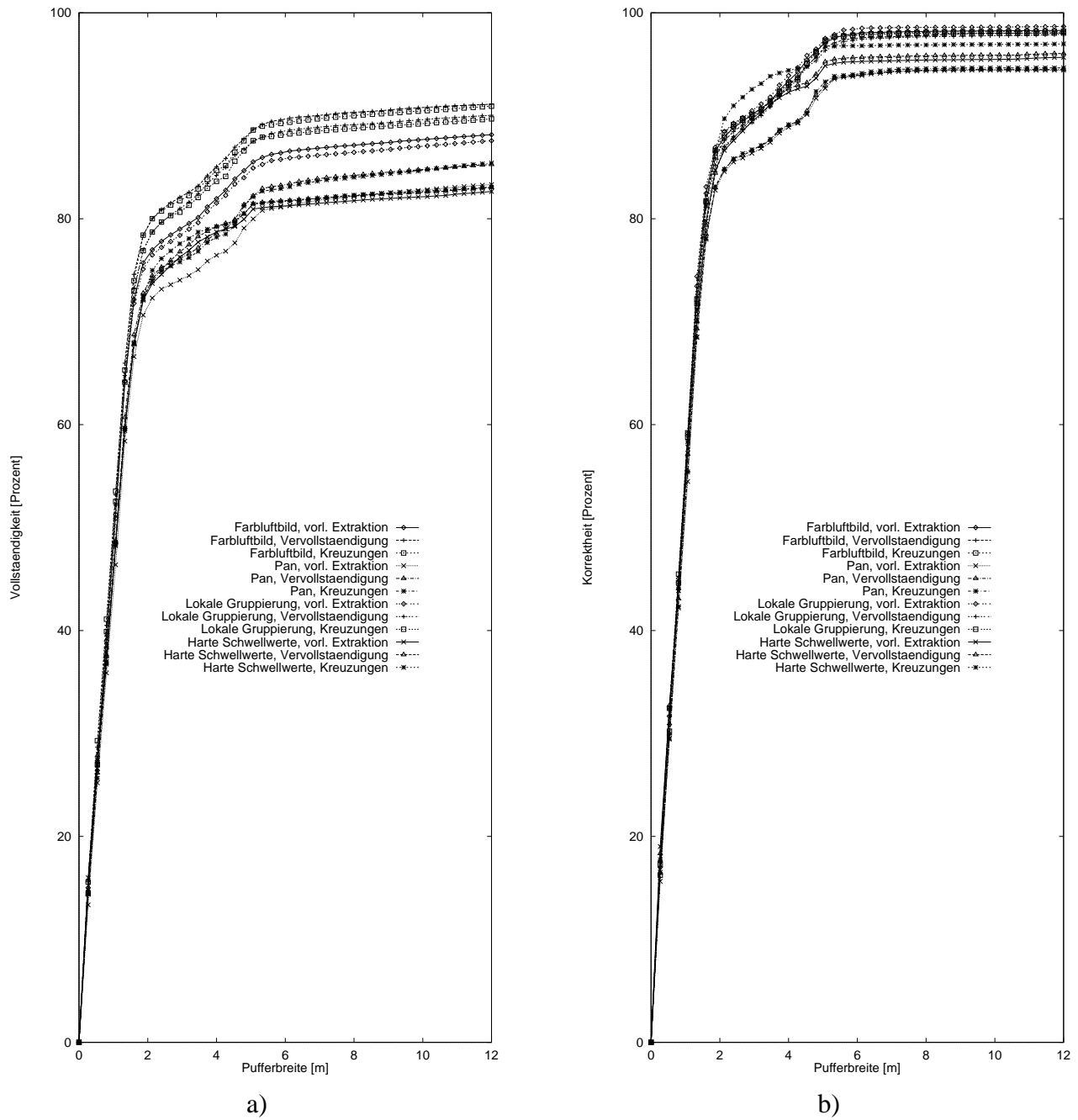


Abbildung 6.34. a) Vollständigkeit und b) Korrektheit als Funktion der Pufferbreite

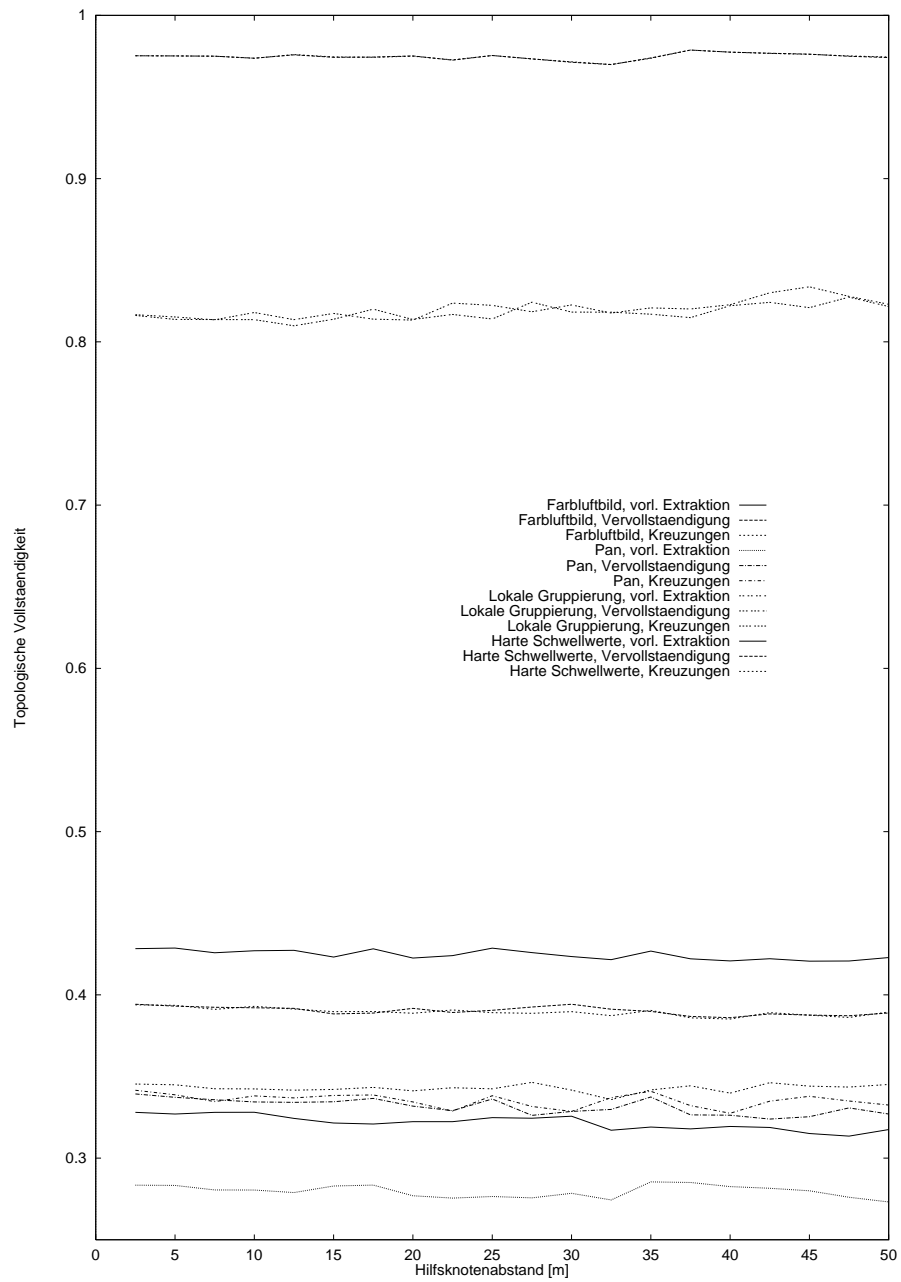


Abbildung 6.35. Topologische Vollständigkeit als Funktion des Hilfsknotenabstands für alle Ergebnisse



Abbildung 6.36. Mittlerer Umwegfaktor als Funktion der minimalen Entfernungsdifferenz Δl für alle Ergebnisse

7. Diskussion der entwickelten Verfahren zur Extraktion von Straßennetzen und Ausblick

Die automatische Auswertung von Luft- und Satellitenbildern wurde in den letzten Jahren von zahlreichen Forschungsgruppen untersucht. Sie hat inzwischen einen Stand erreicht, bei dem unter bestimmten Bedingungen einzelne Klassen von Objekten automatisch erkannt und rekonstruiert werden können. Bis zur automatischen Erstellung einer vollständigen Szenenbeschreibung eines größeren Ausschnitts der Welt ist es jedoch noch ein weiter Weg. Insbesondere sind es die Vielzahl der Objektklassen und ihre unterschiedlichen Erscheinungsformen in einer natürlichen Szene, die heutigen Systemen große Probleme bereiten.

Dies trifft auch für Straßen zu. In beschränkten Bereichen, in denen die Straßen mehr oder weniger einheitlich erscheinen, bzw. dem Modell entsprechen, das den Extraktionsalgorithmen zugrunde liegt, können relativ gute Extraktionsergebnisse erzielt werden. Weicht die Erscheinungsform der Straße aber von der modellierten Erscheinungsform ab, führt dies in aller Regel zu Lücken in der Extraktion. Andererseits führen lineare Objekte, deren Erscheinungsbild dem modellierten ähnelt, zu Fehlextraktionen. Da bisher noch kein zur Extraktion von Straßen verwendetes Modell entsprechend umfassend und gleichzeitig detailliert genug ist, und in näherer Zukunft auch nicht mit der Entwicklung eines solchen Modells gerechnet werden kann, werden die Ergebnisse der automatischen Straßenextraktion auf absehbare Zeit die oben genannten Fehler enthalten. Wissenschaftliche Arbeiten zur automatischen Straßenextraktion beschäftigen sich daher durchwegs mit einzelnen Komponenten des Straßenmodells und mit der Frage, welchen Beitrag diese Komponenten für die Extraktion der Straßen leisten.

7.1 Zusammenstellung der neuen Verfahren

In dieser Arbeit wurden ein Verfahren zur automatischen Extraktion von Straßen aus optischen Satellitenbilddaten sowie Methoden zur Bewertung der Extraktionsergebnisse entwickelt. Das besondere Augenmerk lag dabei auf der expliziten Nutzung der Netzwerkeigenschaften von Straßen für ihre Extraktion. Um diesen Nutzen objektiv nachweisen zu können, wurde ein Verfahren zur Bewertung der Extraktionsergebnisse erstellt, welches auf Qualitätsmaßen basiert, die z.T. aus der Literatur bekannt sind und um spezielle Qualitätsmaße für die Netzwerkeigenschaften erweitert wurden.

Das entwickelte Verfahren zur Straßenextraktion ist in zwei Teilschritte untergliedert: die vorläufige Extraktion und die Verbesserung der vorläufigen Extraktionsergebnisse. Die vorläufige Extraktion basiert auf einem Modell, das neben lokalen (Radiometrie) und regionalen (Geometrie) Aspekten insbesondere die globale Verbindungsfunktion von Straßen (Topologie) beinhaltet. Diese Eigenschaft von Straßennetzen wird hierbei durch die Suche nach langen, zusammenhängenden Straßenstücken realisiert. Bei der Verbesserung der vorläufigen Extraktionsergebnisse werden zwei wesentliche Eigenschaften von Straßennetzen verwendet. Zum einen ist das Straßennetz — unter gewissen Randbedingungen — so optimiert, daß man von einem beliebigen Punkt aus jeden anderen Punkt des Straßennetzes auf möglichst optimalem Weg erreichen kann. Diese Eigenschaft wird durch die Analyse von Pfadlängen innerhalb des vorläufig extrahierten Netzwerkes für die Verbesserung genutzt. Die Netzstruktur der Straßen wird allerdings erst durch Kreuzungen ermöglicht, da diese die einzelnen Straßen miteinander verbinden. Durch eine explizite Rekonstruktion der Kreuzungen können Fehler der vorläufigen Extraktion eliminiert und ein optisch ansprechendes und topologisch korrektes Ergebnis erzielt werden.

Die Bewertung der Extraktionsergebnisse erfolgt durch einen Vergleich mit Referenzdaten. Hierzu werden die Extraktionsergebnisse und die Referenzdaten einander zugeordnet. Aus den Zuordnungsergebnissen werden Qualitätsmaße zur Bewertung der Extraktion abgeleitet. Zur Bewertung der Netzwerkeigenschaften der Extraktionsergebnisse wurden neue Qualitätsmaße definiert. Sie basieren einerseits auf der Analyse von Pfadlängen und andererseits auf der Topologie der Extraktionsergebnisse, jeweils im Vergleich zu den Referenzdaten. Bestehende Arbeiten zur Bewertung von Extraktionsergebnissen werden damit um den für Straßen wichtigen Bereich der Netzwerkeigenschaften ergänzt.

Anhand experimenteller Untersuchungen wurde die Leistungsfähigkeit der entwickelten Verfahren nachgewiesen. Hierfür wurden exemplarisch anhand eines Beispiels der Ablauf der Extraktion dargestellt sowie die Ergebnisse bewertet und diskutiert.

7.2 Wertung der neuen Verfahren

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf die Nutzung der globalen Verbindungsfunktion und der Netzwerkeigenschaften von Straßen zur automatischen Extraktion von Straßennetzen aus Satellitenbilddaten sowie auf die Bewertung der Extraktionsergebnisse. Die Konzeption der Verfahren ist darauf ausgerichtet, daß sie auch mit anderen Verfahren zur Extraktion von Straßen, z.B. aus hochauflösenden Daten, kombiniert werden können. Das Verfahren zur Bewertung ist generell unabhängig von dem Extraktionsverfahren. Es kann auch für die Bewertung der Ergebnisse anderer Straßenextraktionsverfahren verwendet werden.

Im folgenden werden die Stärken und Schwächen der entwickelten Verfahren aufgezeigt. Die Stärken sind:

- **Globale Gruppierung**
Die Entscheidung, welche der extrahierten Linien dem Straßennetz angehören und wie diese Linien untereinander verknüpft werden, wird auf globaler Ebene getroffen. Lokal werden die Linien und Verknüpfungen lediglich bewertet. Dies führt dazu, daß, insbesondere in Bereichen, in denen viele konkurrierende Linien und Verknüpfungen auftreten, Fehlinterpretationen verringert werden können. Durch das Ausnutzen der Verbindungsfunktion im Rahmen der globalen Gruppierung wird überdies sichergestellt, daß nur lange, zusammenhängende Straßenstücke extrahiert werden, nicht aber kurze isolierte lineare Strukturen.
- **Explizite Nutzung der Netzwerkeigenschaften zur Vervollständigung von Netzwerken**
Durch die Analyse von Pfadlängen innerhalb des vorläufig extrahierten Straßennetzes können Lücken erkannt werden. Kann in den Bilddaten eine Straße gefunden werden, die diese Lücke schließt, so wird das Straßennetz durch das Einfügen dieser Straße vervollständigt. Diese bisher noch nicht für die Gruppierung verwendete Vorgehensweise kann Lücken auch dann erkennen, wenn eine auf lokale Kriterien, wie z.B. Kollinearität, basierende Gruppierung versagt. Diese Vorgehensweise zur Vervollständigung eignet sich z.B. auch sehr gut zur Kontrolle der Topologie manuell digitalisierter Straßennetze.
- **Explizite Modellierung von Kreuzungen**
Der in dieser Arbeit dargestellte Ansatz zur Rekonstruktion von Kreuzungen zeigt, daß selbst in der hier verwendeten niedrigen Auflösung eine deutliche Verbesserung der Extraktionsergebnisse durch die explizite Modellierung der Kreuzungen erzielt werden kann.
- **Flexible Einsetzbarkeit**
Der Aufbau der gesamten im Rahmen der Arbeit entwickelten Programme sowie insbesondere der Teile zur Bewertung von Linien und Verknüpfungen wurde bewußt modular gestaltet. Dies ermöglicht, daß an beliebiger Stelle Ergebnisse anderer Extraktionsverfahren eingeführt und weiterverarbeitet werden können und daß die regionalen Bewertungskriterien leicht angepaßt

bzw. durch andere Kriterien ersetzt werden können. Dies führte dazu, daß die Programme zu ganz unterschiedlichen Zwecken eingesetzt werden konnten, wie z.B. zur Extraktion von Straßenmarkierungen in hochauflösenden Luftbildern (HINZ und BAUMGARTNER 2000) oder zur Extraktion von gestrichelten Linien in technischen Zeichnungen.

Durch die Möglichkeit, regional bewertete Linien unterschiedlicher Herkunft zu fusionieren, konnten die entwickelten Verfahren zur Extraktion von Straßen aus Multispektral- sowie Multisensordaten (HELLWICH und WIEDEMANN 2000) verwendet werden. Die Verfahren lassen sich mit anderen Extraktionsverfahren, z.B. basierend auf einer höheren Auflösung, kombinieren (BAUMGARTNER et al. 1999a, HINZ et al. 2000, HINZ et al. 2001).

- Externe Bewertung der Extraktionsergebnisse
Die Bewertung der Extraktionsergebnisse ist sowohl für die Einschätzung der Tauglichkeit der Verfahren als auch für deren Verbesserung und Weiterentwicklung von essentieller Bedeutung. Da das Bewertungsverfahren unabhängig von der Art des Extraktionsverfahrens ist, konnte es auch erfolgreich in anderen Projekten eingesetzt werden (BAUMGARTNER et al. 1999b).

Die Schwächen der entwickelten Verfahren sind:

- Parameter
Zur Steuerung der entwickelten Programme müssen relativ viele Parameter eingestellt werden. Insbesondere für die Bewertung der Linien und Verknüpfungshypothesen aufgrund regionaler Kriterien. Allerdings sind viele Parameter, wie z.B. die Breite der Linien, aus den Eigenschaften der zu extrahierenden Straßen und der Bilddaten ableitbar. Es verbleiben aber dennoch Parameter, die nur aufgrund von Erfahrungswerten gesetzt werden können und die von der Bildqualität oder auch vom lokalen Kontext der Straßen abhängen (z.B. die Breitenvarianz). Untersuchungen haben ergeben, daß die Wahl der Parameter weniger Auswirkungen auf das Ergebnis hat, wenn die hier entwickelten Verfahren mit Verfahren zur Extraktion von Straßen aus Luftbildern (BAUMGARTNER et al. 1999b) *kombiniert* werden (HINZ et al. 2000). Die beiden Verfahren unterstützen sich gegenseitig, so daß die Ergebnisse in Bezug auf die Wahl der Parameter stabiler werden. Das bedeutet, daß ein Parametersatz praktisch unverändert für mehrere Bilder mit unterschiedlichem Bildinhalt angewendet werden kann.
- Extraktion der Startstücke
Da die kürzeste Verbindung zwischen je zwei Startstücken direkt in das Ergebnis der vorläufigen Extraktion einfließt, müssen die Startstücke auf Straßen liegen. Die Auswahl der Startstücke kann aber an der Stelle des Algorithmus, an der die Startstücke extrahiert werden, nur aufgrund der regionalen Bewertung der Linien erfolgen. Da die regionale Bewertung der Linien aber keine sichere Aussage über den Objekttyp der jeweiligen Linie erlaubt, ist die Extraktion der Startstücke ein Schwachpunkt des hier vorgestellten Verfahrens. Allerdings haben Untersuchungen gezeigt, daß es — wieder durch die Kombination mit anderen Verfahren zur Extraktion von Straßen — möglich ist, diesen Schwachpunkt zu beseitigen. Hierzu sind insbesondere Verfahren geeignet, die Straßen aufgrund lokaler Gruppierung aus hochauflösenden Luftbildern extrahieren (BAUMGARTNER et al. 1999b). Diese Verfahren liefern typischerweise sehr sichere Straßenstücke die als Startstücke für die globale Gruppierung verwendet werden können (BAUMGARTNER und HINZ 2000).
- Verifikation von Verknüpfungen
Die im Rahmen der globalen Gruppierung eingefügten Verknüpfungen werden nicht im Bild verifiziert. Bei einer Beschränkung auf relativ kurze Verknüpfungshypothesen dürfte diese Schwachstelle des Verfahrens keine entscheidenden Auswirkungen auf das Extraktionsergebnis haben. Für eine zuverlässige Verifikation wäre in vielen Fällen die Analyse des lokalen Kontextes — ggf. in hochauflösenden Bilddaten — notwendig (BAUMGARTNER et al. 1999b). Eine in gewisser Weise eingeschränkte Möglichkeit der Verifikation wäre, die Verknüpfungshypothesen

mit Linien zu Vergleichen, die mit sehr niedrigen Schwellwerten aus den Bilddaten extrahiert worden sind. Dieser Vergleich könnte ähnlich der in Kapitel 5.2 beschriebenen Bewertung der Straßen durchgeführt werden, wobei der Prozentsatz einer Verknüpfungshypothese, der innerhalb des Puffers um die extrahierten Linien liegt, als zusätzliche Bewertung der Verknüpfungshypothese in die Berechnung ihrer Kosten (s. Kap. 3.3) einbezogen werden könnte. Es wäre auch möglich, die im Extraktionsergebnis enthaltenen Verknüpfungen (nachträglich) zu verifizieren. Allerdings stellt sich dann die Frage, wie mit Verknüpfungen verfahren werden soll, die im Rahmen dieser Verifikation abgelehnt werden, da ein einfaches Entfernen dieser Verknüpfungen die Netzwerkeigenschaften der Extraktion wesentlich beeinflussen würden und im Widerspruch zu dem Ziel steht, ein möglichst gutes Straßennetz zu extrahieren. Da in der vorliegenden Arbeit keine der genannten Möglichkeiten zur Verifikation der Verknüpfungshypothesen eingesetzt wird, sollten im Rahmen der vorläufigen Extraktion nur relativ kurze Verknüpfungshypothesen zugelassen werden.

- **Multispektralinformation**

In den entwickelten Verfahren wird die bei Satellitenbilddaten häufig vorhandene Multispektralinformation nicht konsequent genutzt. Die Linien werden in den einzelnen Kanälen getrennt extrahiert und anschließend lediglich fusioniert. Das Hauptproblem für eine Verwendung der in den Multispektraldaten enthaltenen spektralen Information, die gegebenenfalls Rückschlüsse auf die Materialeigenschaften der abgebildeten Objekte zuläßt, ist die geometrische Auflösung der Bilddaten. Da solche Daten derzeit bestenfalls eine Bodenpixelgröße von 4 m haben, treten im Bereich von Straßen sehr häufig Mischpixel, das sind Pixel, die sowohl Straßen als auch angrenzende Objekte enthalten, auf. In diesen Mischpixeln ist die spektrale Information über Straßen durch die angrenzenden Objekte verfälscht. Die Multispektralinformation kann aber durchaus, z.B. mittels einer Multispektralklassifikation, für eine Bestimmung globaler Kontextgebiete genutzt werden (STRAUB et al. 2000).

- **Gemeinsame Extraktion heller und dunkler Straßen**

Prinzipiell ist die gemeinsame Extraktion heller und dunkler Straßen aus einem Bild möglich, sie ist aber, wie bereits in Kapitel 6.2 angesprochen wurde, relativ anfällig gegenüber Fehlextraktionen. Das liegt daran, daß hierzu sowohl helle als auch dunkle Linien aus dem Bild extrahiert werden müssen und dadurch deutlich mehr lineare Strukturen, die keine Straßen darstellen, extrahiert werden. Hell erscheinen z.B. manche schmalen Felder, dunkel häufig Hecken neben einer Straße oder auch zwischen landwirtschaftlich genutzten Flächen, aber auch Flüsse und Abflußgräben. Auch die Böschungstreifen neben einer Straße erscheinen teilweise als lineare Strukturen, die entweder hell oder dunkel sein können. Da diese Objekte oft in Bezug auf die verwendeten regionalen (geometrischen) Eigenschaften den Straßen ähnlich sind, kann die Unterscheidung zwischen diesen Objekten im Rahmen der weiteren Extraktion schwierig sein. Um ein aus hellen und dunklen Straßen bestehendes Straßennetz möglichst ohne Fehlextraktionen extrahieren zu können, müßte das Straßenmodell idealerweise dahingehend erweitert werden, daß es neben den Straßen auch die übrigen linearen Objekte und ihre Relationen zueinander umfaßt.

- **Kontext**

Lokaler Kontext wird im verwendeten Straßenmodell nicht berücksichtigt. Es wird lediglich davon ausgegangen, daß sich die Straßen als Linien abbilden, die heller oder dunkler als ihre Umgebung sind. Wird die Straße z.B. von Häusern oder Bäumen verdeckt und ist deshalb nicht als Linie in den Bildern extrahierbar, so kann diese Lücke nur durch eine Verknüpfung geschlossen werden. Erste Ansätze zur Nutzung von lokalem Kontext sind in (STRAUB und WIEDEMANN 2000) beschrieben. Hier werden unter Ausnutzung der Multispektralinformation Baumreihen extrahiert und mit den übrigen Linien fusioniert. Dies führt zu einem vollständigerem Extraktionsergebnis, da somit auch Straßen extrahiert werden können, die durch Baumreihen, z.B. eine Allee, verdeckt sind. Globaler Kontext wird bisher nur insofern genutzt, daß die

Extraktion auf offenes Gelände beschränkt ist. Ein Ansatzpunkt für die Nutzung von Kontext im Rahmen der Vervollständigung wäre, die Landnutzung oder auch ein Geländemodell in die Berechnung der optimalen Entfernung von Verbindungshypothesen einzubeziehen.

- **Interne Bewertung**

Eine wesentliche Anforderung an automatische Bildanalyseverfahren ist, Aussagen über die Qualität der Extraktionsergebnisse zu treffen (siehe Kapitel 2.6). Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahren liefern keine internen Bewertungsmaße. Erste erfolgversprechende Untersuchungen für eine interne Bewertung zeigen aber, daß das Verfahren prinzipiell die Möglichkeit bietet, solche Maße, z.B. aus der Anzahl und Länge von Verknüpfungen pro Straße oder der Bewertung der einzelnen Linien und Verknüpfungen, abzuleiten (WIEDEMANN und HINZ 1999).

- **Externe Bewertung**

In Kapitel 6.6 wurde eine Schwäche der Qualitätsmaße zur Bewertung des Netzwerks angesprochen, die darin liegt, daß Extraktionsfehler, die nur von lokaler Bedeutung sind, durch die Qualitätsmaße nicht ausreichend wiedergegeben werden können. Dies ist allerdings eine Folge der Bestrebung, die Bewertung durch jeweils für das gesamte Netzwerk gültige Qualitätsmaße durchzuführen, was der Vorgehensweise bei der Bewertung der Straßen entspricht. Hier wurde die Anschaulichkeit der Qualitätsmaße jedoch durch eine Visualisierung der korrekten, der fehlenden und der fehlerhaft extrahierten Straßenstücke verbessert, was die Lokalisierung auch kleiner Fehler in der Extraktion ermöglicht. Eine entsprechende Lokalisierung und Visualisierung netzwerkrelevanter Fehler der Extraktion würde die oben genannte Schwäche der Bewertung des Netzwerks weitgehend beseitigen. Darüberhinaus wäre es für eine detaillierte Beurteilung der Extraktionsergebnisse hilfreich, alle Qualitätsmaße auch für kleinere, lokale Einheiten des Straßennetzes zu bestimmen und anzugeben.

Bezüglich der in Kapitel 2 formulierten Aufgabenstellung läßt sich feststellen, daß die Extraktion von Straßennetzen von der Nutzung der Verbindungsfunktion der Straßen und ihrer Netzwerkeigenschaften deutlich profitiert. Dies zeigt sich zwar nicht so stark an der Länge der gefundenen Straßen, um so deutlich aber an den Netzwerkeigenschaften der Extraktionsergebnisse.

7.3 Ausblick

Derzeit sind automatische Verfahren zur Extraktion von Straßen aus Luft- bzw. Satellitenbilddaten noch nicht in der Praxis einsetzbar. Das Wissen über automatische Verfahren zur Extraktion von Straßen hat aber mittlerweile einen Stand erreicht, der die Möglichkeit eröffnet, mit halbautomatischen Verfahren die Erfassung der Straßen stark zu unterstützen. Die in dieser Arbeit entwickelten Verfahren könnten z.B. folgendermaßen für ein halbautomatisches System genutzt werden: Die vorläufige Extraktion kann so modifiziert werden, daß die Startpunkte interaktiv für einigermaßen geradlinige Straßenabschnitte vorgegeben werden. Die durch die beiden Startpunkte genähert definierte Richtung der Straße kann dann zusätzlich in die Bewertung der Linien und Verknüpfungshypothesen einfließen. Durch die Bestimmung des kürzesten Pfades der die interaktiv gegebenen Startpunkte verbindet, wird ein Straßenabschnitt extrahiert. Der Operateur muß die Straße also nur noch grob digitalisieren, die Feinmessung wird automatisch durchgeführt. Die Vervollständigung der Straßennetze kann für eine topologische Kontrolle der von einem Operateur erfaßten Straßennetze eingesetzt werden, durch die z.B. fehlende Anschlüsse bei der Erfassung von Kreuzungen aufgedeckt werden können. Allgemein läßt sich erwarten, daß durch eine Anpassung von Verfahren die für die automatische Extraktion von Straßen entwickelt wurden und eine konsequente Nutzung der Information, die durch den Operateur bereitgestellt wird, eine deutliche Zeiteinsparung bei der Erfassung erzielt werden kann.

Bisher wurden die Netzwerkeigenschaften von Straßen im allgemeinen nur sehr eingeschränkt für die automatische Extraktion von Straßennetzen genutzt. Insbesondere für Verfahren, die Straßen aus

hoch aufgelösten Bildern extrahieren ist dies auf folgende Gründe zurückzuführen: (1) Die Netzwerkeigenschaften werden erst bei der Behandlung großer Gebiete offensichtlich. Solche Gebiete können aber mit Verfahren, die hochaufgelöste Bilddaten verwenden aufgrund der großen Datenmengen noch nicht standardmäßig bearbeitet werden. (2) Die lokale Evidenz für Straßen ist in Bildern mit hoher Auflösung auffälliger als die Netzwerkeigenschaften. Dies führt dazu, daß zuerst versucht wurde, die lokale Evidenz möglichst gut auszunutzen. Die vorliegende Arbeit hat aber gezeigt, daß die Extraktion von Straßennetzen von der Nutzung der Netzwerkeigenschaften profitiert. Wünschenswert ist daher eine Kombination von lokaler Evidenz aus hoch aufgelösten Bildern und globaler Evidenz aus der Netzwerkeigenschaft. Erste Versuche hierzu sind in (BAUMGARTNER et al. 1999a) dargestellt. Die lokale Information aus dem hochaufgelösten Bild wird hierbei als Linienextraktion mit sehr hoher Zuverlässigkeit interpretiert und kann daher im Rahmen der Fusion als zusätzlicher Kanal mit einem sehr hohen Gewicht in den Datensatz eingefügt werden. Diese Vorgehensweise verringert das Problem der Extraktion von Startstücken, da die lokale Extraktion aus dem hochaufgelösten Bild sehr zuverlässig ist und daher diese Straßenstücke als Startstücke verwendet werden können. Darüberhinaus werden die Ergebnisse stabiler in Bezug auf die Parameter. Das Problem der Verarbeitung großer Datenmengen wird sich durch die zukünftigen Entwicklungen auf dem Computermarkt verringern. Die bisher realisierte Kombination der beiden Verfahren stellt aber erst einen ersten, relativ einfachen Schritt dar. Interessant ist vor allem die Entwicklung und Untersuchung eines integrierten Ansatzes, der die Vorteile beider Verfahren optimal vereinigt.

Verfolgt man diesen Gedanken weiter und zieht in Betracht, daß die beiden Verfahren jeweils nur in einem relativ engen Auflösungsbereich optimal arbeiten (hohe Auflösung: 0.2 m – 0.5 m, niedrige Auflösung: 1 m – 4 m Bodenpixelgröße), so zeichnet sich als höchst interessantes Forschungsthema die Untersuchung der Abhängigkeiten zwischen Maßstab, Modell und Extraktionsstrategie ab. Im Rahmen dieser Untersuchungen könnte dann gegebenenfalls auch die bisher bestehende „Lücke“ im Bereich einer Bodenpixelgröße von 0.5 m – 1 m geschlossen werden, die für die Auswertung der hochauflösenden Satellitenbilddaten, z.B. (IKONOS 1 2001, EROS A1 2001), von großem Interesse ist. Damit wäre dann die Extraktion von Straßen aus Bilddaten praktisch beliebiger Auflösung möglich¹.

Kreuzungen sind ein elementarer Bestandteil des Straßennetzes. Sie nehmen zwar nur einen geringen Teil der Länge der Straßen ein, sind aber für die Verbindung der Straßen untereinander, also für die Topologie des Straßennetzes, extrem wichtig. In dieser Arbeit wurden nur relativ einfache Kreuzungen und diese nur in einer niedrigen Auflösung modelliert. Es wäre daher wichtig, eine detaillierte Modellierung von Kreuzungen in höherer Auflösung sowie die Modellierung von komplexeren Kreuzungen (z.B. Autobahnkreuz) durchzuführen.

Durch die Nutzung bereits vorhandener Daten kann die Extraktion deutlich unterstützt werden. Bisher wurde allerdings noch nicht im Detail untersucht, wie sich fehlerhafte Daten auf die Extraktionsergebnisse auswirken. Das heißt, die Abhängigkeit zwischen den eingeführten und den extrahierten Daten ist noch nicht ausreichend untersucht. Arbeiten hierzu sind insbesondere wichtig, da in vermehrtem Maße das Problem der Aktualisierung von GIS-Daten ansteht.

¹Der Bereich mit einer Bodenpixelgröße von weniger als 0.2m wird bereits bearbeitet (HINZ und BAUMGARTNER 2000) und der Bereich mit Auflösungen schlechter als ca. 4 m ist für die Extraktion von Straßen im allgemeinen nicht mehr von Interesse.

A. Extraktion linearer Strukturen aus digitalen Bilddaten

In diesem Kapitel wird das verwendete Verfahren zur Extraktion linearer Strukturen aus digitalen Bilddaten (STEGER 1998a) kurz beschrieben.

Lineare Strukturen (Linien) werden als Kurven modelliert, die entlang ihres gesamten Verlaufes senkrecht zur Linienrichtung ein charakteristisches Grauwertprofil aufweisen. Die hier betrachteten Linien zeichnen sich dadurch aus, daß sie entweder heller oder dunkler als ihre Umgebung sind, weshalb das Grauwertprofil jeweils in dem Punkt, in dem es die Linie schneidet, ein Maximum bzw. ein Minimum aufweist. Bei deutlichen Linien besitzt das Grauwertprofile in diesem Schnittpunkt überdies eine starke Krümmung. Um diese Kriterien bestimmen zu können, müssen einerseits die Richtung der Linie und andererseits die erste und zweite Ableitung senkrecht zur Linienrichtung lokal für jeden Bildpunkt berechnet werden.

Hierzu werden die partiellen Ableitungen r_x, r_y, r_{xx}, r_{xy} und r_{yy} der Bildfunktion durch Faltung der Bildfunktion mit den entsprechenden Ableitungen der Filtermaske für die Gauß'sche Glättung bestimmt. Für jeden Bildpunkt werden aus den zugehörigen Werten r_{xx}, r_{xy} und r_{yy} die beiden Hauptkrümmungen der Bildfunktion berechnet. Die Richtung in der die betragsmäßig maximale Krümmung auftritt definiert die Richtung des Grauwertprofils.

Das Grauwertprofil, das auf diese Weise in jedem Bildpunkt definiert ist, wird dann mittels Approximation einer Parabel daraufhin analysiert, ob es innerhalb der Grenzen des betrachteten Bildpunktes ein Maximum bzw. ein Minimum aufweist. Ist dies der Fall, so wird der entsprechende Bildpunkt der Menge potentieller Linienpunkte hinzugefügt, für die jeweils u.a. die subpixelgenaue Position des Extremums (Linienposition) sowie die dortige Krümmung κ des Grauwertprofils und dessen Richtung t bekannt sind. Da die Linienrichtung senkrecht auf der Richtung des Grauwertprofils steht, ist auch diese für jeden potentiellen Linienpunkt bekannt.

Im nächsten Schritt werden die bisher unabhängig voneinander bestimmten Linienpunkte zu Pixelketten verbunden. Startpunkte hierfür sind potentiellen Linienpunkte, deren Krümmung κ betragsmäßig über einem oberen Schwellwert liegt. Ausgehend von dem Startpunkt mit der stärksten Krümmung wird eine Pixelkette durch das Hinzufügen benachbarter, richtungsmäßig kompatibler potentieller Linienpunkte gebildet. Da der gewählte Startpunkt normalerweise kein Endpunkt einer Pixelkette ist, erfolgt die Suche nach benachbarten Linienpunkten in beide Richtungen und zwar jeweils so lange, bis kein benachbarter potentieller Linienpunkt mehr existiert, dessen Krümmung κ über einem unteren Schwellwert liegt. Alle Punkte, die einer Pixelkette hinzugefügt wurden, werden aus der Menge der potentiellen Linienpunkte sowie der Menge der Startpunkte entfernt. Ist kein Startpunkt mehr vorhanden, ist die Linienextraktion beendet.

Die extrahierten Linien liegen dann in Form von subpixelgenauen Pixelketten vor, die topologisch korrekt miteinander verbunden sind.

Das Extraktionsverfahren umfaßt noch mehrere Schritte, die zur Verbesserung der Qualität der extrahierten Linien beitragen. Dies sind u.a. die Extraktion fehlender Kreuzungspunkte sowie die Korrektur der Linienposition, die aufgrund unterschiedlicher Helligkeiten auf beiden Seiten der Linien verschoben sein kann. Auf diese Schritte wird hier nicht näher eingegangen. Detailliert werden sämtliche Schritte in (STEGER 1998b) beschrieben.

B. Fuzzy-Logik

Die Fuzzy-Logik bildet einen Rahmen zur Repräsentation von Wissen, das mit Unsicherheiten behaftet oder durch vage Aussagen beschrieben ist. Dies trifft in vielen Fällen auf die natürlichsprachliche Repräsentation von Wissen zu. Als Beispiele seien folgende Aussagen angeführt:

Peter ist *groß*
das Fußballstadion ist *groß*
das Konzert besuchten *viele* Zuhörer
die Tageshöchsttemperatur betrug *etwa* 30 Grad
Straßen erscheinen in Satellitenbilddaten als *lange* Liniestücke

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Fuzzy-Logik dazu verwendet, den „Grad an Wahrheit“ einer Aussage zu ermitteln. Die Wahrheit wird in der Fuzzy-Logik als Übereinstimmung zwischen einer Aussage und dem aktuellen Wissensstand (Information) bezüglich des Sachverhalts interpretiert, auf den sich die Aussage bezieht (DUBOIS und PRADE 1990). Als Wissensbasis dienen auf der einen Seite das Straßenmodell, das lediglich durch vage Aussagen wie *Straßen erscheinen in Satellitenbilddaten als lange Liniestücke* beschrieben ist, und auf der anderen Seite die Extraktionsergebnisse, die durch exakt festgelegte numerische Werte beschrieben sind (*das Liniestück ist 80 m lang*).

Zu testen ist nun der Wahrheitsgehalt der Aussage *Das 80 m lange Liniestück ist lang* (... und paßt daher zum Straßenmodell). Dabei stellt das Fuzzy-Prädikat *lang* eine sogenannte elastische Bedingung an die Größe des Liniestücks. Die Bezeichnung „elastisch“ rührt daher, daß eine genaue Festlegung, welche Länge ein Straßenstück besitzen muß, um die Bedingung „lang“ zu erfüllen, nicht eindeutig möglich ist. Allerdings ist es möglich, Intervallbereiche anzugeben, innerhalb derer die Bedingung erfüllt ist. In diesem Fall trifft z.B. die Bedingung nicht mehr zu, wenn ein Liniestück 0 m lang ist. Auf jeden Fall trifft sie zu, wenn das Liniestück 100 m lang ist. Die untere und obere Schranke (**support** und **core**) kann in vielen Fällen — wie hier — intuitiv¹ festgelegt werden. Zwischen den Schranken muß ein plausibler funktionaler Zusammenhang angesetzt werden, die sogenannten **Membership-Funktion** (siehe Abb. B.1, hier: linear). Um verschiedene Aussagen miteinander vergleichen zu können, wird dabei in der Regel eine Transformation in den Intervallbereich $[0, 1]$ vorgenommen. Das Ergebnis dieser Transformation wird als **Fuzzy-Wert** oder **test score** τ (ZADEH 1989) bezeichnet.

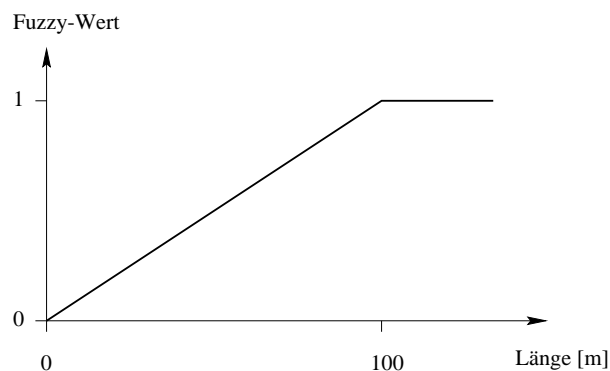


Abbildung B.1. Beispiel einer Membership-Funktion für das Fuzzy-Prädikat *lang*.

¹Es gibt auch Ansätze, die Gültigkeitsbereiche solcher Aussagen durch konkrete Tests, Fragebögen usw. zu definieren (Psychometrie).

Die 80 m lange Linie erhält in diesem Beispiel einen Fuzzy-Wert von 0.8. Der Wahrheitsgehalt obiger Aussage beträgt also 0.8. Bei einem „ruhigen“ Funktionsverlauf ist die exakte Festlegung der beiden Schranken support und core nicht entscheidend, da sich kleine Ungenauigkeiten in der Membership-Funktion nicht erheblich auf das Ergebnis auswirken (DUBOIS und PRADE 1990).

Werden in einer Aussage mehrere Bedingungen an ein Objekt geknüpft, müssen die Fuzzy-Werte der einzelnen Bedingungen kombiniert werden. Zum Beispiel erscheinen Straßen in Satellitenbildern als *lange* Linien mit *geringer* Krümmung. Zur Modifikation und Aggregation verschiedener Bedingungen (C) wurden Regeln definiert, von denen im folgenden einige dargestellt sind:

- Modifikation: (1) Negation: $\text{nicht } C = 1 - \tau$
- (2) Konzentration: $\text{sehr } C = \tau^2$
- (3) Diffusion: $\text{mehr oder weniger } C = \sqrt{\tau}$
- Aggregation: (1) Konjunktion: $C_1 \text{ und } C_2 = \tau_1 \wedge \tau_2$, mit $\wedge = \min$
- (2) Disjunktion: $C_1 \text{ oder } C_2 = \tau_1 \vee \tau_2$, mit $\vee = \max$

C. Graphentheorie

Im folgenden werden Grundbegriffe der Graphentheorie dargelegt sowie einige in der vorliegenden Arbeit angesprochene graphentheoretische Verfahren erläutert. Die Notation ist an die in (CLARK und HOLTON 1994) verwendete Notation angelehnt.

C.1 Die Definition eines Graphen

Ein Graph ist folgendermaßen definiert:

Ein **Graph** $G = (V(G), E(G))$ besteht aus zwei endlichen Mengen:

$V(G)$, der **Knotenmenge** des Graphen, oft nur mit V bezeichnet, die eine nichtleere Menge von Elementen ist, die **Knoten** genannt werden, und

$E(G)$, der **Kantenmenge** des Graphen, häufig nur mit E bezeichnet, die eine möglicherweise leere Menge von Elementen ist, die **Kanten** genannt werden,

wobei jede Kante e in G einem ungeordneten Paar von Knoten (u, v) zugeordnet ist, die als **Endknoten** von e bezeichnet werden. Dabei darf eine Kante identische Endknoten haben, d.h., es ist möglich, einen Knoten u mit sich selbst durch eine Kante zu verbinden — eine derartige Kante wird **Schlinge** genannt.

C.2 Weitere Definitionen

Wenn e eine Kante mit den Endknoten u und v ist, sagt man, daß e u und v verbindet. u und v werden dann als **adjazent** oder **benachbart** bezeichnet.

Eine Kante e eines Graphen G heißt mit einem Knoten v **inzident**, wenn v ein Endknoten von e ist. In diesem Fall sagt man auch, daß v mit e **inzident** ist. Zwei Kanten e und f , die mit einem gemeinsamen Knoten v inzidieren, heißen **adjazent**.

Es sei v ein Knoten des Graphen G . Der **Knotengrad** $d(v)$ von v entspricht der Anzahl der mit v inzidenten Kanten von G , wobei jede Schlinge zweimal gezählt wird, d.h., der Knotengrad von v gibt an, wie oft v ein Endknoten einer Kante ist.

Ein **gewichteter Graph** ist ein Graph G , in dem jeder Kante e eine reelle Zahl $w(e)$ zugeordnet wird, die als **Bewertung**, **Länge** oder **Kosten** von e bezeichnet wird. Die **Bewertung** $w(G)$ von G ist die Summe der Bewertungen $w(e_1) + \dots + w(e_k)$, wobei e_1, \dots, e_k die Menge der Kanten von G ist.

Es sei H ein Graph mit der Knotenmenge $V(H)$ und der Kantenmenge $E(H)$, und gleichermaßen sei G ein Graph mit der Knotenmenge $V(G)$ und der Kantenmenge $E(G)$. Dann wird H als **Untergraph** von G bezeichnet, wenn $V(H) \subseteq V(G)$ und $E(H) \subseteq E(G)$ gilt. Als **spannender Untergraph** wird H bezeichnet, wenn $V(H) = V(G)$ gilt, d.h., wenn H und G genau dieselbe Knotenmenge haben.

C.3 Zusammenhang und Zyklen

Eine **Kantenfolge** in einem Graphen ist eine endliche Folge $P = v_0 e_1 v_1 e_2 v_2 \dots v_{k-1} e_k v_k$, deren Terme abwechselnd Knoten und Kanten sind, so daß, für $1 \leq i \leq k$, die Kante e_i die Enden v_{i-1} und

v_i hat. Somit befindet sich jede Kante e_i unmittelbar zwischen zwei Knoten, mit denen sie inzident ist. Die obige Kantenfolge P wird $v_0 - v_k$ -**Kantenfolge** oder eine **Kantenfolge von v_0 nach v_k** genannt. Die Knoten v_1, \dots, v_{k-1} der obigen Kantenfolge P werden als **innere Knoten** bezeichnet.

Eine **triviale Kantenfolge** beinhaltet keine Kanten.

Sind zwei Knoten u und v eines Graphen G gegeben, so heißt eine $u-v$ -Kantenfolge **geschlossen**, wenn $u = v$, oder **offen**, wenn $u \neq v$ ist.

Wenn die Kanten e_1, e_2, \dots, e_k der Kantenfolge $P = v_0 e_1 v_1 e_2 v_2 \dots v_{k-1} e_k v_k$ unterschiedlich sind, dann heißt P ein **Kantenzug**. Mit anderen Worten ist ein Kantenzug eine Kantenfolge, in der jede Kante nur einmal vorkommt.

Wenn die Knoten v_0, v_1, \dots, v_k der Kantenfolge $P = v_0 e_1 v_1 e_2 v_2 \dots v_{k-1} e_k v_k$ unterschiedlich sind, dann heißt P ein **Pfad**. Mit anderen Worten ist ein Pfad eine Kantenfolge, die jeden Knoten nur einmal enthält.

Ein Knoten u wird als **zusammenhängend** mit einem Knoten v in einem Graphen G bezeichnet, wenn es einen Pfad von u nach v gibt.

Ein Graph G heißt **zusammenhängend**, wenn je zwei seiner Knoten zusammenhängend sind. Ein Graph, der nicht zusammenhängend ist, heißt **nichtzusammenhängend**.

Für jeden Knoten u eines Graphen G bezeichnet $C(u)$ die Menge aller Knoten in G , die mit u zusammenhängend sind. Dann heißt der durch $C(u)$ induzierte Untergraph die **zusammenhängende u enthaltende Komponente** oder die **u enthaltende Zusammenhangskomponente** von G .

Ein nichttrivialer geschlossener Kantenzug in einem Graphen G heißt ein **Zyklus**, wenn sein Anfangsknoten und seine inneren Knoten unterschiedlich sind. Genauer gesagt ist der geschlossene Kantenzug $C = v_1 v_2 \dots v_n v_1$ dann ein Zyklus, wenn

- a) C mindestens eine Kante und
- b) v_1, v_2, \dots, v_n unterschiedliche Knoten hat.

Ein Graph G heißt **azyklisch**, wenn er keine Zyklen beinhaltet.

Ein Graph G heißt **Baum**, wenn er ein zusammenhängender azyklischer Graph ist.

Ein **spannender Baum** (oder Gerüst) eines Graphen G ist ein spannender Untergraph von G , der ein Baum ist. In der Regel existieren für einen Graphen unterschiedliche spannende Bäume. Derjenige spannende Baum von G mit der minimalen Bewertung aller möglichen spannenden Bäume von G wird als **minimaler spannender Baum** oder als **optimaler Baum** von G bezeichnet.

C.4 Darstellung einiger Algorithmen

C.4.1 Traversierungsverfahren

Verfahren, die systematisch jeden Knoten des Graphen besuchen, werden Traversierungsverfahren genannt. Zwei bekannte Traversierungsverfahren sind die Breitensuche und die Tiefensuche. Bei beiden Algorithmen kann man sich die Knoten des Graphen in drei Klassen eingeteilt vorstellen: *Baumknoten* (oder *besuchte* Knoten), welche aus der Datenstruktur entnommen worden sind; *Randknoten*, die zu Baumknoten adjazent, jedoch noch nicht besucht worden sind; sowie *unsichtbare* Knoten, die überhaupt noch nicht angetroffen worden sind.

Die Verfahren starten damit, daß ein Knoten besucht wird. Die zu ihm adjazenten Knoten werden dadurch zu Randknoten. Aus diesen Randknoten wird ein Knoten nach einem bestimmten Schema ausgewählt und besucht. Gegebenenfalls werden dadurch weitere unsichtbare Knoten zu Randknoten. Dieses Besuchen eines weiteren Knotens wird solange fortgesetzt, bis es keine Randknoten mehr gibt. Auf diese Weise werden alle Knoten *einer* Zusammenhangskomponente besucht. Der Graph

besteht dann nur noch aus Baumknoten und gegebenenfalls aus unsichtbaren Knoten in bisher noch nicht besuchten Zusammenhangskomponenten. Existieren noch unsichtbare Knoten, so wird einer davon besucht und das Verfahren wird wie oben beschrieben fortgeführt. Wenn nur noch Baumknoten existieren, bedeutet dies, daß alle Knoten im Zuge des Traversierungsverfahrens besucht wurden und das Verfahren beendet ist.

Die Traversierungsverfahren unterscheiden sich darin, wie entschieden wird, welcher Randknoten als nächster besucht wird. Bei der Tiefensuche wird der Randknoten besucht, der als letzter angetroffen, d.h., als letzter von einem unsichtbaren Knoten zu einem Randknoten gewandelt wurde. Bei der Breitensuche wird der Randknoten besucht, dessen Antreffen am weitesten zurückliegt.

C.4.2 Bestimmung der Zusammenhangskomponenten

Für das Auffinden der Zusammenhangskomponenten eines Graphen kann jedes Traversierungsverfahren benutzt werden, da sie alle auf der gleichen allgemeinen Strategie beruhen, alle Knoten in einer Zusammenhangskomponente zu besuchen und sich dann zur nächsten zu begeben. Sollen z.B. die Knoten eines Graphen so gekennzeichnet werden, daß alle Knoten *einer* Zusammenhangskomponente die selbe Markierung erhalten, Knoten unterschiedlicher Zusammenhangskomponenten aber unterschiedlich gekennzeichnet sind, so läßt sich dies durch folgende Erweiterung eines Traversierungsverfahrens erreichen:

Ein Zähler für die Anzahl der Zusammenhangskomponenten des Graphen wird auf einen Startwert gestellt. Alle besuchten Knoten werden mit dem Wert dieses Zählers gekennzeichnet. Jedesmal, wenn im Rahmen des Traversierungsverfahrens keine Randknoten mehr existieren, also eine Zusammenhangskomponente komplett besucht wurde, wird der Zähler um den Wert eins erhöht.

C.4.3 Bestimmung des kürzesten Pfades in einem gewichteten Graphen

Zur Bestimmung des kürzesten Pfades in einem gewichteten Graphen können unterschiedliche Algorithmen verwendet werden. Zuerst wird hier der Algorithmus von Dijkstra vorgestellt, mit dem der kürzeste Pfad zwischen zwei Knoten bestimmt werden kann. Danach wird kurz auf den A* Algorithmus eingegangen, der Zusatzwissen verwendet, um die Suche nach dem kürzesten Pfad zu beschleunigen. Schließlich wird noch der F* Algorithmus erläutert, der sich unter bestimmten Umständen für eine effiziente Extraktion von Linien in Bilddaten einsetzen läßt.

Ist ein Pfad P von einem Knoten s zu einem Knoten t in einem gewichteten Graphen gegeben, sei die Länge von P als die Summe der Bewertungen seiner Kanten definiert. Das Problem besteht nun darin, den kürzesten Pfad von s nach t zu finden, d.h., den Pfad, für den die Summe der Bewertungen seiner Kanten minimal ist.

C.4.3.1 Algorithmus von Dijkstra

Der **Algorithmus von Dijkstra** beginnt damit, daß alle Knoten mit einer Markierung λ gekennzeichnet werden. Die Markierung $\lambda(s)$ des Startknotens s wird auf $\lambda(s) = 0$ gesetzt, für alle anderen Knoten n mit $n \neq s$ ist $\lambda(n)$ noch nicht bekannt und wird auf ∞ gesetzt, was im folgenden so interpretiert wird, als wäre n noch nicht gekennzeichnet. Danach kennzeichnet man alle zu s adjazenten Knoten v mit $\lambda(v)$, wobei $\lambda(v)$ die Bewertung der Kante von s nach v ist. Es sei u der Knoten unter diesen v , für den $\lambda(u)$ ein Minimum ist. Nun ermittelt man die zu u adjazenten Knoten y und kennzeichnet die, die bisher noch nicht gekennzeichnet wurden, mit $\lambda(y) = \lambda(u) + w(e)$, wobei $w(e)$ die Bewertung der Kante von u nach y ist. Für bereits mit $\lambda(y)$ gekennzeichnete Knoten y wechselt die Markierung nur dann in $\lambda(u) + w(e)$, wenn diese kleiner als die bisherige Markierung ist. Nun muß man den Knoten z unter allen gekennzeichneten Knoten, deren Markierung bisher noch

nicht minimal war, finden, für den $\lambda(z)$ ein Minimum ist, usw. Ist der Knoten mit minimalem λ der Zielknoten t , so ist $\lambda(t)$ die Länge des kürzesten Pfades von s nach t und der Algorithmus ist beendet.

Um den gefundenen kürzesten Pfad von s nach t rekonstruieren zu können, ist es notwendig, daß bei jedem Knoten v ein Zeiger $\text{vorgänger}(v)$ auf denjenigen Knoten u gesetzt wird, der als letzter zu einer Änderung der Markierung $\lambda(v)$ geführt hat. Verfolgt man diese Zeiger von t bis s zurück, erhält man direkt den kürzesten Pfad von s nach t (in umgekehrter Reihenfolge).

Der Algorithmus von Dijkstra läßt sich in den folgenden fünf Schritten darstellen:

- Schritt 1:** Man setzt $\lambda(s) = 0$ und für all Knoten $v \neq s$, $\lambda(v) = \infty$. Man setze $T = V(G)$ für die Knotenmenge von G .
- Schritt 2:** u sei ein Knoten in T , für den $\lambda(u)$ ein Minimum ist.
- Schritt 3:** Wenn $u = t$ ist, ist der Algorithmus beendet und der kürzeste Pfad kann über die Zeiger vorgänger zurückverfolgt werden.
- Schritt 4:** Für jede mit u inzidente Kante $e = uv$, für die gilt, daß $v \in T$ und $\lambda(v) > \lambda(u) + w(e)$ ist, verändere man den Wert von $\lambda(v)$ in $\lambda(u) + w(e)$ und setze den Zeiger $\text{vorgänger}(v) = u$.
- Schritt 5:** Man verändere T in $T - u$ und gehe zu Schritt 2.

C.4.3.2 A* Algorithmus

Der **A* Algorithmus** unterscheidet sich vom Algorithmus von Dijkstra dadurch, daß dessen zweiter Schritt folgendermaßen erweitert wird:

- Schritt 2 (A*):** u sei ein Knoten in T , für den $\lambda(u) + h(u)$ ein Minimum ist.

$h(u)$ ist die geschätzte Länge des kürzesten Pfades von u zum Zielknoten t . Das Maß $\lambda(u) + h(u)$ setzt sich zusammen aus der gemessenen (maximalen) Länge $\lambda(u)$ des Pfades von s nach u und aus der geschätzten Länge $h(u)$ des Pfades von u nach t . Es stellt also eine Abschätzung der Länge des über u führenden Pfades von s nach t dar. Es läßt sich zeigen, daß der A* Algorithmus immer den kürzesten Pfad von s nach t findet, wenn $h(u) \leq h^*(u)$ für alle u gilt, wobei $h^*(u)$ die tatsächliche Länge des kürzesten Pfades von u zum Zielknoten t ist.

C.4.3.3 F* Algorithmus

Soll der kürzeste Pfad durch ein regelmäßiges Raster, z.B. ein digitales Bild, gefunden werden, in dem für jeden Rasterpunkt (Pixel) eine Bewertung vorliegt, so ist der **F* Algorithmus** unter gewissen Umständen sehr effizient. Dabei wird davon ausgegangen, daß die Rasterpunkte den Knoten eines Graphen entsprechen und die Kanten des Graphen benachbarte Rasterpunkte miteinander verbinden (basierend auf der 8er-Nachbarschaft). Abweichend von den oben vorgestellten Verfahren ist hier die Bewertung den Knoten und nicht den Kanten zugeordnet. Die Aufgabe lautet wieder, den kürzesten Pfad von einem Startknoten s zu einem Zielknoten t zu finden, wobei hier die Länge eines Pfades als Summe der Bewertungen seiner Knoten definiert ist.

Das Raster, das die Bewertung enthält wird im folgenden als *Bewertungsmatrix* B bezeichnet. Ein mit der Bewertungsmatrix deckungsgleiches Raster, das nach Beendigung des Algorithmus die Länge (Kosten) des kürzesten Pfades von s bis zu jedem Knoten des kürzesten Pfades von s nach t enthält, wird als *Pfadmatrix* P bezeichnet.

Zuerst wird die Pfadmatrix initialisiert, d.h., alle Rasterpunkte werden auf ∞ gesetzt, außer dem s entsprechenden Rasterpunkt, der die Bewertung von s erhält. Dann beginnt die iterative Bestimmung des kürzesten Pfades. Hierbei wird jede Zeile der Pfadmatrix zweimal pro Iteration bearbeitet. Zuerst werden alle Rasterpunkt der i ten Zeile von links nach rechts gemäß folgender Vorschrift angepaßt:

$$P(i, j) = \min [P(i-1, j-1) + B(i, j); \\ P(i-1, j) + B(i, j); \\ P(i-1, j+1) + B(i, j); \\ P(i, j-1) + B(i, j); \\ P(i, j)].$$

Danach werden alle Rasterpunkte der i ten Zeile von P von rechts nach links nach folgender Vorschrift behandelt:

$$P(i, j) = \min [P(i, j+1) + B(i, j); P(i, j)].$$

Alle weiteren Iterationen werden, soweit notwendig, abwechselnd von unten nach oben (mit invertiertem Zeilenindex, so daß $i = 1$ die unterste Zeile bedeutet) und wieder von oben nach unten (mit normalem Zeilenindex) durchgeführt.

Es läßt sich zeigen, daß nur eine Iteration notwendig ist, wenn die Zeilenindizes entlang des kürzesten Pfades von s nach t monoton ansteigen. Im Allgemeinen ist pro „Richtungswechsel“ des kürzesten Pfades (in Bezug auf die Zeilenindizes) eine weitere Iteration notwendig. Normalerweise läßt sich die Anzahl der notwendigen Iterationen nicht vorhersagen. Es kann aber folgendes Abbruchkriterium verwendet werden: Wenn sich bei einer Iteration kein Element von P ändert, ist der Algorithmus beendet. Der kürzeste Pfad kann jetzt durch eine Zurückverfolgung ermittelt werden, wofür man bei t startet und jeweils zu dem benachbarten Rasterpunkt von P geht, der die geringsten Kosten aufweist.

Der F^* Algorithmus bietet sich somit für die Bestimmung des kürzesten Pfades in Rasterdaten an, wenn davon ausgegangen werden kann, daß der Pfad relativ geradlinig verläuft. Vor dem Start des Algorithmus sollte der Ausschnitt, der den kürzesten Pfad enthalten wird, so gedreht werden, daß der Pfad näherungsweise senkrecht von oben nach unten verläuft, da sich dann kleinere Richtungsänderungen des kürzesten Pfades nicht auf die Anzahl der Richtungswechsel in Bezug auf die Zeilenindizes auswirken und somit die Anzahl der notwendigen Iterationen gering gehalten werden kann.

Literaturverzeichnis

- International Workshop on "3D Geospatial Data Production: Meeting Application Requirements"* (1999): Paris, France.
- AGOURIS, P. und STEFANIDIS, A. (Herausgeber) (1999): *ISD'99*, Nummer 1737 in *Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Verlag.
- AIRAULT, S., JAMET, O. und LEYMARIE, F. (1996): From manual to automatic stereoplotting: Evaluation of different road network capture processes, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band XXXI, part 3, 14–18.
- ALBERTZ, J. (1991): *Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern*, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, Germany: p. 141.
- AMIR, A. und LINDENBAUM, M. (1998): A generic grouping algorithm and its quantitative analysis, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 20(2): 168–185.
- AVIAD, Z. und CARNINE, P. (1992): Road finding for road-network extraction, *Computer Vision and Pattern Recognition*, 814–819.
- BAJCSY, R. und TAVAKOLI, M. (1976): Computer recognition of roads from satellite pictures, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 6(9): 623–637.
- BARZO HAR, M. und COOPER, D. (1995): New geometric stochastic technology for finding and recognizing roads and their features in aerial images, in GRUEN et al. (1995), 255–264.
- BARZO HAR, M. und COOPER, D. (1996): Automatic finding of main roads in aerial images by using geometric-stochastic models and estimation, *PAMI* 18(7): 707–721.
- BARZO HAR, M. und COOPER, D. (1997): Fast robust tracking of curvy partially occluded roads in clutter in aerial images, in GRUEN et al. (1997), 277–286.
- BAUMGARTNER, A. und HINZ, S. (2000): Multi-scale road extraction using local and global grouping criteria., *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band XXXIII, part B3/1, 58–65.
- BAUMGARTNER, A., ECKSTEIN, W., HEIPKE, C., HINZ, S., MAYER, H., RADIG, B., STEGER, C. und WIEDEMANN, C. (1999a): T-REX: TUM-Research on road extraction, *Festschrift für Prof. Dr.-Ing. Heinrich Ebner zum 60. Geburtstag*, 43–64.
- BAUMGARTNER, A., STEGER, C., MAYER, H., ECKSTEIN, W. und EBNER, H. (1999b): Automatic Road Extraction Based on Multi-Scale, Grouping, and Context, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 65(7): 777–785.
- BAUMGARTNER, A., STEGER, C., MAYER, H. und ECKSTEIN, W. (1997): Multi-resolution, semantic objects, and context for road extraction, *Workshop on Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps*, Birkhäuser Verlag, Basel, Switzerland, 140–156.
- BDCARTO (2001): Base de données cartographiques, <http://www.ign.fr/fr/MP/BDGeo/BDCARTO/>: (09/2001).
- BOICHIS, N., COCQUEREZ, J.-P. und AIRAULT, S. (1998): A top down strategy for simple crossroads extraction, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band XXXII, part 2/1, 19–26.
- BOICHIS, N., VIGLINO, J.-M. und COCQUEREZ, J.-P. (2000): Knowledge based system for the automatic extraction of road intersections from aerial images, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band XXXIII, Supplement, part 3, 27–34.

- BORDES, G., GIRAUDON, G. und JAMET, O. (1995): Road extraction guided by a cartographic Database: Creating a Strategy, *Workshop on Context-Based Vision*, 30–37.
- BORDES, G., GIRAUDON, G. und JAMET, O. (1997a): Automatic road extraction from grey-level images based on object database, *Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision III*, Band 3072, SPIE–The International Society for Optical Engineering, 110–118.
- BORDES, G., GIRAUDON, G. und JAMET, O. (1997b): Road modeling based on a cartographic database for aerial image interpretation, *Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps*, SMATI'97, Birkhäuser Verlag, 123–139.
- BOWYER, K. J. und PHILLIPS, P. J. (Herausgeber) (1998): *Empirical Evaluation Methods in Computer Vision*, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, California.
- BUSCH, A. (1996): Extraction of roads and built-up areas from Satellite Imagery, *Remote Sensing and Mapping*, IAPR TC-7, 277–292.
- CHRISTMAS, B., KITTLER, J. und PETROU, M. (1994): Non-iterative contextual correspondence matching, *Third European Conference on Computer Vision*, Band II, 137–142.
- CHRISTMAS, W., KITTLER, J. und PETROU, M. (1995): Structural matching in computer vision using probabilistic relaxation, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 17(8): 749–764.
- CLARK, J. und HOLTON, D. (1994): *Graphentheorie — Grundlagen und Anwendungen*, Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg, Berlin, Oxford.
- CMU (1997): Performance evaluation for feature extraction, Slides presented at the Terrain Week 1997 (<http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/usr/maps/www/rcvw/terrainweek97/roads/tw97-roadeval.ROOT.html>): (09/1997).
- DAGM-WG (2001): Dagm-arbeitskreis: Quality characteristics of pattern recognition algorithms, Homepage: <http://www.dagm.de/DAGM/ag/wg.html>: (09/2001).
- DE GUNST, M. (1996): *Knowledge-Based Interpretation of Aerial Images for Updating of Road Maps*, PhD thesis, Technische Universiteit Delft.
- DE GUNST, M., HAN, C., LEMMENS, M. und VAN MUNSTER, R. (1991): Automatic extraction of roads from SPOT images, *ISPRS and OEEPE Joint Workshop on Updating Digital Data by Photogrammetric Methods*, OEEPE Official Publication No. 27, 131–140.
- DHÉRÉTÉ, P. und DESACHY, J. (1999): Data fusion for linear geographic features matching on SPOT images, in *International Workshop on “3D Geospatial Data Production: Meeting Application Requirements”* (International Workshop on “3D Geospatial Data Production: Meeting Application Requirements” 1999), 217–230.
- DOUCETTE, P., AGOURIS, P., MUSAVI, M. und STEFANIDIS, A. (1999): Automated extraction of linear features from aerial imagery using kohonen learning and gis data, in AGOURIS und STEFANIDIS (1999), 20–33.
- DOUCETTE, P., AGOURIS, P., MUSAVI, M. und STEFANIDIS, A. (2000): Road centerline vectorization by self-organized mapping, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band XXXIII, part B3, 246–253.
- DUBOIS, D. und PRADE, H. (1990): An introduction to possibilistic and fuzzy logics, in G. SHAFER und J. PEARL (Herausgeber), *Readings in Uncertain Reasoning*, Kaufmann, San Mateo, CA, 742–761.
- EROS A1 (2001): Homepage: <http://www.imagesatintl.com>: (05/2001).
- FISCHLER, M. (1994): The perception of linear structure: A generic linker, *Image Understanding Workshop*, 1565–1579.

- FISCHLER, M., TENENBAUM, J. und WOLF, H. (1981): Detection of roads and linear structures in Low-Resolution Aerial Imagery Using a Multisource Knowledge Integration Technique, *Computer Graphics and Image Processing* 15: 201–223.
- FISCHLER, M. und WOLF, H. (1983): Linear delineation, *Computer Vision and Pattern Recognition*, 351–356.
- FISSET, R., CAVAYAS, F., MOUCHOT, M.-C., SOLAIMAN, B. und DESJARDINS, R. (1996): Map-guiding and neural networks: A new approach for high accuracy automatic road extraction, *IAPR TC-7 Workshop: Mapping Buildings, Roads and other Man-Made Structures from Images*, R. Oldenbourg Verlag München Wien, Vienna, Austria, 293–308.
- FISSET, R., CAVAYAS, F., MOUCHOT, M.-C., SOLAIMAN, B. und DESJARDINS, R. (1998): Map-image matching using a multi-layer perceptron: The case of the road network, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 53: 76–84.
- FORLANI, G., MALINVERNI, E. und NARDINOCCHI, C. (1996): Using perceptual grouping for road recognition, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band XXXI, part B3, 202–206.
- FÖRSTNER, W. (1996): 10 pros and cons against performance characterization of vision algorithms, *European Conference on Computer Vision, Workshop on Performance Characteristics of Vision Algorithms*, 13–29.
- FUA, P. (1996): Model-based optimization: Accurate and consistent site modeling, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band XXXI, part 3, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna, 222–233.
- FUA, P. (1997): *RADIUS: Image Understanding for Intelligence Imagery*, Morgan Kaufmann, chapter Model-Based Optimization: An Approach to Fast, Accurate, and Consistent Site Modeling from Imagery: O. Firschein and T.M. Strat, Eds. Available as Tech Note 570, Artificial Intelligence Center, SRI International.
- FUA, P. (1998): Fast, accurate and consistent modeling of drainage and surrounding terrain, *International Journal of Computer Vision* 26(3): 215–234.
- FUA, P. und BRECHBÜHLER, C. (1996): Imposing hard constraints on soft snakes, *Fourth European Conference on Computer Vision*, 495–506.
- GEMAN, D. und JEDYNAK, B. (1993): Shape recognition and twenty questions, *Rapport de Recherche 2155*, Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique.
- GEMAN, D. und JEDYNAK, B. (1996): An active testing model for tracking roads in satellite images, *PAMI* 18(1): 1–14.
- GOODCHILD, M. und HUNTER, G. (1997): A simple positional accuracy measure for linear features, *International Journal of Geographical Information Science* 11(3): 299–306.
- GROCH, W.-D. (1982): Extraction of line shaped objects from aerial images using a special operator to analyze the profiles of functions, *Computer Graphics and Image Processing* 18: 347–358.
- GRUEN, A., BALTSAVIAS, E. und HENRICSSON, O. (Herausgeber) (1997): *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II)*, Birkhäuser Verlag, Basel.
- GRUEN, A., KUEBLER, O. und AGOURIS, P. (Herausgeber) (1995): *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images*, Birkhäuser Verlag, Basel.
- GRUEN, A. und LI, H. (1996): Linear feature extraction with LSB-snakes from multiple images, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band XXXI, part 3, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna, Austria, 266–272.
- GRUEN, A. und LI, H. (1997): Linear feature extraction with 3-D LSB-snakes, in GRUEN et al. (1997), 287–298.

- GUÉRIN, P., JAMET, O. und MAÎTRE, H. (1995): Distortion model in road networks from topographic maps: Identification and assessment, *SPIE: Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision II*, Band 2486, 232–243.
- HALL, D. und BALL, G. (1965): Isodata : A novel method of data analysis and pattern classification, *Technical report*, Stanford Research Institute.
- HARALICK, R. M. (1994): Overview: Computer vision performance characterization, *Image Understanding Workshop*, 663–665.
- HARVEY, W. A. (1999): Performance evaluation for road extraction, in *International Workshop on “3D Geospatial Data Production: Meeting Application Requirements” (International Workshop on “3D Geospatial Data Production: Meeting Application Requirements” 1999)*, 175–184.
- HAZARIKA, M., HONDA, K., SAMARAKOON, L. und MURAI, S. (2000): Extraction of road information using multisensor data, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band XXXIII, part B3, 367–372.
- HELLER, A., FISCHLER, M., BOLLES, R., CONNOLLY, C., WILSON, R. und PEARSON, J. (1998): An integrated feasibility demonstration for automatic population of geospatial databases, *Principal investigator report*, SRI International.
- HELLWICH, O. und WIEDEMANN, C. (2000): Object extraction from high-resolution multisensor image data, *Fusion of Earth Data*, Sophia Antipolis, Frankreich, 105–115.
- HINZ, S., BAUMGARTNER, A., MAYER, H., WIEDEMANN, C. und EBNER, H. (2001): Road extraction focussing on urban areas, *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (III)*, Balkema Publishers, Rotterdam, in print.
- HINZ, S., BAUMGARTNER, A., STEGER, C., MAYER, H., ECKSTEIN, W., EBNER, H. und RADIG, B. (1999): Road extraction in rural and urban areas, in W. FÖRSTNER, C.-E. LIEDKE und J. BÜCKNER (Herausgeber), *Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps, SMATI'99*, 133–153.
- HINZ, S., WIEDEMANN, C. und BAUMGARTNER, A. (2000): A scheme for road extraction in rural areas and its evaluation, *Fifth IEEE Workshop on Applications of Computer Vision*, IEEE, 134–139.
- HINZ, S. und BAUMGARTNER, A. (2000): Road extraction in urban areas supported by context objects, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band XXXIII, part B3, 405–412.
- IKONOS 1 (2001): Homepage: <http://www.spaceimage.com>: (09/2001).
- JEDYNAK, B. und ROZÉ, J.-P. (1995): Tracking roads in satellite images by playing twenty questions, *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images*, Birkhäuser Verlag, Basel, Switzerland, 243–253.
- KASS, M., WITKIN, A. und TERZOPOULOS, D. (1987): Snakes: Active contour models, *International Journal of Computer Vision* 1(4): 321–331.
- KLANG, D. (1998): Automatic detection of changes in road databases using satellite imagery, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band XXXII, part 4, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 293–298.
- KONECNY, G. (1995): Satelliten-Fernerkundung und Kartographie, *GIS* 8(2): 3–12.
- LAPTEV, I. (1997): *Road extraction based on line extraction and snakes*, Master thesis, Computational Vision and Active Perception Laboratory (CVAP), Royal Institute of Technology.
- LI, S., KITTLER, J. und PETROU, M. (1992): Matching and recognition of road networks form Aerial Images, *Second European Conference on Computer Vision*, 857–861.

- MAYER, H. (1998): Automatische Objektextraktion aus digitalen Luftbildern, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 494.
- MAYER, H., LAPTEV, I., BAUMGARTNER, A. und STEGER, C. (1997): Automatic road extraction based on multiscale modeling, context, and snakes, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band XXXII, part 3-2W32, Haifa, Israel, 106–113.
- MAYER, H., LAPTEV, I. und BAUMGARTNER, A. (1998): Multi-scale and snakes for automatic road extraction, *Fifth European Conference on Computer Vision*, Nummer 1407 in *Lecture Notes in Computer Science*, Springer-Verlag, 720–733.
- MCGLONE, C. und SHUFELT, J. (1994): Projective and object space geometry for monocular building extraction, *Computer Vision and Pattern Recognition*, 54–61.
- MCKEOWN, D. und DENLINGER, J. (1988): Cooperative methods for road tracking in Aerial Imagery, *Computer Vision and Pattern Recognition*, 662–672.
- MCKEOWN JR., D., BULWINKLE, G. E. und COCHRAN, S. D. (1996): Research in the automated analysis of remotely sensed imagery: 1994–1995, *Technical Report CMU-CS-101*, Digital Mapping Laboratory, School of Computer Science, Carnegie Mellon University.
- MENDEL, J. (1995): Fuzzy logic systems for engineering: A tutorial, *IEEE Proceedings*, Band 83, No. 3, 345–377.
- MERLET, N. und ZERUBIA, J. (1993): Classical mechanics and road detection in spot images, *Rapport de Recherche 1889*, Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique.
- MERLET, N. und ZERUBIA, J. (1996): New prospects in line detection by dynamic Programming, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 18(4): 426–431.
- MUKHERJEE, A., PARUI, S., CHAUDHURI, B., KRISHNAN, R. und RAO, K. (1994): Detection of linear features in satellite imagery using robust estimation, *ICPR94*, 514–516.
- MUKHERJEE, A., PARUI, S., CHAUDHURI, D., CHAUDHURI, B. und KRISHNAN, R. (1996): An efficient algorithm for detection of road-like structures in satellite images, *ICPR96*, 875–879.
- NEUENSCHWANDER, W., FUA, P., SZÉKELY, G. und KÜBLER, O. (1995): From ziplock snakes to Velcro[™] Surfaces, *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images*, Birkhäuser Verlag, Basel, Switzerland, 105–114.
- NEVATIA, R. und BABU, K. (1980): Linear feature extraction and description, *Computer Graphics and Image Processing* 13: 257–269.
- PHILLIPS, I. T., LIANG, J. und HARALICK, R. (1997): A performance evaluation protocol for engineering-drawing recognition systems, *Proceedings of the Second IAPR Workshop on Graphics Recognition*, Nancy, France, 333–346.
- PIETZSCH, W. (1989): *Straßenplanung*, Werner-Verlag GmbH, Düsseldorf, Germany.
- PLIETKER, B. (1994): Semiautomatic revision of street objects in ATKIS Database DLM 25/1, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band XXX, part 4, 311–317.
- PRICE, K. (1999): Road grid extraction and verification, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band XXXII, part 3-2W5, 101–106.
- PRICE, K. (2000): Urban street grid description and verification, *Proceedings of the fifth IEEE Workshop on Applications of Computer Vision*, 148–154.
- QUAM, L. (1978): Road tracking and anomaly detection in aerial imagery, *DARPA78*, 51–55.
- RUSKONÉ, R. (1996): *Road Network Automatic Extraction by Local Context Interpretation: Application to the Production of Cartographic Data.*, PhD thesis, Université Marne-La-Vallée, France.
- RUSKONÉ, R., AIRAULT, S. und JAMET, O. (1994): Road network interpretation: A topological hypothesis driven system, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band XXX, part 3/2, 711–717.

- SCHLÜTER, M. (2000): Fortführung von Geoinformationssystemen anhand direkt aufgezeichneter digitaler Bilddaten, Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Band 14, ISSN 1436-3445.
- SEDGEWICK, R. (1997): *Algorithmen in C++*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- SHUFELT, J. (1999): Performance evaluation and analysis of monocular building extraction from aerial imagery, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 21(4): 311–326.
- SOLBERG, R. (1992): Semi-automatic revision of topographic maps from satellite imagery, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 29, part B4, 549–556.
- STEGER, C. (1998a): An unbiased detector of curvilinear structures, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 20(2): 113–125.
- STEGER, C. (1998b): *Unbiased Extraction of Curvilinear Structures from 2D and 3D images*, Dissertation, Technische Universität München.
- STEGER, C., MAYER, H. und RADIG, B. (1997): The role of grouping for road extraction, in A. GRUEN, E. BALTSAVIAS und O. HENRICSSON (Herausgeber), *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II)*, Birkhäuser Verlag, Basel, Switzerland, 245–256.
- STRAUB, B.-M., WIEDEMANN, C. und HEIPKE, C. (2000): Towards the automatic interpretation of images for GIS update, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band XXXIII, part B3, 525–532.
- STRAUB, B.-M. und WIEDEMANN, C. (2000): Towards the update of geodata by automatic object extraction, *Image and Signal Processing for Remote Sensing VI*, Band 4170, SPIE - The Intern. Soc. for Optical Engineering, 304–315.
- TEOH, C. und SOWMYA, A. (2000): Junction extraction from high resolution images by composite learning, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band XXXIII, part B3, 882–888.
- TON, J., JAIN, A., ENSLIN, W. und HUDSON, W. (1989): Automatic road identification and labeling in Landsat 4 TM Images, *Photogrammetria* 43: 257–276.
- TRINDER, J. C. und LI, H. (1995): Semi-automatic feature extraction by snakes, *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images*, Birkhäuser Verlag, Basel, Switzerland.
- VAN CLEYNENBREUGEL, J., FIERENS, F., SUETENS, P. und OOSTERLINCK, A. (1990): Delineating road structures on satellite imagery by a GIS-guided technique, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 56(6): 893–898.
- VAN CLEYNENBREUGEL, J., OSINGA, S., FIERENS, F., SUETENS, P. und OOSTERLINCK, A. (1991): Road extraction from multi-temporal satellite images by an evidential reasoning approach, *PRL* 12: 371–380.
- VASUDEVAN, S., CANNON, R. und BEZDEK, J. (1988): Heuristics for intermediate level road finding algorithms, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 44: 175–190.
- VOSSelman, G. (1992): *Relational matching*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York u.a.
- VOSSelman, G. und DE GUNST, M. (1997): Updating road maps by contextual reasoning, in A. GRUEN, E. BALTSAVIAS und O. HENRICSSON (Herausgeber), *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II)*, Birkhäuser Verlag, Basel, Switzerland.
- WALTER, V. (1996): Zuordnung von raumbezogenen Daten - am Beispiel der Datenmodelle ATKIS und GDF, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 480.
- WALTER, V. (1998): Automatic classification of remote sensing data for GIS database revision, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band XXXII, part 4, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 641–648.

- WALTER, V. (1999): Comparison of the potential of different sensors for an automatic approach for change detection in GIS databases, *in* AGOURIS und STEFANIDIS (1999), 47–64.
- WANG, F. und NEWKIRK, R. (1988): A knowledge-based system for highway network extraction, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 26(5): 525–531.
- WANG, J., TREITZ, P. und HOWARTH, P. (1992): Road network detection from SPOT imagery for updating geographical information systems in the rural-urban fringe, *International Journal of Geographical Information Systems* 6(2): 141–157.
- WEBSTER'S (1913): *Webster's Revised Unabridged Dictionary*, C. & G. Merriam Co., Springfield, Mass.: p. 1245.
- WIEDEMANN, C. (1999): Automatic completion of road networks, *Proceedings of the ISPRS Joint Workshop "Sensors and Mapping from Space 1999"*, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- WIEDEMANN, C., HEIPKE, C., MAYER, H. und HINZ, S. (1998a): Automatic extraction and evaluation of road networks from MOMS-2P imagery, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 32(3/1), 285–291.
- WIEDEMANN, C., HEIPKE, C., MAYER, H. und JAMET, O. (1998b): Empirical evaluation of automatically extracted road axes, *in* K. J. BOWYER und P. J. PHILLIPS (Herausgeber), *Empirical Evaluation Methods in Computer Vision*, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, California, 172–187.
- WIEDEMANN, C. und EBNER, H. (2000): Automatic completion and evaluation of road networks, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band XXXIII, part B3, 979–986.
- WIEDEMANN, C. und HINZ, S. (1999): Automatic extraction and evaluation of road networks from satellite imagery, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band XXXII, part 3-2W5, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 95–100.
- YUILLE, A. und COUGHLAN, J. (2000): Fundamental limits of Bayesian inference: Order parameters and phase transitions for road tracking, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 22(2): 160–173.
- ZADEH, L. (1965): Fuzzy sets, *Information Control*, Band 8, 338–353.
- ZADEH, L. (1989): Knowledge representation in fuzzy logic, *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* 1(1): 89–100.
- ZAFIROPOULOS, P. und SCHENK, T. (1998): Color-based energy modelling for road extraction, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band XXXII, part 3/1, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 408–417.
- ZAFIROPOULOS, P. und SCHENK, T. (1999): Color-based contour strategies for road extraction, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band XXXII, part 3-2W5, 203–208.
- ZHANG, C. und BALTSAVIAS, E. (1999): Road network detection by mathematical morphology, *in* *International Workshop on "3D Geospatial Data Production: Meeting Application Requirements"* (International Workshop on "3D Geospatial Data Production: Meeting Application Requirements" 1999), 185–200.

Dank

Mein herzlicher Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heinrich Ebner, dem Leiter des Lehrstuhls für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität München. Durch seine erfahrene Anleitung, die sich durch viele, außerordentlich wertvolle Diskussionen, aber auch durch die mir gewährte Freiheit ausdrückte, hat er diese Arbeit entscheidend mitgestaltet und wesentlich zu ihrem Gelingen beigetragen.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke, dem Leiter des Instituts für Photogrammetrie und Geoinformation der Universität Hannover danke ich für die Übernahme des Korreferats. Sein Engagement, das sich unter anderem in sehr intensiven, richtungweisenden und motivierenden Diskussionen widerspiegelte, möchte ich an dieser Stelle hervorheben. Besonders danke ich ihm auch für überaus schnelle Hilfestellungen trotz hoher Arbeitsbelastung.

Für das Korrekturlesen der Arbeit danke ich Frau Dipl.-Ing. Birgit Wessel und Herrn Dipl.-Ing. Albert Baumgartner sehr herzlich.

Die vorliegende Arbeit konnte nur im Rahmen eines kreativen und motivierenden Umfeldes entstehen. Daher möchte ich allen Mitgliedern des Lehrstuhls für Photogrammetrie und Fernerkundung für die überaus freundschaftliche Atmosphäre und die vielen kleinen Hilfestellungen jeglicher Art danken. Insbesondere seien hier meine (Ex-)Kollegen im Bereich der „Straßenextraktion“ genannt. Die Herren Dipl.-Ing. Albert Baumgartner, Dipl.-Ing. Stefan Hinz, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Helmut Mayer sowie Frau Dipl.-Ing. Birgit Wessel haben mit vielen Diskussionen, Ideen und Hilfestellungen wesentlich zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen.

Mein größter Dank gilt schließlich meiner Frau Vroni. Sie hat mir stets die Kraft und Motivation gegeben, die für das Gelingen einer solchen Arbeit notwendig sind. Dafür bin ich ihr sehr dankbar.

Lebenslauf

Beruf

- 02/99 - Wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität München
- 09/96 Verleihung des *Gerhard-Eichhorn-Preises* des Deutschen Vereins für Vermessungswesen e.V.
- 07/95 - 01/99 Wissenschaftlicher Angestellter am o.a. Lehrstuhl

Ausbildung

- 10/90 - 06/95 Studium des Vermessungswesens (Geodäsie) an der Technischen Universität München, ausgezeichnet mit der *Harbert-Buchspende* des Deutschen Vereins für Vermessungswesen e.V., Abschluß: Diplomingenieur mit Auszeichnung
- 05/90 - 07/90 Vermessungspraktikum am staatlichen Vermessungsamt Nürnberg
- 07/88 - 09/89 Grundwehrdienst
- 1975 - 1989 Rudolf-Steiner-Schule Nürnberg, Abitur 05/89

Privat

Geboren am 07.04.1969 in Nürnberg, ev.-luth.,
seit 1997 verheiratet mit Veronika Wiedemann, ein Kind.