

Institut für Photogrammetrie und Kartographie

Automatische Extraktion von Straßen aus digitalen Luftbildern

Albert Baumgartner

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. Helmut Mayer, Universität der Bundeswehr München

Die Dissertation wurde am 14. November 2002 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 20. Januar 2003 angenommen.

Γνῶθι σαυτόν.
(Erkenne dich selbst!)

Zusammenfassung

Diese Arbeit stellt einen Ansatz zur Extraktion von Straßen aus digitalen Luftbildern vor. Sie konzentriert sich auf eine vollständige Automatisierung der Extraktion und verwendet dafür ein explizit beschriebenes Objektmodell. Die Besonderheiten dieser Arbeit im Vergleich zu anderen Ansätzen sind die Nutzung des Maßstabsraumverhaltens von Straßen und der Gebrauch von Kontextinformation mittels globaler Kontextregionen und lokaler Beziehungen zwischen Straßen und anderen Objekten. Sie beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit der Straßenextraktion in offenen, ländlichen Gebieten. Als Eingabedaten für die automatische Extraktion dienen panchromatische Luftbilder mit einer Bodenpixelgröße von circa 0.2 bis 0.5 Metern.

Der entwickelte Ansatz verwendet verschiedene Auflösungsstufen des Luftbildes. Die Straßen werden als Netz modelliert, das aus Kreuzungen und aus Verbindungen zwischen diesen Kreuzungen besteht. Für verschiedene so genannte *globale Kontexte*, d.h. offene Landschaft, Wald und Siedlung, werden lokale Kontexte, d.h. Relationen zwischen Hintergrundobjekten und Straßenobjekten definiert. Ein *lokaler Kontext* beschreibt z.B. den Schattenwurf eines Gebäudes auf einen Straßenabschnitt. Die lokalen Kontexte werden in Abhängigkeit von den verschiedenen *globalen Kontexten* unterschiedlich modelliert. Eine automatische Unterteilung des Luftbildes auf Grundlage von Texturklassifikation in globale Kontexte dient dazu, die Extraktion auf die Erfolg versprechendsten Regionen zu fokussieren und ermöglicht Aussagen darüber, in welchen Bereichen des Luftbildes das Ergebnis am zuverlässigsten sein wird. Für die Straßenextraktion werden Kanten im ursprünglichen Bild hoher Auflösung (Pixelgröße 0.2 m bis 0.5 m) und Linien in einem auflösungsreduzierten Bild (Pixelgröße 2 m bis 4 m) extrahiert. Unter Verwendung beider Auflösungsstufen und expliziten Wissens über Straßen werden Hypothesen für Straßenabschnitte generiert. Anschließend werden diese Hypothesen in einem iterativen Verfahren zu langen Verbindungen gruppiert. Zum Schließen von Lücken werden neben reinen Gruppierungskriterien auch so genannte „Ribbon-Snakes“ und Wissen über den lokalen Kontext genutzt. Die Vernetzung der Straßen erfolgt durch die Extraktion von Kreuzungen. Die dargestellten Beispiele und die Ergebnisse einer Evaluierung auf Grundlage manuell erfasster Referenzdaten zeigen die Leistungsfähigkeit des Verfahrens.

Summary

This thesis proposes a new approach for the automatic extraction of roads from digital aerial imagery. It focuses on fully automatic extraction and utilizes an explicit object model. Compared to other approaches the most prominent features of this thesis are the exploitation of the scale-space behavior of roads and the use of contextual information by means of global context regions and local relations between roads and other objects. The approach aims at road extraction in open rural areas. Panchromatic aerial images with a pixel size of approximately 0.2 to 0.5 meter on the ground serve as input data for the automatic extraction.

The proposed approach makes use of several versions of the aerial image with different resolution. Roads are modeled as a network of intersections and links between these intersections. For different so-called *global contexts*, i.e., rural, forest, and urban area, the model defines relations between background objects and road objects. These relations, e.g., that a tree casts a shadow on a road-segment, determine so-called *local contexts*. These local contexts are modeled differently depending on the *global context* regions. An automatic segmentation of the aerial image into different global contexts by means of texture classification is used to focus the extraction on the most promising regions. Additionally, it allows to predict in which parts of the image the results will be most reliable. For the actual extraction of the roads edges are extracted in the original high resolution image (pixel size 0.2–0.5 m) and lines in an image of reduced resolution (pixel size 2–4 m). Using both resolution levels and explicit knowledge about roads hypotheses for road-segments are generated. They are grouped iteratively into longer segments. In addition to pure grouping criteria also knowledge about the local context and so-called “Ribbon-Snakes” are used to bridge gaps. For the construction of the road network intersections are extracted. The examples presented and the results of an evaluation based on manually plotted reference data show the efficiency of the approach.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Motivation	7
1.2	Zielsetzung	9
1.3	Aufbau	9
2	Grundlagen der Bildanalyse und der Straßenextraktion	10
2.1	Konzepte und Begriffe	11
2.1.1	Modellbildung und Wissensrepräsentation	11
2.1.2	Ebenenmodell der Bildanalyse	12
2.1.3	Steuerung der Bildinterpretation	12
2.1.4	Maßstabsraum	14
2.2	Methoden	15
2.2.1	Segmentierung und Merkmalsextraktion	15
2.2.2	Gruppierung	16
2.3	Verfahren	17
2.3.1	Laws-Filter	17
2.3.2	Steger-Linienoperator	17
2.3.3	Snakes	18
2.3.4	Netzanalyse mittels Graphen	21
3	Bisherige Arbeiten	22
3.1	Modellierung	22
3.2	Teilaufgaben	22
3.3	Einteilung und Beschreibung ausgewählter Ansätze	24
3.4	Folgerungen	29
4	Modellierung und Strategie	32
4.1	Objekt-Modell	32
4.1.1	Komponenten des Modellwissens	33
4.1.2	Abstraktionsebenen der Modellierung	34
4.2	Kontext-Modell	36
4.2.1	Lokaler Kontext	37
4.2.2	Globaler Kontext	37
4.3	Strategie	39

5	Extraktion	42
5.1	Rahmenbedingungen	42
5.2	Kontextinformation	43
5.2.1	Global: Kontextgebiete	43
5.2.2	Lokal: Schatten und hohe Objekte	44
5.3	Straßen	45
5.3.1	Generierung von Starthypothesen für Straßenabschnitte	45
5.3.1.1	Fokussierung durch globalen Kontext	46
5.3.1.2	Fusion verschiedener Maßstäbe	46
5.3.1.3	Von Straßenrändern zu Straßenabschnitten	49
5.3.2	Gruppierung der Straßenabschnitte	52
5.3.2.1	Generierung von Verbindungshypothesen	52
5.3.2.2	Verifikation der Verbindungshypothesen	54
5.3.3	Netzbildung	58
5.3.3.1	Extraktion von Kreuzungen	58
5.3.3.2	Netzanalyse und interne Bewertung	63
5.3.4	Vervollständigung des Netzes	65
6	Ergebnisse und Bewertung	68
6.1	Bewertungskriterien	68
6.2	Beispieldatensätze und Extraktionsergebnisse	69
6.3	Diskussion	77
7	Ausblick	79
	Literaturverzeichnis	82

1. Einleitung

1.1 Motivation

In der digitalen Photogrammetrie gibt es operationelle automatische Lösungen für verschiedenste Aufgaben. Dazu gehören z.B. die Messung von Rahmenmarken und die Bestimmung homologer Punkte für die relative Orientierung, die Generierung digitaler Oberflächenmodelle oder die automatische Aerotriangulation. Praxistaugliche automatische Lösungen existieren vor allem für eindeutig formalisierbare geometrische Aufgaben. Datenerfassung und Fortführung für geographische Informationssysteme (GIS) sind wegen der hierbei notwendigen Zuordnung von Bildregionen zu topographischen Objekten, wie z.B. Gebäude oder Straße, hingegen semantische Aufgaben. Sie werden bisher in den allermeisten Fällen noch von einem Operateur manuell erledigt. Von Seiten der Praxis besteht großes Interesse daran, den Operateur bei der Objekterfassung aus digitalen Luftbildern durch den Einsatz geeigneter Software zu unterstützen. Damit könnten der Erfassungs- und Fortführungsprozess beschleunigt und Kosten gesenkt werden. Derzeit stehen die dafür benötigten Werkzeuge jedoch noch nicht im erforderlichen Umfang bereit. Es gilt immer noch, wie bereits in (ILLERT 1993) festgestellt wurde, dass sich die Vorgehensweise bei der Interpretation von digitalen Luftbildern nicht wesentlich von der Arbeitsweise der analytischen Photogrammetrie unterscheidet.

Die Auswertung von Luftbildern spielt bei der Erfassung und Fortführung von GIS-Daten eine bedeutende Rolle, wenngleich nicht alle von einem GIS benötigten Daten aus Luftbildern gewonnen werden können. ENGLISCH et al. (1996) stellen am Beispiel der Orthophotoauswertung für das Amtliche Topographische und Kartographische Informationssystem (ATKIS) dar, welche Objekte und Objektattribute des ATKIS-Objektartenkataloges aus Orthophotos erfasst werden können. Der Bestimmung von Attributen wie „Funktion“ oder „rechtliche Widmung“ allein aus im Luftbild enthaltener Information sind enge Grenzen gesetzt oder sie ist einfach unmöglich.

Digitale Straßendaten werden z.B. für Routenplanung, Navigation und Planungsaufgaben benötigt. Zur Erfassung von Straßen aus Luft- aber auch Satellitenbildern gibt es zahlreiche Forschungsarbeiten, deren Motivation häufig in der Automatisierung der Erfassung und Fortführung von Daten für GIS liegt. Prinzipiell lassen sich hierbei halb- und vollautomatische Verfahren unterscheiden. Die Entwicklung eines Verfahrens zur vollautomatischen Extraktion von Straßen aus Luftbildern ist das Ziel dieser Arbeit.

Hauptmerkmal von halbautomatischen Verfahren ist die interaktive Steuerung der Erfassung durch den Operateur. Die grundlegende Idee besteht darin, den Rechner das machen lassen, was er gut kann, nämlich Messen während der menschliche Operateur die Erkennungsaufgabe übernimmt und dem automatischen Verfahren in schwierigen Situationen hilft. Diese Idee klingt bestechend, ist jedoch mit einigen Problemen behaftet: Die Akzeptanz des Verfahrens im praktischen Einsatz hängt entscheidend davon ab, ob das System in der Lage ist, selbst zu erkennen, in welchen Situationen es den Operateur um Rat fragen muss. Vor allem aber ist wichtig, dass das System die Erfassung deutlich beschleunigt, und für den Operateur, der die Extraktion überwacht, keine langen Wartezeiten auftreten. D.h. der Algorithmus sollte nahezu in Echtzeit ablaufen, bzw. auftretende längere Rechenzeiten sollten für den Operateur für andere Aufgaben nutzbar sein.

Bei einem vollautomatischen Verfahren wird die Erfassung vollständig vom Rechner ausgeführt. Für eine operationelle Nutzung bestehen die Hauptaufgaben des Operateurs in der Festlegung von Teilbereichen, für die der Ansatz geeignet ist, in der Einstellung von Parametern sowie in der manuellen oder halbautomatischen Nachbearbeitung der Ergebnisse einer automatischen Extraktion. Wichtig ist hierbei eine niedrige Fehlerrate des automatischen Verfahrens, so dass sich der Operateur zum

größten Teil darauf beschränken kann, die nicht gefundenen Teile des Straßennetzes hinzuzufügen. Unter der Prämisse, dass Rechenzeit im Gegensatz zu menschlicher Arbeitszeit sehr wenig kostet, bestehen für die automatische Objektextraktion keine allzu hohen Anforderungen an die Rechenzeit.

Bei halbautomatischen Verfahren ist die Art und Weise der Interaktion eng an die Qualität des Verfahrens gekoppelt. Ein neues, verbessertes Verfahren impliziert unter Umständen eine deutlich andere Interaktion und würde eine aufwändige Optimierung der Interaktion erfordern. Dieser Aufwand lohnt sich aber erst, wenn das Verfahren bereits relativ weit entwickelt ist. Im Hinblick auf ein operationelles System besteht ein entscheidender Vorteil vollautomatischer Verfahren darin, dass Vorgehensweise und Ablauf der Extraktion nicht auf die Interaktion mit dem Operateur und dessen Arbeitsweise abgestimmt werden müssen.

Mögliche Vorgehensweisen für die Einbindung halb- und vollautomatischer Verfahren in operationelle Produktionsabläufe werden in (AIRAULT et al. 1996) beschrieben. Aufgrund der noch unzureichenden Erkennungsleistung bisheriger automatischer Verfahren werden für den praktischen Einsatz halbautomatische Verfahren favorisiert. Lediglich bei sehr niedrigen Qualitätsanforderungen oder speziellen Anwendungen, bei denen eine absolute Fehlerfreiheit des Ergebnisses nicht erforderlich ist, kommen automatische Verfahren in Betracht. Dies gilt z.B. für die gegenseitige Registrierung von Bildern mit GIS-Daten.

Dennoch sind aus wissenschaftlicher Sicht gerade vollautomatische Verfahren äußerst interessant. Bei vollautomatischen Ansätzen ist die Modellierung der Eigenschaften eines Objektes und seiner Relationen zu anderen Objekten entscheidend. Ausschlaggebend für den Erfolg ist die gezielte Nutzung des Modellwissens während des Extraktionsablaufs. Dadurch wird es möglich, anhand von Ergebnissen Modelle empirisch zu überprüfen und zu vergleichen. Dass sie vorliegende Arbeit auf die Entwicklung eines vollautomatischen Verfahrens ausgerichtet ist, hat aus praktischer Sicht zusätzlich den Vorteil, dass das Hauptaugenmerk auf die Optimierung der automatischen Objekterkennung gelegt werden kann und aufwändige Verbesserungen der Interaktionskomponente keine Rolle spielen.

Eine der Herausforderungen dieser Aufgabe der Bildanalyse besteht darin, zu untersuchen, welche Eigenschaften von Straßen auf welche Weise am besten für die automatische Extraktion genutzt werden können. In vielen Fällen wird für den Menschen die Interpretation eines Luftbildes erleichtert bzw. überhaupt erst möglich, wenn die Zusammenhänge zwischen gleich- und verschiedenartigen Objekten, wie z.B. Gebäude, Bäume und Straßen sichtbar sind. Deshalb erscheint es sinnvoll, die Modellierung des Kontextes, d.h. der Relationen zwischen Straßen und anderen Objekten, auch für die automatische Extraktion zu verwenden.

Vor dem Hintergrund der GIS-Fortführung ist es zwar nahe liegend, die vorhandenen Daten auch für die Erkennung zu nutzen. Dies führt jedoch letztlich meist nur dazu, dass bereits im GIS vorhandene Straßen verifiziert werden. Problematisch ist hierbei, dass eine Gewichtung der Evidenz für eine Straße im Bild gegenüber der Aussage im GIS vorgenommen werden muss. Misst man der GIS-Information hohe Bedeutung zu, so kann man bereits auf Basis relativ einfacher Modelle Straßen in Bildern verifizieren. Für die zuverlässige Extraktion neuer Straßen reicht allerdings ein einfaches Modell in der Regel nicht aus (WIEDEMANN und MAYER 1996). Wenn man sich nicht auf eine reine Verifikation beschränken will, dann sind alle für die Erkennung erforderlichen Informationen in dem zu entwickelnden Verfahren möglichst explizit zu modellieren und zu verwenden. Die Entscheidung über Evidenz und genaue Bedeutung einzelner Straßenabschnitte sollte auf Grundlage der Bilder und nicht auf Basis alter, möglicherweise obsoleter GIS-Daten erfolgen. Im Extremfall können veraltete GIS-Daten nicht einmal dazu dienen, die Extraktion durch Einschränkung des Suchraums zu beschleunigen.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Darstellung eines vollautomatischen Verfahrens zur Straßenextraktion. Als Grundlage für die Erkennung von Straßen soll lediglich Information aus dem Luftbild, bzw. einem Stereobildpaar verwendet werden. Auf bestehende GIS-Daten wird nicht zurückgegriffen. Für den Verzicht auf die Nutzung von GIS-Daten gibt es mehrere Gründe: Eine automatische Extraktion ohne Verwendung von Vorwissen zeigt die Möglichkeiten und Grenzen eines Extraktionsverfahrens wesentlich besser als eine GIS-gesteuerte Extraktion und kann daher einen Beitrag zum besseren Verständnis der Probleme der automatischen Interpretation von Luft- und Satellitenbildern leisten. Weiterhin ist es für die GIS-Fortführung ohnehin unumgänglich, dass neue Objekte extrahiert werden, für die es keine Vorinformation gibt. Ausgangspunkt in dem hier verfolgten Ansatz zur Straßenextraktion ist die Extraktion und Gruppierung von Linien und Kanten in verschiedenen Auflösungsstufen des Bildes, die als Hypothesen für Straßenachsen und Straßenränder dienen. Das Wissen über die Relationen zwischen Straßen und anderen Objekten wird in dieser Arbeit als zusätzliche Kontextinformation genutzt.

1.3 Aufbau

In Kapitel 2 werden Grundlagen der Bildanalyse und einzelne Methoden, die in der Straßenextraktion von besonderer Bedeutung sind, kurz vorgestellt. Diese Grundlagen sind für den eigenen Ansatz bedeutsam, sie sollen aber auch Verständnis und Einordnung der bisherigen Arbeiten erleichtern. Einen Überblick über bisherige Arbeiten zur Straßenextraktion gibt Kapitel 3. Die Ansätze werden hinsichtlich der verwendeten Modellierung und der eingesetzten Methoden und Strategien beschrieben. Stärken und Schwächen der Ansätze werden herausgearbeitet, um daraus Folgerungen für den eigenen Ansatz abzuleiten. Das in Kapitel 4 präsentierte Modell gliedert sich in die zwei Bereiche Modellierung des Objekts Straße und Modellierung des Straßenkontextes. Es bildet die Grundlage für das entwickelte Extraktionsverfahren und die verfolgte Strategie. In Kapitel 5 werden die einzelnen Schritte des Verfahrens detailliert beschrieben und es wird exemplarisch gezeigt, welchen Nutzen die Einbeziehung globaler Gruppierungskriterien bringt. Eine Darstellung und Bewertung der Ergebnisse anhand mehrerer Beispiele erfolgt in Kapitel 6. Kapitel 7 zeigt Ansatzpunkte für weitere Verbesserungen auf dem Weg zur Automation der Straßenextraktion aus Luft- und Satellitenbildern.

2. Grundlagen der Bildanalyse und der Straßenextraktion

Die Aufgabe, Straßen automatisch aus digitalen Luftbildern zu extrahieren, kann neben der digitalen Photogrammetrie auch der Bildanalyse zugeordnet werden. Nahezu gleichbedeutend mit „Bildanalyse“ werden in der Literatur Begriffe wie „Bildverstehen“, „Computer Vision“ oder „Maschinelles Sehen“ verwendet. Unter Bildanalyse versteht man allgemein eine Kombination aus Bildverarbeitung, Mustererkennung und dem Einsatz von Techniken aus der künstlichen Intelligenz. Das Ziel ist die rechnergestützte Interpretation von einem oder mehreren Bildern bzw. von Bildfolgen. Welche Sensoren die Bilder aufgezeichnet haben, spielt keine Rolle. Aufgabe der Bildanalyse im engeren Sinne ist Detektion und Extraktion von Objekten oder Objektteilen in der durch den Sensor aufgezeichneten Szene der realen Welt, für die lediglich eine generische oder parametrische Beschreibung existiert.

Voraussetzung für eine erfolgreiche Bildanalyse ist die Modellierung der interessierenden Szene bzw. der interessierenden Objekte unter Berücksichtigung des verwendeten Sensors. Die Modellierung sollte das für die Lösung der Aufgabe benötigte Wissen möglichst explizit und in einem formal widerspruchsfreien Schema darstellen. Die explizite Modellierung erlaubt es, Programme zu schreiben, die es dem Rechner ermöglichen, die in den Bildern erfasste Szene zu interpretieren, vgl. (HARALICK und SHAPIRO 1992a, BALLARD und BROWN 1982, DOUGHERTY 1994). Das vom Rechner generierte Ergebnis ist umso besser nachvollziehbar je expliziter das Modellwissen dargestellt und genutzt wird. Damit wird eine explizite Modellierung Ausgangspunkt für Analysen und Verbesserungen eines Bildanalyse-Systems. Je nach Komplexität der Aufgabe sind auch die Anforderungen an die Modellierung unterschiedlich. Im Extremfall erfordert die wissensbasierte Vorgehensweise bei der automatischen Objektextraktion eine umfassende Modellierung der Szene mit allen darin enthaltenen Objekten hinsichtlich ihrer geometrischen und radiometrischen Eigenschaften sowie der Relationen zwischen den Objekten. Dies wiederum bedingt ein komplexes Schema für die Repräsentation des Wissens.

Außer durch die Qualität der Modellierung wird die Leistungsfähigkeit eines modellbasierten Systems wesentlich durch die Steuerung des Interpretationsprozesses bestimmt. D.h. neben der Repräsentation des Wissens spielt dessen Nutzung eine entscheidende Rolle. Zu beachten ist hierbei, dass unterschiedliche Repräsentationsformalismen, wie z.B. Logik, Regeln, Frames oder Semantische Netze, bei der Nutzung des repräsentierten Wissens unterschiedliche Stärken und Schwächen aufweisen. Unterschiede gibt es z.B. hinsichtlich der Objektzentrierung des Wissens oder in der Erweiterbarkeit um Unsicherheit und Unschärfe des Wissens (REIMER 1991, SHAFER und PEARL 1990). Im Idealfall beinhaltet die Repräsentationsform zugleich Vorschriften zur Interpretation, d.h. zur Nutzung des Wissens. Zur Steuerung der Interpretation können unterschiedliche Strategien eingesetzt werden. Grundsätzlich lassen sich die daten- und die modellgetriebene Vorgehensweise unterscheiden. In der Praxis finden sich meist Mischformen zwischen diesen beiden Prinzipien. Sie reichen von starren, rein prozeduralen Abläufen, in denen die einzelnen Teilaufgaben in einer vorab festgelegten Reihenfolge abgearbeitet werden, bis hin zu sogenannten Blackboard-Systemen, in denen einzelne autonome Module in Abhängigkeit von ihrem Wissensstand entscheiden, ob und was sie zur Interpretation beitragen können (HAYES-ROTH 1985, NIEMANN 1985).

Als Ergebnis der Interpretation soll der Rechner eine für den Menschen bedeutungsvolle Beschreibung der Objekte der abgebildeten Szene, d.h. eines Ausschnittes der realen Welt, liefern.¹ Auch wenn der Rechner dieses Ergebnis nicht auf die selbe Art und Weise erreicht wie ein Mensch, so wird doch häufig ein Bezug zwischen dem maschinellen Sehen und dem menschlichen Sehen

¹Nach (ROSENFELD und KAK 1976) lässt sich die Bildanalyse beschreiben als *Generierung einer expliziten, bedeutungsvollen Beschreibung für physikalische Objekte in einer, in einem oder in mehreren Bildern, zu einem Zeitpunkt bzw. in einem Zeitraum dargestellten Szene mit Hilfe von Computern.*

hergestellt. Die Kenntnis darüber, wie der Mensch seine Umgebung wahrnimmt bzw. „sieht“, d.h. visuelle Reize aufnimmt und verarbeitet, kann für viele Teilaufgaben aus der Bildanalyse nützliche Hinweise geben. Zum Beispiel erkennt man als Mensch Objekte zum Teil erst dann, wenn man sie nicht isoliert betrachtet sondern auch ihre Umgebung, d.h. ihren Kontext, sieht. Daraus folgt, dass der Mensch für die Objekterkennung sein Hintergrundwissen über die Zusammenhänge verschiedener Objekte nutzt. Die Berücksichtigung des Kontexts von Objekten erleichtert auch die automatische Erkennung von Objekten (STRAT 1992, STRAT 1995, STRAT und FISCHLER 1995). Unklar ist jedoch, wie viel Kontext erforderlich ist. Die Bildanalyse beinhaltet die Aufgabe, dem Rechner zumindest einen Teil dessen „beizubringen“, was für den Menschen selbstverständlich ist, nämlich das Erkennen der Objekte in seiner Umgebung und der Zusammenhänge zwischen diesen Objekten. Eine reine Nachbildung des menschlichen Sehens ist jedoch weder möglich noch sinnvoll. Zum einen ist dafür der Vorgang des menschlichen Sehens im Sinne von Erkennen noch viel zu wenig bekannt (KOSSLYN 1994), zum anderen weist das menschliche Auge als Sensor im Vergleich zu anderen Sensoren andere Charakteristika auf (SANDINI et al. 2000). Dies gilt z.B. hinsichtlich der geometrischen und radiometrischen Auflösung aber auch hinsichtlich der spektralen Empfindlichkeit.

Am erfolgreichsten sind Anwendungen der Bildanalyse in der Regel dann, wenn es um die Lösung relativ spezieller Aufgaben geht. Je klarer und einfacher sich ein Problem strukturieren lässt, desto eher kommt man mit automatischen Verfahren zum gewünschten Ergebnis. In den einfachsten Fällen wird die Erkennungsleistung allerdings mehr durch den Sensor bzw. die richtige Beleuchtung als durch die nachfolgende Bearbeitung ermöglicht (BÄSSMANN 1998).

Im folgenden Abschnitt werden einige Konzepte und Begriffe der Bildanalyse kurz erläutert. Grundlegende Methoden werden in Abschnitt 2.2 dargestellt. In Abschnitt 2.3 werden spezielle Verfahren erläutert, die in dieser Arbeit eine besondere Rolle spielen. Für eine ausführlichere Beschreibung weiterer Techniken wird auf die angegebene Literatur verwiesen.

2.1 Konzepte und Begriffe

2.1.1 Modellbildung und Wissensrepräsentation

Voraussetzung für die automatische Bildinterpretation ist eine adäquate Modellierung der Szene bzw. der Objekte. Ein umfassendes Modell für eine Szene sollte sowohl eine Beschreibung der Objekte der Szene als auch der Relationen zwischen den Objekten enthalten.

Die Modellierung einer Szene oder eines Objektes lässt sich in verschiedene Ebenen unterteilen. Ausgangspunkt ist eine Modellierung der realen Welt, d.h. eine allgemeingültige, für einen Menschen bedeutungsvolle Beschreibung der Szene, z.B. auf Grundlage von Objektamen. Die Modellierung muss aber auch im Hinblick auf das verwendete Bildmaterial und damit auf die verwendeten Sensoren erfolgen. Um die Brauchbarkeit der Ergebnisse des Bildanalyseprozesses zu gewährleisten, muss die Modellierung der zu beschreibenden Szene außerdem die Zielsetzung der jeweiligen Anwendung berücksichtigen.

Zusätzlich zu den Ebenen „reale Welt“ und „Bild“ ist eine Modellierung auf der „Geometrie-/Material-“ Ebene nützlich (CLÉMENT et al. 1993, SANDAKLY und GIRAUDON 1994, TÖNJES 1997). Man kann diese Ebene auch als Subebene der realen Welt betrachten. Über sie lassen sich Form- und Oberflächeneigenschaften eines realen Objektes unabhängig von Sensoreigenschaften und Blickrichtung mit den Merkmalen auf der Bildebene verknüpfen, auch wenn diese weiter untergliedert ist: Sie kann zum Beispiel im Fall der Fusion, Daten unterschiedlicher Sensoren umfassen.

Zusätzlich zu der skizzierten Unterteilung des Objektmodells in verschiedene Ebenen lässt sich das Modell hinsichtlich des Maßstabs strukturieren. Mit einer maßstabsabhängigen Modellierung kann der Tatsache Rechnung getragen werden, dass in Bildern unterschiedlicher Auflösung, d.h.

unterschiedlicher Pixelgröße im Objektraum, die Charakteristika eines Objektes unterschiedlich stark hervortreten (siehe Kapitel 4).

Für die Darstellung von Wissen unterscheidet BRACHMAN (1979) fünf aufeinander aufbauende Wissens Ebenen: Auf der obersten Wissens Ebene erfolgt die Beschreibung natürlichsprachlich (*linguistische Wissens Ebene*). Darunter liegt die *konzeptuelle Wissens Ebene*. Auf dieser Ebene werden grundlegende Repräsentationsformalismen genutzt. Die Darstellung ist jedoch an den jeweiligen Anwendungsbereich angepasst. Als nächste Ebene folgt die *epistemologische Wissens Ebene*. Auf dieser Ebene sind die Repräsentationsformen eingeschränkt. Die Darstellung ist anwendungsunabhängig. Darunter liegen die *Logikebene* und die *Implementierungsebene*, in denen die Darstellung von Wissen noch stärker formalisiert ist. Die Darstellung des Modellwissens auf der *konzeptuellen Wissens Ebene* hat den Vorteil, dass sie einerseits eine Formalisierung erzwingt, andererseits aber eine problemnahe Repräsentation erlaubt.

Da die Objektbildung ein wesentliches Grundelement der Bildanalyse ist, bieten sich für die Wissensrepräsentation (REIMER 1991) vor allem objektzentrierte Schemata wie semantische Netze oder Frames an. Logik und regelbasierte Systeme kommen grundsätzlich auch in Frage, erschweren aber bei komplexen Zusammenhängen oder bei der Repräsentation von Spezialfällen den Überblick über die Teile des Objektmodells (MCKEOWN et al. 1989). Zur Veranschaulichung von Zusammenhängen zwischen modellierten Objekten eignen sich semantische Netze besonders gut. In semantischen Netzen werden Konzepte auf Knoten und Relationen auf Kanten abgebildet. Um automatische Schlussfolgerungen zu erleichtern, werden in der Regel nur wenige Relationen verwendet. Am gebräuchlichsten sind die *Teil-von-* und die *Spezialisierungs-*Relation (BRACHMAN 1977, BRACHMAN 1979).

Ein generelles Problem aller Repräsentationsformen ist die Handhabung von Unsicherheit oder unscharfer Beschreibung. Unsichere Aussagen über ein Objekt können entweder durch Unsicherheit der extrahierten Bildmerkmale oder durch eine generalisierende und damit auch unschärfere Beschreibung der Objekte verursacht werden. Eine gute Übersicht über die Vielzahl theoretisch fundierter Methoden für die Verarbeitung einzelner mit Unsicherheit behafteter Aussagen ist in (SHAFER und PEARL 1990) zu finden. Insbesondere die Fuzzy-Logic (ZADEH 1989) ist hier zu nennen, da mit ihr Unsicherheiten in der Parametrisierung von Objekten oder Objektteilen relativ einfach und effizient gehandhabt werden können.

2.1.2 Ebenenmodell der Bildanalyse

Das Vorgehen der Bildanalyse wird häufig in Form eines Ebenenmodells (siehe Abbildung 2.1) beschrieben (SOMMER 1992, MARR 1982). Nach der Bilderzeugung folgt als nächste Ebene die Bildvorverarbeitung („low level“). Mit der Merkmalsextraktion, d.h. der Segmentierung auf der mittleren Ebene erfolgt der Übergang zu einer symbolischen Beschreibung des Bildinhalts („mid level“). Die Zuordnung der Bildmerkmale zu Objekten und Objektteilen findet erst auf der oberen Ebene statt („high level“). Grundlegend lassen sich modell- und datengetriebene Interpretationsstrategien unterscheiden. Auf diese wird im folgenden Abschnitt näher eingegangen.

2.1.3 Steuerung der Bildinterpretation

Bei der Steuerung des Analyseprozesses werden meist drei grundlegende Strategien unterschieden:

- In rein *datengetriebenen* Ansätzen werden die aus den Bildern extrahierten Merkmale sukzessive zu höherwertigen Strukturen und schließlich zu Objektteilen und Objekten aggregiert. Eine rein datengetriebene Vorgehensweise setzt voraus, dass bei den Zwischenschritten alle Informationen erzeugt werden, die für die gesuchte symbolische Beschreibung der Szene erforderlich sind.

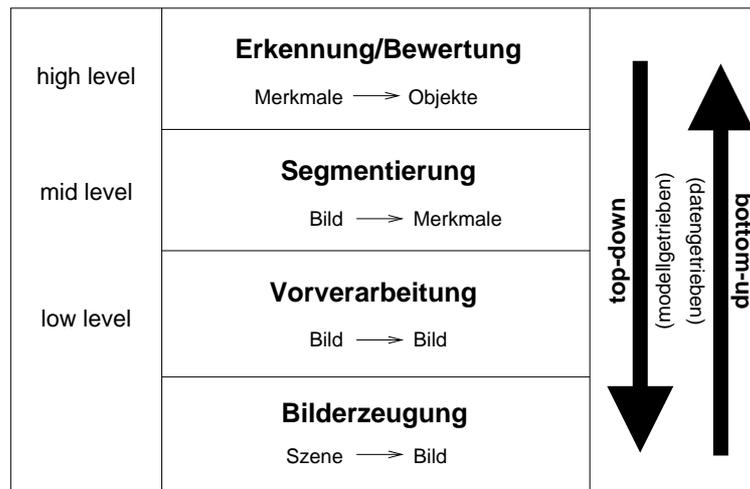


Abbildung 2.1. Ebenenmodell der Bildanalyse

- Das direkte Gegenstück bilden die rein *modellgetriebenen* Ansätze. Hierbei werden ausgehend von einem Objekt- oder Szenenmodell Hypothesen generiert. Zur Verifikation dieser Hypothesen wird im Bild nach Merkmalen gesucht, die einzelnen Modellkomponenten zugeordnet werden können. D.h. auf Grund von a priori Annahmen wird gezielt nach Evidenz für spezielle Instanzen eines Objektes gesucht. Der Vorteil besteht darin, dass der Suchraum gezielt eingeschränkt werden kann.
- Die dritte Gruppe bilden *hybride* Vorgehensweisen, die daten- und modellgetriebene Vorgehensweise vereinigen. Diese sind für komplexe Szenen oft unumgänglich, um ein sinnvolles Ergebnis zu erhalten. Ausgehend von den Ergebnissen einer anfänglichen Segmentierung und dem Aufbau einfacher Strukturen und Relationen werden Hypothesen für neue Objekte oder Objektteile generiert, die dann anschließend durch eine erneute Segmentierung in einem eingeschränkten Suchraum und/oder durch Überprüfung der Konsistenz mit anderen Hypothesen verifiziert werden.

HARALICK und SHAPIRO (1992b) spezialisieren die hybride Strategie zu einer heterarchischen Strategie, in der auf Grund der vorhandenen Daten entschieden wird, wann und in welcher Reihenfolge die unterschiedlichen Prozesse, d.h. Segmentierung, Hypothesenbildung und Verifikation, ablaufen. Hierbei ist zum Teil die Planung des weiteren Vorgehens wichtiger als das Vorgehen selbst. Das Wissen ist auf einzelne miteinander kommunizierende Prozeduren verteilt, die jeweils Experten für spezielle Aufgaben sind. In sogenannten *Blackboard*-Systemen findet diese Kommunikation über eine gemeinsame Datenbasis statt. Der Zugang zu dieser Datenbasis wird über einen *Blackboard Scheduler* geregelt. Ein *Blackboard*-System ist vergleichbar mit einem Zimmer, in dem sich eine Tafel (*Blackboard*), ein Moderator (*Blackboard Scheduler*) und viele Experten befinden, die sich nicht direkt unterhalten, sondern nur über die Tafel kommunizieren können. Aus den Informationen, die an der Tafel stehen, leiten einzelne Experten neue Erkenntnisse ab und teilen ihre Erkenntnisse den anderen mit, indem sie diese an die Tafel schreiben. Der Moderator steuert den Zugang zur Tafel.

Hypothesenbildung und Verifikation ist ein Grundprinzip, das allen Interpretationsstrategien zu Grunde liegt — sofern man im Falle der rein datengetriebenen Vorgehensweise die datengetriebene Instanziierung als Hypothesenbildung und die Bewertung der einzelnen Instanzen als Verifikation betrachtet. Die Art und Weise, wie dieser Prozess der Hypothesenbildung und Verifikation gesteuert wird, ist ein weiterer wichtiger Aspekt beim Entwurf eines Bildanalyse-Systems. Im Laufe der Interpretation eines Bildes werden in der Regel sehr viele Hypothesen aufgestellt und verifiziert

oder falsifiziert. Im Hinblick auf das Ziel, effizient eine konsistente symbolische Beschreibung der Szene zu generieren, sind nicht alle Hypothesen gleich bedeutend. Der Ablaufsteuerung kommt die Aufgabe zu, das Vorgehen so zu lenken, dass der für das Erreichen des Ziels erforderliche Aufwand minimiert wird. Das heißt zum Beispiel, dass eine vollständige Abarbeitung des gesamten Suchraums vermieden werden soll. Zugleich sollen die wichtigsten und wahrscheinlichsten Hypothesen möglichst am Anfang aufgestellt und verifiziert werden. Für die Entscheidung, welcher Schritt als nächster durchgeführt werden soll, ist eine Bewertung der vorliegenden Szenenbeschreibung und der möglichen neuen Hypothesen erforderlich. Die Interpretation wird beendet, wenn der komplette Suchraum abgearbeitet wurde, eine Lösung gefunden wurde, oder ein vorher definiertes Abbruchkriterium eingetreten ist. Dies ist der Fall, wenn entweder die gefundene Szenenbeschreibung ausreichend gut ist oder die Bewertung der verbleibenden Hypothesen zu wenig erfolgversprechend ist. Eine Zusammenstellung von Suchverfahren und von Möglichkeiten, den Suchraum einzuschränken, und dennoch ein nahezu optimales Ergebnis zu erhalten, wird z.B. in (GRIMSON 1990, GINSBERG 1993) gegeben. Während für die Ableitung von geeigneten Bewertungskriterien letztlich nur auf anwendungsabhängiges Wissen zurückgegriffen werden kann, stehen für die Kombination und Weiterverarbeitung der Unsicherheiten theoretisch fundierte Methoden zur Verfügung (SHAFER und PEARL 1990).

2.1.4 Maßstabsraum

Objekte der realen Welt haben die Eigenschaft, dass sie als bedeutungsvolle Einheiten der Betrachtung nur über gewisse Maßstabsbereiche existieren. So ist z.B. eine Betrachtung des Konzeptes *Ast* nur im Bereich von wenigen Zentimetern bis hin zu mehreren Metern sinnvoll. Auf der Ebene von Kilometern oder Nanometern ist es dagegen angebrachter, die Eigenschaften eines Waldes oder einzelner Moleküle zu betrachten.

Die Notwendigkeit, bei Betrachtung und Darstellung eines Objektes einen geeigneten Maßstab zu wählen, ist hinreichend bekannt und der Maßstab wird — sei es intuitiv oder aus Erfahrung — dem jeweiligen Problem angepasst. Sobald für die Modellierung jedoch dimensionslose mathematische Konzepte verwendet werden, wird es erforderlich, anzugeben, für welchen Maßstab diese Modellierung gilt. Das Maßstabsproblem tritt vor allem bei der Detektion von *Punkt-* oder *Linien-* Merkmalen in Bildern auf. Erst durch Information über Auflösung und Signal-/Rauschverhältnis wird die Auswahl eines geeigneten Operators und seiner Parameter möglich. Daraus, dass zu extrahierende Objekte sich in mehreren Maßstäben ausprägen, oder weil ein Objekt einen anderen Maßstab besitzt als die vorliegenden Daten, ergibt sich die Notwendigkeit, Bilddaten in mehreren Maßstäben zu repräsentieren. Einen soliden theoretischen Unterbau für die Repräsentation und Handhabung mehrerer Maßstäbe stellen KOENDERINK (1984) und LINDBERG (1994) dar. Diese Arbeiten beschreiben die Maßstabsproblematik aus der Sicht der Signal- und Bildverarbeitung und befassen sich vor allem mit dem linearen Maßstabsraum. Innerhalb des Maßstabsraumes erfolgt die Beschreibung durch den jeweiligen Maßstabsparameter. Im linearen Maßstabsraum gibt der Maßstabsparameter den Grad der Glättung des Ausgangsbildes mit einem Gauß'schen Kern $g_\sigma(x, y)$ an.

$$g_\sigma(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (2.1)$$

Abbildung 2.2 zeigt einen Ausschnitt eines Luftbildes für unterschiedliche Maßstabsparameter des linearen Maßstabsraumes. Weitere für die Bildanalyse relevante Maßstabsräume sind der morphologische Maßstabsraum (SERRA 1982, KÖTHE 1996) und der Reaktions-Diffusionsraum (KIMIA et al. 1995).

Die Änderungen des Informationsgehaltes eines Bildes innerhalb eines Maßstabsraumes, wie z.B. Wegfall von Punkten und Linien infolge der Vergrößerung des Maßstabsparameters, werden als

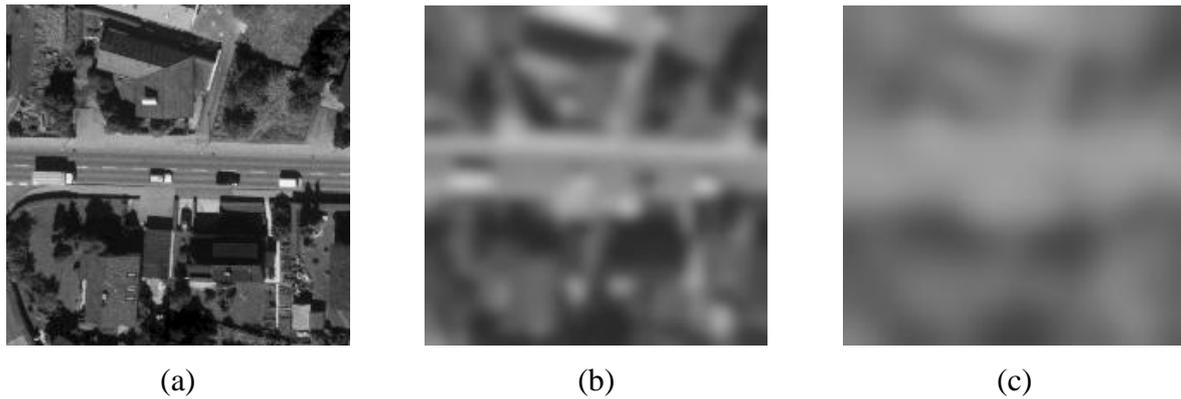


Abbildung 2.2. (a) Bild, Pixelgröße 0,6 m (b) Glättung mit $\sigma = 2,4$ m (c) Glättung mit $\sigma = 5,4$ m

Maßstabsraumereignisse bezeichnet (MAYER 1998, MAYER und STEGER 1998). Im Hinblick auf die Objektextraktion können diese Ereignisse dahingehend interpretiert werden, dass Detailinformation eliminiert und eine Generalisierung erreicht wird. Konkret bedeutet dies z.B. für die topographischen Objekte Gebäude oder Straße, dass die in höheren Auflösungen erkennbaren Substrukturen, wie z.B. einzelne Dachziegel oder Fahrbahnmarkierungen, durch die Vergrößerung des Maßstabsparameters eliminiert werden können, oder dass z.B. die zwei Richtungsfahrbahnen einer Autobahn mit dem Mittelstreifen zu einem Objekt Autobahn zusammengefasst werden können.

2.2 Methoden

2.2.1 Segmentierung und Merkmalsextraktion

Unter Segmentierung versteht man die Unterteilung eines Bildes in sich nicht überlappende Regionen mit bestimmten einheitlichen Eigenschaften, deren Vereinigungsmenge die gesamte Bildregion umfasst. Bei der Merkmalsextraktion ist das Ziel nicht die lückenlose Klassifikation des gesamten Bildes. Es wird vielmehr nach interessanten Merkmalen im Bild gesucht, die für die weitere Verarbeitung nützlich sind.

Mit Verfahren zur Extraktion von Bildmerkmalen und zur Segmentierung ist die Bildverarbeitung die Grundlage der Bildanalyse. Als Bildmerkmale oder Bildprimitive werden hier Merkmale und Strukturen bezeichnet, für deren Detektion problemspezifisches Wissen nicht oder zumindest nur in sehr geringem Umfang verwendet wird. Bildprimitive lassen sich in Punkte, lineare Strukturen, d.h. Kanten und Linien, sowie Flächen einteilen. Im Allgemeinen ist für die Extraktion eines dieser Bildprimitive eine Kombination mehrerer Bildverarbeitungsschritte erforderlich. Ohne auf Details einzugehen, seien hier exemplarisch geeignete Operatoren und Verfahren für die Extraktion dieser drei Klassen von Bildprimitiven genannt:

- Punkte: Förstner-, Moravec-, oder Harris-Operator (FÖRSTNER und GÜLCH 1987, MORAVEC 1979, HARRIS und STEPHENS 1988)
- lineare Strukturen:
 - Kanten: Canny-, Canny/Deriche-, Lanser-Operator (CANNY 1986, DERICHE 1987, LANSEK und ECKSTEIN 1992)
 - Linien: Steger-Operator (STEGER 1998a, STEGER 1998b)
- Flächen: Schwellwertbildung, Bereichswachstum, Texturanalyse, etc. Details sind z.B. in (JÄHNE 1997, HABERÄCKER 1995, HARALICK und SHAPIRO 1992a) zu finden.

Das Verfahren von STEGER (1998a) für die Linienextraktion und das texturbasierte Segmentierungsverfahren nach LAWS (1980) werden aufgrund ihrer Bedeutung für den in dieser Arbeit verfolgten Ansatz zur Straßenextraktion in Abschnitt 2.3 genauer beschrieben.

Verfahren zur Extraktion von Kanten und Linien liefern als Ergebnis in der Regel Konturen, die als Polygone mit Punktabständen von einem Pixel repräsentiert werden. Um die nachfolgenden Verarbeitungsschritte zu vereinfachen und zu beschleunigen, ist es häufig wünschenswert, die Datenmenge zu reduzieren. Vor der weiteren Verwendung in Bildanalyseprozessen werden die Konturen von Linien und Kanten daher durch Polygone mit größeren Punktabständen approximiert. Solche Approximationsverfahren wurden z.B. von RAMER (1972), RAY und RAY (1993) oder SATO (1992) vorgestellt. Die Auswahl der neuen Polygonpunkte erfolgt je nach Wahl des Approximationsverfahrens und Festlegung der zugehörigen Parameter nach unterschiedlichen Kriterien. Die resultierenden Approximationen unterscheiden sich jedoch meist nur geringfügig. Welches Verfahren am geeignetsten ist, hängt von der Form der Konturen und den nachfolgenden Bearbeitungsschritten ab. In dieser Arbeit wird das Verfahren von (RAMER 1972) verwendet, mit dem empirisch gute Erfahrungen gemacht wurden. Bei diesem Verfahren wird gefordert, dass kein Punkt der ursprünglichen Kontur von dem resultierenden Polygon weiter als ein vom Benutzer zu definierender Abstand d entfernt ist. Anfangs- und Endpunkt der Kontur werden als Anfangs- und Endpunkt des approximierten Polygons übernommen. Anschließend wird geprüft, welcher Konturpunkt den größten Abstand von der Verbindungsgerade zwischen Anfangs- und Endpunkt hat. Falls der Abstand in diesem Konturpunkt größer als der Abstand d ist, wird an dieser Stelle ein Zwischenpunkt eingefügt. Für die beiden so entstehenden neuen Polygonsegmente werden ebenfalls wieder die Punkte mit den maximalen Abständen gesucht, und gegebenenfalls Zwischenpunkte eingefügt. Sobald für alle Polygonsegmente das Abstandskriterium erfüllt ist, wird das resultierende Polygon rekursiv aus den entstandenen Polygonsegmenten aufgebaut.

2.2.2 Gruppierung

Im Zusammenhang mit der Bildanalyse versteht man unter Gruppierung die Suche nach zusammengehörigen Bildprimitiven oder Objektteilen. Die Gruppierung dient der Aggregation einfacher Strukturen zu höherwertigen, semantisch bedeutungsvolleren Strukturen, und erleichtert dadurch die Erkennung und die Bewertung von Objekten. Zur Entscheidung, welche Teile zusammengehören und zusammengefasst werden sollen, werden Kriterien verwendet, die aus der Gestaltpsychologie schon seit langem bekannt sind (WERTHEIMER 1923). Als Kriterien können sowohl Ähnlichkeiten der Eigenschaften der Teile, wie z.B. Farbe, Größe oder Form, als auch Relationen zwischen den Teilen herangezogen werden. Beispiele für solche Relationen sind Symmetrie, Parallelität, Kontinuität oder Nähe. Eine allgemein gültige Aussage zur Auswahl der Kriterien ist auch nach fast einem Jahrhundert Forschung in der Gestaltpsychologie nicht möglich. Welche Kriterien am sinnvollsten sind, hängt stets von der Art der vorliegenden Bildprimitive und der jeweiligen Aufgabenstellung ab. Allgemein lässt sich jedoch feststellen, dass die Kombination mehrerer unterschiedlicher Kriterien, die Zuverlässigkeit der Gruppierungsergebnisse deutlich verbessert. Ein gutes Beispiel hierfür ist die Arbeit von HENRICSSON (1998), in der zusätzlich zu geometrischen Gruppierungskriterien noch radiometrische Kriterien verwendet werden.

Die Gruppierungskriterien der Gestaltpsychologie können sowohl auf gleichartige Bildprimitive, wie z.B. Kanten, Parallelen, U-Strukturen, etc. in (MOHAN und NEVATIA 1989, MOHAN und NEVATIA 1992), als auch auf unterschiedliche Bildprimitive, wie z.B. Punkte und Kanten, angewendet werden, z.B. (LITTMANN et al. 1996). Gruppierungsverfahren, die zur automatischen Objekterkennung verwendet werden, lassen sich auf Grund meist sehr unterschiedlicher Anforderungen nur schwer vergleichen. SARKAR und BOYER (1993) schlagen zur Systematisierung von Gruppierungsverfahren eine Unterteilung der Gruppierung in unterschiedliche Ebenen vor. Diese Ebenen unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Komplexität der zu gruppierenden Teilstrukturen. Eine Bewertung von

Gruppierungsmodulen, wie sie in (BORRA und SARKAR 1997) vorgestellt wird, ist dann hilfreich, wenn mehrere gleichartige Module zur Verfügung stehen. Allerdings ist anzumerken, dass eine allgemein gültige Aussage über die Qualität der Ergebnisse eines Gruppierungsmoduls kaum möglich ist: eine solche Bewertung kann streng genommen nur für eine spezifische Aufgabenstellung gelten.

2.3 Verfahren

In diesem Abschnitt werden einzelne spezielle Verfahren und Techniken dargestellt, die in Kapitel 5 für die Straßenextraktion genutzt werden.

2.3.1 Laws-Filter

LAWS (1980) schlägt 2D-Filtermasken zur Bestimmung der so genannten „Texturenergie“ vor, die durch Vektorkombinationen aus 1D-Filtermasken generiert werden. Ausgangspunkt für die 1D-Filtermasken ist die Gauß-Kurve. Die weiteren 1D-Filtermasken entsprechen der ersten, zweiten, dritten, etc. Ableitung der Gauß-Kurve. Je nach Größe der 1D-Masken entstehen durch die Kombination 3x3, 5x5, 7x7, usw. 2D-Masken. Ausgangspunkt für 5x5-Masken sind z.B. folgende Vektoren:

$$\begin{array}{l} L \quad \left[\begin{array}{ccccc} 1 & 2 & 4 & 2 & 1 \end{array} \right] \quad E \quad \left[\begin{array}{ccccc} 1 & 2 & 0 & -2 & -1 \end{array} \right] \quad S \quad \left[\begin{array}{ccccc} -1 & 0 & 2 & 0 & -1 \end{array} \right] \\ W \quad \left[\begin{array}{ccccc} -1 & 2 & 0 & -2 & 1 \end{array} \right] \quad \dots \end{array}$$

Daraus können z.B. die 5x5-Masken

$$EE \quad \left[\begin{array}{ccccc} 1 & 2 & 0 & -2 & -1 \\ 2 & 4 & 0 & -4 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & -4 & 0 & 4 & 2 \\ -1 & -2 & 0 & 2 & 1 \end{array} \right] \quad \text{oder} \quad LE \quad \left[\begin{array}{ccccc} 1 & 2 & 4 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 8 & 4 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & -4 & -8 & -4 & -2 \\ -1 & -2 & -4 & -2 & -1 \end{array} \right]$$

generiert werden.

Zur Textursegmentierung werden zunächst für mehrere dieser Laws-Filter so genannte „Energie-Bilder“ berechnet. Anschließend werden diese Energie-Bilder zu einem Mehrkanalbild zusammengefügt, das als Grundlage für eine Klassifikation dient.

2.3.2 Steger-Linienoperator

Gegenüber anderen Verfahren zur Linienextraktion hat der Steger-Linienoperator (STEGER 1998a, STEGER 1998b) mehrere Vorteile: Er kann für Linien unterschiedlicher Breite und auch für verschiedene Arten von Linien, wie z.B. helle und dunkle Linien mit balkenförmigem oder parabolischem Profil, eingesetzt werden. Er ist in der Lage eine Verschiebung der Linienposition, die durch unterschiedliche Kontraste auf beiden Seiten der Linie verursacht wird, zu kompensieren. Die Linienposition kann subpixel-genau bestimmt werden und die Topologie von Linien wird besonders gut erhalten. Aus diesen Gründen wird der Steger-Linienoperator in dieser Arbeit eingesetzt, um aus Luftbildern mit einer Bodenpixelgröße von ca. 2 m Linien zu extrahieren, die als anfängliche Hypothesen für Straßenachsen dienen (siehe Kapitel 5).

Die theoretische Herleitung des Steger-Linienoperators geht von einem balkenförmigen eindimensionalen Linienprofil aus. In Luftbildern tritt ein solches Profil z.B. bei Flüssen und Straßen häufig auf. Voraussetzung für die Detektion dieser Linien ist die Faltung mit einem Gauß-Filter. Um

Linienpunkte zu finden, genügt es zunächst, Punkte zu bestimmen, in denen die erste Ableitung $g_{c,\sigma}$ des Profils verschwindet. Da man im Normalfall nur an auffälligen Linien interessiert ist, wird als zweites Kriterium die Krümmung, d.h., der Wert der zweiten Ableitung $g_{cc,\sigma}$, des Gauß-geglätteten Profils herangezogen. Der Wert der zweiten Ableitung soll betragsmäßig möglichst groß sein. Für helle Linien auf dunklem Hintergrund ist $g_{cc,\sigma} \ll 0$, für dunkle Linien auf hellem Hintergrund ist $g_{cc,\sigma} \gg 0$.

Für die Extraktion von Linien in zwei Dimensionen werden Linien als Kurven $s(t)$ modelliert, die ein balkenförmiges Profil senkrecht zur Richtung der Linie $n(t)$ aufweisen. Wie im eindimensionalen Fall verschwindet für die Linie die erste Ableitung in Richtung $n(t)$, während die zweite Ableitung einen großen Absolutwert aufweist. In Richtung der Linie sollte die Krümmung, d.h., der Absolutwert der zweiten Ableitung, dagegen niedrig sein. Zur Berechnung der Linienstärke und -richtung werden in jedem Bildpunkt die partiellen Ableitungen $g_{r,\sigma}$, $g_{c,\sigma}$, $g_{rr,\sigma}$, $g_{rc,\sigma}$ und $g_{cc,\sigma}$ des Gauß-gefilterten Bildes in Zeilen- (row, r) und Spaltenrichtung (column, c) bestimmt. Die Linienrichtung ergibt sich aus dem Eigenvektor des maximalen Eigenwertes der Hesse-Matrix

$$H(r, c) = \begin{pmatrix} g_{rr,\sigma} & g_{rc,\sigma} \\ g_{rc,\sigma} & g_{cc,\sigma} \end{pmatrix}. \quad (2.2)$$

Nach der Unterdrückung lokaler Maxima werden die Linien mittels Hysterese-Schwellwertbildung verfolgt.

2.3.3 Snakes

Der Begriff „Snake“ oder „aktives Konturmodell“ wurde von KASS et al. (1988) eingeführt. Snakes sind Konturen $\vec{v}(s, t) = (x(s, t), y(s, t))$; $0 \leq s \leq 1$, deren geometrischer Verlauf unter dem Einfluss von inneren und äußeren Kräften mittels Energieminimierung optimiert wird. Die inneren Kräfte ergeben sich aus den geometrischen Bedingungen, welche die Kontur erfüllen muss, z.B. aus der Forderung nach einem glatten Verlauf. Hierbei wird oft gefordert, dass die erste Ableitung, d.h. die Spannung, und die zweite Ableitung, d.h. die Krümmung, der Kontur klein sind. Dies führt zu einer möglichst direkten Verbindung der Endpunkte unter Vermeidung von Knicken. Äußere Kräfte hängen von der Umgebung ab, in der sich die Kontur befindet. So wird z.B. oft gefordert, dass die Kontur durch benachbarte Bildmerkmale, wie Kanten, angezogen oder abgestoßen wird. Aus den inneren und äußeren Kräften, die auf die Kontur wirken, werden „Energien“ berechnet:

$$E(\vec{v}) = E_{ext}(\vec{v}) + E_{int}(\vec{v}). \quad (2.3)$$

Die Bestimmung der optimalen Position der Kontur wird als Problem der Minimierung der Summe der beiden Energien betrachtet und erfolgt – ausgehend von einer vorgegebenen Näherungsposition – iterativ (siehe Abbildung 2.3). Wirken neben den aus Bildmerkmalen abgeleiteten Kräften keine weiteren äußeren Kräfte, so wird anstelle des Begriffs „äußere“ Energie oft der Begriff „Bildenergie“ verwendet.

Das den Snakes zu Grunde liegende Prinzip hat den Vorteil, dass Bildinformation und geometrische Zwänge nach einer klaren mathematischen Vorschrift kombiniert werden. Dieser Vorteil kommt zum Beispiel dann zum Tragen, wenn die aus dem Bild gewinnbare Kanteninformation sehr fragmentiert ist. In diesem Fall wirken die Kantenfragmente als gesicherte Stützstellen, und die geometrischen Bedingungen bewirken einen bestmöglichen Verlauf der Kurve zwischen diesen Stützstellen. Diese Eigenschaften von Snakes motivieren ihre Verwendung für die Extraktion von Straßen.

Probleme können sich bei der Anwendung von Snakes durch „lokale“ Energieminima ergeben. Abbildung 2.4 verdeutlicht dieses Problem am Beispiel einer ungenauen Initialisierung einer Snake.

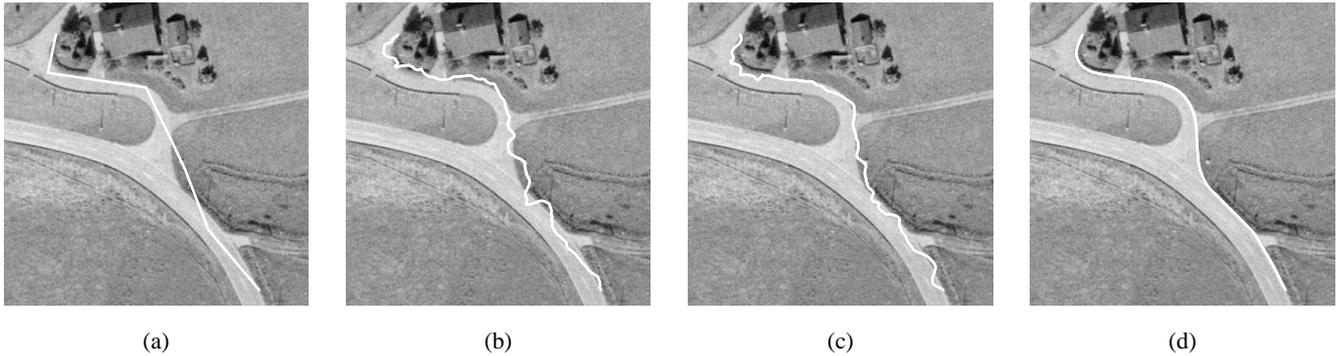


Abbildung 2.3. Anpassung einer Snake an eine Bildkante unter Mitwirkung der ersten Ableitung (Spannung) und zweiten Ableitung (Krümmung) der Kurve. (a) Anfangsposition (b)/(c) Zwischenschritte (d) Endgültige Lösung

Dadurch, dass die Position der Snake an allen Punkten gleichzeitig optimiert wird, kann die Snake im mittleren Teil nicht von der gewünschten Straßenseite angezogen werden. Abhilfe schafft hier eine Optimierung der Position von den beiden als richtig angenommenen Endpunkten aus. Dazu wird die Snake in aktive und passive Teile (Knoten) zerlegt (siehe Abbildung 2.5). Die Optimierung erfolgt jeweils nur für die aktiven Teile. Auf die passiven Teile wirkt zunächst nur die innere Energie. Erst durch die iterative Verschiebung der Ausbreitungsgrenzen der aktiven Teile nach innen erfolgt auch für den mittleren Teil der Snake eine Anpassung an die Bildinformation. Da die so modifizierte Snake ähnlich wie ein Reißverschluss an die Kante herangezogen wird, wird diese Snake-Variante auch als „Zip-lock-Snake“ bezeichnet (NEUENSCHWANDER et al. 1995). Die Vorteile dieser Vorgehensweise im Vergleich zu Abbildung 2.4 sind in Abbildung 2.6 zu erkennen.

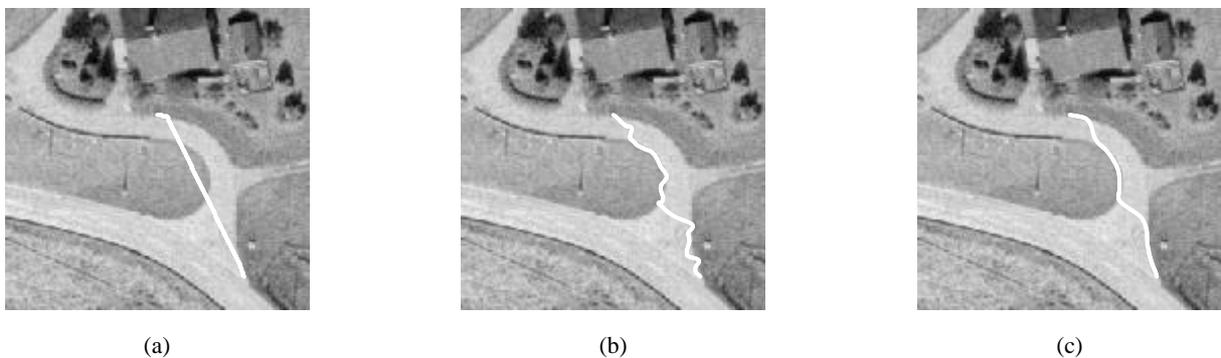


Abbildung 2.4. Probleme durch „lokale“ Energieminima: (a) Anfangsposition (b) Zwischenschritt (c) Endgültige Lösung

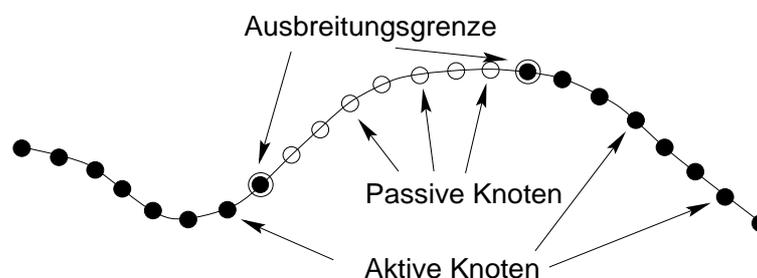


Abbildung 2.5. Prinzip einer „Zip-lock-Snake“: Zerlegung in aktive und passive Teile. Die Optimierung erfolgt von außen nach innen

Zu dem von KASS et al. (1988) vorgestellten Prinzip der aktiven Kontur gibt es zahlreiche Erweiterungen und Adaptionen. Exemplarisch für die Anwendung auf Konturen in Stereobildern sei

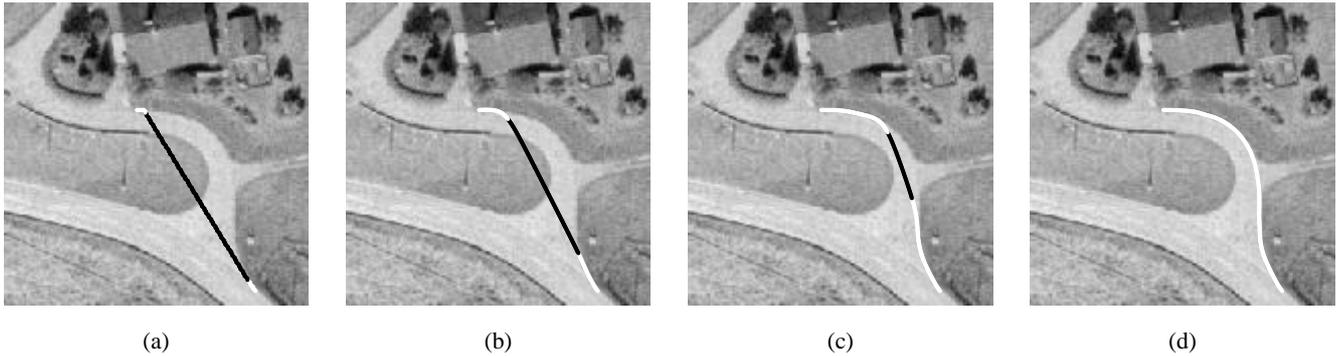


Abbildung 2.6. Überwindung lokaler Energieminima (siehe Abbildung 2.4) durch „Zip-lock-Snake“. (a) Anfangsposition (b)(c) Zwischenschritte (d) Endgültige Lösung

(CHAM und CIPOLLA 1997) genannt. Eine andere Erweiterung betrifft die Koppelung von zwei oder mehr Konturen innerhalb eines Bildes. Hierbei wird die Position der Punkte entlang einer Kontur nicht nur von der Bildinformation in der unmittelbaren Umgebung sondern auch von der Bildinformation in der Umgebung der anderen Konturen beeinflusst. Für die vorliegende Arbeit ist diese Erweiterung von besonderer Bedeutung, weil hiermit die Parallelität von Straßenrändern als wichtiges Merkmal für die Straßenextraktion genutzt werden kann. Im Unterschied zur gewöhnlichen Snake wird die so genannte „Ribbon-Snake“ (Ribbon = Band) durch ihre Achse und durch die Breite an jedem Punkt der Achse repräsentiert (siehe Abbildung 2.7). Die Parametrisierung erfolgt über die Mittelachse des Bandes, wobei jedem Achspunkt ein eigener Breitenwert zugeordnet wird ($\vec{v}(s, t) = (x(s, t), y(s, t), w(s, t))$). Die Bildenergie für jeden Achspunkt ergibt sich aus den Gradienten an den beiden zugehörigen linken und rechten Randpunkten \vec{v}_L und \vec{v}_R . Details zu dieser Snake auf Basis von Bändern sind in (LAPTEV 1997, MAYER et al. 1998, LAPTEV et al. 2000) zu finden. Der Vorteil gegenüber einer Repräsentation mit zwei unabhängig voneinander zu optimierenden Snakes, wie z.B. in (KERSCHNER 1998), besteht darin, dass keine Überprüfung der Zuordnung von Punkten entlang der beiden, näherungsweise parallelen Kurven erforderlich wird.

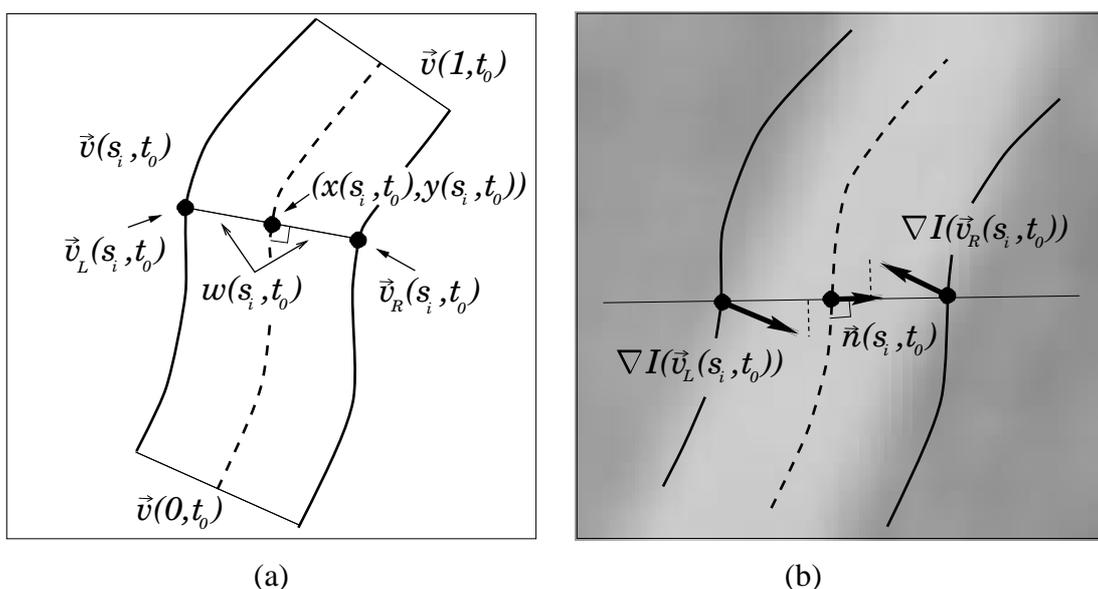


Abbildung 2.7. Ribbon-Snake. (a) Modellierung über Mitte (x, y) und Breite w_i (b) Berechnung der Gradienten (∇I) im Bild an den Rändern \vec{v}_L und \vec{v}_R

2.3.4 Netzanalyse mittels Graphen

Graphen eignen sich sehr gut für die Repräsentation von Straßennetzen. Ein Graph besteht aus einer Menge von Knoten (Vertex, V) und einer Menge von Kanten (Edge, E). Die Kanten entsprechen Verbindungen zwischen Paaren von Knoten. Kreuzungen werden hierbei als Knoten und Straßen als Kanten modelliert. Ist mit der Zuordnung von Kanten zu Knotenpaaren keine feste Reihenfolge der beiden Knoten verbunden, so spricht man von einem ungerichteten Graphen. Als Grad eines Knotens v bezeichnet man die Anzahl der Knoten, mit denen v direkt über eine Kante verbunden ist.

Für Graphen existieren zahlreiche Verfahren, die auch für die Analyse und Verbesserung von Straßennetzen nützlich sind. Z.B. kann die Suche nach dem kürzesten Pfad zwischen zwei Punkten in einem Straßennetz sehr effizient mit dem Verfahren von Dijkstra (DIJKSTRA 1959) erfolgen. Voraussetzung hierfür ist, dass das Straßennetz mit seinen Kreuzungen und Verbindungsstraßen zwischen den Kreuzungen in Form eines gewichteten Graphen repräsentiert wird. Darüber hinaus erleichtern Graphen Untersuchungen der Topologie eines Straßennetzes und können z.B. auch für die Generalisierung eines Straßennetzes genutzt werden (MACKANESS und MACKECHNIE 1997, MORISSET und RUAS 1997).

3. Bisherige Arbeiten

Forschungsarbeiten zur automatischen Extraktion von Straßen aus Luft- und Satellitenbildern gibt es seit den siebziger Jahren (BAJCSY und TAVAKOLI 1976, QUAM 1978, NEVATIA und BABU 1980). Am Anfang standen vor allem niedrig aufgelöste digitale Satellitenbilder zur Verfügung, in denen sich auch breite Straßen lediglich als lineare, wenige Pixel breite Strukturen abbilden. Mit zunehmender Verfügbarkeit digitaler Luftbilder mittlerer und hoher Auflösung spielen die Flächenhaftigkeit von Straßen und ihre Detailstrukturen, wie z.B. Fahrspuren und Markierungen, sowie ihre Relationen zu anderen Objekten eine immer größere Rolle für ihre Extraktion. Zielsetzung der neueren Arbeiten zur Automation der Straßenextraktion ist meist die Erfassung bzw. die Fortführung von Daten für geographische Informationssysteme (GIS).

In diesem Kapitel wird zunächst ein Überblick über Aspekte der Modellierung von Straßen gegeben (Abschnitt 3.1). Die im Rahmen der Extraktion zu lösenden Teilaufgaben sind in Abschnitt 3.2 zusammengestellt. In Abschnitt 3.3 werden Ansätze aus der Literatur in vier Kategorien eingeteilt und kurz beschrieben. Anschließend werden anhand der Erkenntnisse aus den bisherigen Ansätzen Folgerungen für die eigene Arbeit abgeleitet (Abschnitt 3.4).

3.1 Modellierung

Die Modellierung von Straßen für die Extraktion aus Luft- und Satellitenbildern lässt sich untergliedern in die Beschreibung der Straßen in der realen Welt und die Beschreibung in den Bilddaten. Die Modellierung in der realen Welt erfolgt in vielen Ansätzen nur implizit. Im Extremfall ist die Modellierung reduziert auf die Modellierung der Straßen im Bild, z.B. mit einer Beschreibung ihrer Breite und Länge in der Einheit [Pixel]. Für Satellitenbilder und kleinmaßstäbige Luftbilder werden Straßen oft als lineare Strukturen beschrieben, die infolge der Materialeigenschaften des Fahrbahnbelags bzw. der Eigenschaften des verwendeten bildgebenden Sensors einen deutlichen Kontrast zu ihrer Umgebung aufweisen (FISCHLER et al. 1981, VASUDEVAN et al. 1988, GRÜN und LI 1995). Für die Extraktion von Straßen aus Bilddaten höherer Auflösung wird dagegen die Homogenität der Straßenflächen (RUSKONÉ 1996) oder auch die Parallelität der Straßenränder (NEUENSCHWANDER et al. 1995, BARZO HAR und COOPER 1995) verwendet. Einer der wenigen Ansätze, in dem Vorschriften über den Straßenbau explizit für die Extraktion von Straßen genutzt werden, ist (DE GUNST und VOSSELMAN 1997). Eine Modellierung, die die Funktion von Straßen oder Relationen zwischen Straßen und anderen Objekten einbezieht, ist selten zu finden. BORDES et al. (1997) untersuchen für eine vorhandene Datenbank den Zusammenhang zwischen der Genauigkeit von Straßenachsen und verschiedenen Arten der Landnutzung. Der Einfluss der Landnutzung auf das Aussehen von Straßen wird jedoch für die Straßenextraktion nicht genutzt. In Ansätzen, wie z.B. (MCKEOWN und DENLINGER 1988), werden typische Schwierigkeiten in der Extraktion, deren Ursache lokal begrenzte Störungen des Erscheinungsbildes von Straßen sind, durch spezielle Operatoren gehandhabt. Allerdings erfolgt eine detaillierte Modellierung der Zusammenhänge zwischen Straßen und störenden Hintergrundobjekten nur in sehr begrenztem Umfang, z.B. in (MCKEOWN et al. 1989).

3.2 Teilaufgaben

In diesem Abschnitt werden zunächst typische Aufgaben dargestellt, die in einem System zur automatisierten Erfassung von Straßen gelöst werden müssen. Anschließend werden Vorgehensweisen

und Methoden aus bisherigen Arbeiten zur Straßenextraktion zusammengestellt, die zur Lösung der Teilaufgaben eingesetzt werden können.

Die Teilaufgaben, die ein System zur automatisierten Erfassung von Straßen aus Luft- und Satellitenbildern lösen muss, lassen sich folgendermaßen charakterisieren:

1. Es müssen Teile des Straßennetzes extrahiert werden, die als sichere Startpunkte dienen können.
2. Ausgehend von einem einzelnen Startpunkt ist der weitere Verlauf einer Straße zu bestimmen.
3. Zwischen zwei oder mehreren gegebenen Startpunkten auf einer Straße muss der richtige Verbindungspfad gesucht werden.
4. Es muss entschieden werden, welche Teile zum Straßennetz gehören und wie sie zu verbinden sind.
5. Kreuzungen müssen extrahiert werden, um die extrahierten Straßen zu einem topologischen Straßennetz zu verknüpfen.

Diese Teilaufgaben sind zunächst davon unabhängig, ob ein halb- oder vollautomatischer Ansatz verfolgt wird. Gleichwohl hat die Entscheidung für eine vollautomatische oder für eine halbautomatische Vorgehensweise sehr starken Einfluss darauf, welche Methoden für die Lösung dieser Aufgaben besonders geeignet sind. Die Bodenauflösung der Bilddaten ist ebenfalls von großer Bedeutung für die Auswahl geeigneter Methoden, da sie die Extrahierbarkeit der Bildprimitive bestimmt. Prinzipiell kann sich ein Verfahren zur Straßenextraktion auf Linien, auf Kanten, auf Flächen oder auf eine Kombination dieser Bildprimitive stützen. Nachfolgend werden Methoden, die in bisherigen Arbeiten zur Straßenextraktion eingesetzt wurden, den oben genannten Teilaufgaben zugeordnet und beschrieben.

Die automatische Extraktion von einzelnen relativ sicheren Startstücken für die weitere Straßenextraktion (Teilaufgabe 1) stützt sich in der Regel vor allem auf lokale Merkmale. Für Bilder mit höherer Bodenauflösung stützt sich die Suche nach sicheren Teilen des Straßennetzes meist auf die Detektion anti-paralleler Kanten (FISCHLER et al. 1981, ZLOTNICK und CARNINE 1993, BARZOHAR und COOPER 1995, BARZOHAR et al. 1997b, BAUMGARTNER et al. 1996, FORLANI et al. 1996, HARVEY 1999). Aus diesen werden anti-parallele Kanten, die einen der Straßenbreite im Bild entsprechenden Abstand voneinander haben, selektiert. Die auf diese Weise gefundenen Kantenpaare, werden dann als Startpunkte für die weitere Straßenextraktion genutzt. Eine Alternative zu kantenbasierten Verfahren bietet eine flächenhafte Segmentierung des Gradientenbildes mittels einer sogenannten Wasserscheidentransformation (RUSKONÉ 1996). Die Entscheidung, ob eine Fläche ein Teil des Straßennetzes sein kann, wird auf Grund der Langgestrecktheit und der Homogenität dieser Fläche getroffen. Bei geringer Bodenauflösung, d.h. in Bildern, in denen Straßen nur wenige Pixel breit sind, ist eine automatische Extraktion von Startpunkten schwierig, da lokale Merkmale für die Unterscheidung von Straßen und anderen linearen Strukturen oft relativ unzuverlässig sind. Nur durch die Kombination einer Vielzahl von Kriterien und durch die Ausdehnung auf eine mehr regionale Betrachtung kann die Sicherheit der Extraktion von Startpunkten erhöht werden. Als Startpunkte werden diejenigen Linien ausgewählt, deren geometrische und radiometrische Eigenschaften dem jeweiligen Straßenmodell am besten entsprechen (VASUDEVAN et al. 1988, MUKHERJEE et al. 1996, WIEDEMANN 2001).

Verfahren, die den Verlauf einer Straße ausgehend von einem gegebenen Startpunkt und der zugehörigen Richtung der Straße verfolgen (Teilaufgabe 2), werden am häufigsten in halbautomatischen Ansätzen verwendet. Gleichwohl können auch automatisch detektierte Startpunkte zur Initialisierung der Straßenverfolgung dienen. In Bilddaten niedriger Bodenauflösung eignen sich Verfahren, die lineare Strukturen verfolgen (QUAM 1978, JEDYNAK und ROZÉ 1995, GEMAN und JEDYNAK 1996). In höher aufgelösten Bilddaten werden meist profil- oder templatebasierte Verfahren zur Straßenverfolgung eingesetzt. Zur Bestimmung des Straßenverlaufs können hierbei sowohl die Grauwerte des Bildes (GROCH 1982, VOSSELMAN und DE KNECHT 1995, DAL POZ et al. 2000) als auch aus den Grauwerten abgeleitete Kanten- und Linienmerkmale (MCKEOWN und DENLINGER

1988, ZHAO et al. 2002) verwendet werden. Ebenfalls für Bilddaten höherer Auflösung geeignet sind Verfolgungsverfahren, die sich auf die Homogenität der Straßenfläche stützen (AIRAULT et al. 1994).

Sind zwei oder mehrere Punkte entlang einer Straße vorgegeben, sei es manuell oder automatisch, so besteht der nächste Schritt darin, den bestmöglichen Verbindungspfad zwischen den gegebenen Punkten zu bestimmen (Teilaufgabe 3). Zur automatischen Bestimmung des (optimalen) Verlaufs der Straße zwischen diesen Punkten werden Verfahren, wie z.B. der A^* - bzw. der F^* -Algorithmus (FISCHLER et al. 1981, MERLET und ZERUBIA 1996), Methoden der dynamischen Programmierung (GRÜN und LI 1994, GRÜN und LI 1995) oder Snake-basierte Verfahren (NEUENSCHWANDER et al. 1995, TRINDER und LI 1996, GRÜN und LI 1996, GRÜN und LI 1997a, KLANG 1998) eingesetzt. Meist werden für die Suche nach der optimalen Verbindung in den Bildern entsprechend der Auflösung entweder Linien oder Kanten verstärkt bzw. extrahiert, und dann z.B. von Snakes (siehe Abschnitt 2.3.3) genutzt. Da die Entscheidung, welche Punkte miteinander zu verbinden sind, bei vollautomatischen Ansätzen unsicher bzw. falsch sein kann, ist es für diesen Fall zweckmäßig, zusätzlich Kontrollmechanismen einzubauen. In (LAPTEV et al. 2000) wird dies z.B. dadurch gelöst, dass vor der endgültigen Annahme einer neuen Verbindung verifiziert wird, inwieweit entlang des gefundenen Pfades eine weitgehend parallele Kantenstruktur existiert.

Die Frage, welche Teile zu einem Straßennetz gehören und wie sie miteinander zu verbinden sind (Teilaufgabe 4), spielt in vollautomatischen Verfahren eine zentrale Rolle. Im Gegensatz zu halbautomatischen Ansätzen, in denen diese Frage durch den Operateur nahezu fehlerfrei beantwortet wird, treten bei automatisch generierten Hypothesen über zu erstellende Verbindungen häufig Fehler auf. Dies gilt insbesondere dann, wenn mehrere, sich gegenseitig ausschließende Verbindungen möglich erscheinen und daher miteinander konkurrieren. Entscheidungen über zu erstellende Verbindungen stützen sich häufig auf lokale Gruppierungskriterien, wie z.B. Ähnlichkeit, Nähe oder Kontinuität (siehe Abschnitt 2.2.2). Konkurrierende Verbindungshypothesen sollten aber nicht nur lokal sondern auch global bewertet werden, da oft erst bei einer Betrachtung des gesamten Netzes die Bedeutung einer Verbindung klar wird (STEGE et al. 1997). Die Unsicherheit, mit der automatisch generierte Verbindungshypothesen behaftet sind, hat indirekt auch Einfluss darauf, welche Verfahren zur Bestimmung des Straßenverlaufes zwischen einzelnen Straßenteilen in Betracht kommen.

Obwohl Kreuzungen ein wesentlicher Bestandteil des Straßennetzes sind, sind in der Literatur — verglichen mit der Menge an Verfahren zur Extraktion einzelner Straßen — nur wenige Verfahren zur Extraktion von Kreuzungen zu finden (Teilaufgabe 5). Auf Kreuzungen wird in den meisten Ansätzen indirekt über bereits extrahierte Straßen geschlossen, z.B. durch die Bestimmung von Schnittpunkten zwischen vorhandenen Straßenachsen (RUSKONÉ 1996). Daneben gibt es auch einzelne Ansätze zur Extraktion von einfachen Kreuzungen eines bestimmten Typs, wie z.B. Kreisverkehr (BOICHIS et al. 1998, BOICHIS et al. 2000). Für eine detaillierte Extraktion komplexer Kreuzungen sind kaum Ansätze vorhanden, die ohne Vorinformation aus Karten oder GIS-Daten arbeiten.

3.3 Einteilung und Beschreibung ausgewählter Ansätze

Nachfolgend werden die Ansätze zur Straßenextraktion entsprechend der jeweils verfolgten Strategie in vier Kategorien eingeteilt. In der ersten Kategorie werden Straßen ausgehend von vorgegebenen Startpunkten verfolgt (siehe Abschnitt 3.2, Teilaufgabe 2). Die zweite Kategorie umfasst Arbeiten zur Straßenextraktion, die nach der Festlegung von Anfangs- und Endpunkt eine (Straßen-)Verbindung zwischen den vorgegebenen Punkten finden (siehe Abschnitt 3.2, Teilaufgabe 3). Die automatische Suche nach Startpunkten bzw. Start- und Endpunkten (siehe Abschnitt 3.2, Teilaufgabe 1) spielt in Ansätzen, die den beiden ersten Kategorien zuzuordnen sind, meist eine untergeordnete Rolle bzw. sie wird durch die manuelle Vorgabe des Operateurs ersetzt. In die dritte Kategorie fallen diejenigen Ansätze, die in einem ersten Schritt mehrere nicht zusammenhängende Teile des Straßennetzes finden (siehe Abschnitt 3.2, Teilaufgabe 1) und darauf aufbauend versuchen, diese Teile zu verbinden

(siehe Abschnitt 3.2, Teilaufgaben 4 und 5). Zur vierten Kategorie zählen Ansätze, in denen die Einbeziehung von Vorinformation aus GIS-Daten eine zentrale Rolle spielt.

Bei Ansätzen, die Komponenten aus unterschiedlichen Kategorien enthalten, erfolgt die Zuordnung entsprechend der Hauptkomponenten des Ansatzes. Als Kriterien zur weiteren Charakterisierung der Ansätze werden Auflösung und spektrale Eigenschaften der verwendeten Bilddaten, die manuelle Interaktion während des Extraktionsvorganges, sowie der Umfang und die Nutzung des Modellwissens verwendet.

Kategorie: Verfolgung

Die erste Kategorie von Ansätzen verwendet Prozeduren zur Straßenverfolgung, um Straßen zu extrahieren. Da die Straßenverfolgung zur Initialisierung stets einen Startpunkt benötigt, erfordern diese Ansätze eine zweistufige Vorgehensweise. Je nachdem, ob die Startpunkte für die Straßenverfolgung manuell vorgegeben werden oder automatisch gefunden werden, führt dies zu halb- oder zu vollautomatischen Ansätzen.

Der Ansatz zur Straßenverfolgung von (VOSSELMAN und DE KNECHT 1995) basiert auf der Korrelation von Grauwertprofilen und ist daher primär für Luftbilder oder Satellitenbilder höherer Auflösung geeignet. Ausgehend von einem manuell vorgegebenen Straßenabschnitt wird ein Kalmanfilter initialisiert, der den weiteren Verlauf der Straße prädiziert. Der Zustandsvektor des Kalmanfilters enthält als Parameter die Position, die Richtung, sowie die Richtungsänderung der Straße. Anhand eines aus dem Bild abgeleiteten Referenzprofils wird durch Korrelation mit dem an der prädizierten Stelle gefundenen Profil die Position der Straße entlang des Profils verschoben. Die Entscheidung, ob diese neue Position zur Neuberechnung des Zustandsvektors des Kalmanfilters verwendet werden kann, wird auf Grundlage eines statistischen Tests getroffen. Ist der Unterschied zwischen Prädiktion und tatsächlicher Beobachtung für mehrere aufeinander folgende Profile zu groß, bricht die Verfolgung ab und es wird ein Eingriff des Operateurs erforderlich. Sofern dem Operateur geeignete Werkzeuge für Interaktion und Nachbearbeitung zur Verfügung stehen, lassen sich in einem halbautomatischen System mit einem solchen Verfahren Straßenachsen relativ effizient erfassen (BAUMGARTNER et al. 2002).

Beispiele dafür, wie sich automatische Startpunktsuche und Straßenverfolgung kombinieren lassen, sind (BARZO HAR et al. 1997a) und (MCKEOWN und DENLINGER 1988, ZLOTNICK und CARNINE 1993). BARZO HAR et al. (1997a) detektieren Teile des Straßennetzes unter Verwendung eines lokalen Straßenmodells, dessen geometrische und radiometrische Eigenschaften mit Hilfe von Markoff-Zufallsfeldern beschrieben werden. Die Verfolgung der Straßen basiert auf dem selben Straßenmodell. In (ZLOTNICK und CARNINE 1993, AVIAD und CARNINE 1988) sowie (MCKEOWN und DENLINGER 1988) werden Verfolgungsverfahren ebenfalls mit automatisch detektierten Startpunkten initialisiert. Zuerst werden aus anti-parallelen Kanten Hypothesen für Straßenmitten generiert. Nach einer lokalen pixelweisen Gruppierung werden unter Berücksichtigung von Länge und Geradlinigkeit Startpunkte für die Straßenverfolgung ausgewählt. Für die Straßenverfolgung kombinieren MCKEOWN und DENLINGER (1988) die Korrelation von Grauwertprofilen mit einer Kantenverfolgung, die ebenfalls auf Basis von Profilen arbeitet. Durch die Kooperation der beiden Verfahren, die auf unterschiedliche Problemstellen während der Straßenverfolgung verschieden reagieren, wird letztlich ein deutlich besseres Ergebnis erzielt als durch einen getrennten Einsatz der beiden Verfahren (MCKEOWN 1990). Die Besonderheit der Straßenverfolgung von (MCKEOWN und DENLINGER 1988) besteht darin, dass Änderungen des Straßenprofils in Folge von Störungen explizit modelliert und die jeweiligen Auswirkungen auf die Verfolgungsalgorithmen berücksichtigt werden. So wirkt sich z.B. eine Änderung des Fahrbahnbelags vor allem auf das Grauwertprofil aus, während ein Breitenwechsel vor allem die kantenbasierte Verfolgung beeinflusst.

Kategorie: Pfadsuche

Die im Folgenden beschriebenen Ansätze haben die Suche nach einem optimalen Pfad zwischen zwei Punkten als primäre Aufgabe. Hierbei wird davon ausgegangen, dass diese beiden Punkte tatsächlich durch eine Straße verbunden sind.

Der in (FISCHLER et al. 1981) vorgestellte Ansatz extrahiert Straßen aus Luftbildern niedriger Auflösung. Für die Suche nach der optimalen Verbindung zweier gegebener Punkte des Straßennetzes werden unterschiedliche sogenannte „lokale“ Informationen mit allgemeinem Wissen über Straßen kombiniert. Die Extraktion „lokaler“ Straßeninformation verwendet unterschiedliche low-level Operatoren. Von Operatoren vom Typ I wird angenommen, dass sie zwar keine falschen Extraktionsergebnisse liefern, dafür aber nicht alle Straßen finden. Operatoren vom Typ II zeichnen sich dadurch aus, dass sie zwar alle Straßen vollständig finden und ihre Parameter genauer als die Typ I Operatoren bestimmen, aber zusätzlich zu den Straßen auch noch falsche Ergebnisse liefern. Die Ergebnisse jedes Typ II Operators werden in Form einer Kosten-Matrix gespeichert. Bei der anschließenden gemeinsamen Bewertung der gefundenen Straßen wird wie folgt verfahren: In den Bereichen, in denen ein Typ I Operator eine Straße gefunden hat, wird die Bewertung für den Typ II Operator auf den maximalen Wert gesetzt. D.h. die Kosten für die Benutzung dieser Straße zum Aufbau der Verbindung werden auf 0 gesetzt. Durch Skalierung der Werte der Typ II Operatoren werden die unterschiedlichen Operatoren von Typ II vergleichbar gemacht. Für jeden Typ II Operator wird die beste Verbindung zwischen den beiden gegebenen Punkten separat berechnet. Die Suche nach dem optimalen Pfad erfolgt mit dem sogenannten F*-Algorithmus. Aus den resultierenden Pfaden wird derjenige ausgewählt, für den die „normierten durchschnittlichen“ Kosten am niedrigsten sind. Eine Extraktion weiterer Teile des Straßennetzes kann dadurch erreicht werden, dass ausgehend von gut bewerteten Punkten innerhalb des Suchbereiches weitere Straßen extrahiert werden. Das Straßenmodell, das den Operatoren zugrunde liegt, verwendet lediglich die radiometrischen Eigenschaften von Straßen, d.h. ihre Ausprägung als lokal helle, linienhafte Bildbereiche. Die Defizite dieses Ansatzes liegen zum einen in der Unausgereiftheit der verwendeten low-level Operatoren und zum anderen in der Vernachlässigung der geometrischen Eigenschaften von Straßen. Dagegen ist die Strategie, unterschiedliche Operatoren zur Detektion von Teilstücken des Straßennetzes zu kombinieren, eine große Stärke dieses Ansatzes, zumal hierbei auch Wissen über die Wirkungsweise unterschiedlicher Operatoren zur Extraktion von Straßen einbezogen wird.

MERLET und ZERUBIA (1996) erweitern für die Extraktion von linearen Strukturen aus SPOT-Bildern den F*-Algorithmus gegenüber dem pixelbasierten Vorgehen in (FISCHLER et al. 1981). Sie berücksichtigen bei der Suche nach dem besten Pfad zwischen Start- und Zielpunkt nicht nur die direkten Nachbarn eines Punktes, sondern auch Nachbarschaften höherer Ordnung. Auf diese Weise kann zusätzlich Information über die Krümmung des Pfades, und somit über die Geometrie von Straßen, berücksichtigt werden.

Die in (GRÜN und LI 1997a, GRÜN und LI 1997b, TRINDER und LI 1996) vorgestellten Ansätze nutzen die in Abschnitt 2.3.3 beschriebene Snake-Technik für die Extraktion von Straßen zwischen manuell vorgegebenen Punkten. Dadurch, dass zusätzlich zu Anfangs- und Endpunkt auch Zwischenpunkte vorgegeben werden können, lässt sich der Verlauf des gesamten zu extrahierenden Pfades relativ stark einschränken. ZAFIROPOULOS und SCHENK (1998) zeigen die Verwendung von Snakes zur Straßenextraktion aus Farbbildern. Gegenüber dem Ansatz von FISCHLER et al. (1981) besitzen Snakes den Vorteil, dass zusätzlich zur Bildinformation auch Annahmen über den geometrischen Verlauf von Straßen berücksichtigt werden. Kritisch ist beim Einsatz der Snakes jedoch der Einfluss der Wahl der Start-, Zwischen- und Endpunkte und die Gefahr, dass die Anpassung an „lokale Energieminima“ zu unbrauchbaren Ergebnissen führen kann (vgl. Abbildung 2.4). In (GRÜN und LI 1997a, GRÜN und LI 1997b) wird dieses Problem weitgehend dadurch behoben, dass für die Extraktion mehrere Bilder verwendet werden und der Verlauf der Straße bzw. der Snake direkt im dreidimensionalen Objektraum bestimmt wird. Die redundante Information aus mehreren Bildern

ermöglicht zudem Genauigkeitsaussagen, mit denen grobe Ausreißer, die z.B. durch Verdeckungen in einzelnen Bildern verursacht werden, aufgedeckt und eliminiert werden können. Erfolgt die Extraktion nur auf Basis eines einzelnen Bildes, so besteht die Möglichkeit, „lokale Energieminima“ weitgehend dadurch zu vermeiden, dass wie in (NEUENSCHWANDER et al. 1995) so genannte „Ziplock-Snakes“ oder „Ziplock-Ribbon-Snakes“ (siehe Abschnitt 2.3.3) eingesetzt werden. Im Hinblick auf die Straßenextraktion sind sich Ziplock-Snakes und Profil- oder Kantenverfolgungsverfahren in gewisser Weise ähnlich. Beide passen ihren Verlauf an die im Bild vorhandenen Merkmale an. Gegenüber den beschriebenen Straßenverfolgungsverfahren haben Ziplock-Snakes aber den Vorteil, dass der mögliche Verlauf der Straße durch die Vorgabe des zweiten Punktes eingeschränkt wird. Eine Ziplock-Snake, die von beiden Punkten aus gleichzeitig optimiert wird, entspricht in ihrer Wirkung dem gleichzeitigen Start von zwei Straßenverfolgern, deren Ziel es ist, sich zu treffen, und die daher von der jeweiligen Position des anderen beeinflusst werden.

Kategorie: Gruppierung/Netzbildung

Die Ansätze, deren Ziel nicht nur die Extraktion einer einzelnen Straße sondern die automatische Extraktion des gesamten Straßennetzes ist, sind in der Regel nicht auf die Lösung einer der in Abschnitt 3.2 beschriebenen Teilaufgaben beschränkt. Nach der Detektion von Teilen des Straßennetzes (Teilaufgabe 1) besteht die zentrale Aufgabe darin, zu untersuchen, welche dieser Teile wie verbunden werden müssen (Teilaufgabe 4). Wie die Straßen bzw. die Verbindungspfade im Detail verlaufen (Teilaufgabe 2 bzw. 3) oder wie die gefundenen Straßen über Kreuzungen miteinander zu verknüpfen sind (Teilaufgabe 5), spielt demgegenüber in den meisten dieser Ansätze eine untergeordnete Rolle oder wird im Extremfall überhaupt nicht behandelt.

VASUDEVAN et al. (1988) befassen sich mit der Extraktion von Straßen aus Satellitenbildern. Nach der Extraktion von Linien werden unter Verwendung von allgemeinem Wissen über die topologischen Beziehungen zwischen Straßen zu verbindende, d.h. benachbarte kollineare Linien gesucht. Als Kriterien werden der minimale Abstand und der Richtungsunterschied herangezogen. Verbundene Linien bilden Linien-Gruppen, die einen Teil des Straßennetzes repräsentieren, wobei jedoch jede Linie in mehreren Linien-Gruppen enthalten sein kann. Eine echte Netzbildung, d.h. eine Verknüpfung der einzelnen Linien-Gruppen, wird nicht durchgeführt.

WIEDEMANN und HINZ (1999) kombinieren als Erweiterung des Ansatzes von (VASUDEVAN et al. 1988) die Ergebnisse der Linienextraktion aus mehreren Spektralkanälen. Zusätzlich zu lokalen Gruppierungskriterien werden jedoch noch – wie in (STEGER et al. 1997) gefordert – globale Gruppierungskriterien verwendet, um aus den extrahierten Linien diejenigen auszuwählen und zu verbinden, die am besten dem verwendeten Straßenmodell entsprechen. Hierfür werden zunächst Paare von Linien gebildet, die auf Basis des Straßenmodells, z.B. weil sie relativ lang sind, als gute Startpunkte für die Suche nach weiteren Straßen in Frage kommen. Anschließend werden unter Berücksichtigung der lokalen Bewertung von Verbindungen zwischen allen Linienpaaren optimale Pfade zwischen den Startpunktpaaren gesucht. Das endgültige Straßennetz ergibt sich aus der Vereinigungsmenge aller extrahierten Pfade.

Ansätze zur Extraktion von Straßen aus Luftbildern mit einer Bodenauflösung von weniger als 0.5 m stützen sich im Unterschied zu Ansätzen für die Straßenextraktion aus Satellitenbildern oder Luftbildern niedriger Auflösung häufig auf Kanten als Bildprimitive. Bedingt durch die geringere Flächenabdeckung in km^2 spielt in Arbeiten, die sich mit der Extraktion von Straßen aus Luftbildern hoher Auflösung befassen, der Aufbau eines großen zusammenhängenden Straßennetzes oft nur eine untergeordnete Rolle. Die extrahierten Kanten werden meist unter Verwendung rein geometrischer Gruppierungskriterien zu höherwertigen Strukturen aggregiert, z.B. zu anti-parallelen Kantenpaaren oder zu T- und L-Strukturen (FÜGER et al. 1994, FORLANI et al. 1996). Der Zusammenschluss solcher Strukturen zu längeren Straßenteilen kann entweder auf Basis der anfänglich extrahierten Kanten

oder aber auf Grundlage der Attribute der generierten Strukturen erfolgen. Viele Schwierigkeiten und Fehler beim Aufbau von Verbindungen resultieren daraus, dass die Entscheidungen meist nur auf Basis lokaler Bildinformation getroffen werden. Darüber hinaus haben die Kriterien, die für die Gruppierung verwendet werden, wie z.B. Abstand oder Kollinearität, ebenfalls nur lokalen Charakter. Um eine zuverlässige Extraktion von Straßenrändern zu erreichen, fusionieren STEGER et al. (1995) daher Ergebnisse von Kanten- und Linienextraktion. Hierbei werden Kanten in der Originalauflösung des Bildes extrahiert und Linien in einer niedrigeren Auflösung. Die Linien werden als mögliche Straßenachsen betrachtet, und nur diejenigen Kanten werden als Straßenränder in Betracht gezogen, die in gewissen Relationen zu einer Linie in ihrer Nähe stehen. Diese Kombination von Linien und Kanten ist auch Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit, vgl. (BAUMGARTNER et al. 1996). Die Idee, Linien und Kanten gemeinsam für die Extraktion von Straßen zu nutzen, ist in ähnlicher Form auch in (TRINDER und WANG 1998) zu finden. TRINDER und WANG (1998) nutzen die Ergebnisse der Linienextraktion, um die auf Basis von parallelen Kanten detektierten Teile des Straßennetzes zu verknüpfen.

Ausgehend von (RUSKONÉ et al. 1994, AIRAULT et al. 1994) wird in (RUSKONÉ 1996) ein relativ umfassendes System zur vollautomatischen Extraktion von Straßen aus Luftbildern vorgestellt. Als Startpunkte für die weitere Straßenextraktion werden mittels einer Wasserscheidentransformation langgestreckte homogene Regionen im Gradientenbild extrahiert (siehe Abschnitt 3.2). Mit diesen Regionen wird eine Straßenverfolgung initialisiert, die sich vor allem darauf stützt, dass die Varianz der Grauwerte entlang der Straßenachse niedrig und der Gesamtpfad möglichst kurz sein soll. Im nächsten Schritt werden unter Verwendung geometrischer Kriterien Hypothesen für Verbindungen zwischen den gefundenen Teilen des Straßennetzes aufgestellt und überprüft. Hierbei werden Verbindungen zwischen Paaren bevorzugt, die entweder möglichst kollinear oder rechtwinkelig zueinander liegen. Um ein topologisch verknüpftes Straßennetz zu erhalten, werden Kreuzungen zunächst auf Basis einfacher geometrischer Berechnungen generiert. Abschließend werden die Kreuzungen nochmals überprüft und gegebenenfalls korrigiert. RUSKONÉ (1996) zeichnet sich dadurch aus, dass fast alle in Abschnitt 3.2 beschriebenen Teilaufgaben behandelt werden, und dass zusätzlich Information über lokale Umgebung, z.B. Schatten oder Fahrzeuge, in die Extraktion einfließt.

In einem gewissen Gegensatz zu den bisher dargestellten Arbeiten, die primär nur auf ländliche Gebiete bzw. weniger komplexe Szenen abzielen, steht (PRICE 1999). Dies ist einer der wenigen Ansätze, die sich mit der Straßenextraktion in städtischen Bereichen befassen. Diesem Ansatz liegt die Annahme zu Grunde, dass das Straßennetz in (nordamerikanischen) Städten die Form eines regelmäßigen Gitters hat. Nach manueller Initialisierung einer Masche des Straßennetzes, d.h. nach der Messung von drei Kreuzungen, wird das Netz automatisch weiter ausgedehnt. Größe und Position der neuen Maschen des Straßennetzes werden durch die Bildkanten bestimmt, die als Straßenränder in Betracht kommen. Zusätzlich wird Information aus einem digitalen Oberflächenmodell genutzt, um die Position der Straßen zu korrigieren, falls diese auf einem hohen Objekt neben der Straße zu liegen kommen sollten.

Kategorie: Berücksichtigung von GIS-Daten

GIS-Daten werden meist zur Verbesserung der geometrischen Genauigkeit der vorliegenden Straßenachsen oder zur Überprüfung der Qualität der Straßendaten verwendet (PLIETKER 1994, MOISSINAC et al. 1995, ROUX und MAÎTRE 1996, KLANG 1998, DOUCETTE et al. 2000, ZHANG et al. 2001). In gewissem Umfang können GIS-Daten aber auch für die Extraktion „neuer“ Straßen hilfreich sein (DE GUNST 1996, BORDES 1997). Unter dem Gesichtspunkt der Aktualisierung vorhandener Daten und im Hinblick auf die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist vor allem Letzteres von Interesse.

DE GUNST (1996) befasst sich mit der wissensbasierten Interpretation von Luftbildern zur Fortführung von Straßendaten. In einer objektzentrierten Repräsentation wird das Straßennetz auf

verschiedenen Auflösungsstufen modelliert. Dazu werden auch Vorschriften aus dem Straßenbau in die Wissensbasis aufgenommen (DE GUNST und VOSSELMAN 1997). Das entwickelte Konzept für eine GIS-gestützte Straßenextraktion wurde speziell für Autobahnen untersucht. Wissen über den Aufbau von Straßen aus Fahrbahnen, Markierungen, Standstreifen, etc. und deren räumliche Zusammenhänge wird explizit genutzt. Die verwendeten Schlussfolgerungsmechanismen und die Segmentierungsverfahren stützen sich sehr stark auf die Zusammenhänge zwischen den Objekten. Neben der Überprüfung und Fortführung von bereits gegebenen Straßen werden auch neue, d.h. nicht im alten Datenbestand enthaltene, Straßen extrahiert. Dazu werden Abzweigungen von den bestehenden Straßen gesucht. Zur Erkennung von Abzweigungen und zur Extraktion der abzweigenden Straßen wird ein Profilverfolgungsverfahren eingesetzt. Die Grauwertprofile senkrecht zur hypothetisierten Straßenachse werden dazu mit einem Musterprofil korreliert. Dabei hat sich herausgestellt, dass — zumindest für Autobahnen — die Bauvorschriften für Kreuzungen ein sehr wichtiges Kriterium zur Beurteilung von Abzweigungshypothesen sind.

In (BORDES 1997, BORDES et al. 1997, BORDES et al. 1996) wird Wissen über die Genauigkeit von Straßenachsen aus einer bestehenden kartographischen Datenbank genutzt, um die Straßenextraktion zu steuern. Grundlage bildet eine Untersuchung des Einflusses der Straßenklasse und der jeweiligen Umgebung der Straßen, z.B. Wald oder Siedlung, auf die Genauigkeit der Erfassung. In der Extraktionsphase werden die vorliegenden Straßendaten zur Instantiierung von Straßenhypothesen verwendet. Straßen werden zunächst in den Bereichen gesucht, in denen eine zuverlässige Extraktion voraussichtlich mit einfachen Mitteln möglich ist. Diese sicheren Teile des Straßennetzes dienen anschließend als Startpunkte für die Extraktion der anderen Straßen. Infolge der zentralen Rolle der vorhandenen Straßendaten für die Instantiierung der zu extrahierenden Straßen besteht der praktische Nutzen dieses Ansatzes vor allem in der Verbesserung der geometrischen Genauigkeit der bereits bekannten Straßen und weniger im Auffinden neuer Straßen. Konzeptionell zeichnet er sich gegenüber anderen Ansätzen dadurch aus, dass die in der Analyse der Datenbank gewonnenen Erkenntnisse für die Extraktion konsequent genutzt werden. Vor allem wird die Extraktion von guten Starthypothesen durch die Nutzung von Vorinformation aus den GIS-Daten erheblich sicherer.

Der in (KLANG 1998) vorgestellte Ansatz hat als Ziel die Verbesserung der Geometrie eines vorhandenen Straßennetzes. Dazu wird das aus einem GIS bekannte Straßennetz anhand eines Satellitenbildes korrigiert. Nach der automatischen Zuordnung von Kreuzungen aus dem GIS zu den entsprechenden Bereichen im Bild werden die Verbindungen zwischen den Kreuzungen mit Hilfe von Snakes extrahiert. Dadurch, dass die vorhandenen Straßenachsen als Näherungsinformation für die Snakes genutzt werden, können für die verwendeten Satellitenbilder brauchbare Ergebnisse erzielt werden.

Die Zielsetzung von (ZHANG et al. 2001) ist ebenfalls die Verifikation und die geometrische Verbesserung vorhandener Straßenachsen. Dieser Ansatz stützt sich auf vorhandene GIS-Daten und verwendet bei der Extraktion für jede Straßenklasse ein spezifisches Modell, das auch die jeweilige Umgebung der Straße berücksichtigt. Von anderen Ansätzen unterscheidet er sich zudem dadurch, dass er Farbbilder und Information aus mehreren Bildern verwendet. Als wesentliche Hinweise auf Straßen dienen Bildkanten, aus denen — sofern mehrere Bilder zur Verfügung stehen — Kanten im dreidimensionalen Objektraum generiert werden. Dadurch, dass ZHANG et al. (2001) ein digitales Oberflächenmodell sowie Farbinformation für die Extraktion nutzen, wird auch die Handhabung schwieriger abgeschatteter oder verdeckter Bereiche möglich.

3.4 Folgerungen

Bei der Beurteilung der bisherigen Ansätze und deren Ergebnisse ist zu bedenken, dass eine erfolgreiche Interpretation nicht nur von den eingesetzten Modellen, Strategien und Methoden abhängt, sondern auch davon, welche Bilddaten genutzt werden. Zudem wird eine optimale Vorgehensweise

auch stark durch die jeweilige Aufgabenstellung beeinflusst. Unter Berücksichtigung der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit (siehe Abschnitt 1.2) ergeben sich aus der obigen Darstellung und Analyse bisheriger Arbeiten folgende Erkenntnisse:

- Die automatische Extraktion von Startpunkten wird umso zuverlässiger, je mehr Merkmale dafür herangezogen werden. D.h., zusätzlich zur Fusion von Kanten und Linien sollten auch radiometrische Kriterien genutzt werden.
- Systeme zur Straßenverfolgung werden durch die Kombination unterschiedlicher Verfolgungsverfahren mit verschiedener Charakteristik robuster.
- Für die Suche nach optimalen Verbindungspfaden gibt es eine Reihe mathematisch gut fundierter Algorithmen, wie z.B. Snakes, A^{*}-F^{*}-Algorithmus, oder graphbasierte Suchverfahren wie das von (DIJKSTRA 1959). Außerdem gilt auch hier, dass die Kombination unterschiedlicher Verfahren meist vorteilhaft ist.
- Für die Entscheidung, welche Startpunkte miteinander zu verbinden sind, können sowohl lokale als auch globale (Gruppierungs-)kriterien herangezogen werden. Je mehr und je aussagekräftigere Kriterien verfügbar sind, desto einfacher und sicherer wird die Entscheidung.
- Generell ist es zweckmäßig, einfach und sicher zu extrahierende Teile zuerst zu extrahieren.
- Umgebungsinformation, d.h. Kontext, kann genutzt werden, um die Straßenextraktion effizient zu steuern und um sie zuverlässiger zu machen.
- Die Berücksichtigung von Bauvorschriften ist relativ aufwändig und für untergeordnete Straßen auch weniger von Bedeutung, weil Bauvorschriften bei kleineren Straßen weniger strikt eingehalten werden.
- Für die Extraktion komplexer Kreuzungen gibt es noch kein Verfahren, das auch ohne GIS-Information befriedigende Ergebnisse liefert.
- Die Einbeziehung von „3D-Information aus mehreren Bildern“ und „Farbe“ ist hilfreich.

Eine der wesentlichen Herausforderungen für den vollautomatischen Ansatz dieser Arbeit besteht darin, dass die Startpunkte bzw. die zu verbindenden Straßenteile automatisch gefunden werden müssen. Hierbei ist nicht nur die Extraktion sicherer Teile des Straßennetzes schwierig, sondern auch die Entscheidung, welche Teile miteinander verbunden werden sollen. Erst durch die Lösung dieser beiden Teilaufgaben wird die Voraussetzung für die Extraktion des gesamten Straßennetzes geschaffen. Für die Extraktion der Verbindungen zwischen extrahierten Straßenteilen scheinen sowohl Verfahren zur Suche nach optimalen Pfaden als auch Straßenverfolgungsalgorithmen geeignet. Auf Grund des Vergleichs von Ziplock-Snakes und Verfolgungsverfahren (siehe Abschnitt 3.3, Kategorie: Pfadsuche) sind Snakes den Verfolgungsverfahren vorzuziehen. Als Vorteil der Verfolgungsverfahren ist allenfalls zu sehen, dass sie nur einen Startpunkt benötigen. Ob für die Pfadsuche Optimierungsverfahren, wie z.B. Snakes, auch Gruppierungsverfahren vorzuziehen sind, lässt sich nicht eindeutig beantworten. Als Vorteil der Optimierungsverfahren ist ihre klare mathematische Formulierung zu sehen. Gruppierungsverfahren haben dagegen den Vorteil, dass sich Parameter des Objektmodells in der Regel einfacher auf Gruppierungskriterien abbilden lassen als z.B. auf die Gewichtung von „innerer“ und „äußerer“ Energie bei den Snakes. Um beim Aufbau des Straßennetzes globale Gruppierungskriterien zu berücksichtigen, sollten die Ergebnisse einer Linienextraktion in Bildern niedriger Bodenauflösung genutzt werden. Voraussetzung für eine globale Bewertung von Verbindungshypothesen ist jedoch, dass der zu bearbeitende Bildausschnitt einen ausreichend großen Teil des Straßennetzes enthält. Anregungen zur Modellierung und Extraktion von Kreuzungen sind am ehesten in (BOICHIS et al. 2000) zu finden. In fast allen anderen Ansätzen ist die Kreuzungsextraktion nur sehr schwach entwickelt.

Auf Grund der in der vorliegenden Arbeit verwendeten Eingangsdaten kann die Forderung nach Nutzung von Farb- und 3D- bzw. Mehrbildinformation nicht bzw. kaum berücksichtigt werden. Bei

den Überlegungen, welche Verfahren für die eigene Arbeit geeignet sind, ist ferner die Komplexität der zu interpretierenden Szenen und das Erscheinungsbild der Straßen zu beachten. Das Aussehen einer Straße hängt unter anderem von der Auflösung des Bildes und vom Kontrast zur Umgebung, d.h. z.B. vom Oberflächenmaterial, ab. Einen wesentlichen Einfluss auf das Aussehen von Straßen hat der Kontext, in dem sie sich befinden. Im Vergleich zu ländlichen Szenen sind Straßen und Straßennetze in städtischen Bereichen meist deutlich komplexer. Durch Bauwerke wie Über- oder Unterführungen und die verstärkte Präsenz anderer Objekte, wie z.B. Fahrzeuge, Gebäude und Bäume, sind auf Grund von Schattenwurf und Verdeckungen die Straßenflächen im Luftbild häufig nur noch zum Teil sichtbar. Den daraus resultierenden unterschiedlichen Anforderungen an die Modellierung wird nur in wenigen Ansätzen Rechnung getragen.

Defizite der bisherigen Arbeiten zur vollautomatischen Straßenextraktion lassen sich vor allem bei der Berücksichtigung des Maßstabsraumverhaltens (siehe Abschnitt 2.1.4) von Straßen feststellen. Eine durchgängige Modellierung in verschiedenen Auflösungsstufen fehlt. Ferner wird Kontextinformation für die Extraktion von Straßen — von GIS-gestützten Ansätzen abgesehen — nur in geringem Umfang und wenig systematisch genutzt. Hier erscheint eine Zusammenführung lokaler Beziehungen zwischen Straßen und anderen Objekten, wie z.B. in (MCKEOWN et al. 1989), und globaler Einflüsse durch den jeweiligen Landschaftstyp, wie z.B. in (BORDES 1997), erstrebenswert.

Zusammenfassend lässt sich für diese Arbeit folgende Vorgehensweise ableiten:

1. Extraktion von langen und sicheren Straßenteilen
2. Generierung von Hypothesen für Verbindungen zwischen den Straßenteilen
3. Extraktion von optimalen Verbindungen und deren Überprüfung
4. Netzbildung durch Detektion von Kreuzungen und Berücksichtigung globaler Gruppierungskriterien

Nach Möglichkeit sollten hierbei in den einzelnen Teilschritten die oben genannten Aspekte berücksichtigt werden.

4. Modellierung und Strategie

Um Straßen aus digitalen Luftbildern zu extrahieren, ist eine klare Vorstellung von dem Objekt „Straße“ notwendig. Das der automatischen Extraktion zu Grunde liegende Modell wird hier unterteilt in die Modellierung des Objektes selbst (Abschnitt 4.1), d.h. der Eigenschaften und Erscheinungsformen des Objekts, und die Modellierung der Relationen mit anderen Objekten (Abschnitt 4.2). Auf Basis dieses so untergliederten Straßenmodells und unter Einbeziehung von Wissen über Bildverarbeitungsverfahren wird in Abschnitt 4.3 eine Strategie für die Extraktion vorgestellt.

4.1 Objekt-Modell

Nachfolgend sind charakteristische Funktionen und Eigenschaften von Straßen in der realen Welt und im Luftbild beschrieben. Daraus werden anschließend die Komponenten des Modellwissens und die Strukturierung des Modells abgeleitet (BAUMGARTNER et al. 1997b, BAUMGARTNER et al. 1999b).

Straßen in der realen Welt: Die Beschreibung von Straßen in der realen Welt kann zuerst aus ihrer Funktion für die Menschen abgeleitet werden: Straßen erschließen die Erdoberfläche und erscheinen daher als Netz, das von Menschen besiedelte und bewirtschaftete Gebiete verbindet. Je dichter ein Gebiet bewohnt und je intensiver es genutzt wird, desto dichter ist das Straßennetz. Entsprechend ihrer Bedeutung werden die einzelnen Teile des Straßennetzes in eine Hierarchie verschiedener Kategorien mit unterschiedlichen Attributen eingeteilt. Straßen von überregionaler Bedeutung sind meist deutlich breiter als Straßen, die ländliche Gebiete erschließen. Ihr Bezug zur natürlichen Geländeoberfläche ist je nach Kategorie und Funktion unterschiedlich. Feldwege und weniger bedeutende Verbindungswege folgen der natürlichen Geländeoberfläche wesentlich stärker als Autobahnen oder Bundesstraßen, die in erster Linie der schnellen Verbindung zwischen Ballungsräumen dienen. Je nach Kategorie unterscheiden sich die Straßen u.a. hinsichtlich minimalem Krümmungsradius und maximal zulässiger Steigung. Als Folge größerer Krümmungsradien, flacherer Steigung und der Notwendigkeit kreuzungsfreier Knotenpunkte verlaufen Straßen von übergeordneter Bedeutung häufig auf Dämmen, in Einschnitten, auf Brücken oder in Tunneln. Informationen über Art und Zustand des Fahrbahnbelags, Existenz von Markierungen, Geh- und Radwegen, oder rechtliche Bestimmungen, wie z.B. Straßenbezeichnung oder Verkehrsvorschriften, sind als Attribute für einzelne Teile einer Straße von Bedeutung.

Straßen in Luftbildern: Das Aussehen von Straßen in Bildern hängt von den spektralen Eigenschaften des verwendeten Sensors und der Größe der Pixel im Objektraum ab. Eine wesentliche Komponente des hier vorgestellten Ansatzes zur Straßenextraktion ist die Berücksichtigung maßstabsabhängiger Charakteristika. Die Verwendung mehrerer Farbkanäle steht dagegen im Hintergrund. Entsprechend ist die im Folgenden dargestellte Modellierung primär auf panchromatische Bilder oder auf einen einzigen Farbkanal ausgerichtet. Bilder mit unterschiedlicher Bodenpixelgröße lassen verschiedene Eigenschaften von Straßen unterschiedlich deutlich hervortreten. In Bildern niedriger Auflösung, d.h. mehr als 2 m pro Pixel, erscheinen Straßen meist als Linien, die ein mehr oder weniger dichtes Netz bilden (siehe Abbildung 4.1(a)). In Bildern höherer Auflösung, d.h. bei weniger als ca. 0.5 m pro Pixel, erscheinen Straßen dagegen als lang gestreckte homogene Flächen mit relativ konstanter Breite (siehe Abbildung 4.1(b)). In der höheren Auflösung ist die erreichbare geometrische Genauigkeit deutlich besser. Jedoch wird die Straßenextraktion durch Hintergrundobjekte, wie Fahrzeuge, Bäume oder Gebäude stark gestört.

Liegt ein Bild hoher Auflösung vor, so können in einem im Maßstabsraum (siehe Abschnitt 2.1.4) geglätteten Bild — welches einer reduzierten Auflösung entspricht — Linien, die Straßenachsen

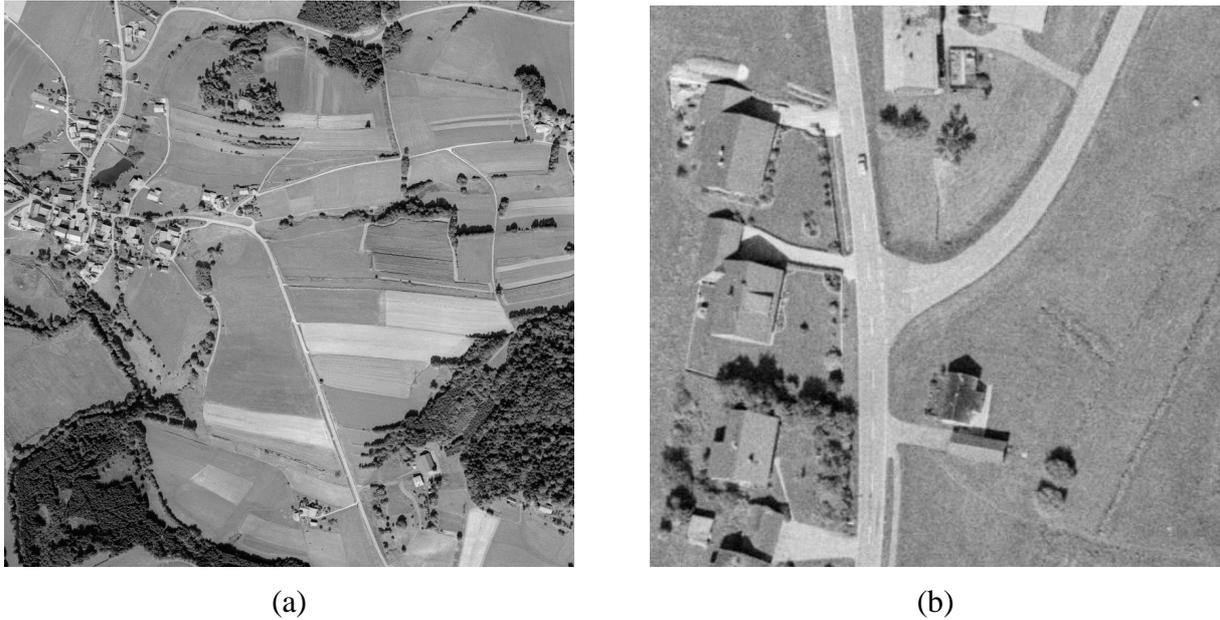


Abbildung 4.1. Luftbild: (a) Niedrige Auflösung (b) Hohe Auflösung

repräsentieren, teilweise auch noch in Gegenwart störender Hintergrundobjekte sicher extrahiert werden. Die Verwendung mehrerer Auflösungsstufen lässt sich durch die mit der Glättung verbundenen Maßstabsraumereignisse begründen (siehe Abschnitt 2.1.4). Die Glättung im Maßstabsraum eliminiert Detailstrukturen der Straße, wie z.B. ein Fahrzeug auf der Straße oder Fahrbahnmarkierungen. Dies kann als Maßstabsraumereignis und damit als Abstraktion interpretiert werden, da das Objekt Straße vereinfacht wird und seine grundlegenden Eigenschaften hervorgehoben werden. Abbildung 4.2 gibt hierfür ein Beispiel: Mit zunehmender Glättung tritt die Straße immer deutlicher als band- bzw. linienartige Struktur hervor. Das Ergebnis einer Linienextraktion in reduzierter Auflösung (siehe Abbildung 4.2(c)) ist kaum noch durch Fahrzeuge gestört und gibt den Verlauf der Straßenachse bereits sehr gut wieder, auch wenn die Straßenränder schlecht lokalisiert sind.

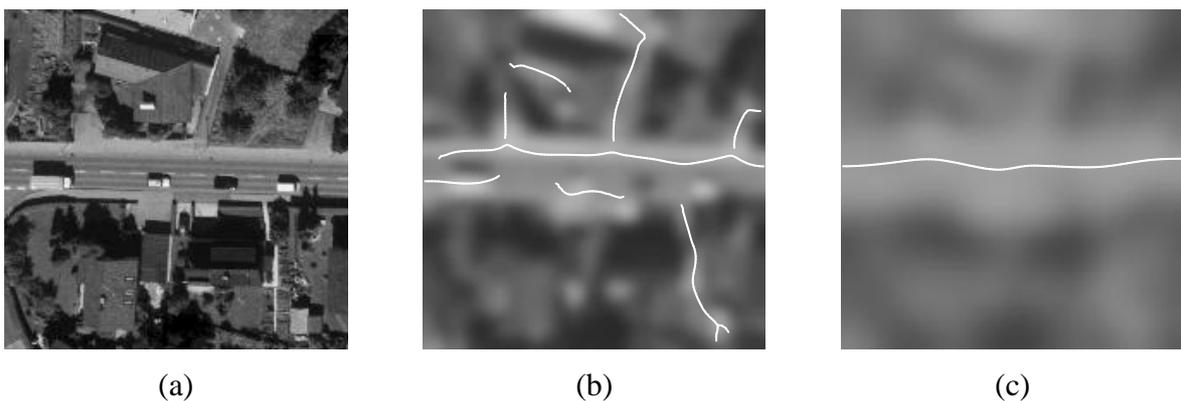


Abbildung 4.2. (a) Luftbild (Auflösung 0.6 m) (b) Extrahierte Linien (Glättung mit $\sigma = 2.4$ m) (c) Extrahierte Linien (Glättung mit $\sigma = 5.4$ m)

4.1.1 Komponenten des Modellwissens

Der hier beschriebene Teil des Modells umfasst explizites Wissen über die Komponenten Geometrie, Radiometrie und Topologie (siehe Abbildung 4.3). Wissen über den Kontext von Straßen wird in

Abschnitt 4.2 modelliert.

Die modellierten geometrischen Eigenschaften ergeben sich zum größten Teil aus der Funktion von Straßen: So müssen Straßen z.B. gewisse Mindestbreiten, maximal zulässige Steigungen, Querneigungen oder Krümmungsradien einhalten, um für gewöhnliche Fahrzeuge befahrbar zu sein. Mit dem Wunsch nach ausreichend guten Sichtverhältnissen — vor allem in Kreuzungen und in Kurven — spielen zusätzlich auch noch Sicherheitsaspekte eine wichtige Rolle.

Die radiometrische Komponente spiegelt die Reflexionseigenschaften des Straßenbelags und die Reflexionseigenschaften in der unmittelbaren Umgebung der Straße wider. In diese Modellkomponente fließen Materialeigenschaften der Straße und der Umgebung sowie die spektrale Empfindlichkeit des verwendeten Sensors ein.

Das topologische Wissen über die Netzstruktur von Straßen führt im Modell zu der Forderung, dass abgesehen von Randeffekten durch die endliche Größe des Bildausschnittes und abgesehen von Inseln und Trennungen durch breite Flüsse innerhalb des Straßennetzes zwischen allen Paaren von Punkten eine topologische Verbindung existieren muss.

Auch wenn die Berücksichtigung von Wissen über die Funktion von Objekten die Objekterkennung erleichtert (STARK und BOWYER 1991), so wird die Funktion von Straßen hier dennoch nicht als eigene Komponente des Modells betrachtet. Dies ist gerechtfertigt, weil die funktionalen Eigenschaften eng mit den geometrischen und topologischen Komponenten des Modells verflochten sind, und dort entsprechend berücksichtigt sind.

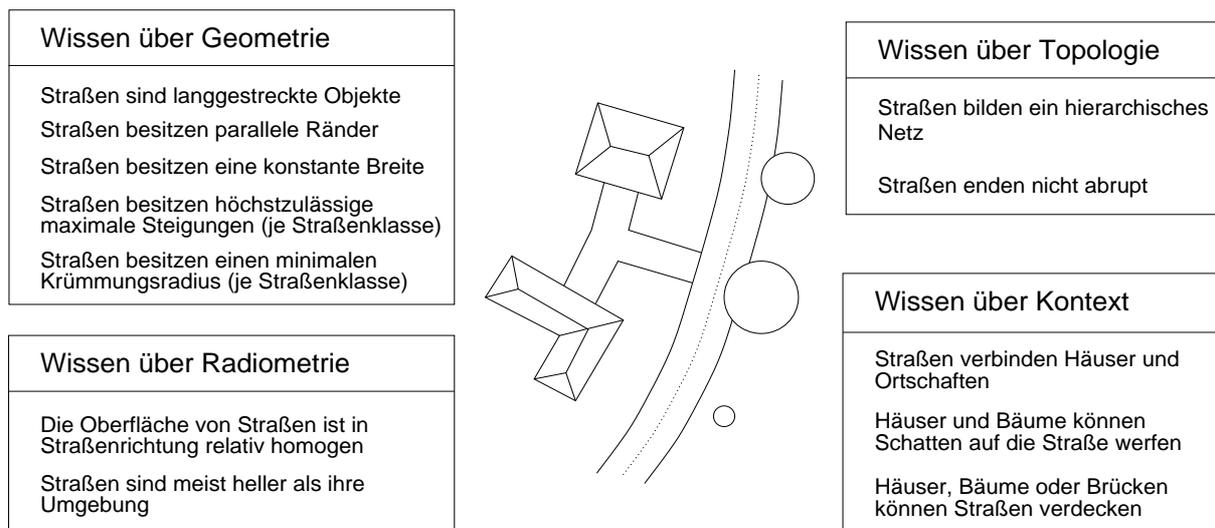


Abbildung 4.3. Komponenten des Straßenmodells

4.1.2 Abstraktionsebenen der Modellierung

Zur besseren Strukturierung des zu modellierenden Wissens wird das Straßenmodell auf verschiedenen Abstraktionsebenen beschrieben. In Anlehnung an TÖNJES (1997) werden auch hier drei Abstraktionsebenen verwendet: *Reale Welt*, *Geometrie und Material* und *Bild*. Die *Geometrie- und Material-Ebene* dient als Zwischenebene, in der die 3D-Gestalt und die Materialeigenschaften der Objekte repräsentiert werden (siehe Abschnitt 2.1.1). Das Modell für die Interpretation der Bilddaten wird auf diesen drei Ebenen entwickelt. Die Modellierungen auf den verschiedenen Ebenen sind allerdings nicht unabhängig voneinander, sondern über die Zuordnung der Konzepte einer Ebene

zu Konzepten der anderen Ebenen gekoppelt. Erst diese Koppelung ermöglicht es, den aus Bildern extrahierten Merkmalen für den Menschen sinnvolle Bedeutungen zuzuweisen, bzw. aus den Bildmerkmalen eine für Menschen bedeutungsvolle Beschreibung der in den Bildern enthaltenen Szene abzuleiten. Die für die Bildanalyse wesentlichen Teile des Modells sind zunächst der Bild-/Sensorebene zu entnehmen. Auf Basis der Modellierung auf dieser Ebene und der Verbindungen zur Modellierung auf der Ebene der realen Welt kann den Bildmerkmalen eine konkrete Semantik zugeordnet werden. Für eine erfolgreiche Objekterkennung ist eine optimale Nutzung der verfügbaren Bildmerkmale und ihrer Attribute wichtig. Als Konsequenz aus diesen Überlegungen und den am Anfang von Abschnitt 4.1 dargestellten Charakteristika von Straßen im Luftbild wird auf der Bildebene zusätzlich eine Unterteilung des Modells bezüglich des Maßstabs vorgenommen.

Das Modell in Abbildung 4.4 stellt Straßenobjekte als „Konzepte“ in einem semantischen Netz dar. Zu den drei horizontalen Ebenen der Modellierung kommt eine vertikale Unterteilung bezüglich des Maßstabs. Auf der *realen Welt*-Ebene (siehe Abschnitt 2.1.1) besteht das Straßennetz aus Kreuzungen und aus Straßen, die diese Kreuzungen miteinander verbinden. Die Straßen sind aus kürzeren Segmenten, den Straßenabschnitten, aufgebaut. In der hohen Auflösung setzen sich die Straßenabschnitte aus Fahrbahnen und Markierungen zusammen. Die Konzepte der realen Welt sind mit den Konzepten der *Geometrie- und Material*-Ebene über die *Konkret*-Relation gekoppelt, welche Konzepte verbindet, die gleiche Objekte auf verschiedenen Ebenen repräsentieren. In der reduzierten Auflösung sind die Straßenabschnitte mit den „meist geraden hellen Linien“ der *Bild*-Ebene verbunden. Im Gegensatz dazu ist die Fahrbahn als Teil eines Straßenabschnitts in der hohen Auflösung mit der „lang gestreckten hellen Fläche“ der *Bild*-Ebene über die „lang gestreckte Beton- oder Asphaltfläche“ der *Geometrie- und Material*-Ebene verbunden.

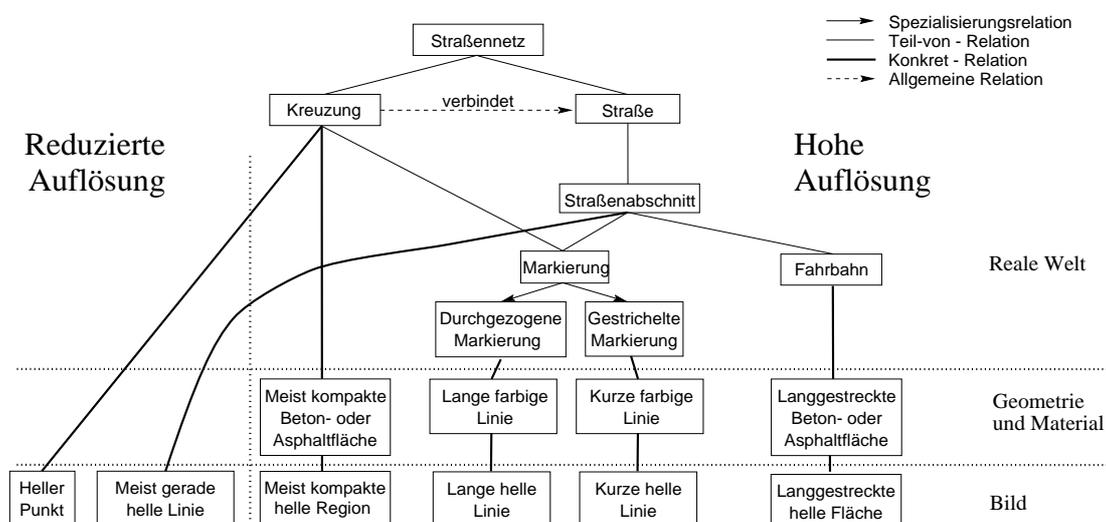


Abbildung 4.4. Straßenmodell

Während die hohe Auflösung detaillierte Information liefert, fügt die reduzierte Auflösung globale Information hinzu. Aufgrund der Abstraktion in der reduzierten Auflösung können zu den Straßenhypothese aus der höheren Auflösung im Rahmen der Fusion der Information beider Auflösungen weitere Hypothesen für Straßen hinzugefügt und falsche eliminiert werden. Damit wird die Extraktion insgesamt vollständiger und weniger fehlerhaft. Gleichzeitig können aus der hohen Auflösung Details entnommen werden, wie z.B. die exakte Position und Breite der Straße oder die Existenz und Lage von Markierungen. Auf diese Weise werden die Vorteile beider Auflösungen ausgenutzt.

Aus dem letzten Absatz folgt, dass die Fusion der Ergebnisse einer Straßenextraktion im auflösungsreduzierten und hoch aufgelösten Bild dazu beitragen kann, die Zuverlässigkeit der Stra-

Benextraktion zu erhöhen. Zudem können Details wie Fahrbahnmarkierungen, welche bei einer Auflösung von 0.2 m oder weniger zu erkennen sind, als zusätzliche Evidenz zur Bestätigung von Straßenhypothesen genutzt werden. Die Verwendung mehrerer Auflösungsstufen erhöht einerseits die Robustheit der Straßenextraktion, andererseits ergibt sich daraus die Notwendigkeit, verschiedene Merkmale in den einzelnen Auflösungsstufen zu verwenden und die Merkmale aller Auflösungsstufen in einem Modell zu vereinen.

Ebenso wie für die Straßenabschnitte ist es auch für die Kreuzungen nahe liegend, diese auf verschiedenen Auflösungsstufen zu modellieren. Kreuzungen lassen sich aus Teilkomponenten, wie z.B. Fahrbahnen, Verkehrsinseln und Markierungen, aufbauen. In Luftbildern höherer Auflösung können Kanten, Linien und Regionen segmentiert werden, die sich diesen Teilkomponenten zuordnen lassen. In der niedrigen Auflösung sind dagegen Kreuzungen oft nur als helle oder dunkle kompakte Flächen erkennbar. Sofern im Zuge der Linienextraktion auch Verknüpfungspunkte zwischen den Linien bestimmt werden, können diese als Kandidaten für Kreuzungspunkte verwendet werden.

Bei Kreuzungen tritt das Problem auf, dass sich — insbesondere beim Vorhandensein von Verkehrsinseln — die Topologie der Fahrspuren (in hoher Auflösung) und die Topologie des Straßennetzes (in niedriger Auflösung) nicht ohne Generalisierung aufeinander abbilden lassen. Abhilfe schafft hier eine durchgängige, detailliertere Modellierung des Objekts Straße (HINZ et al. 2001). Durch die Betrachtung von Fahrbahnen und Fahrspuren als kleinste Einheit des Straßennetzes lässt sich ein großer Teil der Probleme, die in Kreuzungsbereichen auftreten können, beheben. Eine Schwierigkeit, die sich aus einer detaillierteren Modellierung ergibt, ist Notwendigkeit, für die Detailstrukturen geeignete Bildmerkmale zu extrahieren. Hierfür kommen neben Fahrbahnmarkierungen auch Fahrzeuge in Betracht, wie z.B. in (HINZ und BAUMGARTNER 2000). Ansätze, eine detailliertere Modellierung zu nutzen, gibt es z.B. auch im Bereich GIS (WALTER und FRITSCH 1995). Hierbei wird versucht, Kreuzungen aus dem stark generalisierten ATKIS Kreuzungen aus detaillierten Straßendaten zuzuordnen. Am IGN gibt es mit (RUSKONÉ 1996), (BOICHIS et al. 1998) und (BOICHIS et al. 2000) eine ganze Reihe von Arbeiten, die sich – zumindest für einfache Kreuzungen und Kreisverkehr – mit dieser Problematik befassen. Eine detaillierte Modellierung der Straßen auf Basis von Fahrspuren ist in der hier vorgestellten Arbeit nicht realisiert. Die gewählte Modellierung ist daher letztlich nur für einfache Kreuzungen gültig. Des Weiteren ist anzumerken, dass durch den Verzicht auf eine Modellierung auf Basis von Fahrspuren, Straßen mit baulich getrennten Fahrbahnen, z.B. Autobahnen, nicht adäquat modelliert werden können. Die Richtungsfahrbahnen einer Autobahn entsprechen in dem vorgestellten Modell vielmehr zwei separaten Straßen.

4.2 Kontext-Modell

Der Nutzen von Kontextinformation für das Bildverstehen wird häufig betont (siehe Kapitel 2) und so genannte „Kontextinformation“ wird in vielen Arbeiten genutzt. Jedoch wird der Begriff Kontext hierbei oft sehr unterschiedlich verwendet: Der Bogen spannt sich von Zusatzinformationen über Aufnahmedatum und über den verwendeten Sensor bis hin zu einer vollständigen 3D-Beschreibung der aufgenommenen Szene. Eine explizite Nutzung von Kontextinformation für die Straßenextraktion ist in (DE GUNST und VOSSELMAN 1997) und (BORDES et al. 1995, BORDES et al. 1997) zu finden. In der hier vorgestellten Arbeit werden unter dem Begriff Kontext die Relationen zwischen Objekten verstanden (BAUMGARTNER et al. 1997a).

Das in Abschnitt 4.1 vorgestellte Objekt-Modell enthält Wissen über radiometrische, geometrische und topologische Eigenschaften von Straßen. Dies wird hier um den Kontext erweitert. Hintergrundobjekte, wie Gebäude, Bäume und Fahrzeuge können die Straßenextraktion unterstützen. Z.B. führt zu einem Haus in der Regel auch eine Straße. Andererseits können Hintergrundobjekte die Straßenextraktion aber auch behindern. Ein Haus kann einen Teil einer Straße verdecken und Hausdächer können ähnlich aussehen wie Straßen. Die Wechselwirkungen zwischen Straßen- und

Hintergrundobjekten werden in dieser Arbeit in Form des so genannten *lokalen* und *globalen* Kontexts modelliert. Dementsprechend ist das beschriebene Kontext-Modell in zwei Teile gegliedert: Der eine Teil definiert verschiedene lokale Kontexte (Abschnitt 4.2.1) und der andere unterschiedliche globale Kontexte (Abschnitt 4.2.2). Abhängig von ihrer Bedeutung in den verschiedenen globalen Kontexten können die Komponenten des lokalen Kontexts unterschiedliche Ausprägungen erfahren. Auf diese Weise wird das komplexe Modell für das Objekt „Straße“ in Teilmodelle zerlegt, die an den jeweiligen globalen Kontext angepasst sind. Diese Teilmodelle betonen bestimmte Eigenschaften von Straßen und können daher als spezialisierte Modelle betrachtet werden.

4.2.1 Lokaler Kontext

Mittels des lokalen Kontexts werden typische Beziehungen zwischen einzelnen Straßenobjekten und Hintergrundobjekten modelliert. Situationen, in denen die Straßenextraktion durch Hintergrundobjekte lokal erschwert wird, sind in der offenen Landschaft z.B. Zufahrten zu Feldern oder einzelne Fahrzeuge auf der Fahrbahn. In Siedlungen treten dagegen Probleme eher durch Zufahrten zu Gebäuden auf. Gebäude sind ihrerseits meist parallel zu den Straßen ausgerichtet. In Siedlungen gibt es zudem eine Reihe von anderen Objekten, die parallel zu Straßen verlaufen und die Extraktion ebenfalls behindern, aber auch unterstützen können. Dies sind z.B. Geh- und Radwege. Für den lokalen Kontext werden diese Situationen in Form von Skizzen beschrieben. Der lokale Kontext *Verdeckung_Schatten* (siehe Abbildung 4.5) beschreibt z.B. einen Fall, in dem ein hohes Objekt einen Teil der Straße verdeckt oder abschattet, so dass zunächst nur zwei unverbundene Straßenabschnitte gefunden werden. Weitere lokale Kontexte sind *Zufahrt_zu_Feld*, *Zufahrt_zu_Gebäude*, *Fahrzeug_auf_Straßenabschnitt* oder *Geh-/Radweg_parallel_zu_Straße* (siehe Abbildungen 4.6 / 4.7). Diese beispielhaft angeführten lokalen Kontexte können zu komplexeren lokalen Kontexten aggregiert werden, in denen dann z.B. *Verdeckung_Schatten* und *Zufahrt_zu_Gebäude* miteinander interagieren.

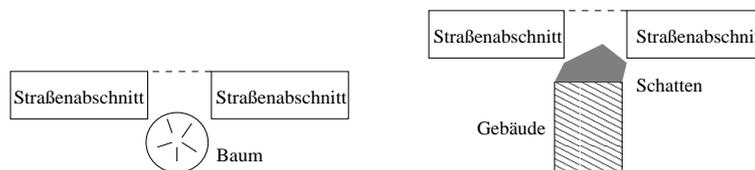


Abbildung 4.5. Lokaler Kontext *Verdeckung_Schatten*

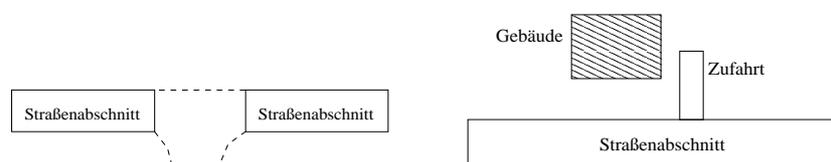


Abbildung 4.6. Lokale Kontexte *Zufahrt_zu_Feld* und *Zufahrt_zu_Gebäude*

4.2.2 Globaler Kontext

Nicht jeder lokale Kontext ist überall relevant. Die Relationen zu Hintergrundobjekten und deren Bedeutung für die Straßenextraktion hängen auch von den Gebieten ab, in denen sie auftreten. So haben Straßen in bebauten Gebieten ein deutlich anderes Erscheinungsbild als im Wald oder in der



Abbildung 4.7. Lokaler Kontext *Fahrzeug_auf_Straßenabschnitt*

aus Wiesen und Feldern bestehenden offenen Landschaft. Die Unterschiede im Erscheinungsbild der Straßen sind zum Teil auch Ausprägung der unterschiedlichen Beziehungen zwischen Straßen und Gebäuden. So stehen Gebäude meist um so näher an den Straßen und sind umso stärker parallel zu ihnen ausgerichtet, je dichter die Bebauung ist. Daher ist es sinnvoll, unterschiedliche lokale Kontexte, d.h. Relationen und Merkmale, nicht nur für verschiedene Auflösungsstufen, sondern auch für verschiedene Gebiete, d.h. globale Kontexte, zu verwenden. Hier werden im Folgenden *Siedlung*, *Wald* und *Offene Landschaft* unterschieden. Eine Zuweisung verschiedener Komponenten des lokalen Kontexts zu globalen Kontexten ist in Abbildung 4.8 dargestellt.

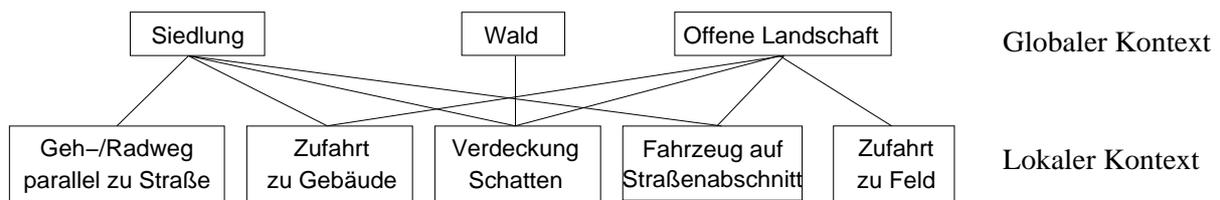


Abbildung 4.8. Globaler Kontext und Zuordnung von Komponenten des lokalen Kontextes

Der globale Kontext ist allerdings nicht nur für die Relevanz und Ausprägung des lokalen Kontexts von Bedeutung. Auch die Extrahierbarkeit der Objekte hängt von ihm ab. Verfahren, die für die Straßenextraktion in der offenen Landschaft gut geeignet sind, sind wegen des unterschiedlichen Erscheinungsbildes von Straßen nicht ohne weiteres auf die anderen globalen Kontexte übertragbar. In Wald und Siedlung können andere Parametereinstellung zu besseren Ergebnissen führen. Im Allgemeinen sind dort aber komplett andere Ansätze erforderlich. Demzufolge kann die Unterteilung in die Gebiete des globalen Kontextes auch zur Steuerung des Ablaufs der Straßenextraktion genutzt werden.

Eng verbunden mit der Verwendung von Kontextwissen ist die Frage nach der Quelle für die zusätzliche Information. Da in dieser Arbeit die Extraktion von Straßen im Vordergrund steht, sind die Anforderungen an Genauigkeit und Detaillierungsgrad der Information über die Hintergrundobjekte in der Regel nicht sehr hoch. Diese Information kann daher entweder aus einem vorhandenen GIS übernommen werden, oder aber aus dem Bild selbst extrahiert werden. Letzteres hat den Vorteil, dass sich keine zusätzlichen Probleme durch eventuell veraltete GIS-Daten ergeben. Allerdings sollte die Kontextinformation einfach und robust aus Bildern extrahierbar sein. Durch die Zuhilfenahme eines aus zwei und mehreren Bildern automatisch generierten digitalen Oberflächenmodells (DOM) kann z.B. ein wesentlicher Teil der für die Straßenextraktion problematischen Situationen erklärt werden. So können einzelne hohe Objekte im DOM detektiert werden und scheiden damit als Straßenhypothesen aus. Eine Unterteilung des Luftbildes in globale Kontexte zur Steuerung der Straßenextraktion kann ebenfalls entweder aus einem GIS übernommen oder durch eine Segmentierung des Bildes erreicht werden.

4.3 Strategie

Neben der statischen Modellierung von Objekten und deren Kontext spielt die Strategie, d.h. das Wissen darüber, welches Modellwissen wann eingesetzt werden soll, eine zentrale Rolle für die Leistungsfähigkeit eines Ansatzes zur Objektextraktion. In diesem Abschnitt erfolgt eine allgemeine Beschreibung der Vorgehensweise zur Extraktion von Straßen. Details und einzelne Teilschritte der Umsetzung der beschriebenen Extraktionsstrategie werden in Kapitel 5 anhand von Beispielen erläutert.

Die ersten Schritte der Interpretationsstrategie entsprechen einer datengetriebenen Vorgehensweise (siehe Abschnitt 2.1.3). D.h. Ausgangspunkt für die Interpretation sind die Daten. Einzelne Teilschritte basieren auf dem Grundsatz der Hypothesenbildung und Verifikation (siehe Abschnitt 2.1.3). Auf Grundlage der gefundenen Bildprimitive werden zunächst mögliche Teile von Straßen extrahiert. Auf deren Basis erfolgt sukzessive der Aufbau des Straßennetzes. Hierbei werden ausgehend von den bereits extrahierten Straßenteilen Hypothesen für weitere Teile des Straßennetzes generiert und anhand der Bildinformation verifiziert. Somit wird insgesamt eine hybride Vorgehensweise, d.h. eine Mischung aus daten- und modellgetriebenem Vorgehen, verfolgt. Der konkrete Ablauf der Extraktion wird durch die Festlegung einer Folge mehrerer (Gruppierungs-)Operationen festgelegt. Im Zuge der sequentiellen Abarbeitung dieser Folge wird für jeden Teilschritt — ähnlich wie in einem regelbasierten System — zunächst überprüft, ob die Voraussetzungen für die durchzuführende Aktion vorliegen. Falls die vorliegenden Daten die geforderten Bedingungen erfüllen, erfolgt durch die Operation eine Veränderung des jeweiligen Zwischenstandes der Straßenextraktion.

Das Grundprinzip des hier vorgestellten Extraktionsverfahrens besteht darin, die Extraktion auf die Teile des Straßennetzes zu fokussieren, die im Idealfall am einfachsten und zugleich am sichersten zu erkennen sind, und die zudem einen großen Einfluss auf die weitere Erkennung haben. Welche Merkmale am auffälligsten sind und sich damit für die Extraktion am besten eignen, hängt stark davon ab, in welchem globalen Kontext Straßen extrahiert werden sollen. In Siedlung und Wald reicht Wissen über Geometrie und Radiometrie der Straßen wegen der Schatten- und Verdeckungsprobleme häufig nicht aus. Dagegen können für die offene Landschaft bereits mit einem relativ einfachen Modell, das nur Wissen über Eigenschaften von Straßen selbst berücksichtigt, gute Ergebnisse erwartet werden.

Entsprechend diesen Überlegungen sollte die Straßenextraktion in der offenen Landschaft beginnen. Die (Zwischen-)Ergebnisse nach diesem Schritt könnten genutzt werden, um die Straßenextraktion in Siedlung und Wald weiterzuführen. Dieser Gedanke wird jedoch in dieser Arbeit nicht weiterverfolgt. Vielmehr dient die Unterteilung des Luftbildes in die verschiedenen globalen Kontexte primär dazu, die Qualität des Extraktionsergebnisses abzuschätzen. Diese Unterteilung erfolgt mit Hilfe einer texturbasierten Segmentierung.

Gemäß dem Straßenmodell wird neben der Originalauflösung von 0.2-0.5 m ein auflösungsreduziertes Bild verwendet, in dem die Straßen nur wenige Pixel breit sind. Damit wird das Verhalten von Straßen im Maßstabsraum für die Extraktion nutzbar gemacht. Auf Grundlage von in der reduzierten Auflösung extrahierten Linien und Kanten aus der hohen Auflösung werden mittels mehrerer Gruppierungsregeln diejenigen Kanten ausgewählt, die Kandidaten für Straßenränder sind: Die Kanten müssen einen gewissen, der Straßenbreite entsprechenden Abstand zueinander haben, parallel sein, eine homogene Fläche einschließen und zusätzlich mit einer Linie aus der reduzierten Auflösung übereinstimmen. Aus diesen Kandidaten für Straßenränder werden dann Straßenabschnitte generiert. Straßenabschnitte werden durch Punkte ihrer Mittelachse mit zugehöriger Breite repräsentiert. Sie erhalten Attribute, wie z.B. mittlerer Grauwert oder Standardabweichung der Grauwerte, die sowohl für die weitere Extraktion bzw. Gruppierung nützlich, als auch bei der späteren Nutzung der Extraktionsergebnisse, z.B. in einem GIS, von Interesse sind.

Die Gruppierung der zunächst noch relativ kurzen Straßenabschnitte zu längeren Straßenabschnitten, d.h. das Schließen von Lücken und die sukzessive Elimination von falschen Hypothesen, erfolgt

wieder nach dem Prinzip der „Hypothesenbildung und Verifikation“. Ausgehend von geometrischen Kriterien, wie z.B. absoluter und relativer Abstand, Kollinearität, Breitenverhältnis, und radiometrischen Kriterien, wie z.B. mittlerer Grauwert oder Standardabweichung, werden Hypothesen über zu schließende Lücken generiert. Anschließend werden die hypothetischen Straßenabschnitte im Bild verifiziert. Diese Verifikation besteht aus bis zu drei Stufen: Auf der ersten Stufe werden die radiometrischen Eigenschaften des neuen Abschnittes mit denen der zu verbindenden Abschnitte verglichen. Die Geometrie des neuen Abschnitts wird hierbei durch die zu verknüpfenden Endpunkte und die von diesen ausgehenden Richtungen festgelegt. Sofern sich in den radiometrischen Eigenschaften keine allzu großen Differenzen zeigen, gilt die Hypothese als bestätigt. Im anderen Fall wird in der zweiten Verifikationsstufe mittels einer so genannten „Ribbon“-Snake (siehe Abschnitt 2.3.3) versucht, im Gradientenbild einen optimalen Pfad für die Verbindung zu finden, der zudem eine Annahme der Verknüpfungshypothese rechtfertigt. Der Vorteil des Snake-basierten Schrittes besteht darin, dass durch die Kombination von geometrischen Zwängen und Bildinformation auch schwache Evidenz in den Bilddaten für die Verifikation einer Hypothese genutzt werden kann. Schlägt auch dieser Verifikationsschritt fehl, so wird in der dritten Stufe nach einer Erklärung dafür gesucht, weshalb sich für den hypothetischen Straßenabschnitt keine Bestätigung im Bild finden lässt. Als Rechtfertigung für die Annahme einer Verbindungshypothese trotz fehlender Bildinformation kommt vor allem der lokale Kontext *Verdeckung_Schatten* (siehe Abschnitt 4.2.1) in Betracht. D.h., der lokale Kontext wird als letzte und schwächste Verifikationsmethode zur Erklärung und zum Schließen von Lücken herangezogen. Mit dem Schließen von Lücken zwischen den Straßenabschnitten geht die Elimination von mit großer Wahrscheinlichkeit falschen Hypothesen, die kurz sind und nicht verknüpft werden können, einher.

Im nächsten Schritt gilt es, Kreuzungspunkte zu finden, um topologische Beziehungen zwischen den Straßenhypothesen aufzubauen. Infolge der Begrenzung des Bildausschnittes und auf Grund von Defiziten des Extraktionsverfahrens ist kein topologisch vollständig verknüpftes Straßennetz zu erwarten. Dennoch ist es in begrenztem Umfang möglich, anhand der topologischen Verbindungen die Bedeutung einzelner Straßen im Gesamtnetz zu bewerten und einige der verbleibenden falschen Hypothesen zu eliminieren. Eine weitergehende Überprüfung und Vervollständigung des Straßennetzes ist durch die Einbeziehung globaler Gruppierungskriterien möglich (STEGER et al. 1997, WIEDEMANN und HINZ 1999, WIEDEMANN und EBNER 2000).

Unter Verwendung von Wissen über den globalen und lokalen Kontext kann zudem die Semantik einzelner Straßen genauer bestimmt werden. So können Zufahrten zu Gebäuden und Zufahrten zu Feldern unterschieden werden. Ab einer gewissen Mindestbreite ist zu erwarten, dass eine Straße mit Fahrbahnmarkierungen versehen ist. Daher kann in den extrahierten breiten Straßen gezielt nach Markierungen gesucht werden. Sind Markierungen vorhanden, so ist dies ein zusätzlicher, äußerst wichtiger Hinweis darauf, dass es sich tatsächlich um eine Straße handelt. Außer zur Elimination von falschen Straßenhypothesen können Fahrbahnmarkierungen auch dazu genutzt werden, Details über einzelne Straßenabschnitte, wie z.B. Anzahl der Fahrspuren, Existenz von Abbiegespuren, zu erfahren. Um solche weitergehende Analysen anhand von Markierungen betreiben zu können, sollte die Bodenpixelgröße deutlich kleiner als 0.2 m sein, damit sich die Markierungen zuverlässig extrahieren lassen.

Zusammenfassend ergibt sich für die auf „Hypothesenbildung und Verifikation“ basierende Extraktionsstrategie folgender Ablauf:

1. Start in *Offener Landschaft*
2. Extraktion von Hypothesen für Straßen in reduzierter Auflösung
3. Extraktion von Hypothesen für Straßen in hoher Auflösung durch lokale Gruppierung
4. Bildung von Straßenabschnitten
5. Erweiterung des Straßennetzes durch Überbrückung von Lücken

6. Extraktion von Kreuzungen

7. Vervollständigung des Straßennetzes durch globale Gruppierung

Ausgangspunkt ist die Extraktion von Objekten bzw. Objektteilen, die

- einfach zu extrahieren sind,
- zuverlässig extrahiert werden können
- und die große Bedeutung für die weitere Extraktion haben.

5. Extraktion

5.1 Rahmenbedingungen

Vor der detaillierten Beschreibung des Ablaufs der Straßenextraktion werden zunächst nochmals die Rahmenbedingungen des vorgestellten Ansatzes zur Straßenextraktion zusammenhängend dargestellt.

Die Straßenextraktion erfolgt vollautomatisch und nutzt nur Information, die automatisch aus den Bilddaten gewonnen werden kann. Der Ansatz ist beschränkt auf Luftbilder mit einer Bodenauflösung von ca. 0.2 m bis 0.5 m. Es wird davon ausgegangen, dass es sich bei den Bildern um Orthophotos handelt, zu denen ein digitales Oberflächenmodell (DOM) vorliegt, das z.B. mit Verfahren der automatischen Bildzuordnung generiert wurde. Erst dadurch wird es möglich, die Extraktion im Objektraum durchzuführen und Kontextinformation über Schattenwurf und Verdeckung zu nutzen. Das entwickelte Verfahren ist auch anwendbar, wenn nur Orthophotos ohne DOM oder nicht entzerrte Einzelbilder vorliegen. Das Fehlen der DOM-Information wird sich jedoch in den meisten Fällen auf die Vollständigkeit und die Zuverlässigkeit des Ergebnisses auswirken.

Neben Informationen über verfügbare Bild- und Kontextdaten müssen dem System zwei Arten von Parametern zur Verfügung gestellt werden. Zum einen werden Parameter benötigt, um die zu extrahierenden Straßen zu beschreiben, d.h. Parameter, die in erster Linie das Straßenmodell repräsentieren. Dies sind z.B. minimale und maximale Breite und ein Intervall für den mittleren Grauwert der Straße. Zum anderen sind Angaben darüber notwendig, wie die Schwellwerte für die einzelnen Gruppierungsschritte zu setzen sind, und ab welcher Gruppierungsphase Kreuzungen zu extrahieren sind. Die Modellierung und Repräsentation des Wissens über Straßen erfolgt in Form eines semantischen Netzes auf der konzeptuellen Ebene (siehe Abschnitt 4.1.2). Dies wurde in der Implementierung auf Klassen der objektorientierten Programmiersprache C++ abgebildet.

Bei der Bearbeitung größerer Flächen in digitalen Luftbildern mit einer Bodenauflösung von 0.2–0.5 m stößt man trotz der rasanten Entwicklung von Rechenleistung und Speicherkapazität rasch an die Grenzen der Leistungsfähigkeit der Computer. Um größere Luftbilder effizient bearbeiten zu können, wird das Bild daher in kleinere Einheiten (Kacheln) unterteilt. Alle Verarbeitungsschritte, die sich nur lokal auswirken, d.h. für deren sinnvolle Ausführung die Beschränkung auf kleinere Bildausschnitte ausreicht, werden nur auf die einzelnen Kacheln angewendet. Neben der Linien- und Kantenextraktion gilt dies für die Gruppierung von Linien und Kanten zu Straßenrändern bis hin zur Generierung der ersten Hypothesen für Straßenabschnitte. Durch die Kachelung wird der Bedarf an Arbeitsspeicher reduziert und die Rechenzeiten bleiben trotz der exponentiellen Komplexität der Gruppierungsalgorithmen in einem erträglichen Rahmen.

Die Extraktion der Straßen erfolgt in einer Mischung aus daten- und modellgetriebenem Vorgehen (siehe Abschnitt 4.3): Zunächst werden aus den extrahierten Bildmerkmalen Hypothesen für einzelne Abschnitte des Straßennetzes generiert. Diese werden dann verwendet, um auf Grund der gegebenen Modellannahmen weitere Hypothesen für Straßenabschnitte aufzustellen. Eine Bestätigung bzw. Zurückweisung der neuen Hypothesen hat einen indirekten Einfluss auf die Bewertung der ursprünglichen Hypothesen, die anhand der Bildinformation aufgestellt wurden.

Abschnitt 5.2 stellt dar, welche Kontextinformation für die Extraktion von Straßen verwendet wird. In Abschnitt 5.3 werden die Einzelschritte der Extraktion ausführlich erläutert.

5.2 Kontextinformation

Entsprechend dem in Abschnitt 4.2 dargestellten Modell wird Kontextinformation für die Extraktion auf zwei Ebenen genutzt. *Globaler* Kontext ist geeignet, um die Extraktion auf die erfolgversprechendsten Regionen, d.h. auf die offene Landschaft, zu fokussieren. Entsprechend Abschnitt 4.3 wird er hier aber vorrangig eingesetzt, um die Qualität der gefundenen Straßenhypothesen zuverlässiger zu bewerten. *Lokaler* Kontext dient vor allem dazu, Verbindungshypothesen zwischen Straßenabschnitten zu verifizieren. Die Information über den globalen Kontext wird mit Hilfe einer Segmentierung des Luftbildes gewonnen. Für die Bestimmung von Schatten- und Verdeckungssituationen, wie sie im lokalen Kontext modelliert sind, wird zusätzlich zum Orthophoto ein DOM und Information über die Beleuchtungsrichtung zum Zeitpunkt der Aufnahme benötigt.

5.2.1 Global: Kontextgebiete

Für die Unterteilung des Luftbildes in die unterschiedlichen Gebiete des globalen Kontextes, *offene Landschaft*, *Wald* und *Siedlung*, wird das auf Laws-Filtern basierende Segmentierungsverfahren für Textur eingesetzt (siehe Abschnitt 2.3.1). Die Abbildungen 5.1 und 5.2 zeigen Resultate für die Segmentierung der offenen Landschaft. Die Berechnung der Texturenergie und die Klassifikation wurde in einer reduzierten Auflösung von ca. 4 m durchgeführt. Bei dieser Auflösung erscheint die offene Landschaft deutlich homogener als die stärker texturierten Kontextgebiete Wald und Siedlung. Durch die Einbeziehung des Grauwertbildes in die Klassifikation wird eine bessere Unterscheidbarkeit von dunklem Wald und heller Siedlung erreicht. Bei einer noch stärker reduzierten Auflösung könnten für die Segmentierung von Siedlungsgebieten z.B. auch die Verfahren von BUSCH (1996) oder FABER und FÖRSTNER (2000) eingesetzt werden, die auf Häufigkeit und Ausrichtung von Kanten beruhen. Die Pixelgröße am Boden beträgt für die gezeigten Beispiele in der höchsten Auflösung ca. 0.25 m (Abbildung 5.1) und ca. 0.5 m (Abbildung 5.2).

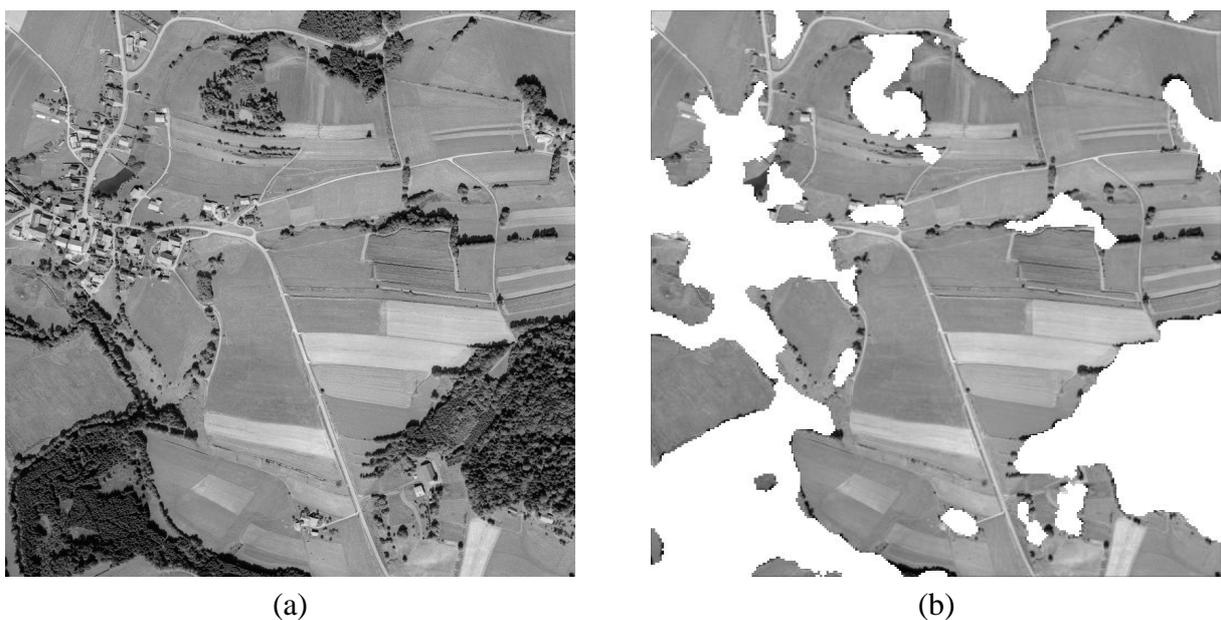


Abbildung 5.1. Texturbasierte Segmentierung: (a) Luftbild (b) *Offene Landschaft* (Wald- und Siedlungsflächen sind ausmaskiert)

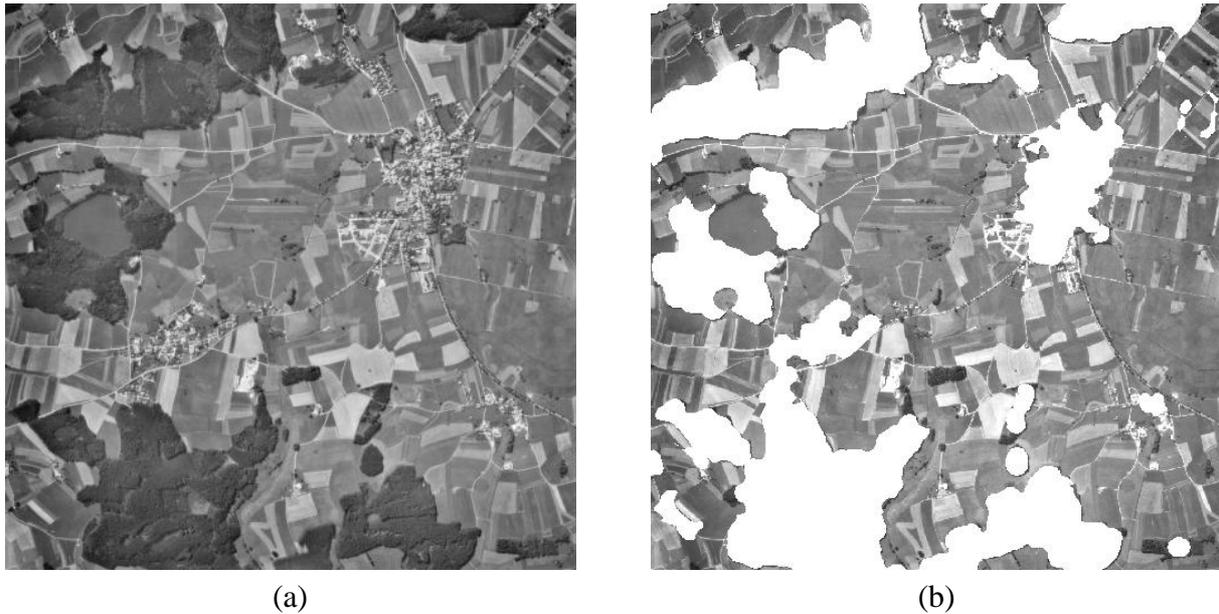


Abbildung 5.2. Texturbasierte Segmentierung: (a) Luftbild (b) Offene Landschaft (Wald- und Siedlungsflächen sind ausmaskiert)

5.2.2 Lokal: Schatten und hohe Objekte

Die Nutzung von Wissen über lokale Relationen zwischen Straßen und Hintergrundobjekten setzt voraus, dass diese Hintergrundobjekte ebenfalls extrahiert oder zumindest sicher detektiert werden. Da die Extraktion aller relevanten Hintergrundobjekte den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, wird im Folgenden nur eine Komponente des lokalen Kontexts in die Extraktion integriert. Mit der Extraktion von Schattenbereichen und hohen Objekten werden Informationen gewonnen, die lokale Auswirkungen von Gebäuden oder Bäumen auf benachbarte Straßenabschnitte erklären können. Diese Informationen können bei der Straßenextraktion als lokaler Kontext *Verdeckung_Schatten* (siehe Abschnitt 4.2.1 bzw. (BAUMGARTNER et al. 1997a)) genutzt werden.

Eine Extraktion von Schattenbereichen, die allein darauf basiert, mittels eines Schwellwertes alle dunklen Bildregionen zu selektieren, ist meist relativ unzuverlässig. Oft sind dunkle Objekte vorhanden, die ebenfalls als Schatten klassifiziert werden. Um solche Fehler nach Möglichkeit auszuschließen, werden in Anlehnung an (ECKSTEIN 1996) die Schattenbereiche unter Verwendung eines automatisch generierten DOM extrahiert. Das DOM wird entsprechend dem zum Aufnahmezeitpunkt herrschenden Sonnenstand beleuchtet. Anhand dieses beleuchteten DOMs werden erste Näherungen für Schattenregionen gefunden (siehe Abbildung 5.3(a)). Wegen der niedrigen Auflösung des DOM und Ungenauigkeiten im DOM kann dieses Ergebnis jedoch nur als Vorsegmentierung dienen. Im nächsten Schritt werden kleine Regionen eliminiert. Die Pixel der verbliebenen, größeren Schattenregionen werden anschließend als Startpunkte für ein Bereichswachstumsverfahren im Luftbild verwendet, um eine verfeinerte Segmentierung durchzuführen. Die Ergebnisse (siehe Abbildung 5.3(b)) sind zwar nicht fehlerfrei. Sie reichen aber in den meisten Fällen aus, um für die Straßenextraktion genügend Information über Abschattungen, d.h. über einen Aspekt des lokalen Kontexts *Verdeckung_Schatten*, zu erhalten.

Das DOM kann ferner dazu genutzt werden, lokal hohe Bereiche zu detektieren und diese anhand der Textur im Luftbild in Vegetation und Gebäude zu klassifizieren (ECKSTEIN und STEGER 1996). Dies ist bereits bei einer DOM-Rasterweite von wenigen Metern möglich. Information über lokal hohe Bereiche wird bei der nachfolgenden Straßenextraktion als Zusatzinformation für Ausschlussregionen genutzt. Die exakte Form der hohen Objekte spielt zunächst keine Rolle. Daher sind die Anforderungen an die Ergebnisse der Gebäude- und Vegetationsdetektion ähnlich wie bei

der Segmentierung der Schattenregionen nicht allzu hoch. Die Unterscheidung zwischen Gebäude und Vegetation ist nützlich, weil sich die Art des hohen Objekts auf die Intensität von Schatten und Verdeckung auswirken kann. Während Gebäude den Hintergrund vollständig verdecken und harte Schatten werfen, verdecken Bäume den Hintergrund oft nur zum Teil und werfen nur einen Halbschatten.

Bei einer weitergehenden Nutzung der hohen Objekte als Kontextinformation für die Straßenextraktion sind höhere Anforderungen an die Qualität von extrahierten Gebäuden und Bäumen zu stellen. Für die Extraktion der Gebäude aus dem DOM sind dann Ansätze wie z.B. von (WEIDNER 1997, BRUNN und WEIDNER 1998) in Betracht zu ziehen. Ob solche Ansätze erfolgreich eingesetzt werden können, hängt allerdings davon ab, ob ein DOM in entsprechend hoher Auflösung verfügbar ist.



Abbildung 5.3. (a) Schattenregionen – Vorsegmentierung aus beleuchtetem DOM (b) Endgültige Schattenregionen

5.3 Straßen

Das Grundprinzip der gewählten Extraktionsstrategie besteht darin, zuerst die am einfachsten und sichersten zu findenden Teile des Straßennetzes zu extrahieren, die zudem einen großen Einfluss auf die weitere Extraktion haben (siehe Abschnitt 4.3). Ausgehend von diesen relativ zuverlässigen Hypothesen wird das Straßennetz durch die Extraktion weiterer Teile vervollständigt. Der daraus abgeleitete Ablauf der Straßenextraktion spiegelt sich in der Struktur dieses Unterkapitels wider: Aus der Gruppierung von Linien und Kanten ergeben sich Starthypothesen für Straßenabschnitte (Abschnitt 5.3.1), die anschließend miteinander verknüpft werden (Abschnitt 5.3.2). Abschließend erfolgt mit der Extraktion von Kreuzungen der Aufbau des eigentlichen Straßennetzes (Abschnitt 5.3.3) und eine Vervollständigung auf Grundlage von globaler Gruppierung (Abschnitt 5.3.4).

5.3.1 Generierung von Starthypothesen für Straßenabschnitte

Charakteristisch für die hier gewählte Vorgehensweise zur Generierung von Starthypothesen für Straßenabschnitte sind die Fokussierung mittels des globalen Kontextes *offene Landschaft* und die Fusion mehrerer Maßstäbe.

Für Letzteres kommt die Modellierung von Straßen in unterschiedlichen Auflösungen zum Tragen (siehe Abschnitt 4.1.2). Als Bildprimitive werden Kanten aus der Originalauflösung (hohe Auflösung,

ca. 0.2–0.5 m Pixelgröße) und Linien aus einer reduzierten Auflösung (niedrige Auflösung, ca. 2 m Pixelgröße) kombiniert. Während Straßen in der niedrigen Auflösung nur wenige Pixel breit sind, erscheinen sie in der hohen Auflösung als flächenhafte Objekte. In der hohen Auflösung werden daher auch Teile des Modells genutzt, die detailliert die Radiometrie, bzw. die Materialeigenschaften von Straßen beschreiben.

5.3.1.1 Fokussierung durch globalen Kontext

Entsprechend dem der Extraktion zu Grunde liegenden Modell, das in Kapitel 4 vorgestellt wurde, ist die Extraktion in der offenen Landschaft am Erfolg versprechendsten. Die Segmentierung der Gebiete des globalen Kontextes liefert die Voraussetzung für die Fokussierung der Extraktion von Straßenhypothesen mittels des globalen Kontextes (siehe Abschnitt 4.3). Mit der Einschränkung auf einen speziellen globalen Kontext kann mit einem gegenüber dem Gesamtmodell vereinfachten Modell eine relativ zuverlässige Extraktion erzielt werden. Hinzu kommt, dass sich auch der Such- und Rechenaufwand zum Teil deutlich reduzieren lässt.

Um die Grenzen des Ansatzes aufzuzeigen, wird in den nachfolgend gezeigten Beispielen wird der globale Kontext nicht zur Suchraumeinschränkung genutzt. Der globale Kontext dient ferner als Basis für die Einschätzung der Qualität und für die Bewertung der Zuverlässigkeit der Straßenhypothesen. Ein weiterer Grund dafür, den globalen Kontext nicht zur Suchraumeinschränkung zu nutzen, liegt darin, dass der vorgestellte Ansatz nur für den globalen Kontext *offene Landschaft* entwickelt wurde und für die anderen Gebiete des globalen Kontextes kein geeignetes Extraktionsverfahren verfügbar ist. Eine Beschränkung auf das offene Gelände könnte — trotz der nachfolgenden Gruppierungsschritte zum Schließen von Lücken zwischen den Straßenhypothesen — in vielen Fällen dazu führen, dass ein größeres zusammenhängendes Straßennetz nicht extrahiert werden kann. Zum anderen hat sich gezeigt, dass fehlerhafte Hypothesen, die von dem für die *offene Landschaft* optimierten Verfahren in bebauten ländlichen Gebieten und im Wald verursacht werden, in den nachfolgenden Schritten meist keine größeren Probleme bereiten.

5.3.1.2 Fusion verschiedener Maßstäbe

Ein wesentliches Merkmal des vorgestellten Ansatzes ist die Kombination von Linien- und Kantenextraktion bei der Generierung der anfänglichen Hypothesen für Straßenabschnitte. Diese Kombination entspricht einer Fusion der Information aus verschiedenen Maßstäben bzw. aus den entsprechenden Maßstäben. Aus der Fusion erhält man Hypothesen für Straßenränder, aus denen anschließend Hypothesen für Straßenabschnitte generiert werden.

Als Eingangsdaten für die Fusion dienen Linien aus der niedrigen und Kanten aus der hohen Auflösung. Die Kandidaten für Straßenränder sind ein Teil der Menge der extrahierten Kanten. Um die Berechnungen bei der nachfolgenden Gruppierung zu vereinfachen und um die Datenmenge zu reduzieren, werden Linien und Kanten mit Hilfe des Verfahrens von (RAMER 1972) durch Polygone approximiert. Die weitere Verarbeitung erfolgt auf Basis dieser Linien- und Kantenpolygone (siehe Abbildung 5.4).

Abgesehen von sehr kurzen Linien werden zunächst alle hellen Linien als Hinweise auf potentielle Straßenachsen betrachtet. Die Kanten dagegen müssen mehrere Kriterien erfüllen, um als Kandidaten für Straßenränder ausgewählt zu werden:

Im ersten Schritt werden aus den Kanten Paare paralleler Polygonsegmente ausgewählt (siehe Abbildung 5.5). Hierbei ist es ausreichend, wenn die Kantenpaare annähernd parallel sind. D.h., der von den beiden Kanten eingeschlossene Winkel muss unterhalb eines von der Länge der beiden Kanten abhängigen Schwellwertes liegen. Exakte Parallelität der Kantenpaare zu fordern ist selbst bei absolut parallelen Straßenrändern nicht zielführend, da Richtungsabweichungen bereits infolge der



Abbildung 5.4. (a) Linien aus reduzierter Auflösung (b) Kanten aus hoher Auflösung

Kantenextraktion und Polygonapproximation auftreten können. Um für die Straßenextraktion als Parallelenpaar ausgewählt zu werden, sind weitere Forderungen zu erfüllen: Die Kantensegmente müssen sich überlappen und ihr Abstand muss zwischen einem unteren und einem oberen Schwellwert liegen. Die Schwellwerte für den minimalen und maximalen Abstand spiegeln die erwartete Straßenbreite wider. Zur Überprüfung des Kriteriums Überlappung wird eine Referenzgerade eingeführt, auf die die Endpunkte der beiden Kanten projiziert werden (siehe Abbildung 5.5(a)).

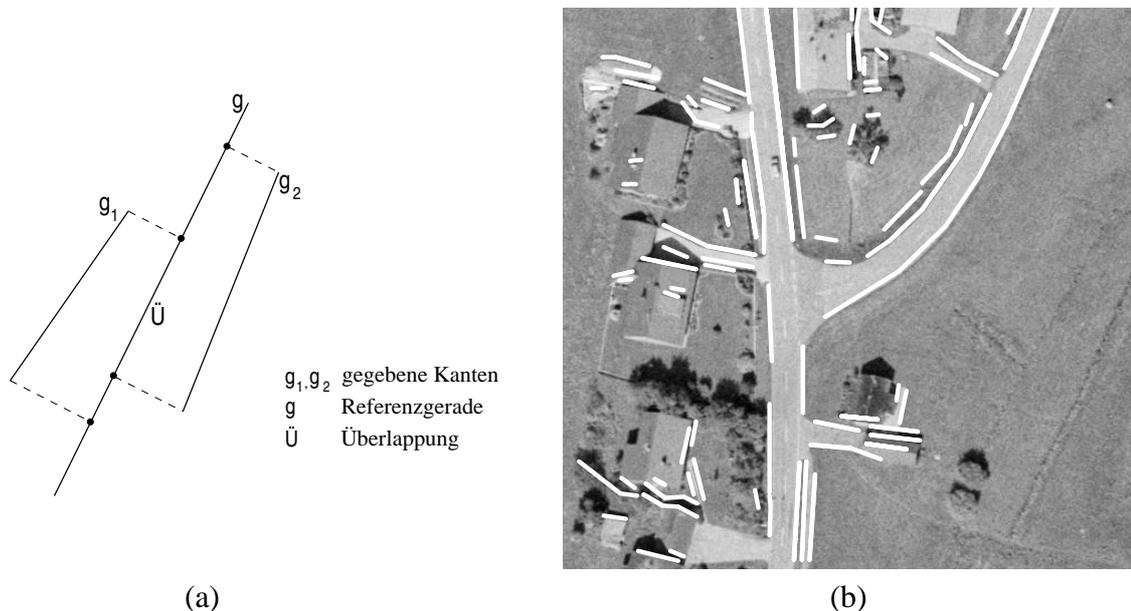


Abbildung 5.5. (a) Projektion der Endpunkte auf Referenzgerade zur Bestimmung der Überlappung (b) Parallele Kanten

Im zweiten Schritt werden radiometrische Kriterien herangezogen (siehe Abbildung 5.6). Es wird überprüft, welche der Parallelenpaare in Richtung der Straße homogene helle Flächen einschließen. Dazu werden für Streifen, die parallel zur Mittelachse zwischen den beiden Kanten verlaufen (siehe

Abbildung 5.6(a)), der mittlere Grauwert und die Varianz berechnet. Für Straßenrand-Kandidaten wird gefordert, dass die Varianz der Grauwerte in Straßenrichtung gering und der Mittelwert hoch ist. Die Varianz quer zur Straßenrichtung spielt dagegen keine Rolle, da diese infolge von Markierungen und Reifenabrieb relativ groß sein kann.

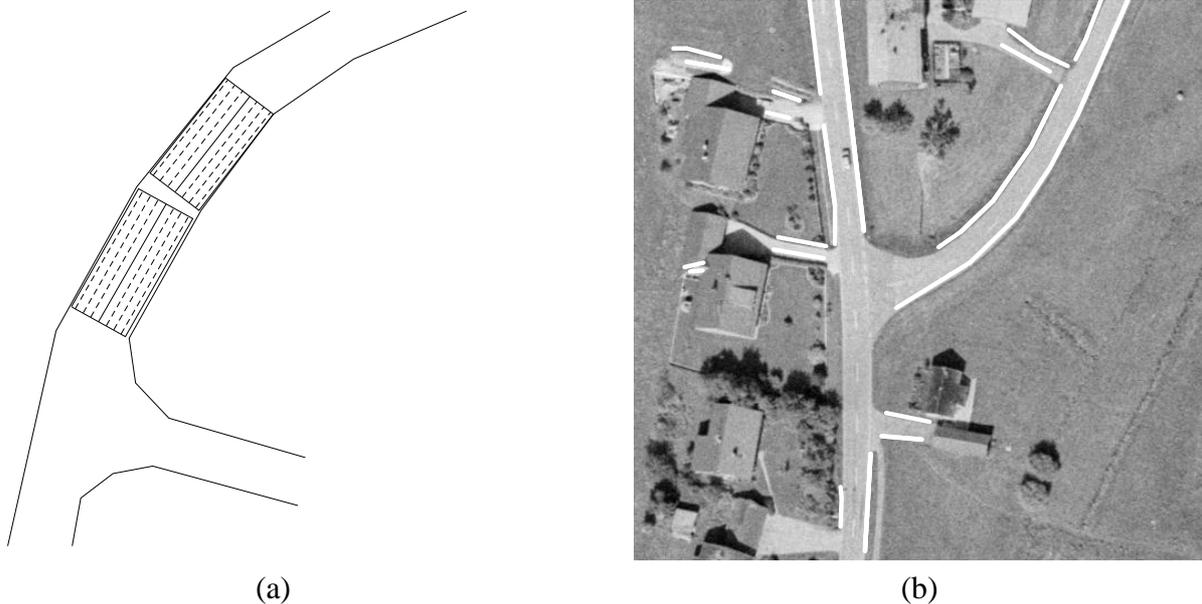


Abbildung 5.6. (a) Überprüfung der Homogenität in Straßenrichtung (b) Kanten, die homogene Flächen einschließen

In einem dritten Schritt werden die Paare paralleler Kanten, die homogene Flächen einschließen, um Kantensegmente ergänzt, die mit einem der im vorherigen Schritt selektierten Kantensegmente verbunden sind und zugleich ebenfalls eine homogene Fläche begrenzen. Diese Erweiterung der Kandidaten für Straßenränder ist erforderlich, da die Annahme, dass Straßenränder parallel sind, in engen Kurven oder im Bereich von Kreuzungen nicht zutrifft (siehe Abbildung 5.7(a)) und somit eine ganze Reihe von Kandidaten für Straßenränder nicht gefunden wurde. Abbildung 5.7(b) zeigt die auf Basis der im hochauflösten Bild vorhandenen Information als Kandidaten für Straßenränder ausgewählten Bildkanten.

Durch eine Fusion der Ergebnisse der Linienextraktion in der reduzierten Auflösung mit den Kandidaten für Straßenränder aus der hohen Auflösung werden Hypothesen für Straßenränder generiert (siehe Abbildung 5.8). Zweck der Fusion ist es, die Zuverlässigkeit der Hypothesen für Straßenränder zu erhöhen, indem aus den Ergebnissen beider Auflösungsstufen die Teile übernommen werden, die sich gegenseitig unterstützen. Die Fusion beginnt mit der Auswahl der Kandidaten für Straßenränder, die eine Linie aus der reduzierten Auflösung, d.h. eine Hypothese für eine Straßenachse, einschließen. Ausgehend von diesen sicheren Hypothesen für Straßenränder werden benachbarte kollineare Kantensegmente daraufhin überprüft, ob sie sich ebenfalls mit einer der bestätigten Hypothesen für Straßenachsen überlappen. Durch die Fusion von Information aus hoher und reduzierter Auflösung wird das Potenzial beider Auflösungsstufen genutzt (siehe Abschnitt 4.1.2): Aus der reduzierten Auflösung erhält man Hypothesen für Straßenachsen, die von kleineren lokalen Störungen kaum beeinträchtigt sind und die die wesentliche Struktur des Straßennetzes widerspiegeln. Die Einbeziehung der Kanten aus der hohen Auflösung gewährleistet dagegen eine gute geometrische Genauigkeit und zudem die Elimination von Hypothesen, die wegen fehlender Parallelität und Homogenität mit hoher Wahrscheinlichkeit keinen Straßen entsprechen.



Abbildung 5.7. (a) Überprüfung weiterer Kanten auf Homogenität in Straßenrichtung (b) Kandidaten für Straßenränder aus der hohen Auflösung



Abbildung 5.8. (a) Eingabedaten für Fusion — aus hoher Auflösung: Kandidaten für Straßenränder (weiß, durchgezogen), andere Kanten (weiß, punktiert) — aus reduzierter Auflösung: Linien (schwarz) (b) Ergebnis der Fusion: Straßenränder

5.3.1.3 Von Straßenrändern zu Straßenabschnitten

Auf dem Weg zur Extraktion eines Straßennetzes, das aus Kreuzungen und Straßen (siehe Abbildung 4.4) besteht, stellen die durch die Fusion beider Auflösungsstufen gefundenen Hypothesen für Straßenränder lediglich einen ersten Teilschritt dar. Die Straßenränder sind zunächst nur eine Menge von Polygonen, aus denen die gesuchten Straßenobjekte, d.h. die Straßen und Kreuzungen, erst noch abgeleitet werden müssen. Zur Extraktion dieser Straßenobjekte werden aus den Hypothesen für Straßenränder grundlegende Straßenabschnitte gebildet. Diese anfangs kurzen Abschnitte werden dann nach und nach mit weiteren Abschnitten zu längeren Straßenabschnitten verbunden. Straßenabschnitte sind im Straßenmodell (siehe Abbildung 4.4) als Zwischen-Konzepte eingeführt,

weil eine direkte Extraktion einer durchgehenden Straße, die zwei Kreuzungen verbindet, wegen Verdeckungen, lokaler Störungen und anderer Probleme nur selten möglich ist.

Als grundlegender Straßenabschnitt wird in dieser Arbeit ein Viereck bezeichnet, dessen Ausdehnung durch den Überlappungsbereich zweier paralleler Straßenränder festgelegt wird. Grundlegende Straßenabschnitte werden erzeugt, indem die Endpunkte einzelner sich überlappender Segmente paralleler Straßenränder senkrecht auf die jeweils gegenüberliegende Seite projiziert werden (siehe Abbildung 5.9). Die aus den Straßenrändern generierten grundlegenden Straßenabschnitte sind in Abbildung 5.10(a) dargestellt.

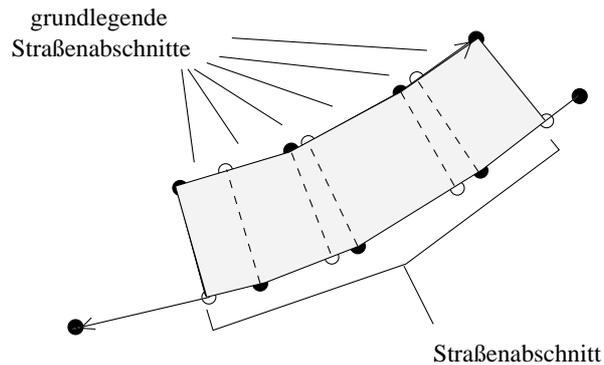


Abbildung 5.9. Bildung grundlegender Straßenabschnitte aus Straßenrand-Polygonen

Bis zur Generierung von grundlegenden Straßenabschnitten erfolgt die Bearbeitung innerhalb einzelner Bildkacheln. Such- und Gruppierungsschritte sind daher lokal begrenzt (siehe Abschnitt 5.1). Um sicher zu stellen, dass die durch die Kachelung auftretenden Randeffekte die Vollständigkeit des Extraktionsergebnisses nicht beeinträchtigen, werden überlappende Kacheln verwendet. Als Folge hieraus können allerdings Konflikte zwischen konkurrierenden Hypothesen für grundlegende Straßenabschnitte auftreten. Diese werden dadurch gelöst, dass die konkurrierenden grundlegenden Straßenabschnitte in überlappende und nicht-überlappende Teile aufgespalten werden. Die nicht-überlappenden Teile werden für die weitere Verarbeitung beibehalten. Von den konkurrierenden Teilen werden jeweils diejenigen übernommen, deren Eigenschaften am besten mit dem Straßenmodell übereinstimmen. Letzteres wird durch die gewählten Extraktionsparameter beschrieben. Ab dem Übergang zu den längeren Straßenabschnitten erfolgt die Extraktion auf größeren Bildbereichen bzw. auf dem gesamten Bild.

Straßenabschnitte werden durch das Aneinanderfügen benachbarter grundlegender Straßenabschnitte erzeugt (siehe Abbildung 5.10(b)). Mit den Straßenabschnitten liegen semantisch bereits relativ bedeutungsvolle Straßenobjekte vor. Ihnen können einerseits aussagekräftige Attribute zugeordnet werden. Andererseits erlauben sie einen einfachen Zugriff auf Informationen, die für die nachfolgenden Gruppierungsschritte benötigt werden. Ein Straßenabschnitt wird durch ein Polygon repräsentiert, für das zu jedem Punkt eine Breitenangabe vorliegt. Aus diesen elementaren Daten lassen sich durchschnittliche Breite, Variation der Breite, Länge, Richtung an den Endpunkten, etc. ableiten. Darüber hinaus liegen für einen Straßenabschnitt Angaben über seine topologische Funktion innerhalb des extrahierten Straßennetzes, das Vorhandensein von Markierungen, seinen globalen Kontext und eine Qualitätsbewertung vor. Mit dem Straßenabschnitt ist zudem der Zugriff auf die zugehörige Bildregion einfach.

Abbildung 5.11 zeigt ein weiteres Beispiel für die Fusion von Linien und Kanten und die Generierung von Straßenabschnitten. Die Detektion einzelner Gebäudedächer als Hypothesen für Straßenabschnitte ist dadurch zu erklären, dass die Dächer ebenfalls parallele Strukturen enthalten und zum Teil auch ähnliche radiometrische Eigenschaften wie Straßen aufweisen. Durch Einbeziehung



Abbildung 5.10. (a) Grundlegende Straßenabschnitte (b) Straßenabschnitte

von Information über lokal hohe Objekte, z.B. aus einem digitalen Oberflächenmodell, könnten diese Fehler zum Teil beseitigt werden. In diesem Beispiel wird ferner deutlich, dass Schattenwurf die Detektion von grundlegenden Straßenabschnitten stark beeinträchtigt.

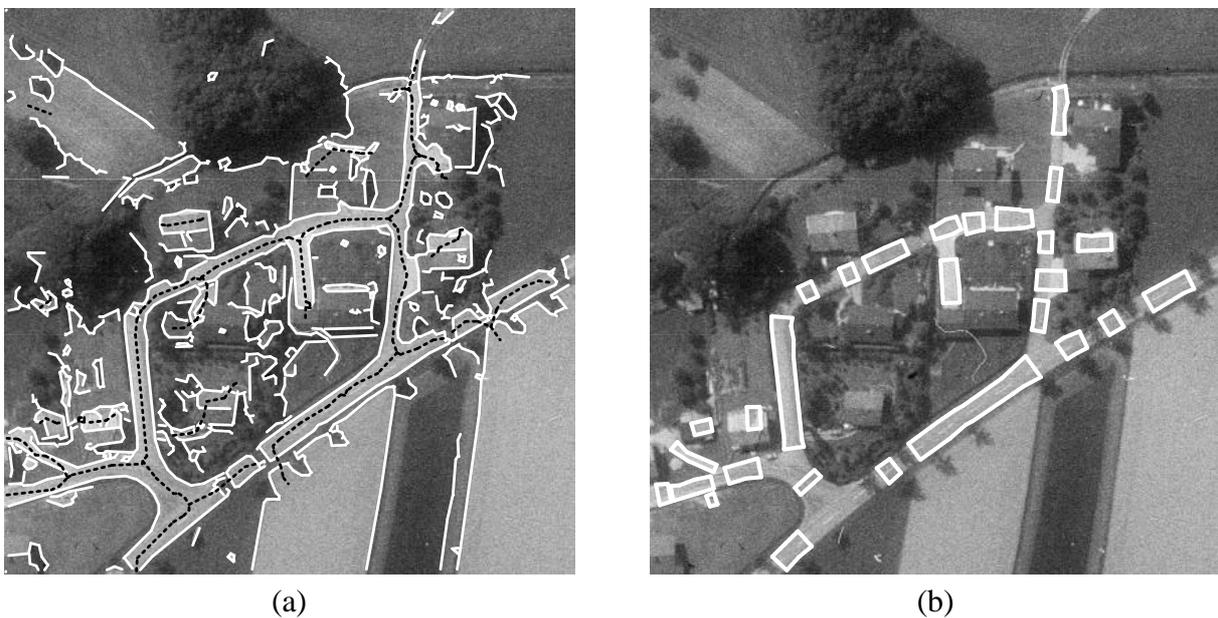


Abbildung 5.11. Weiteres Beispiel: (a) Linien und Kanten (b) Straßenabschnitte

Die Lücken zwischen Straßenabschnitten, die nach dem Zusammenfügen benachbarter anfänglicher Straßenabschnitte (siehe Abbildungen 5.10 und 5.11) auftreten, können in zwei Kategorien eingeteilt werden:

1. Relativ kleine Lücken, die dort auftreten, wo auf Grund mangelnder Parallelität keine Straßenstücke gebildet werden konnten. Gründe hierfür sind z.B. kurze Unterbrechungen der extrahierten Kanten oder eine Krümmung der Straße.

2. Größere Lücken, die durch lokale Störungen, durch Schatten oder Verdeckung oder durch Unterbrechung des normalen Straßenverlaufs im Bereich von Kreuzungen oder Einmündungen verursacht werden.

Während die kleineren Lücken auf Grundlage einfacher geometrischer Operationen geschlossen werden, ist es bei den größeren Lücken erforderlich, die im Bild vorhandenen Hinweise auf die Existenz einer Straße weiter zu untersuchen. Eine Beschreibung der Vorgehensweise für das Schließen der größeren Lücken und für die gleichzeitige Beseitigung falscher Hypothesen gibt der nachfolgende Abschnitt.

5.3.2 Gruppierung der Straßenabschnitte

Um Lücken zwischen korrekten Hypothesen zu schließen und falsche Hypothesen zu eliminieren, werden in einem iterativen Verfahren anhand geometrischer und radiometrischer Gruppierungskriterien Verbindungshypothesen aufgestellt, bewertet und überprüft. Die geometrischen Kriterien zur Generierung von Verbindungshypothesen umfassen Nähe, d.h. euklidische Entfernung, Kollinearität, d.h. Richtung in der Endpunkten, und Ähnlichkeit der Breite. Zusätzlich sollen die zu verbindenden Straßenabschnitte ähnliche radiometrische Eigenschaften aufweisen. D.h., mittlerer Grauwert und Standardabweichung dürfen nicht zu unterschiedlich sein. Die wichtigsten Kriterien für die Bewertung sind allerdings Nähe und Kollinearität. Würde nämlich großes Gewicht auf eine Ähnlichkeit in Breite und Radiometrie gelegt, so würde die Gruppierung zu längeren Straßenabschnitten in Fällen scheitern, bei denen sich, z.B. wegen einer zusätzlicher Fahrspur, die Breite der Straße ändert oder bei denen der Fahrbahnbelag wechselt.

5.3.2.1 Generierung von Verbindungshypothesen

Für die Generierung von Verbindungshypothesen ist es erforderlich, die genannten Kriterien mit Hilfe von Schwellwerten genauer zu definieren. Um harte Schwellwerte für die einzelnen Kriterien zu vermeiden, werden bei geringfügiger Überschreitung der geforderten Schwellwerte alle Kriterien in eine Gesamtbewertung der Verknüpfungshypothese zusammengefasst. Ist diese besser als ein Schwellwert, so wird die Hypothese dennoch angenommen. Das Kriterium „Nähe“ besteht aus zwei Komponenten: Neben der absoluten Entfernung, d.h. dem euklidischen Abstand, zwischen zwei Straßenabschnitten, wird zusätzlich ihre relative Entfernung berücksichtigt. Dies stellt sicher, dass die zu schließende Lücke zwischen zwei Straßenabschnitten auch im Verhältnis zur Länge der beiden Abschnitte nicht zu groß ist.

Die Gruppierung der Straßenabschnitte erfolgt iterativ. Für alle Paare von Straßenabschnitten wird überprüft, ob die geforderten Gruppierungskriterien erfüllt sind. Von Iteration zu Iteration wird der Schwellwert für die maximale Länge der zu schließenden Lücken vergrößert, während die übrigen Kriterien zunächst nahezu unverändert bleiben. Mit zunehmender maximaler Länge der zu schließenden Lücken werden gleichzeitig kurze, bislang nicht verknüpfte Hypothesen für Straßenabschnitte eliminiert. Die anfänglichen (Start-)Hypothesen für Straßenabschnitte sind in Abbildung 5.12 dargestellt. Abbildung 5.13 zeigt ein Zwischenergebnis des Gruppierungsprozesses. In stärker gekrümmten Bereichen versagt die vor allem auf Kollinearität basierende Vorgehensweise allerdings teilweise. Diesem Problem wird Rechnung getragen, indem bei größeren Lücken kein geradliniger Pfad zwischen den beiden zu verbindenden Endpunkten angenommen wird, sondern der Pfad durch eine kubische Kurve beschrieben wird. Hierbei wird die Form mittels einer kubischen Bezier-Kurve (siehe z.B. (FOLEY und VAN DAM 1982)) festgelegt.

Falls Verbindungshypothesen bestätigt werden, entsteht aus zwei ursprünglichen Straßenabschnitten ein neuer Straßenabschnitt, der aufgrund seiner größeren Länge besser bewertet wird als die



Abbildung 5.12. Gruppierung: Starthypothesen für Straßenabschnitte

beiden Vorgänger. Bei der Zurückweisung von Verbindungshypothesen wird zwar die Bewertung der beteiligten Straßenabschnitte nicht verändert, aber im Vergleich zu anderen Straßenabschnitten, deren Bewertungen infolge verifizierter Verbindungshypothesen angehoben werden, erscheinen sie dennoch als unsicherere Straßenabschnitte.

Ein prinzipielles Problem bei der Generierung von Verbindungshypothesen besteht darin, dass es ist oft nicht möglich, allein auf Basis lokaler geometrischer und radiometrischer Kriterien zu entscheiden, welche von mehreren konkurrierenden Verbindungshypothesen im Hinblick auf die Extraktion des Straßennetzes die beste ist. In vielen Fällen kann erst durch Berücksichtigung globaler Gruppierungskriterien die richtige Entscheidung getroffen werden. Dass die Nutzung von Wissen über die globalen Netzwerkeigenschaften von Straßen für die Generierung von Verbindungshypothesen wie in (STEGER et al. 1997, WIEDEMANN 2001) auch für den hier vorgestellten Ansatz eine Verbesserung des Extraktionsergebnisses bewirkt, wird in Abschnitt 5.3.4 exemplarisch aufgezeigt.



Abbildung 5.13. Gruppierung: Zwischenergebnis

5.3.2.2 Verifikation der Verbindungshypothesen

Bevor die generierten Verbindungshypothesen als Teile des Straßennetzes akzeptiert werden, wird überprüft, ob in der zugehörigen Bildinformation genügend Evidenz für das Vorhandensein einer Straße gefunden wird. Diese Verifikation erfolgt in einem Verfahren, das mehrere Stufen durchlaufen kann. Hierbei wird versucht, die Verbindungshypothese zuerst mit einem möglichst einfachen Verfahren zu bestätigen. Im ersten Teilschritt wird überprüft, ob die radiometrischen Eigenschaften mit dem vorgegebenen Straßenmodell übereinstimmen. Im Falle einer erfolgreichen Überprüfung gilt die Verbindungshypothese als bestätigt und die beiden Straßenabschnitte werden verbunden. Sollte die Überprüfung fehlschlagen, so werden in der nächsten Stufe so genannte „Ribbon-Snakes“ (siehe Abschnitt 2.3.3) eingesetzt. Diese haben den Vorteil, dass sie auch schwache oder stark fragmentierte Kanteninformation für die Detektion von Straßen nutzen können. Sollte auch diese zweite Stufe der Verifikation versagen, so wird als dritte Möglichkeit untersucht, ob die Annahme der Verbindungshypothese durch Informationen des lokalen Kontextes gerechtfertigt werden kann. Als mögliche Erklärung dafür, dass keine ausreichenden Bildmerkmale gefunden werden können, die dem Modell für das Objekt Straße entsprechen, dient hierbei der lokale Kontext *Verdeckung_Schatten*

(siehe Abschnitt 4.2.1). Kann die Verbindungshypothese auch durch den Kontext nicht verifiziert werden, so wird sie abgelehnt.

Bei einer erfolgreichen Verifikation einer Verbindungshypothese können Fälle auftreten, in denen die neu einzufügende Verbindung mit anderen Straßenabschnitten konkurriert (vgl. Abbildung 5.14). Sofern ein solcher Straßenabschnitt kürzer als die zu schließende Lücke ist und nicht mit anderen Abschnitten verbunden werden kann, wird er als fehlerhafte Hypothese betrachtet und gelöscht.

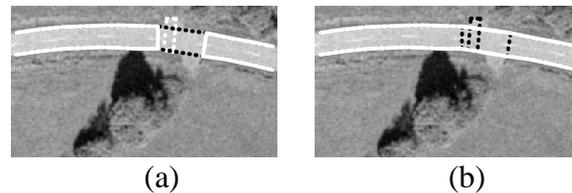


Abbildung 5.14. (a) Konflikt zwischen neuer (schwarz, gepunktet) und bereits existierender Hypothese (weiß, gepunktet) (b) Lösung: Elimination der schwächeren Hypothese

Wie im Abschnitt 5.3.2.1 erwähnt, werden bei längeren Lücken die zu verbindenden Straßenabschnitte nicht durch Geradenstücke sondern durch kubische Bezierkurven verknüpft. Damit wird erreicht, dass die richtige Bildregion für die Verifikation herangezogen wird. Abbildung 5.15(a) zeigt ein Beispiel, bei dem über einen größeren Bereich hinweg auf Grund von Schattenwurf keine Straßenabschnitte gefunden werden konnten. Bei Anwendung sehr niedriger Schwellwerte für die Winkeltoleranz und einer Beschränkung auf geradlinige Verbindungen wäre hier eine Verifikation der Verbindungshypothese nicht möglich. Erst eine Lockerung der Winkelschwellwerte in Verbindung mit der Approximation des Straßenverlaufs als kubische Bezierkurven ermöglicht es, die beiden Straßenabschnitte miteinander zu verbinden (siehe Abbildung 5.15(b)).

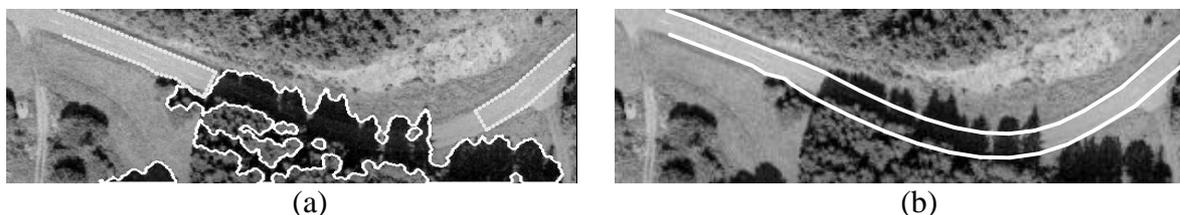


Abbildung 5.15. (a) Straßenabschnitte, Schattenregion (b) Verifizierte Verbindung

Nach der Vergrößerung des Schwellwertes für den Abstand werden in den folgenden Iterationen die Anforderungen hinsichtlich der Kollinearität reduziert. In dieser Gruppierungsphase kommt auch die Snake-Technik in Form der Ribbon-Snakes mehr und mehr zum Tragen. Bei größeren Abständen und größeren Winkelunterschieden treffen nämlich die vereinfachenden Annahmen über den mehr oder weniger geradlinigen Verlauf der Straße zwischen den zu verbindenden Endpunkten nur noch selten zu.

Der besondere Vorteil bei Verwendung der Ribbon-Snake (LAPTEV 1997, MAYER et al. 1998, LAPTEV et al. 2000) zur Straßenextraktion besteht darin, dass auch bei stark fragmentierten, die Straßenränder repräsentierenden Kanten und in Fällen, in denen nur ein Straßenrand im Bild sichtbar ist, die Extraktion von Straßen möglich ist. Die Überbrückung einer Lücke zwischen zwei Straßenabschnitten mit der Ribbon-Snake erfolgt in zwei Phasen. In der ersten Phase wird die Breite des Bandes festgehalten und nur die Position der Achse optimiert. Dies geschieht im Reißverschlussverfahren („Ziplock-Snake“), ausgehend von beiden zu verbindenden Endpunkten zur Mitte hin (siehe Abschnitt 2.3.3). In der zweiten Phase wird dann nur die Breite optimiert, d.h. an die Bildinformation angepasst. Falls die Varianz der Breite nach der zweiten Phase niedrig ist, wird

die Verknüpfungshypothese akzeptiert. In Abbildung 5.16 ist diese Vorgehensweise schematisch dargestellt. Die Abbildungen 5.16(a) und 5.16(c) zeigen jeweils einen optimalen Pfad, der durch die erste Phase der Anwendung der Ribbon-Snake gefunden wird. Die Abbildungen 5.16(b) und 5.16(d) zeigen die dazugehörigen Ergebnisse nach der Breitenanpassung in der zweiten Phase. Dadurch dass die Achse bereits durch die erste Phase fixiert ist, reicht für die Bestimmung der Breite ein deutlicher Kontrast auf einer Seite der Achse aus. Die Varianz der Breite in Abbildung 5.16(b) ist gering, so dass die Verbindungshypothese als verifiziert betrachtet wird. Infolge zufälliger Merkmale variiert die Breite in der Abbildung 5.16(d) dagegen sehr stark. Dies wird als Indiz für eine falsche Hypothese bewertet.

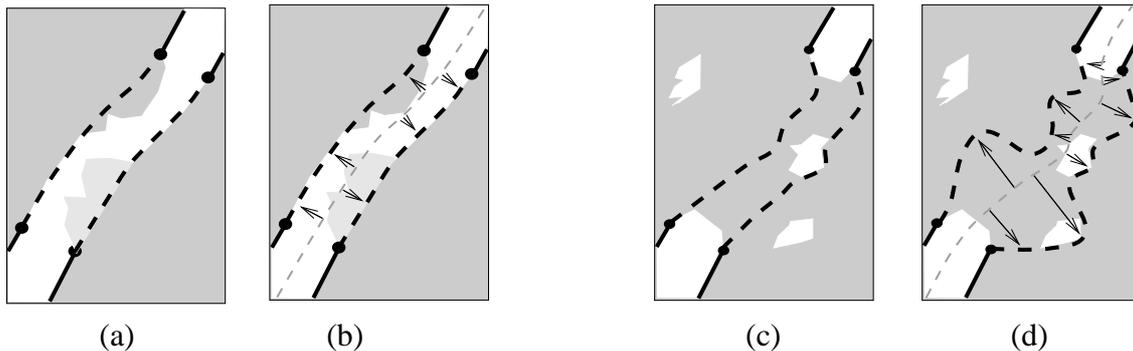


Abbildung 5.16. Schematische Darstellung der Verifikation einer Verbindungshypothese anhand der Breitenvarianz. Links (a-b): korrekte Hypothese; Rechts (c-d): falsche Hypothese

Abbildung 5.17 zeigt exemplarisch das Schließen einer Lücke unter Verwendung einer Ziplock-Snake. Die Verbindung zwischen den Straßenabschnitten wird ausgehend von beiden Endpunkten optimiert. Dazu wird die Ziplock-Snake in aktive und inaktive Stücke unterteilt. Die Anpassung des Bandes an die Bildinformation erfolgt jeweils nur für die aktiven Teile. Dadurch dass sich die aktiven Teile aufeinander zu bewegen, wird sukzessiv von den als bekannt gegebenen Enden her die optimale Verbindung bestimmt. Aus Abbildung 5.18 ist zu ersehen, dass die Verifikation selbst dann noch möglich ist, wenn die Straßenränder nur schwachen Kanten im Bild entsprechen. Abbildung 5.19 zeigt ein weiteres Beispiel für den Einsatz der Ribbon-Snake. Im Unterschied zu dem in Abbildung 5.18 dargestellten Fall, liegt hier nur einer der beiden Straßenränder im Schatten, der andere Straßenrand ist deutlich zu erkennen. Auch in diesem Fall gelingt es, den richtigen Straßenverlauf zu finden. Abbildung 5.20 zeigt ein Beispiel, in dem eine falsche Hypothese wegen der fehlenden Konstanz der Breite zu Recht verworfen wurde.

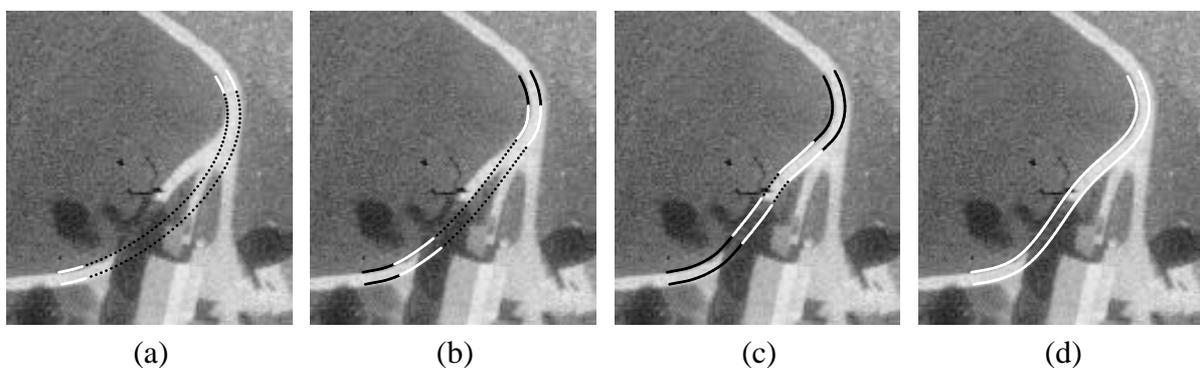


Abbildung 5.17. Optimierungsschritte einer „Ziplock“ Ribbon-Snake. (a)-(c) Passive Teile der Ribbon-Snake (gepunktet); momentan zu optimierende Teile (weiß); Ergebnis für bereits optimierte Teile (schwarz). (d) Endergebnis

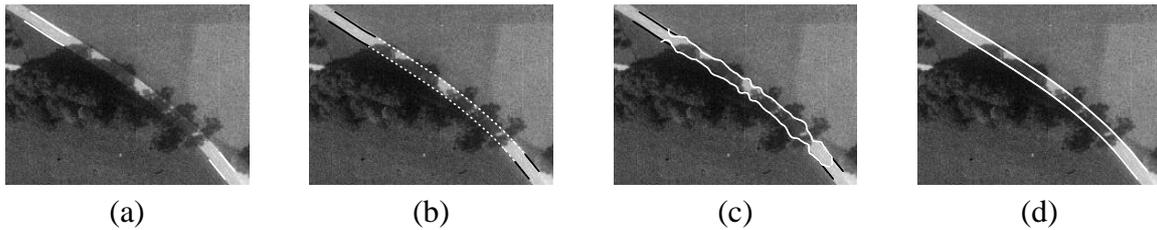


Abbildung 5.18. Schließen einer Lücke mittels Ribbon-Snake. (a) Anfängliche Hypothese (b) Optimaler Pfad; (c) Verifikation durch Anpassung der Breite (d) Akzeptanz der Hypothese wegen konstanter Breite

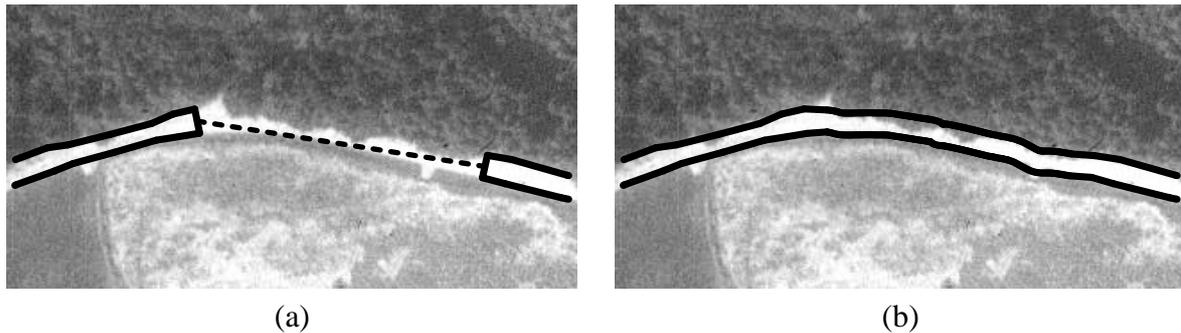


Abbildung 5.19. (a) Verbindungshypothese (b) Überbrückung mittels Ribbon-Snake

Reicht die Bildinformation nicht aus, um eine Verbindungshypothese zu bestätigen, so wird Wissen über den lokalen Kontext des betreffenden Straßenabschnitts berücksichtigt. D.h., es wird nach einer plausiblen Erklärung gesucht, warum die Lücke geschlossen werden darf, obwohl im Bild zuwenig Hinweise auf eine Straße gefunden werden. Von Bedeutung ist hier v.a. der lokale Kontext *Verdeckung_Schatten*. Ein Großteil der Information, die zur Erklärung dieser Problemsituationen erforderlich ist, kann mit Hilfe eines DOM und Kenntnis von Aufnahmeort und Aufnahmezeit gewonnen werden. Hiermit können Schattenbereiche im Bild prädiziert und detektiert sowie Aussagen über Verdeckungen gemacht werden (siehe Abschnitt 5.1.2). Zudem lassen sich einzelne hohe Objekte detektieren und anhand ihrer Textur im Bild in Vegetation und Gebäude unterscheiden. Damit können falsche Hypothesen für Straßen, die sich auf Hausdächern befinden, eliminiert werden.

Abbildung 5.21 zeigt das Zwischenergebnis der Straßenextraktion nach der Gruppierung der Straßenabschnitte. Durch das Einfügen von Verbindungen zwischen den anfänglich generierten Straßenabschnitten sind relativ lange Straßenabschnitte entstanden. Zudem konnten die kurzen, größtenteils fehlerhaften Straßenabschnitte im Bereich der Siedlung eliminiert werden.

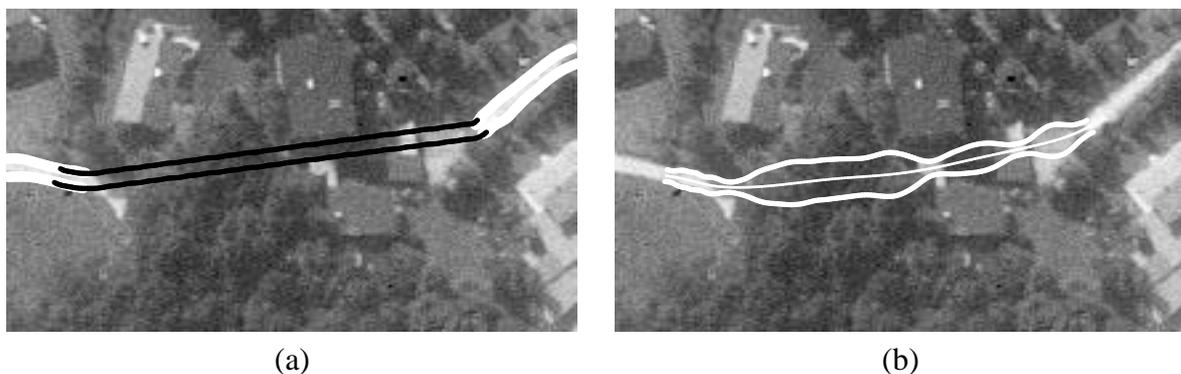


Abbildung 5.20. Beispiel für eine wegen fehlender Konstanz der Breite verworfene Verbindungshypothese



Abbildung 5.21. Straßenhypothesen

5.3.3 Netzbildung

Nach der Generierung von Verbindungshypothesen und deren Verifikation wird ein zusammenhängendes Straßennetz aufgebaut. Die im Zuge der Gruppierung entstandenen langen Straßenabschnitte werden hierzu durch Kreuzungen miteinander verbunden und damit das Straßennetz vervollständigt.

5.3.3.1 Extraktion von Kreuzungen

In dem vorgestellten Ansatz wird auf die Einbeziehung vorhandener GIS-Daten verzichtet. Damit ist eine Strategie, die auf Vorinformation über die Art der zu extrahierenden Kreuzung aufbaut, wie sie z.B. in (BOICHIS et al. 1998) verfolgt wird, nicht möglich. Da der Schwerpunkt auf der Straßenextraktion im offenen Gelände liegt, kommt für die Extraktion von Kreuzungen eine vereinfachte Kreuzungsmodellierung zum Einsatz.

Nachfolgend werden zwei Verfahren zur Generierung und Verifikation von Kreuzungshypothesen vorgestellt. Das erste Verfahren basiert auf der Berechnung von Schnittpunkten zwischen bereits

extrahierten Straßenachsen sowie zwischen den Verlängerungen von Straßenachsen an freien Endpunkten und anderen Straßenachsen. Das zweite Verfahren verwendet die Knotenpunkte aus der Linienextraktion in der reduzierten Auflösung zur Instantiierung von Kreuzungshypothesen.

Bei der **Verschneidung von Straßenachsen (Kreuzungen I)** erfolgt die Generierung von Kreuzungshypothesen allein auf Grund von geometrischen Kriterien. Bildinformation wird erst für die Verifikation der Hypothesen herangezogen. Diesem Verfahren liegen zwei wesentliche Annahmen zu Grunde:

- In den vorhergehenden Gruppierungsschritten ist es gelungen, in Kreuzungsbereichen eine oder mehrere Straßen durchgängig zu extrahieren.
- Im Kreuzungsbereich treten in erster Linie bei den einmündenden Straßen Defizite in der Extraktion auf.

Um Kreuzungen zu finden, wird somit zuerst nach Schnittpunkten zwischen den bereits extrahierten Straßenachsen gesucht. Diese Schnittpunkte entsprechen Vierer-Kreuzungen. Eine Verifikation ist für diese Kreuzungen nicht erforderlich, da für die entsprechenden Kreuzungsbereiche bereits im Laufe der Gruppierung der Straßenabschnitte eine Überprüfung der Übereinstimmung der Bildinformation mit dem Straßenmodell erfolgt ist. Für die Extraktion weiterer Kreuzungen werden anschließend alle Straßenabschnitte an ihren Endpunkten verlängert und mit benachbarten Straßenachsen zum Schnitt gebracht. Wie weit die einzelnen Straßen verlängert werden, hängt von der Gesamtlänge und Breite des jeweiligen Straßenabschnitts ab. Im Falle eines Schnittes werden an den Enden neue Abschnitte generiert, die bis zum Schnittpunkt mit der anderen Straße reichen. Die Verifikation dieses Abschnitts erfolgt weitgehend nach denselben Kriterien wie das Schließen der Lücken während des Gruppierungsprozesses (siehe Abschnitt 5.3.2.2). Es werden die radiometrischen Eigenschaften überprüft und gegebenenfalls wird auf lokale Kontextinformation zurückgegriffen. Ribbon-Snakes werden in diesem Fall nicht eingesetzt.

Abbildung 5.22 verdeutlicht diesen Ansatz zur Kreuzungsextraktion. Abbildung 5.22(a) zeigt die Straßenabschnitte in weiß. Die schwarz gepunkteten Regionen entsprechen den Flächen, die im Zuge der Kreuzungsbildung verifiziert werden. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.22(b) dargestellt. Die extrahierten Kreuzungen bestehen aus den Knotenpunkten und kurzen Stücken der angrenzenden Straßenachsen. Eine detailliertere flächenhafte Beschreibung der Kreuzungen wird nicht abgeleitet.

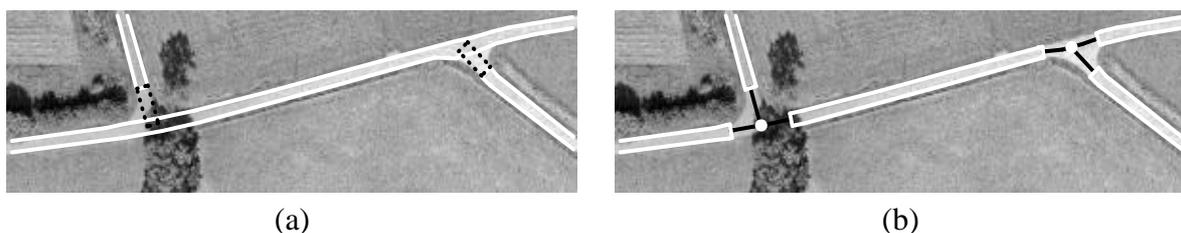


Abbildung 5.22. (a) Straßenabschnitte (weiß) und Verlängerungen (schwarz, gepunktet) (b) Straßenabschnitte und endgültige Kreuzungen

Als Alternative zu dem obigen Verfahren zur Extraktion von Kreuzungen wird auf die **Knotenpunkte aus der reduzierten Auflösung (Kreuzungen II)** zurückgegriffen, und die Kreuzungen werden ähnlich wie die Straßenabschnitte als flächenhafte Objekte extrahiert. Die Knotenpunkte fallen bei der Linienextraktion in der reduzierten Auflösung als Nebenprodukt an. Die Grundannahme besteht darin, dass die extrahierten Linien gute Hypothesen für Straßenachsen sind und daher die Verknüpfungspunkte zwischen den Linien Hinweise auf mögliche Kreuzungsbereiche geben. Da die Knotenpunkte aus der Linienextraktion bereits zu Beginn des iterativen Gruppierungsprozesses bekannt sind, kann dieser Ansatz anders als der erste Ansatz zur Extraktion von Kreuzungen bereits in einer sehr frühen Phase des iterativen Gruppierungsprozesses eingesetzt werden.

Um festzustellen, welche Straßenabschnitte über eine Kreuzung zu verbinden sind, werden von einem Knotenpunkt aus alle angrenzenden Linien bis zum nächsten anfänglichen Straßenabschnitt verfolgt (siehe Abbildung 5.23). Durch diese benachbarten Straßenabschnitte wird die Ausdehnung der Kreuzung definiert. Das Polygon, das die Kreuzungsfläche begrenzt, wird in feste und flexible Segmente unterteilt. Die festen Segmente sind die der Kreuzung zugewandten Seiten der benachbarten Straßenabschnitte. Die flexiblen Segmente beschreiben den Verlauf der Grenze der Kreuzungsfläche zwischen den festen Segmenten. Aufgrund der Vielfalt möglicher Kreuzungsformen werden an die flexiblen Segmente keine speziellen Anforderungen gestellt. Für die Extraktion wird davon ausgegangen, dass zwischen der Kreuzungsfläche und ihrer Umgebung ein deutlicher Kontrast besteht. D.h., dass im Bereich der flexiblen Segmente im Bild eine Kante existiert. Um den genauen Verlauf der Kreuzungsgrenze im Bereich der flexiblen Segmente zu bestimmen, werden Snakes (siehe Abschnitt 2.3.3) eingesetzt, die durch Bildkanten angezogen werden. Näherungswerte für die Initialisierung dieser Snakes werden aus der geometrischen Anordnung der Straßenabschnitte berechnet, die an die Kreuzung angrenzen.

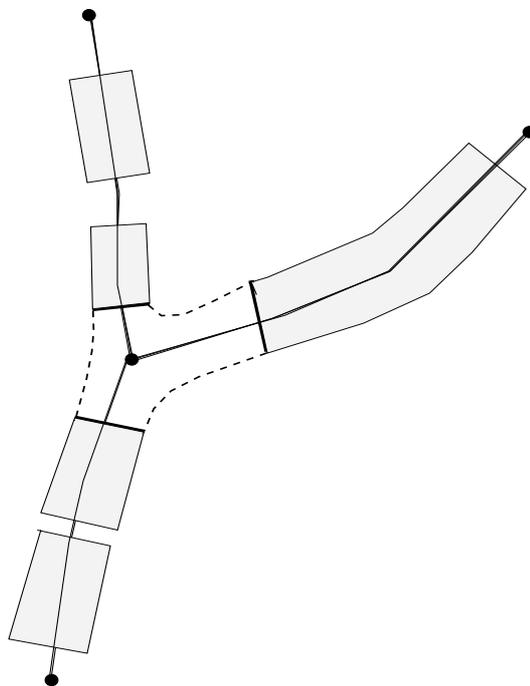


Abbildung 5.23. Anfängliche Straßenabschnitte (grau), extrahierte Linien und Knotenpunkt; Unterteilung des Kreuzungspolygons in feste Segmente (fette, durchgezogene Linien) und flexible Segmente (fette, gestrichelte Linien)

Abbildung 5.24 zeigt einen Bildausschnitt, in dem auf Grundlage von Knotenpunkten der Linienextraktion Hypothesen für mehrere Kreuzungs- und Einmündungsbereiche generiert wurden. Für die flexiblen Segmente der Kreuzungsbegrenzung sind in Abbildung 5.24(a) die Näherungen dargestellt. Das Ergebnis der genaueren Bestimmung des Kreuzungsbereiches mittels Snakes ist Abbildung 5.24(b) gezeigt. In Abbildung 5.25 sind die extrahierten Kreuzungen gemeinsam mit den Straßenabschnitten dargestellt.

Eine dem Ansatz Kreuzungen II verwandte weitere Möglichkeit, unter Verwendung der Knotenpunkte aus der Linienextraktion Kreuzungshypothesen zu generieren, besteht darin, die Knotenpunkte erst in einer späteren Phase der Gruppierung zur Generierung von Kreuzungen zu verwenden. Als Hypothese für den Kreuzungspunkt dient der Lotfußpunkt des Linienknotens auf einer unmittelbar benachbarten Straßenachse. Diese Variante zur Nutzung der Knoten aus der Linienextraktion ist im Detail in (MAYER et al. 1998, LAPTEV et al. 2000) beschrieben: Die Ausdehnung des Kreuzungsbereiches wird durch Verwendung einer Snake bestimmt. Dazu „blasen“ innere Kräfte eine



Abbildung 5.24. (a) Näherungen für Kreuzungen und Einmündungen (schwarz: feste Segmente, weiß: flexible Segmente) (b) Ergebnis der Snake-basierten Bestimmung der Kreuzungsbereiche

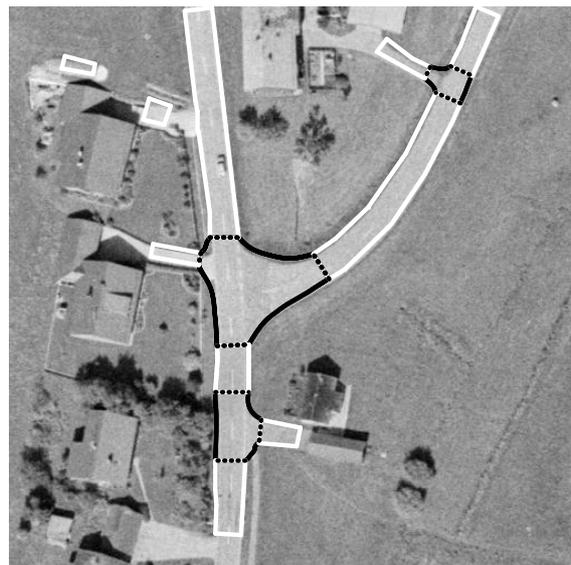


Abbildung 5.25. Extrahierte Straßenabschnitte und Kreuzungen

Snake in Form eines geschlossenen Polygons um den Lotfußpunkt wie einen Ballon auf (Balloon-Snake), wobei über die erste und zweite Ableitung Spannung und Glattheit forciert werden, während die von Kanteninformation ausgehende Bildenergie die Ausdehnung des Ballons einschränkt (siehe Abbildung 5.26(b)). Nach der Bestimmung des Kreuzungsbereichs werden die Verbindungshypothesen zwischen dem Lotfußpunkt und den nahegelegenen Endpunkten anderer Straßen mit Hilfe einer Ribbon-Snake verifiziert. Da in unmittelbarer Umgebung des Kreuzungspunktes in der Regel keine parallelen Bildkanten zur Verifikation dieser Verbindungshypothese herangezogen werden können, erfolgt die Optimierung der Ribbon-Snake nur bis zur Grenze des Kreuzungsbereichs (siehe Abbildung 5.26(c)). Abschließend wird ebenfalls mittels Snakes das die Kreuzung umschließende Polygon genauer bestimmt (vgl. oben; siehe Abbildung 5.26(d)).

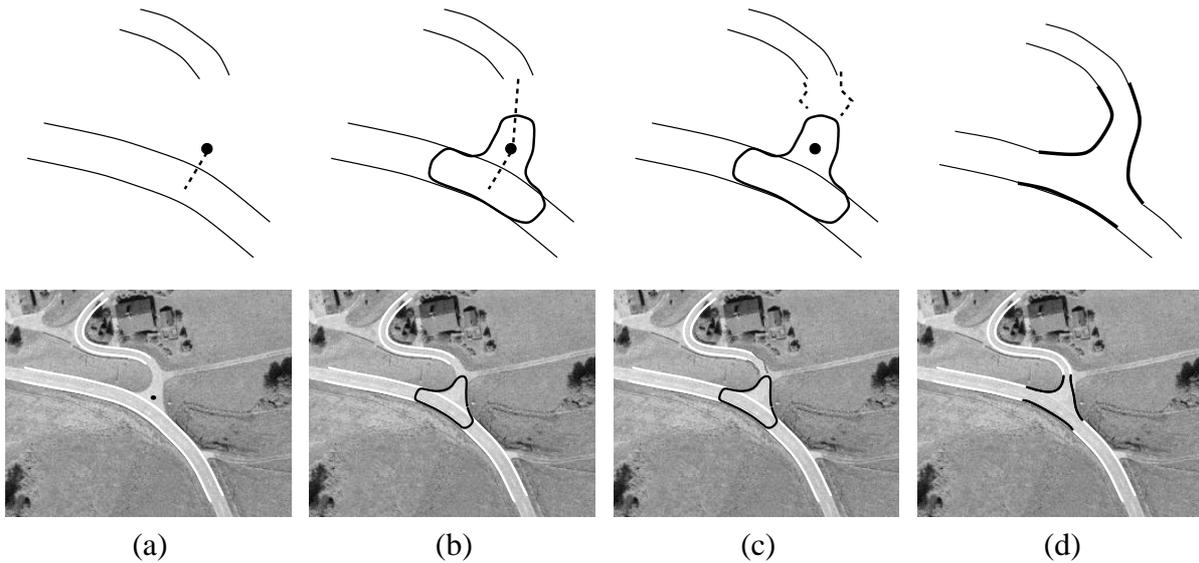


Abbildung 5.26. Kreuzungsextraktion II (Variante): (a) Knotenpunkt und Straßenabschnitte (b) Bestimmung des Kreuzungsbereichs (c) Verifikation der Verbindung (d) Straßen- und Kreuzungsränder

Vergleicht man die beschriebenen Verfahren für die Extraktion von Kreuzungen, so erscheinen die beiden Varianten des Ansatzes II dem Ansatz I konzeptionell überlegen. Das ist insbesondere deshalb der Fall, weil sie den Fusionsgedanken konsequent fortführen. Durch die Verwendung der Knotenpunkte aus der reduzierten Auflösung und die verfeinerte Bestimmung des Ausdehnung der Kreuzungen in der Originalauflösung nutzen sie die Information aus beiden Auflösungsstufen. Gegenüber dem ersten Ansatz haben sie darüber hinaus den Vorteil, dass die Kreuzungsextraktion nicht davon abhängt, wie weit die Enden eines Straßenabschnittes von der Kreuzung entfernt sind und welche Richtungen in den Endpunkten der Straßenabschnitte vorliegen. Zusätzlich erlauben sie eine detailliertere Beschreibung der Kreuzungsfläche als der erste Ansatz.

Bei der praktischen Anwendung des zweiten Ansatzes auf umfangreichere Testdaten haben sich allerdings mehrere gravierende Probleme herausgestellt: Die Bestimmung der flexiblen Segmente der Kreuzungsgrenzen mittels Snakes ist sehr instabil. Insbesondere können bereits relativ geringe Störungen durch Markierungen oder Schatten zu einem unbefriedigenden Ergebnis führen. Dazu kommt als generelles Problem, dass einerseits viele Knotenpunkte nicht Kreuzungen entsprechen und andererseits für Kreuzungen, in denen z.B. durch Schattenwurf Störungen auftreten, keine Knoten gebildet werden. Letzteres führt in vielen Fällen zum Verlust topologisch wichtiger Verbindungen im Straßennetz, ersteres hingegen zu sehr vielen unerwünschten Knoten, deren automatische Elimination oft schwierig ist. Die erste Variante ist dagegen weitgehend unabhängig von den Ergebnissen der Linienextraktion. Die Beschränkung auf einfache geometrische Bedingungen hat sich in vielen Fällen als ausreichend herausgestellt, und die Integration von Kontextinformation für die Verifikation ist in der selben Art und Weise möglich wie für die übrigen Teile des Straßennetzes. Allerdings ist die Bestimmung des Kreuzungspunktes abhängig von der Richtung im jeweiligen Endpunkt der Straßenabschnitte und bei einer größeren Entfernung zwischen Schnitt- und Endpunkt können bereits kleine Winkeländerungen dazu führen, dass die Position der Kreuzung grob fehlerhaft und die Kreuzungshypothese verworfen wird. Der Verzicht auf eine genaue Beschreibung der Kreuzungsgrenzen stellt dagegen keinen praktischen Nachteil dar, da die Snake-basierte Bestimmung keine zuverlässigen Ergebnisse liefert. Weil darüber hinaus im ersten Ansatz im Gegensatz zum zweiten eine effiziente Einbeziehung von Kontextinformation möglich ist, wird im Weiteren nur der erste Ansatz für die Extraktion von Kreuzungen verwendet.

Idealerweise sind nach der Kreuzungsextraktion alle Straßenhypothesen verbunden und es gibt mindestens einen Pfad zwischen jedem Paar von Punkten auf dem extrahierten Straßennetz. In den meisten Fällen kann ein solches Ergebnis allerdings nicht erwartet werden. Zum einen liegen wegen der begrenzten Größe der Bilder Kreuzungspunkte außerhalb des Bildes. Zum anderen sind die Ergebnisse fast immer mit Fehlern behaftet (siehe Kapitel 6). Vor allem in bebauten Gebieten und im Wald können meist nur Teile des Straßennetzes extrahiert werden. Dadurch, dass sich die Extraktion primär auf lokale Information stützt und die Netzwerkeigenschaften von Straßen somit nicht optimal genutzt werden, sind die Ergebnisse der Extraktion nur in der offenen Landschaft einigermaßen zuverlässig. In begrenztem Umfang ist es jedoch möglich, topologische Beziehungen zu verwenden, um die Bedeutung einzelner Straßen im Netz zu bewerten und einige der verbliebenen falschen Hypothesen zu eliminieren.

5.3.3.2 Netzanalyse und interne Bewertung

Durch die Extraktion von Kreuzungen werden zwischen Straßenabschnitten topologische Verbindungen geschaffen. Damit wird es möglich, für die Elimination schwacher Hypothesen zusätzlich zu den Attributen eines Straßenabschnittes, wie zum Beispiel seiner Länge, seine topologischen Eigenschaften als Kriterien zu verwenden. Zur Bewertung der topologischen Bedeutung eines Straßenabschnittes wird das extrahierte Straßennetz als Graph betrachtet (siehe Abschnitt 2.3.4) und für jeden Straßenabschnitt der Grad der Knoten der beiden Endpunkte des Straßenabschnittes bestimmt. Je höher der Knotengrad an den beiden Endpunkten ist, um so höher wird die Bedeutung dieses Straßenabschnittes bewertet. Auf Grund der Tatsache, dass das vorgestellte Verfahren in den meisten Fällen nur ein stark fragmentiertes Straßennetz extrahiert, ist die Aussagekraft der Topologie-Attribute im Hinblick auf die Elimination von „schwachen“ Straßenhypothesen eher gering. Erst durch die Einbeziehung globaler Gruppierungskriterien wird eine deutliche Verbesserung der Topologie des Straßennetzes erreicht (siehe Abschnitt 5.3.4).

Sofern zusätzlich zu den extrahierten Straßen auch Information über Gebäude vorliegt, können die topologischen Eigenschaften dazu verwendet werden, die Rolle einzelner Straßen im gesamten Netz genauer zu charakterisieren. So können zum Beispiel Sackgassen, d.h. kurze schmale Straßenabschnitte, die nur an einem Ende an das Straßennetz angeschlossen sind, als Zufahrten zu Gebäuden klassifiziert werden, falls sich an dem freien Ende des Straßenabschnittes ein oder mehrere Gebäude befinden.

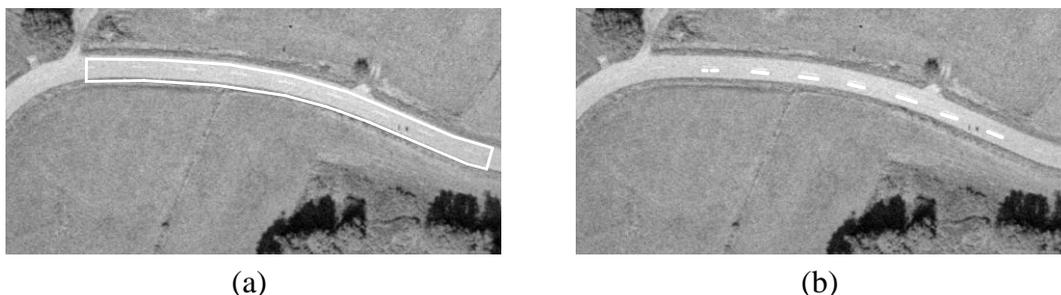


Abbildung 5.27. (a) Straßenabschnitt (b) Fahrbahnmarkierungen

Eine weitere äußerst bedeutende Möglichkeit, die extrahierten Straßenabschnitte zusätzlich zu überprüfen, bietet die Extraktion von Fahrbahnmarkierungen (siehe Abbildung 5.27). Das Vorhandensein von Fahrbahnmarkierungen dient als wertvoller zusätzlicher Hinweis und zugleich als sehr starke Bestätigung bei der Überprüfung von Straßenhypothesen. In Bilddaten mit einer Bodenpixelgröße von ca. 0.2 m erscheinen Fahrbahnmarkierungen nur als schwache Linien, deren Extraktion nur mit sehr niedrigen Schwellwerten des hier verwendeten Steger-Linienoperators (siehe Abschnitt 2.3.2)

möglich ist. Eine robuste Extraktion dieser Markierungen ist nur möglich, wenn der Suchraum auf den Bereich der bereits gefundenen Straßenhypothesen eingeschränkt ist, da sonst vor allem im Wald und auf Wiesen Unmengen dieser Linien extrahiert werden. Abbildung 5.27 zeigt einen extrahierten Straßenabschnitt und Fahrbahnmarkierungen, die innerhalb der Region der Straßenhypothese gefunden wurden. Durch diese Markierungen wird die Bewertung der Hypothese deutlich erhöht.

Allgemein lassen sich die Ergebnisse wie folgt charakterisieren: Die Qualität ist je nach globalem Kontext sehr unterschiedlich. Für die offene Landschaft sind die Ergebnisse weitgehend richtig und vollständig (siehe Abbildung 5.28). Voraussetzung für gute Ergebnisse ist ein ausreichend deutlicher Kontrast zwischen Straßen und Umgebung. Die Feldwege, die oft ebenfalls extrahiert werden, lassen sich anhand ihrer Breite meist relativ einfach von den übrigen Straßen unterscheiden. Für eine grobe Abschätzung der Zuverlässigkeit einzelner extrahierter Straßen kann zum einen die Information über die globalen Kontextgebiete (offene Landschaft = zuverlässig; Wald/Siedlung = unzuverlässig) herangezogen werden. Straßenabschnitte bzw. Verknüpfungshypothesen, die nur auf Grund von Information des lokalen Kontextes verifiziert werden konnten, sind ebenfalls relativ unzuverlässig. In Abbildung 5.28 sind die Teile des Straßennetzes, die nur unter Verwendung von lokaler Kontextinformation extrahiert werden konnten, gepunktet dargestellt.



Abbildung 5.28. Extrahierte Straßen und Kreuzungen; Punktiert: Straßen, die nur auf Grund von Kontextinformation verifiziert wurden.

In der Siedlung bereitet die große Anzahl von Hintergrundobjekten Probleme. Dadurch, dass die Straßen dort im Bild sehr oft unterbrochen sind, werden von Anfang an weniger korrekte Hypothesen für Straßenabschnitte gefunden, die sich zudem schlecht gruppieren lassen. Abbildung 5.29 ist ein Ausschnitt aus dem Luftbild in Abbildung 5.2. Sie verdeutlicht die Grenzen des Ansatzes in der Siedlung: Die in der offenen Landschaft gefundenen Straßen enden meist am Ortsrand. Eine konsequente Einbeziehung der DOM-Information, die hier noch nicht erfolgt ist, kann zum Teil weiterhelfen. Insbesondere die Nutzung von Ausschlussregionen für lokal hohe Objekte kann wesentlich zur Qualität des Ergebnisses beitragen.



Abbildung 5.29. Ergebnis für globalen Kontext *Siedlung*

5.3.4 Vervollständigung des Netzes

Ein offensichtliches Defizit des extrahierten Straßennetzes besteht darin, dass es in vielen Fällen aus mehreren unzusammenhängenden Teilen besteht. D.h., die im Modell geforderte topologische Verknüpfung aller Punkte des Netzes ist oft nicht gegeben. Eine Ursache hierfür ist, dass das der Extraktion zugrunde liegende Straßenmodell vor allem auf Straßen in der offenen Landschaft zutrifft, und für die Fortsetzung der Straßenextraktion in den anderen Gebieten des globalen Kontextes, d.h. Siedlung und Wald, keine geeigneten Verfahren zur Verfügung stehen. Darüber hinaus gibt es auch innerhalb zusammenhängender Netzteile Lücken, die mit den lokalen Gruppierungskriterien nicht geschlossen werden können.

Im Folgenden wird eine Möglichkeiten aufgezeigt, wie das mit Hilfe des vorgestellten Ansatzes extrahierte Straßennetz weiter vervollständigt werden kann. Das Augenmerk ist hierbei auf die Generierung von neuen Verbindungshypothesen unter Verwendung der Linien aus der reduzierten Auflösung gerichtet. Eine Überprüfung der neuen Verbindungshypothesen kann entweder auf die selbe Art und Weise erfolgen wie die Verifikation der Verbindungshypothesen zwischen zwei Straßenabschnitten in dem hier vorgestellten Ansatz (siehe Abschnitt 5.3.2.2) oder durch an Auflösung und globalen Kontext angepasste Verfahren.

Im Gegensatz zu der oben beschriebenen Vorgehensweise, bei der in erster Linie lokal nach Evidenz für Straßen gesucht wird, stützen sich andere Arbeiten zur Straßenextraktion (STEGER et al. 1997, WIEDEMANN und HINZ 1999, WIEDEMANN 2001) verstärkt auf die Nutzung der Netzwerkeigenschaften von Straßen. Dementsprechend rücken bei der Extraktion vor allem globale Kriterien in den Vordergrund. In diesem Abschnitt wird exemplarisch dargestellt, wie der Ansatz von (WIEDEMANN und HINZ 1999) mit dem Ansatz dieser Arbeit kombiniert werden kann, um von den Stärken beider Ansätze zu profitieren. In der nachfolgenden Beschreibung der Kombination der beiden Ansätze wird der Ansatz dieser Arbeit als Modul I und der Ansatz von (WIEDEMANN und

HINZ 1999) als Modul II bezeichnet. Modul II wurde für die Straßenextraktion aus mehreren (Spektral-)Kanälen und Bildern mit einer Auflösung von ca. 2–4 m entwickelt. Die Straßenextraktion beginnt in Modul II mit der Extraktion von Linien in allen Kanälen. Diese Linien werden in einen einheitlichen Liniendatensatz zusammengeführt und auf Grund geometrischer und radiometrischer Modellannahmen über Straßen bewertet. Dann wird aus den bewerteten Linien ein gewichteter Graph aufgebaut, und zwischen allen Paaren gut bewerteter Linien jeweils der beste Pfad in diesem Graphen berechnet. Da sich das Straßennetz dann als Summe aller „besten Pfade“ ergibt, beeinflusst die Auswahl der guten Linienpaare das Ergebnis sehr stark. Durch Berücksichtigung des so extrahierten Straßennetzes in dem Gruppierungsprozess von Modul I wird dessen Ergebnis verbessert.

Wie bereits oben festgestellt wurde, hat die Elimination von vermeintlich falschen Hypothesen für Straßen, die im Laufe des iterativen Gruppierungsprozesses durchgeführt wird, einen entscheidenden Einfluss auf das Endergebnis von Modul I. In diesen Eliminations-Schritten werden in der Regel nicht nur falsche sondern auch korrekte Hypothesen eliminiert. Die Ursache hierfür liegt darin, dass die Entscheidung über das Verwerfen einer Straßenhypothese vor allem auf den Eigenschaften des einzelnen Straßenabschnitts selbst beruht und ihre Bedeutung im gesamten Straßennetz nur unzureichend berücksichtigt wird. Die relativ restriktive Vorgehensweise bei der Entscheidung über die Elimination einzelner Straßenhypothesen führt dazu, dass die Extraktionsergebnisse weitgehend korrekt, aber zugleich weniger vollständig sind. In denjenigen Gebieten, in denen es nur wenige anfängliche Hypothesen gibt und diese zudem sehr kurz sind, wie z.B. in dichter bebauten Gebieten, führt die Elimination einiger weniger korrekter Hypothesen dazu, dass das Straßennetz in diesen Gebieten überhaupt nicht extrahiert werden kann. Gerade in solchen problematischen Gebieten können die Eigenschaften von Modul II genutzt werden. Modul II kann Modul I bei der Auswahl der zu eliminierenden Straßenhypothesen unterstützen und sicherstellen, dass Straßenabschnitte, die für die Verknüpfung des Straßennetzes wichtig sind, beibehalten werden.

Die konkrete Vorgehensweise bei der Kombination der beiden Module sieht folgendermaßen aus: Bevor Modul I im Zuge des iterativen Gruppierungsprozesses Hypothesen eliminiert, bewertet es alle Straßenabschnitte und übergibt sie an Modul II. Modul II führt diese mit den Ergebnissen der Linienextraktion zusammen und sucht nach optimalen Pfaden. Hierbei werden lediglich die von Modul I als gut bewerteten Kandidaten als Startpunkte genutzt. D.h., die Aufgabe, geeignete Startpunkte für Modul II auszuwählen wird von Modul I gelöst. Modul II gibt an Modul I das von ihm extrahierte Straßennetz zurück und stellt ihm dadurch Information darüber zur Verfügung, welche der als „schlecht“ bewerteten Kandidaten für die Topologie des gesamten Straßennetzes wichtig sind und daher nicht eliminiert werden dürfen. Darüber hinaus enthält das von Modul II extrahierte Straßennetz Hypothesen für Verknüpfungen, die anhand globaler Kriterien aufgestellt wurden, und nun in der höheren Auflösung von Modul I zusätzlich zu den lokalen Verknüpfungshypothesen überprüft werden können. Diese Schritte werden vor jedem Eliminationsschritt von Modul I durchgeführt.

Da im Zuge der lokalen Gruppierung von Modul I Lücken zwischen Straßenabschnitten geschlossen werden, die Schwellwerte relaxiert werden und sich die Bewertung der Abschnitte als „gut“ oder „schlecht“ ändern kann, werden sich in vielen Fällen auch die Startpunktpaare für Modul II ändern. Demzufolge ist es notwendig, dass Modul I vor jedem Eliminationsschritt Modul II erneut in die Entscheidung einbezieht. In Abbildung 5.30 wird dieser Prozess beispielhaft für einen der ersten Eliminationsschritte illustriert: Die weiß dargestellten Straßenabschnitte werden von Modul I als „gut“ bewertet und dienen als Startpunkte für Modul II. Die von Modul II zurück gelieferten Pfade sind gepunktet. In diesem Beispiel verhindern die anhand globaler Kriterien gefundenen Pfade, dass einige kurze, schlecht bewertete Abschnitte eliminiert werden. Unter der Annahme, dass die Stärke von Modul I darin besteht, korrekte Teile des Straßennetzes zu finden, und dass Modul II gute Hypothesen für globale Verbindungen liefert, profitieren beide Module von dieser Kombination.

Nach dem letzten Eliminationsschritt werden alle Pfade, die Modul II geliefert hat, dem von Modul I extrahierten Straßennetz hinzugefügt. Ein Teil der Pfade kann von Modul I verifiziert werden. Für andere Pfade wird zumindest die Position der einzelnen Punkte entlang des Pfades verbessert. Diese



Abbildung 5.30. Detail: Straßenabschnitte (Startstücke für Modul II sind weiß, andere schwarz dargestellt) und globale Verbindungshypothesen (weiß, gepunktet)

Verbesserung des Pfades wird durchgeführt, weil die Verbindungshypothesen von Modul II zwar als zuverlässig betrachtet werden, der geometrische Verlauf der Pfade aus Modul II allerdings weniger genau ist. Das Endergebnis der Kombination der beiden Gruppierungsmodule ist in Abbildung 5.31(b) dargestellt. Gegenüber dem Ergebnis der rein lokalen Gruppierung (vgl. Abbildung 5.28) sind vor allem zwei Verbesserungen festzustellen: Zum einen werden auch Verbindungen durch die Ortschaft gefunden. Zum anderen hängt das gesamte extrahierte Straßennetz zusammen, und vereinzelt fehlerhafte Extraktionen konnten eliminiert werden. Aber auch gegenüber dem Ergebnis der globalen Gruppierung (siehe Abbildung 5.31(a)) sind deutliche Verbesserungen erkennbar. Das Ergebnis der Kombination der beiden Module ist vollständiger und enthält weniger fälschlich extrahierte Straßen. Hinzu kommt eine höhere geometrische Genauigkeit.



(a)



(b)

Abbildung 5.31. (a) Ergebnis von Modul II (b) Ergebnis der Kombination von Modul I und Modul II

6. Ergebnisse und Bewertung

Zur Validierung wurde der in dieser Arbeit beschriebene Ansatz zur automatischen Straßenextraktion auf eine Reihe weiterer Datensätze angewendet. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse für ausgewählte Datensätze dargestellt und bewertet, die ohne die im Abschnitt 5.3.4 beschriebene Vervollständigung des Straßennetzes erzielt werden. Die Kriterien und das Verfahren, auf denen die Bewertung basiert, werden im Abschnitt 6.1 erläutert. Im Abschnitt 6.2 werden drei Datensätze und die jeweils erzielten Extraktionsergebnisse vorgestellt. Die Extraktionsergebnisse werden entsprechend den im Abschnitt 6.1 vorgestellten Kriterien quantitativ bewertet. Im Abschnitt 6.3 wird das Verfahren insgesamt bewertet und im Hinblick auf die Zielsetzung „Automatische Datenerfassung“ diskutiert.

6.1 Bewertungskriterien

Bei der Evaluierung von Ergebnissen ist zwischen interner und externer Evaluierung zu unterscheiden. Während die interne Evaluierung zur Selbstdiagnose eines Systems herangezogen werden kann, und das Verfahren hierbei selbst Aussagen über die Qualität seiner Ergebnisse macht, wird bei der externen Evaluierung das Ergebnis von einem unabhängigen Verfahren mit einem als korrekt betrachteten Ergebnis verglichen.

Es wird oft vorgeschlagen, dass jedes Verfahren zur automatischen Extraktion von Objekten oder Objektteilen in der Lage sein soll, mitzuteilen, wie sicher seine Ergebnisse sind (FÖRSTNER 1996). Idealerweise sollte dies in Form von statistischen Genauigkeitsangaben erfolgen. In vereinfachter Form kann dies aber z.B. auch dadurch geschehen, dass die extrahierten Objekte anhand der intern ermittelten Qualitätsmaße wie bei einer Ampel in die Klassen „rot“, „gelb“ und „grün“ eingeteilt werden, um damit einem Operateur die Überprüfung und die Nachbearbeitung zu erleichtern: „rot“ bedeutet hierbei „vermutlich falsch, auf jeden Fall zu überprüfen“, „gelb“ bedeutet „weniger sicher, ggf. zu überprüfen“ und „grün“ bedeutet „sichere Straße, keine Überprüfung erforderlich“. Als Kriterien für eine interne Bewertung und eine Prognose im Sinne dieses „Ampel-Paradigmas“ eignen sich für einzelne Straßenabschnitte bei dem hier verwendeten Extraktionsverfahren jeweils

- der Anteil der überbrückten Lücken,
- die Übereinstimmung der als sicher betrachteten Stücke mit den geometrischen und radiometrischen Annahmen des Modells sowie das Vorhandensein von Markierungen,
- und die Verknüpfung mit anderen Straßen.

Bei der in Abschnitt 6.2 durchgeführten externen Evaluierung wird eine interne Bewertung der Qualität einzelner Straßenabschnitte durch das Extraktionsverfahren selbst nicht berücksichtigt. Das automatisch extrahierte Straßennetz wird mit einer manuell erstellten Referenz verglichen, und es wird angenommen, dass diese Referenz keine Fehler enthält. Die externe Bewertung der jeweils erzielten Ergebnisse wurde mit dem von (HEIPKE et al. 1998, WIEDEMANN 2001) vorgestellten Evaluierungsverfahren durchgeführt. Hierfür wird die von WIEDEMANN (1998) bereitgestellte Implementierung verwendet. Die Grundzüge dieses Evaluierungsverfahrens werden im Folgenden kurz erläutert.

Das für die Evaluierung verwendete Verfahren bewertet das extrahierte Straßennetz hinsichtlich

- Vollständigkeit,

- Zuverlässigkeit
- und geometrischer Genauigkeit,

nicht jedoch hinsichtlich seiner Topologie. Für die Bewertung wird nur die Position der Straßenachse herangezogen, weitere Attribute, wie zum Beispiel Straßenbreite oder Straßenklasse, bleiben unberücksichtigt. Prinzipiell könnten zwar auch die in (WIEDEMANN und EBNER 2000) vorgestellten Maße („Zusammenhang“ und „Umfwegfaktor“) für die Bewertung der Topologie herangezogen werden, jedoch bestehen die mit dem vorgestellten Ansatz extrahierten Straßennetze in der Regel aus relativ vielen Zusammenhangskomponenten, so dass auch ohne objektive externe Bewertung klar ist, dass die topologische Qualität der Ergebnisse eher unbefriedigend ist. Zu erklären ist die schlechte topologische Qualität der Ergebnisse dadurch, dass das Wissen über die Netzwerkeigenschaften von Straßen für die Extraktion nicht bzw. nur in sehr geringem Maße genutzt wird.

Die „Vollständigkeit“ gibt an, welcher Prozentsatz der in den Referenzdaten enthaltenen Straßen im Extraktionsergebnis enthalten ist. Die „Zuverlässigkeit“ gibt hingegen an, wie viel Prozent des Extraktionsergebnisses in den Referenzdaten enthalten sind, d.h., wie viel Prozent der extrahierten Straßen tatsächlich Straßen sind. Im Idealfall liegen beide Werte bei 100%. D.h., es wurden alle Straßen extrahiert und das Extraktionsergebnis enthält keine falschen Straßen. Die geometrische Genauigkeit der extrahierten Straßenachsen wird anhand des Root-Mean-Square-(RMS-)Fehlers, d.h. der mittleren quadratischen Abweichung von den manuell erfassten Achsen bewertet. Der RMS-Fehler wird in [m] angegeben, jedoch ist hierbei auch die Auflösung der Bilder zu berücksichtigen. Weitere Bewertungsmaße wie „Qualität“ oder „Redundanz“ (HARVEY 1999) werden nicht verwendet, da das verwendete Qualitätsmaß letztlich aus den Werten für Vollständigkeit und Zuverlässigkeit abgeleitet wird und daher keine zusätzliche Information enthält. Redundante, d.h., mehrfache Extraktionen des selben Straßenabschnittes kommen in den Ergebnissen praktisch nicht vor.

Die Berechnung der genannten Bewertungsmaße setzt die Zuordnung einzelner Teilstücke des extrahierten Straßennetzes und einzelner Teilstücke des Referenznetzes voraus. Da diese Zuordnung innerhalb eines festzulegenden räumlichen Bereiches, d.h. eines Puffers, erfolgt, können die Zahlenwerte, die man für die einzelnen Bewertungsmaße erhält, je nach der Breite des Puffers variieren. Abgesehen von dem Fall, dass die Pufferbreite sehr klein gewählt wird, werden die Ergebnisse des Bewertungsverfahrens jedoch kaum durch die Wahl der Pufferbreite beeinflusst. Dies ist damit zu erklären, dass die Position der extrahierten Straßen relativ genau ist. Falls es bei der Extraktion einer Straße Probleme gibt, so führt das in der Regel nicht dazu, dass die Straße an der falschen Position gefunden wird, sondern dass die Extraktion gänzlich scheitert. Auf die Möglichkeit, bei der Bewertung der Extraktionsergebnisse den Zusammenhang zwischen Vollständigkeit und Pufferbreite ähnlich wie (GOODCHILD und HUNTER 1997) für detailliertere statistische Genauigkeitsaussagen zu nutzen, wird daher verzichtet.

6.2 Beispieldatensätze und Extraktionsergebnisse

Im Folgenden werden für drei Datensätze Zwischen- und Endergebnisse dargestellt. Die Endergebnisse werden sowohl qualitativ beurteilt als auch quantitativ bewertet. Für den Datensatz II erfolgt zusätzlich eine Bewertung der Ergebnisse für Straßen unterschiedlicher Breite. Für den Datensatz III werden außerdem die Ergebnisse evaluiert, die durch eine sequentielle Kombination lokaler und globaler Gruppierungskriterien wie z.B. in (BAUMGARTNER et al. 1999a) erreicht werden. Welche Verbesserungen durch diese im Vergleich zu Abschnitt 5.3.4 weniger aufwändige Vervollständigung des Straßennetzes erreichbar sind, wurde in (HINZ et al. 2000) ausführlich untersucht.

Bei **Datensatz I** (Abbildung 6.1(a)) handelt es sich um ein Luftbild mit einer Bodenauflösung von ca. 0.25 m. Die Szene umfasst ein Gebiet von ca. 1 km² und enthält überwiegend landwirtschaftlich genutzte Flächen und Wald. Die Straßen und Wege in der *offenen Landschaft* sind im

Bild signifikant heller als ihre Umgebung und treten deutlich hervor. In Abbildung 6.1(b) sind die als *offene Landschaft* segmentierten Regionen dargestellt. Es kommen nur einfache Kreuzungen und wenige störende Hintergrundobjekte vor. Im *Wald* sind die Straßen aufgrund von Schatten und Verdeckungen kaum zu erkennen. Die wenigen Häuser sind relativ weit entfernt von den Straßen. Sie beeinflussen das Aussehen der Straßen nur indirekt durch die Einfahrten, die die Durchgängigkeit des Straßenrandes vereinzelt unterbrechen. Aus Sicht der Straßenextraktion handelt es sich um eine Szene von geringer Komplexität. Das dem Verfahren zugrunde liegende Straßenmodell für die *offene Landschaft* beschreibt Form und Aussehen der Straßen außer für die Waldflächen sehr gut. Dies zeigt sich auch darin, dass die in einer reduzierten Auflösung extrahierten Linien einen großen Teil des Straßennetzes enthalten und der Anteil der Linien, die nicht zu einer Straße gehören, relativ gering ist (siehe Abbildung 6.2(a)).

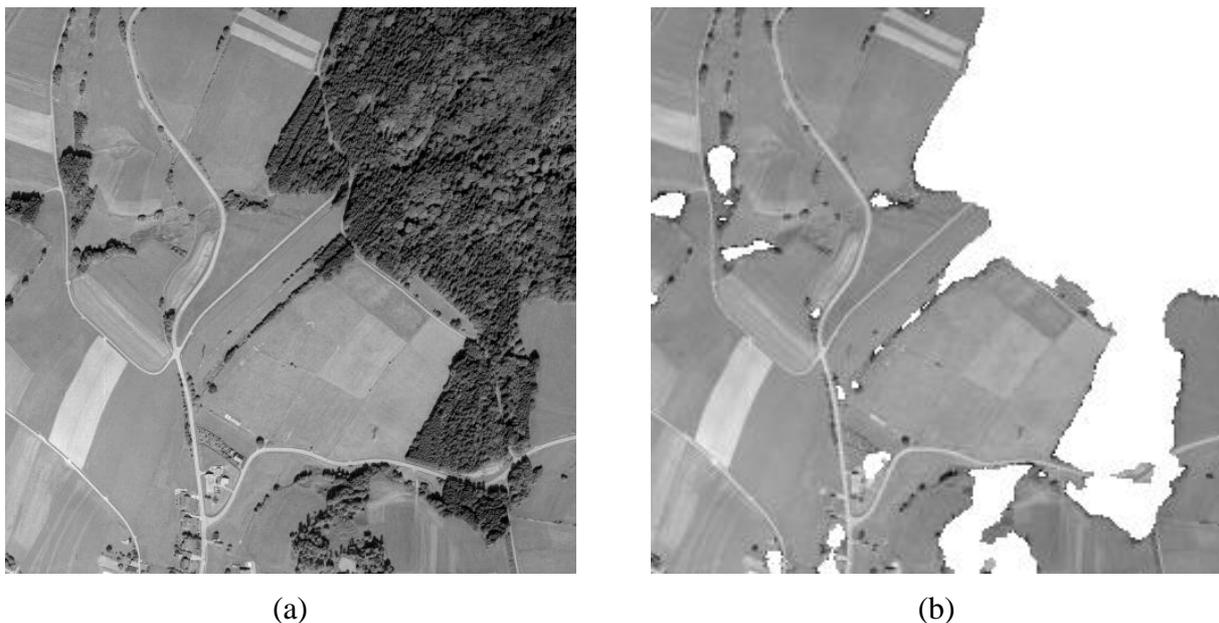


Abbildung 6.1. Datensatz I: (a) Luftbild (b) Offene Landschaft

Die in Abbildung 6.2(b) dargestellten anfänglichen Hypothesen für Straßenabschnitte lassen bereits erkennen, dass sehr wenige falsche Hypothesen gebildet wurden, und die gefundenen Hypothesen das Straßennetz bereits weitgehend abdecken. D.h., für die nachfolgenden Gruppierungsschritte ist die Aufgabe deutlich einfacher als in dem Beispiel aus Kapitel 5. Die gute Übereinstimmung von Form und Aussehen der Straßen mit den grundlegenden Modellannahmen spiegelt sich auch in der Qualität der Extraktionsergebnisse wider (siehe Abbildung 6.3(a)). Aus dem Vergleich des automatisch extrahierten Straßennetzes mit den manuell erfassten Referenzdaten (Abbildung 6.3(b)) resultieren die in Tabelle 6.1 zusammengestellten Evaluierungsergebnisse.

	Gesamtes Bild	Offene Landschaft
Vollständigkeit [%]	76	91
Zuverlässigkeit [%]	98	98
RMS [m]	0.41	0.31

Tabelle 6.1. Datensatz I: Zusammenstellung der Ergebnisse der Evaluierung

Die Bewertung wurde einmal für das gesamte Bild durchgeführt, und einmal wurden nur die Teile des Straßennetzes bewertet, die sich in der offenen Landschaft befinden. Die separate Evaluierung für

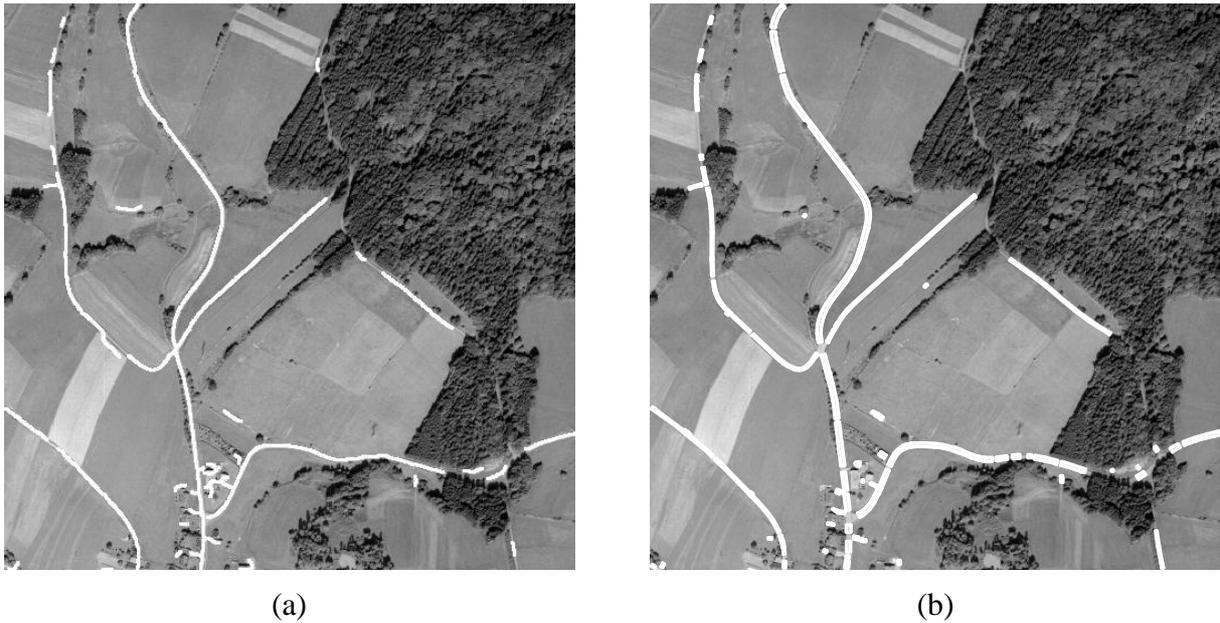


Abbildung 6.2. Datensatz I: (a) In der reduzierten Auflösung extrahierte Linien (b) Anfängliche Hypothesen für Straßenabschnitte

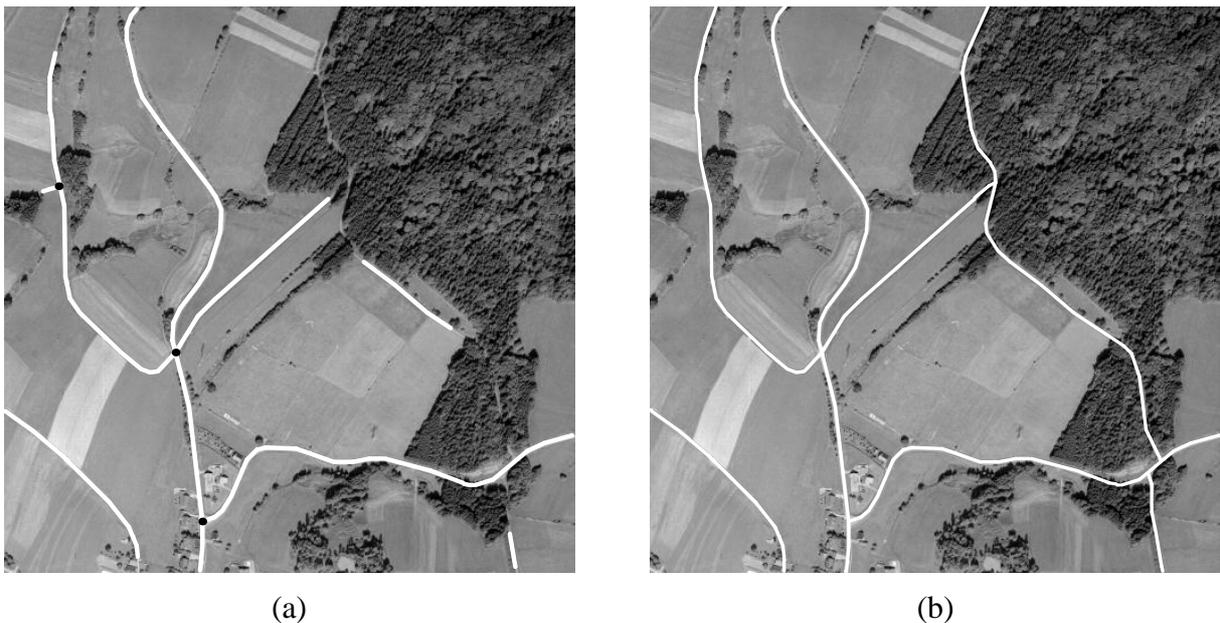


Abbildung 6.3. Datensatz I: (a) Extrahiertes Straßennetz (Straßenachsen und Kreuzungen); (b) Manuell erfasstes Referenznetz

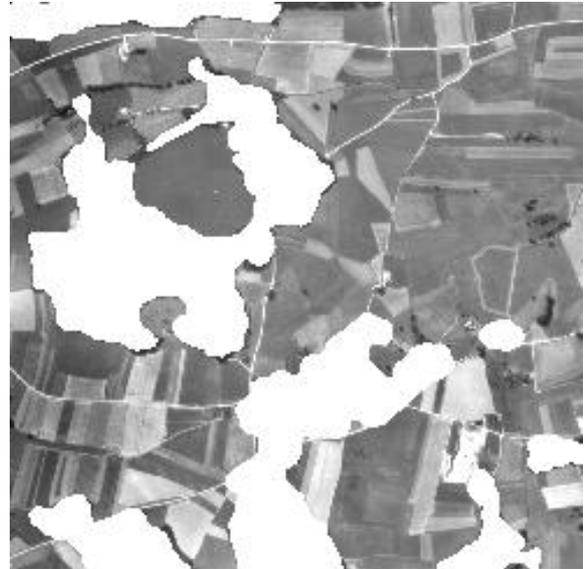
die offene Landschaft zeigt, dass dort das extrahierte Straßennetz vollständiger und auch deutlich genauer extrahiert werden konnte als für das gesamte Bild. Abgesehen von einem kurzen Stück eines Feldweges, das in der Referenz nicht enthalten ist, gibt es keine fälschlicherweise extrahierten Straßen. Bemerkenswert ist jedoch, dass die Zuverlässigkeit für das gesamte Bild genauso gut ist wie für die offene Landschaft. Dies deutet darauf hin, dass das Extraktionsverfahren — zumindest bei einfachen Szenen — robuste Ergebnisse liefert.

Datensatz II (Abbildung 6.4(a)) ist ein Ausschnitt eines panchromatischen Luftbildes und liegt mit einer Bodenauflösung von ca. 0.4 m zwischen den Auflösungen von Datensatz I (ca. 0.25 m) und Datensatz III (ca. 0.5 m). Das abgebildete Gebiet umfasst eine Fläche von ca. 3 km² und enthält eine

ländliche Szene mit einer kleinen Ortschaft. Aus Sicht der Straßenextraktion ist dieser Datensatz komplexer als der Datensatz I, da große Teile des Bildes nicht zur *offenen Landschaft* gehören (vgl. Abbildung 6.4(b)). Insbesondere im Bereich der Ortschaft wird die Straßenextraktion durch Gebäude erschwert. Für die Bearbeitung solcher Szenen wäre eine umfassendere Modellierung der Relationen zwischen Straßen und Gebäuden notwendig. In den Waldbereichen ist dagegen die Erkennung und genaue Lokalisierung der Straßen in diesem Bild selbst für einen Menschen schwierig.



(a)



(b)

Abbildung 6.4. Datensatz II: (a) Luftbild (b) Offene Landschaft

Vergleicht man in Abbildung 6.5 das automatisch extrahierte Straßennetz und die manuell erfasste Referenz visuell, so stellt man fest, dass nicht nur in Wald und Siedlung sondern auch in der offenen Landschaft Teile des Straßennetzes nicht gefunden wurden. Infolge des hohen Anteils an



(a)



(b)

Abbildung 6.5. Datensatz II: (a) Extrahiertes Straßennetz (Straßenachsen und Kreuzungen); (b) Manuell erfasstes Referenznetz

Straßen in Wald- und Siedlungsflächen liegt die Vollständigkeit bezüglich des gesamten Bildes lediglich bei 68%. Für die offene Landschaft werden immerhin 77% Vollständigkeit erreicht (siehe Tabelle 6.2). Neben den etwas niedrigen Werten für die Vollständigkeit fallen die hohen Werte für die Zuverlässigkeit auf. Da es sich bei Vollständigkeit und Zuverlässigkeit um zumindest teilweise gegensätzliche Zielvorgaben handelt, lassen sich die Ergebnisse der Bewertung hier so interpretieren, dass die guten Werte für die Zuverlässigkeit zu Lasten der Vollständigkeit erreicht wurden. Die geometrische Genauigkeit entspricht wie für Datensatz I in etwa der Bodenauflösung des Bildes.

	Gesamtes Bild	Offene Landschaft
Vollständigkeit [%]	68	77
Zuverlässigkeit [%]	99	99
RMS [m]	0.48	0.39

Tabelle 6.2. Datensatz II: Zusammenstellung der Ergebnisse der Evaluierung

Anhand dieses Datensatzes wird exemplarisch gezeigt, inwiefern die Qualität der Extraktion vom Straßentyp beeinflusst wird. Hierzu werden die Straßen in der Referenz und die extrahierten Straßen anhand ihrer Breite in zwei Klassen eingeteilt (siehe Abbildung 6.6). Betrachtet man das Extraktionsergebnis separat für Straßen und Wege, die breiter als 4 m sind, so steigen die Werte für die Vollständigkeit deutlich an (siehe Tabelle 6.3).

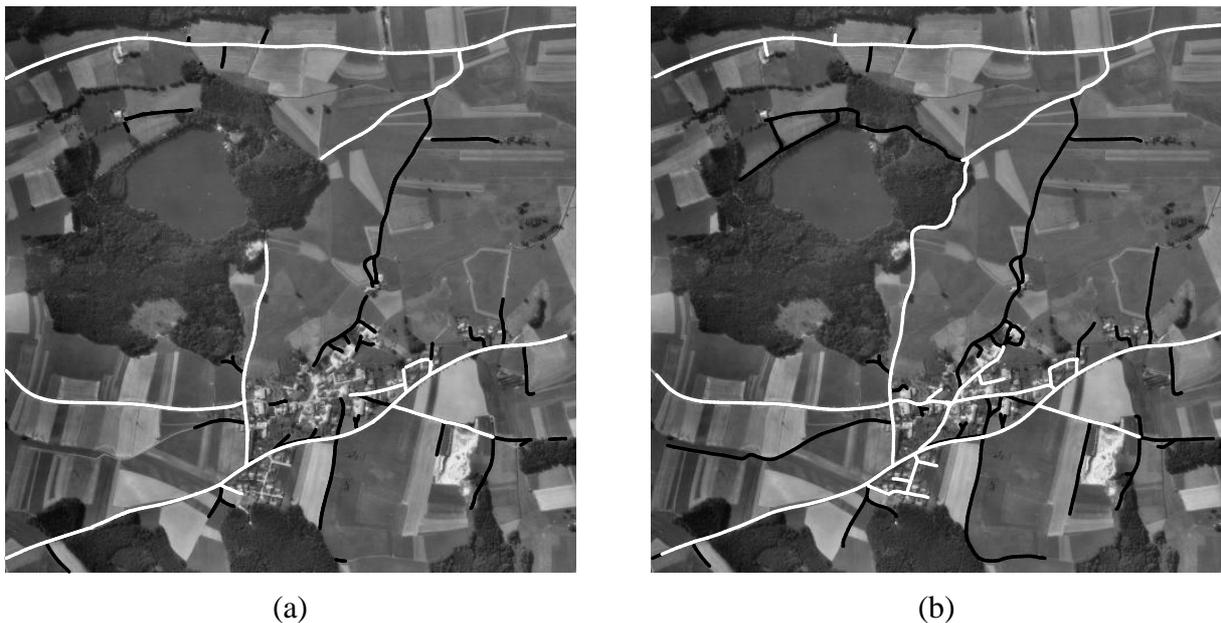


Abbildung 6.6. Datensatz II: Unterscheidung der Straßen nach ihrer Breite – Straßenbreite ≥ 4 m (weiss), Straßenbreite < 4 m (schwarz)
(a) Extraktion (b) Referenz

	Gesamtes Bild	Offene Landschaft
Vollständigkeit [%]	77	93
Zuverlässigkeit [%]	98	99
RMS [m]	0.51	0.41

Tabelle 6.3. Datensatz II: Ergebnisse der Evaluierung für breite Straßen (≥ 4 m)

Betrachtet man die nicht extrahierten schmalen Straßen näher, so sind vor allem zwei Ursachen für die Probleme bei der Extraktion zu erkennen:

- Bei den in der Extraktion fehlenden Straßen handelt es sich um kaum befestigte Feldwege. Die zugehörigen Bildregionen erfüllen daher, meist bedingt durch ihre Bauart, das vom Straßenmodell geforderte Homogenitätskriterium nicht.
- Aufgrund der geringen Breite und der Bodenauflösung von ca. 0.4 m sind die Straßenflächen im Bild weniger als 10 Pixel breit. Dies führt dazu, dass sich Störungen durch andere Objekte und zufällige radiometrische Unterschiede stärker auf die Extrahierbarkeit auswirken. D.h., Extraktionskriterien, die sich auf die Flächenhaftigkeit von Straßen stützen, sind unzuverlässiger. Das kann als Indiz dafür gewertet werden, dass für den vorgestellten Ansatz die zu extrahierenden Straßen eine gewisse Mindestbreite in Pixel nicht unterschreiten sollten.

Der überwiegende Teil der nicht extrahierten breiten Straßen befindet sich innerhalb der Siedlungs- und Waldflächen. In der Zuverlässigkeit unterscheiden sich die Ergebnisse der Evaluierung für die breiten Straßen nicht von der Zuverlässigkeit der gesamten Extraktion. Aus den RMS-Werten in Tabelle 6.2 und Tabelle 6.3 ergibt sich, dass die geometrische Genauigkeit der extrahierten breiten Straßen in etwa auf dem selben Niveau liegt wie die Genauigkeit der übrigen Straßen.

Datensatz III (Abbildung 6.7(a)) ist ein Ausschnitt eines panchromatischen Luftbildes mit einer Bodenauflösung von ca. 0.5 m und umfasst eine Fläche von ca. 5 km². Das abgebildete Gebiet besteht abgesehen von einigen kleineren Weilern und Einzelhöfen überwiegend aus landwirtschaftlich genutzten Flächen. In den Ergebnissen der texturbasierten Segmentierung wurden nur wenige Bereiche nicht als *offene Landschaft* klassifiziert (siehe Abbildung 6.7(b)). Die Szene enthält ein relativ umfangreiches Straßen- und Wegenetz mit vielen Kreuzungen. Bei den meisten Straßen handelt es sich um kleinere Nebenstraßen. Lediglich im rechten unteren Viertel des Bildes befindet sich eine deutlich breitere Straße. Um sowohl diese Straße als auch die übrigen Wege extrahieren zu können, wurde die Extraktion der anfänglichen Hypothesen für Straßenstücke zweimal – mit jeweils unterschiedlichen Parametern für die Straßenbreite durchgeführt. Ab der Phase der Gruppierung, die über einzelne Bildkacheln hinausgeht, wurden diese Straßenstücke gemeinsam bearbeitet.



(a)



(b)

Abbildung 6.7. Datensatz III: (a) Luftbild

(b) Offene Landschaft

Das Ergebnis der Extraktion ist in Abbildung 6.8 dem manuell erfassten Referenznetz gegenübergestellt. Die Position der automatisch extrahierten Straßenachsen weicht von den manuell erfassten Referenzdaten im Mittel um ca. 0.5 m ab. Berücksichtigt man, dass die Bodenauflösung des Bildes ebenfalls ca. 0.5 m beträgt und zudem die Erfassung der Referenzdaten nur pixelgenau durchgeführt wurde, so ist die erzielte geometrische Genauigkeit sehr zufriedenstellend.

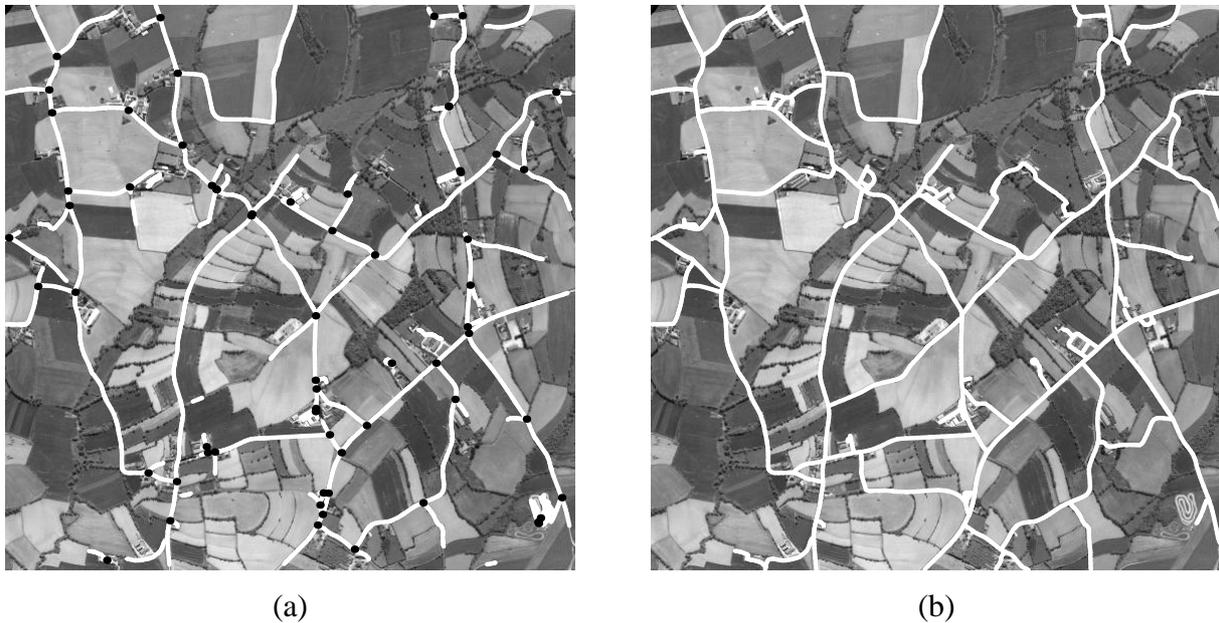


Abbildung 6.8. Datensatz III: (a) Extrahiertes Straßennetz (Straßenachsen und Kreuzungen) (b) Manuell erfasstes Referenznetz

	Gesamtes Bild	Offene Landschaft
Vollständigkeit [%]	76	79
Zuverlässigkeit [%]	92	95
RMS [m]	0.54	0.52

Tabelle 6.4. Datensatz III: Zusammenstellung der Ergebnisse der Evaluierung

Die Evaluierungsergebnisse in Tabelle 6.4 zeigen, dass die Zahlenwerte für die Vollständigkeit und die Zuverlässigkeit bezogen auf das gesamte Bild und bezogen auf das offene Gelände in etwa auf dem selben Niveau liegen. Dass hier für die offene Landschaft gegenüber dem gesamten Bild kaum eine Steigerung der Qualität der Ergebnisse stattfindet, ist dadurch zu erklären, dass das Bild fast nur offene Landschaft enthält. Gegenüber den Ergebnissen für den Datensatz I (vgl. Tabelle 6.1) sind die Ergebnisse für den Datensatz III bezüglich der beiden Kriterien Vollständigkeit und Zuverlässigkeit etwas schlechter. Die geringere geometrische Genauigkeit für Datensatz III relativiert sich, wenn man die unterschiedliche Auflösung der beiden Datensätze berücksichtigt.

Für den Datensatz III wurde untersucht, wie sich die Einbeziehung globaler Gruppierungskriterien auf die Ergebnisse auswirkt. Die Kombination lokaler und globaler Gruppierungskriterien erfolgt hier jedoch nicht so eng verzahnt wie in Abschnitt 5.3.4 beschrieben. Die Ergebnisse der Extraktion auf Basis der lokalen Gruppierung werden als relativ hoch bewertete Hypothesen für Straßenabschnitte betrachtet und dienen als Vorinformation für eine Extraktion, die vor allem die Netzwerkeigenschaften von Straßen berücksichtigt. Gemeinsam mit den in reduzierter Auflösung extrahierten Linien wird diese Vorinformation für die Suche nach optimalen Pfaden zwischen Paaren von „gut“ bewerteten Linien verwendet (vgl. Abschnitt 5.3.4 bzw. (WIEDEMANN und HINZ 1999)). Eine Rückkoppelung

zwischen globaler und lokaler Gruppierung findet nicht statt. Die Ergebnisse der Evaluierung dieser sequentiellen Kombination lokaler und globaler Gruppierungskriterien sind in Tabelle 6.5 zusammengestellt. Der Vergleich mit den Werten in Tabelle 6.4 zeigt, dass die Vollständigkeit durch die sequentielle Kombination nicht beeinflusst wird, die Zuverlässigkeit geringfügig abnimmt, und die geometrische Genauigkeit sich deutlich verringert. Letzteres lässt sich dadurch erklären, dass die globale Gruppierung lediglich das auflösungsreduzierte Bild nutzt. Infolge dessen sind die zusätzlich gefundenen Straßen unzuverlässiger und auch wesentlich ungenauer. Im Extremfall sind einzelne Straßen so ungenau, dass sie außerhalb des Puffers für die Zuordnung zwischen Referenz und Extraktion liegen und dadurch zur Verringerung der Zuverlässigkeit beitragen. Der eigentliche Nutzen der Kombination, nämlich die Extraktion eines vollständig zusammenhängenden Straßennetzes (siehe Abbildung 6.9), spiegelt sich in den hier verwendeten Bewertungsmaßen nicht wider und wird erst durch die in (WIEDEMANN und EBNER 2000) definierten Maße quantifizierbar.



Abbildung 6.9. Datensatz III: Durch sequentielle Kombination lokaler und globaler Gruppierungskriterien extrahiertes Straßennetz

	Gesamtes Bild	Offene Landschaft
Vollständigkeit [%]	76	79
Zuverlässigkeit [%]	90	93
RMS [m]	0.69	0.67

Tabelle 6.5. Datensatz III: Zusammenstellung der Ergebnisse der Evaluierung für eine sequentielle Kombination lokaler und globaler Gruppierungskriterien

Bei genauerer Betrachtung der Teile des Straßennetzes, die nicht extrahiert werden konnten, fallen einige weitere Aspekte auf, die durch die Evaluierung nicht quantitativ erfasst werden: Manche Straßen bzw. Feldwege fehlen im extrahierten Straßennetz nahezu vollständig. Erklären lassen sich diese großen Lücken meist durch einen geringen Kontrast zwischen Straße und Umgebung oder durch Baum- und Buschreihen entlang der Straße. Kleine Lücken treten häufig in der Nähe von Gebäuden und in Kreuzungsbereichen auf. Für die Mehrzahl der Kreuzungen und Einmündungen scheint das einfache Vorgehen bei der Extraktion ausreichend. Bei komplizierteren Kreuzungen und bei spitzwinkligen Einmündungen schlägt die Bildung von Knotenpunkten des Öfteren fehl oder die Position der Knotenpunkte wird nicht korrekt bestimmt.

6.3 Diskussion

Die Ergebnisse der externen Bewertung der in Abschnitt 6.2 dargestellten Datensätze zeigen, dass die Extraktion von Straßen mit dem hier vorgestellten Ansatz für die offene Landschaft sehr zuverlässig (95%–99%) und auch relativ vollständig (77%–91%) ist. Die geometrische Genauigkeit der korrekt gefundenen Straßenachsen liegt bei ca. einem Pixel, d.h. 0.30-0.50 m. Hinsichtlich der Wahl der Parameter ist für die in Abschnitt 6.2 bewerteten Datensätze festzustellen, dass die wesentlichen Änderungen in den Parametereinstellungen durch die radiometrischen Eigenschaften der Bilder bedingt sind. An den Parametern, die sich vor allem auf Teile des geometrischen Modells beziehen, sind kaum Änderungen erforderlich, um akzeptable Ergebnisse zu erzielen. Ein Problem ist jedoch, dass das Modell nur einen Teil der Straßen beschreibt und die Algorithmen nicht alle auftretenden Fälle abdecken. Die Schwächen des Ansatzes liegen darin, dass für die Gruppierung nur lokale Information verwendet wird, und der Ablauf des iterativen Gruppierungsverfahrens während des Programmablaufes nicht auf einer globaleren Ebene gesteuert wird. Abhilfe für die erstgenannte Schwäche schafft die Kombination mit einem Verfahren, das die Netzwerkeigenschaften von Straßen berücksichtigt (vgl. Abschnitt 5.3.4). Wie sich die Defizite in der Ablaufsteuerung beheben lassen, ist dagegen noch offen. Ohne eine interne Bewertung der erreichten Ergebnisse scheint eine sinnvolle automatische Steuerung der Extraktion nicht möglich. Die interne Bewertung sollte im Idealfall auch die Relationen zwischen unterschiedlichen Objektarten, z.B. zwischen Straßen und Gebäuden, berücksichtigen. Jedoch ist unklar, welche Kriterien und Verfahren für eine zuverlässige interne Bewertung der (Zwischen-)Ergebnisse geeignet sind.

Nachfolgend wird der vorgestellte Ansatz qualitativ mit anderen Arbeiten zur vollautomatischen Straßenextraktion verglichen, um Stärken und Schwächen zu verdeutlichen.

Eigene Untersuchungen auf Bildern einfacher ländlicher Szenen (MAYER et al. 1998, LAPTEV et al. 2000) haben gezeigt, dass auch mit rein Snake-basierten Ansätzen ähnliche Ergebnisse möglich sind wie mit dem Ansatz dieser Arbeit. Allerdings ist bei rein Snake-basierten Ansätzen eine explizite Nutzung des Modellwissens nicht möglich, da sich die erforderliche Gewichtung interner und externer Energien nur sehr schwer aus der Modellbeschreibung für Straßen ableiten lässt. In der Kombination mit einer stark modellbasierten Vorgehensweise wie in der hier vorliegenden Arbeit tritt dieser Nachteil allerdings etwas in den Hintergrund, weil der Einsatz der Snakes durch eine stark am Modell orientierte Vorgehensweise gesteuert wird.

Die ähnlichsten Arbeiten stammen vom Institut Géographique National (IGN), Paris, Frankreich (RUSKONÉ 1996). Die Komplexität der bearbeiteten Bilder ist in etwa vergleichbar und die dort verfolgte Vorgehensweise, zunächst nach einfach zu extrahierenden Teilen des Straßennetzes zu suchen und diese anschließend zu einem Straßennetz zu verbinden, ist ähnlich. In folgenden Punkten sind die wesentlichen Unterschiede zu den Arbeiten am IGN zu sehen:

- Eine Fusion von Information aus unterschiedlichen Auflösungsstufen findet in (RUSKONÉ 1996) nicht statt. Dafür kommt der Modellannahme, wonach Straßenflächen in Luftbildern homogen erscheinen, eine größere Bedeutung zu.
- Im Gegensatz zu den Arbeiten am IGN wird hier bei höher aufgelösten Bildern mit der Extraktion von Markierungen zusätzliche wertvolle Evidenz für Straßen genutzt.
- Die Überbrückung von Störungen wurde beim IGN weniger explizit angegangen, als dies hier durch die Nutzung von lokalem Kontext und Prädiktion von Schatten bzw. Verdeckungen geschieht.

Modellierung und Extraktion von Kreuzungen ist in beiden Ansätzen auf einfache Kreuzungen beschränkt.

Der Ansatz von DE GUNST (1996) nutzt für die Extraktion von Straßen detaillierte Informationen aus Vorschriften für den Straßenbau. Dies ermöglicht eine sehr präzise Modellierung. Allerdings ist

die Nutzung von Bauvorschriften in erster Linie für die automatische Extraktion neuerer Autobahnen und anderer größerer Straßen geeignet. Bei kleineren oder älteren Straßen sind die Variationen in der Realität dagegen deutlich größer als in den Bauvorschriften vorgesehen. Im Vergleich dazu ist die in dieser Arbeit gewählte Vorgehensweise deutlich generischer.

Verbesserungsmöglichkeiten für den vorgestellten Ansatz bietet die Verwendung von Farbbildern. Z.B. könnte Farbinformation ähnlich wie in (HENRICSSON 1998, HENRICSSON et al. 1996) als zusätzliches Merkmal für die Gruppierung verwendet werden. Im einfachsten Fall kann Farbinformation ähnlich wie vorhandene GIS-Information dazu genutzt werden, den Suchraum für die Straßenextraktion einzuschränken. Potential steckt auch in einer verstärkten Nutzung der DOM Information. Die Verwendung der Information über lokal hohe Objekte zur Bestimmung von Ausschlussregionen kann insbesondere in bebauten Gebieten einen entscheidenden Beitrag dazu leisten, zuverlässigere Extraktionsergebnisse zu erreichen, bzw. die Extraktion überhaupt erst ermöglichen (HINZ et al. 2001).

Zusammenfassend sind als Stärken des vorgestellten Ansatzes vor allem die Fusion von Informationen aus verschiedenen Auflösungsstufen, die Kontextmodellierung, die explizite Nutzung von Modellwissen bei der Gruppierung und die sich daraus insgesamt ergebende hohe Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu sehen.

7. Ausblick

Der vorgestellte Ansatz zur automatischen Straßenextraktion berücksichtigt das Verhalten von Straßen im Maßstabsraum. Zudem bezieht er Kontextinformation in Form von globalen Kontextgebieten und lokalen Relationen zwischen Straßen und anderen Objekten ein. Das in dieser Arbeit präsentierte System ist vor allem für die automatische Straßenextraktion in ländlichen Gebieten geeignet.

Die Leistungsfähigkeit des Systems wird durch eine externe Evaluierung der Ergebnisse belegt. Dabei zeigte sich, dass das entwickelte System derzeit zu den besten der Welt gehört. Trotzdem erscheint der operationelle Einsatz vollautomatischer Systeme in naher Zukunft als ein zu ehrgeiziges Ziel. Abgesehen von Fällen, in denen die qualitativen Anforderungen relativ niedrig sind, wird immer eine Nachbearbeitung durch einen Menschen notwendig sein: Für automatisch generierte Ergebnisse kann keine 100%-ige Vollständigkeit und Zuverlässigkeit garantiert werden. Daher sind aus wirtschaftlicher Sicht mittelfristig halbautomatische Verfahren der einzig gangbare Weg. Inwieweit das vorgestellte System durch geeignete manuelle Vor- und Nachbearbeitung eine Konkurrenz zu reinen halbautomatischen Systemen, die den Operateur in Echtzeit unterstützen und deren Modellierung daher vergleichsweise einfach ist, sein kann, ist eine äußerst interessante praktische Fragestellung. Für eine möglichst rasche Erfassung von Straßen ist eventuell eine Kombination von halb- und vollautomatischen Verfahren sinnvoll. Unter Umständen könnten die Ergebnisse eines vollautomatischen Ansatzes als Grundlage für die Interaktion in den rein halbautomatischen Systemen verwendet werden. Hierfür ist jedoch erforderlich, dass das vollautomatische System in der Lage ist, die Korrektheit der von ihm generierten Ergebnisse verlässlich einzuschätzen. Eine weitere wichtige Voraussetzung für die Einbindung eines automatischen Verfahrens zur Straßenextraktion in einen operationellen Arbeitsablauf ist die Bereitstellung effizienter Werkzeuge für Kontrolle und Nachbearbeitung der extrahierten Straßen. Zusätzlich ist auch eine Vorbearbeitung denkbar. Der Operateur könnte Problembereiche bereits vorab digitalisieren, und Gebiete festlegen, in denen unterschiedliche Parametereinstellungen oder unterschiedliche Verfahren zu verwenden sind.

Für eine vollständige Automatisierung der Straßenextraktion sind aus wissenschaftlicher Sicht noch eine Reihe interessanter Fragen zu lösen. Neben der Problematik der internen Bewertung (siehe Abschnitt 6.3) ist die adäquate Modellierung des zu extrahierenden Objektes die zentrale Herausforderung: Wie detailliert müssen Straßen modelliert werden? In welchem Umfang muss Wissen über die gesamte Szene genutzt werden? In diesem Zusammenhang ist auch die Frage nach der Nutzung von GIS-Information zu nennen. Die Ergebnisse von ZHANG et al. (2001) zeigen, dass GIS-Information verwendet werden kann, um die Position von Straßenachsen auch unter schwierigen Bedingungen, z.B. in bebauten Gebieten, zu verbessern. Allerdings bleiben Fragen wie z.B.: Wie ist bei Widersprüchen zwischen Bild- und GIS-Information zu verfahren? Auf welche Art und Weise können Bild- und GIS-Information sowohl für die Verbesserung von GIS-Daten als auch für die Neuerfassung effizient genutzt werden? Da die Verfügbarkeit aktueller digitaler Straßendaten weiterhin von großem Interesse für viele Bereiche sein wird, bleibt die Automatisierung der Erfassung, ohne die auch eine automatische Aktualisierung nicht möglich ist, ein wichtiges Thema.

Bei der Analyse der Ergebnisse und der Zwischenergebnisse des entwickelten Systems stellte sich heraus, dass die Generierung der anfänglichen Straßenstücke, die als Starthypothesen für die weitere Gruppierung dienen, der kritischste Teilschritt und der entscheidende Engpass ist. Die Fusionierung von Linien- und Kanteninformation ist anderen Verfahren, die sich nur auf eine einzige Art von Bildprimitiven stützen, konzeptionell überlegen. Sie beseitigt aber nicht die grundlegende Schwierigkeit, dass der Erfolg der automatischen Extraktion sehr stark von der ersten Segmentierung abhängt. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, dass beim Aufbau von Verbindungshypothesen zusätzlich zu den jeweils nächsten Nachbarn das gesamte Straßennetz zu betrachten ist. Nur dadurch kann gewährleistet

werden, dass stets die im Sinne des gesamten Netzes optimalen Verbindungen ausgewählt werden (STEGGER et al. 1997) und ein weitgehend zusammenhängendes Straßennetz extrahiert wird. Verschiedene Tests (BAUMGARTNER et al. 1999a, BAUMGARTNER und HINZ 2000) haben gezeigt, dass die Einbeziehung globaler Gruppierungskriterien bei der Generierung von Verbindungshypothesen großes Potential für Verbesserungen der Extraktionsergebnisse bietet. In (WIEDEMANN und EBNER 2000, WIEDEMANN 2001) wird die große Bedeutung der globalen Gruppierung für die Extraktion von Straßen aus niedrig aufgelösten Bildern gezeigt. Da dort die lokale Evidenz für Straßen noch deutlich schwächer ist, ist die globale Information noch wichtiger für die Extraktion.

Der vorgestellte Ansatz wurde auf Bilder mit einer Bodenauflösung von ca. 0.2-0.5 m angewendet. Bei einer feineren Auflösung nimmt die Zahl der extrahierten Kanten sehr stark zu und die Fahrbahnen erscheinen wesentlich inhomogener. Andererseits werden bei einer gröberen Auflösung als 0.5 m die Straßenflächen im Bild sehr klein, so dass letztlich nur noch das weniger aussagekräftige Linienmodell anwendbar ist. Dieser eingeschränkte Einsatzbereich des Ansatzes ist jedoch nicht allein in Bezug auf die Auflösung des Bildes zu sehen. Er steht vielmehr in engem Zusammenhang mit der zu extrahierenden Straßenklasse. Entscheidend für die Erfolgsaussichten des Ansatzes ist, dass die Straßen in der hohen Auflösung als einigermaßen homogene Flächen und in der reduzierten Auflösung als Linien erscheinen, so wie das bei kleineren, wenig befahrenen Straßen in der offenen Landschaft oft der Fall ist.

Aufbauend auf dieser Analyse des vorgestellten Ansatzes werden einzelne Erfolg versprechende Erweiterungen vorgeschlagen:

- Verbesserungen sind durch eine umfassendere Nutzung des in dieser Arbeit modellierten Wissens über Straßen und deren Relationen mit anderen Objekten zu erwarten. Exemplarisch wurde dies anhand der Extraktion von Fahrbahnmarkierungen dargestellt. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass eine detailliertere Modellierung auf der Seite der Segmentierung oft eine höhere Auflösung (< 0.15 m pro Pixel) voraussetzt.
- Darüber hinaus könnte für die Generierung von Hypothesen und deren Verifikation das im Laufe der Gruppierung erworbene zusätzliche Wissen genutzt werden. Dieses Wissen kann die Adaption von Extraktionsparametern oder auch den Einsatz einer anderen Extraktionstechnik rechtfertigen. Für den Fall, dass für die zu extrahierende Straßenklasse sehr genaue Bauvorschriften bezüglich Fahrbahnbreite, zulässiger Steigung oder Kurvenradien gelten und es z.B. auch nur eine eng begrenzte Auswahl von Kreuzungsvarianten gibt, kann die Verwendung dieses Spezialwissens die Anzahl der möglichen Hypothesen deutlich reduzieren.

Um dem allgemeinen Ziel einer weitestgehend automatischen Straßenextraktion näher zu kommen, sind zusätzlich noch weitergehende Verbesserungen erforderlich:

- Eine detailliertere Modellierung des Straßennetzes, die sich bis auf die Ebene der Fahrspuren erstreckt, scheint bei höheren Anforderungen an Zuverlässigkeit und Detaillierungsgrad des Extraktionsergebnisses unumgänglich. Auf Basis von Fahrspuren ist auch eine spezifische Modellierung für unterschiedliche Straßenklassen möglich.
- Eine umfassendere Modellierung und Interpretation der kompletten Szene einschließlich der Gebäude und der Vegetation würde weitergehende Möglichkeiten für die Bestimmung der Bedeutung einzelner Teile des extrahierten Straßennetzes eröffnen. Z.B. könnten Zufahrten zu Gebäuden und landwirtschaftlichen Flächen unterschieden werden.
- Für die Extraktion der Straßen in der Siedlung und im Wald stehen mit den Endpunkten am Rand der offenen Landschaft gute Startpunkte zur Verfügung. Die Extraktion muss sich in diesen Gebieten jedoch stärker auf andere Evidenz, wie z.B. die Gruppierung von Markierungen und Fahrzeugen, als auf parallele Kanten stützen. Dazu sind sowohl die Modellierung als auch die eingesetzten Extraktionsstrategien speziell für diese Gebiete des globalen Kontextes anzupassen. Dieser Gedanke wird zum Beispiel in (HINZ und BAUMGARTNER 2000) verfolgt.

- Für die Extraktion von Kreuzungen werden robustere Verfahren benötigt, die zudem in der Lage sind, mit den vielfältigen Erscheinungsformen von Kreuzungen zurechtzukommen. Auf Basis einfacher, stark generalisierter Kreuzungsmodelle, wie sie z.B. in dieser Arbeit verwendet werden, lässt sich die Komplexität vieler Kreuzungen nicht beschreiben. Dies gilt insbesondere für Kreuzungen mit Verkehrsinseln oder für Kreuzungen von Straßen, die aus mehreren baulich getrennten Fahrbahnen bestehen.
- Eine konsequentere Nutzung von Wissen über 3D ist sowohl für Hintergrundobjekte, wie z.B. Gebäude und Vegetation, als auch für die Straßen selbst wünschenswert. Wegen ihrer guten Genauigkeit und der hohen Punktdichte bieten sich Laserscannerdaten als Quelle für die 3D-Information an. Für eine durchgreifende Verifikation von 3D-Hypothesen ist u.U. ein Wechsel von der Einzelbildauswertung zur Mehrbildauswertung sinnvoll. Gegenüber der Verwendung von Orthophoto und digitalem Oberflächenmodell bietet die Mehrbildauswertung den entscheidenden Vorteil, dass durch redundante Bildinformation und durch die zusätzliche Möglichkeit zur 3D-Auswertung Verdeckungssituationen besser handhabbar werden (GRÜN und LI 1997b, GRÜN und LI 1997a).
- Potential für eine Verbesserung der Extraktion bietet die Verwendung von Farb- oder Multispektraldaten. Im einfachsten Fall kann spektrale Information dazu genutzt werden, den Suchraum einzuschränken. Eine andere Möglichkeit besteht in der Fusion des Informationsgehaltes unterschiedlicher Kanäle (WIEDEMANN 2001).
- Eine weitere Herausforderung stellt die Einbeziehung von Vorinformation aus bestehenden GIS-Daten und die nach der automatischen Extraktion erforderliche Aktualisierung der GIS-Daten dar. (ZHANG et al. 2001) ist ein gutes Beispiel für die Nutzung von GIS-Daten zur Überprüfung und Verbesserung vorhandener Straßenachsen unter Einbeziehung von mehreren Bildern, aus denen die Straßenränder in 3D bestimmt werden.

Abschließend ist festzustellen, dass mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Ansatz mit relativ einfachen Gruppierungsverfahren für das offene Gelände gute Resultate erreicht werden. Dies wird durch die Nutzung maßstabsabhängiger Charakteristika von Straßen und durch die Einbeziehung des Kontextes von Straßen möglich. Durch eine weitere konsequente Einbeziehung von Kontextwissen und durch die Integration globaler Gruppierungskriterien sollten sich die Ergebnisse weiter verbessern lassen. Gleichwohl ist die automatische Straßenextraktion mit dem vorgestellten Ansatz selbst bei einer Beschränkung auf weniger komplexe Szenen und auf die offene Landschaft nicht absolut vollständig und zuverlässig. Daher wäre bei einem praktischen Einsatz in jedem Fall ein Operateur erforderlich, der die fälschlicherweise extrahierten Straßen eliminiert und die fehlenden Teile ergänzt.

Literaturverzeichnis

- 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 31, B3, 14–18.
- AIRAULT, S., RUSKONÉ, R. und JAMET, O. (1994): Road Detection from Aerial Images: A Cooperation between Local and Global Methods, *Image and Signal Processing for Remote Sensing*, Proc. SPIE 2315, 508–518.
- AVIAD, Z. und CARNINE, P. D. (1988): 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.
- BALLARD, D. und BROWN, C. (1982): *Computer Vision*, Prentice-Hall International, Inc., Englewood Cliffs, USA.
- BARZO HAR, M., COHEN, M., ZISKIND, I. und COOPER, D. B. (1997a): Fast Robust Tracking of Curvy Partially Occluded Roads in Clutter in Aerial Images, *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II)*, 277–286.
- BARZO HAR, M., COHEN, M., ZISKIND, I. und COOPER, D. B. (1997b): Robust Method for Automatic Aerial Detection of Occluded Roads Based on Multihypothesis Generalized Kalman Filter, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 32, 3-2W3, 1–7.
- BARZO HAR, M. und COOPER, D. B. (1995): New Geometric Stochastic Technology for Finding and Recognizing Roads and Their Features in Aerial Images, *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images*, Birkhäuser Verlag Basel, Schweiz, 255–264.
- BÄSSMANN, H. (1998): Licht und Schatten, *Elektronik Praxis* 33(18): 92–96.
- 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, in C. HEIPKE und H. MAYER (Herausgeber), *Festschrift für Prof. Dr.-Ing. Heinrich Ebner zum 60. Geburtstag*, Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität München, 43–64.
- BAUMGARTNER, A., ECKSTEIN, W., MAYER, H., HEIPKE, C. und EBNER, H. (1997a): Context Supported Road Extraction, *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II)*, Birkhäuser Verlag Basel, Schweiz, 299–308.
- BAUMGARTNER, A., HINZ, S. und WIEDEMANN, C. (2002): Efficient Methods and Interfaces for Road Extraction, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 34, 3B, 28–31.
- 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. (1997b): Multi-Resolution, Semantic Objects, and Context for Road Extraction, *Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps*, Birkhäuser Verlag Basel, Schweiz, 140–156.
- BAUMGARTNER, A., STEGER, C., WIEDEMANN, C., MAYER, H., ECKSTEIN, W. und EBNER, H. (1996): Update of Roads in GIS from Aerial Imagery: Verification and Multi-Resolution

- Extraction, *International Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 31, B3, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 53–58.
- BAUMGARTNER, A. und HINZ, S. (2000): Multi-Scale Road Extraction using Local and Global Grouping Criteria, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 33, B3/1, 58–65.
- BOICHIS, N., COCQUEREZ, J. und AIRAULT, S. (1998): A Top Down Strategy for Simple Crossroads Automatic Extraction, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 32, 2, 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 33, Supplement, 27–34.
- BORDES, G. (1997): *Interpretation d'Images Aériennes Guidée par une Base de Données Cartographiques: Application à l'Extraction Automatique des Routes.*, PhD thesis, Université Marne-La-Vallée, Frankreich.
- BORDES, G., GIRAUDON, G. und JAMET, O. (1995): Road Extraction Guided by a Cartographic Database: Creating a Strategy, *Workshop on Context-Based Vision*, IEEE, 30–37.
- BORDES, G., GIRAUDON, G. und JAMET, O. (1997): Road Modeling Based on a Cartographic Database for Aerial Image Interpretation, *Semantic Modeling for the Aquisition of Topographic Information from Images and Maps*, Birkhäuser Verlag Basel, Schweiz, 123–139.
- BORDES, G., GUERIN, P., GIRAUDON, G. und MAITRE, H. (1996): Contribution of External Data to Aerial Image Analysis, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 31, B4, 134–138.
- BORRA, S. und SARKAR, S. (1997): A Framework for Performance Characterization of Intermediate-Level Grouping Modules, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 19(11): 1306–1312.
- BRACHMAN, R. (1977): What's in a Concept: Structural Foundations for Semantic Networks, *International Journal of Man-Machine Studies* 9: 127–152.
- BRACHMAN, R. (1979): On the Epistemological Status of Semantic Networks, *Associative Networks*, Academic Press, Inc., New York, USA, 191–215.
- BRUNN, A. und WEIDNER, U. (1998): Hierarchical Bayesian Nets for Building Extraction Using Dense Digital Surface Models, *Journal for Photogrammetry & Remote Sensing* 53(6): 296–307.
- BUSCH, A. (1996): A Common Framework for the Extraction of Lines and Edges, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 31, B3, 88–93.
- CANNY, J. (1986): A Computational Approach to Edge Detection, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 8(6): 679–698.
- CHAM, T.-J. und CIPOLLA, R. (1997): Stereo Coupled Active Contours, *Computer Vision and Pattern Recognition*, 1094–1099.
- CLÉMENT, V., GIRAUDON, G., HOUZELLE, S. und SANDAKLY, F. (1993): Interpretation of Remotely Sensed Images in a Context of Multisensor Fusion Using a Multispecialist Architecture, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 31(4): 779–791.
- DAL POZ, A., GYFTAKIS, S. und AGOURIS, P. (2000): Semi-Automatic Road Extraction: Comparison of Methodologies and Experiments, *Proc. ASPRS 2000*, Washington D.C., CD-ROM.
- DE GUNST, M. E. (1996): *Knowledge-Based Interpretation of Aerial Images for Updating of Road Maps*, Netherlands Geodetic Commission, Publications on Geodesy, New Series 44, Delft, Niederlande.

- DE GUNST, M. und VOSSELMAN, G. (1997): A Semantic Road Model for Aerial Image Interpretation, *Semantic Modeling for the Aquisition of Topographic Information from Images and Maps*, Birkhäuser Verlag Basel, Schweiz, 107–122.
- DERICHE, R. (1987): Using Canny's Criteria to Derive a Recursively Implemented Optimal Edge Detector, *International Journal of Computer Vision* 1: 167–187.
- DIJKSTRA, E. W. (1959): A Note on Two Problems in Connexion with Graphs, *Numerische Mathematik*.
- DOUCETTE, P., AGOURIS, P., MUSAVI, M. und STEFANIDIS, A. (2000): Road Centerline Vectorization by Self-Organized Maps, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 33, B3, 246–253.
- DOUGHERTY, E. R. (1994): *Digital Image Processing Methods*, Marcel Dekker, Inc., New York, USA.
- ECKSTEIN, W. (1996): Segmentation and Texture Analysis, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 31, B3, 165–175.
- ECKSTEIN, W. und STEGER, C. (1996): Fusion of Digital Terrain Models and Texture for Object Extraction, *Proceedings of the Second International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*, Band III, 1–10.
- ENGLISCH, A., HEIPKE, C., REINHARDT, W. und EBNER, M. (1996): Digitale Luftbilder zur Aktualisierung von GIS Daten, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 31, B4, 231–236.
- FABER, A. und FÖRSTNER, W. (2000): Detection of Dominant Orthogonal Road Structures in Small Scale, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 33, 3A, 274–281.
- FISCHLER, M. A., TENENBAUM, J. M. und WOLF, H. C. (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.
- FOLEY, J. D. und VAN DAM, A. (1982): *Fundamentals of Interactive Computer Graphics*, AW, USA.
- FORLANI, G., MALINVERNI, E. und NARDINOCCHI, C. (1996): Using Perceptual Grouping for Road Recognition, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 31, B3, 202–206.
- FÖRSTNER, W. (1996): 10 Pros and Cons Against Performance Characterization of Vision Algorithms, *Fourth European Conference on Computer Vision, Workshop on "Performance Characteristics of Vision Algorithms"*, Cambridge, Großbritannien.
- FÖRSTNER, W. und GÜLCH, E. (1987): A Fast Operator for Detection and Precise Location of Distinct Points, Corners and Centers of Circular Features, *ISPRS Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data*, Interlaken, Schweiz, 281–305.
- FÜGER, H., STEIN, G. und STILLA, U. (1994): Multi-Population Evolution Strategies for Structural Image Analysis, *First IEEE Conference on Evolutionary Computation*, Orlando, Florida, 229–234.
- GEMAN, D. und JEDYNAK, B. (1996): An Active Testing Model for Tracking Roads in Satellite Images, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 18(1): 1–14.
- GINSBERG, M. (1993): *Essentials of Artificial Intelligence*, Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, USA.
- GOODCHILD, M. F. und HUNTER, G. J. (1997): A Simple Positional Accuracy Measure for Linear Features, *International Journal of Geographical Information Science* 11(3): 299–306.
- GRIMSON, W. E. L. (1990): *Object Recognition by Computer*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA.

- GROCH, W.-D. (1982): Extraction of Line Shaped Objects from Aerial Images Using a Special Operator to Analyse the Profiles of Functions, *Computer Graphics and Image Processing* 18: 347–358.
- GRÜN, A. und LI, H. (1994): Semi-Automatic Road Extraction by Dynamic Programming, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 30, 3/1, 324–332.
- GRÜN, A. und LI, H. (1995): Semi-Automatic Road Extraction as a Model Driven Optimization Procedure, *SPIE*, Band 2646, 160–171.
- GRÜN, A. und LI, H. (1996): Linear Feature Extraction with LSB-Snakes from Multiple Images, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 31, Part B3, 266–272.
- GRÜN, A. und LI, H. (1997a): Linear Feature Extraction with 3-D LSB-Snakes, *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II)*, Birkhäuser Verlag Basel, Schweiz, 287–298.
- GRÜN, A. und LI, H. (1997b): Semi-Automatic Linear Feature Extraction by Dynamic Programming and LSB-Snakes, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 63(8): 985–995.
- HABERÄCKER, P. (1995): *Praxis der Digitalen Bildverarbeitung und Mustererkennung*, Carl Hanser Verlag, München.
- HARALICK, R. M. und SHAPIRO, L. G. (1992a): *Computer and Robot Vision*, Band I, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, USA.
- HARALICK, R. M. und SHAPIRO, L. G. (1992b): *Computer and Robot Vision*, Band II, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, USA.
- HARRIS, C. und STEPHENS, M. (1988): A Combined Corner and Edge Detector, *Fourth Alvey Vision Conference*, 147–151.
- HARVEY, W. A. (1999): Performance Evaluation for Road Extraction, *Bulletin SFPT* (153): 79–87.
- HAYES-ROTH, B. (1985): A Blackboard Architecture for Control, *Artificial Intelligence* 26: 251–321.
- HEIPKE, C., MAYER, H., WIEDEMANN, C. und JAMET, O. (1998): External Evaluation of Automatically Extracted Roads, *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation* 1998(2): 81–94.
- HENRICSSON, O. (1998): The Role of Color Attributes and Similarity Grouping in 3-D Building Reconstruction, *Computer Vision and Image Understanding* 72(2): 163–184.
- HENRICSSON, O., BIGNONE, F., WILLUHN, W., ADE, F., KÜBLER, O., BALTSAVIAS, E., MASON, S. und GRÜN, A. (1996): Project AMOBE: Strategies, Current Status and Future Work, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band (31) B3/III, 321–330.
- HINZ, S., BAUMGARTNER, A., MAYER, H., WIEDEMANN, C. und EBNER, H. (2001): Road Extraction Focussing on Urban Areas, *Workshop on Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps (III)*, Balkema Publishers, Lisse, Niederlande, 255–265.
- HINZ, S., WIEDEMANN, C. und BAUMGARTNER, A. (2000): A Scheme for Road Extraction in Rural Areas and its Evaluation, *5th IEEE Workshop on Applications of Computer Vision*, 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 33, B3/1, 405–412.
- ILLERT, A. (1993): Automationsgestützte Fortführung des ATKIS, *Technischer Bericht*, Institut für Photogrammetrie, Universität Bonn.
- JÄHNE, B. (1997): *Digital Image Processing – Concepts, Algorithms, and Scientific Applications*, Springer, Berlin.

- 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, Schweiz, 243–253.
- KASS, M., WITKIN, A. und TERZOPOULOS, D. (1988): Snakes: Active Contour Models, *International Journal of Computer Vision* 1(4): 321–331.
- KERSCHNER, M. (1998): Homologous Twin Snakes Integrated in a Bundle Block Adjustment, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 32, 3/1, 244–249.
- KIMIA, B., TANNENBAUM, A. und ZUCKER, S. (1995): Shapes, Shocks, and Deformations I: The Components of Two-Dimensional Shape and the Reaction-Diffusion Space, *International Journal of Computer Vision* 15(3): 189–224.
- KLANG, D. (1998): Automatic Detection of Changes in Road Databases Using Satellite Imagery, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 32, 4, 293–298.
- KOENDERINK, J. (1984): The Structure of Images, *Biological Cybernetics* 50: 363–370.
- KOSSLYN, S. (1994): *Image and Brain*, MIT Press, Cambridge, USA.
- KÖTHE, U. (1996): Local Appropriate Scale in Morphological Scale-Space, *Fourth European Conference on Computer Vision*, Band I, 219–228.
- LANSER, S. und ECKSTEIN, W. (1992): A Modification of Deriche's Approach to Edge Detection, *11th International Conference on Pattern Recognition*, Band III, 633–637.
- LAPTEV, I. (1997): *Road Extraction Based on Snakes and Sophisticated Line Extraction*, Master thesis, Computational Vision and Active Perception Lab (CVAP), Royal Institute of Technology, Stockholm, Schweden.
- LAPTEV, I., MAYER, H., LINDBERG, T., ECKSTEIN, W., STEGER, C. und BAUMGARTNER, A. (2000): Automatic Extraction of Roads from Aerial Images Based on Scale Space and Snakes, *Machine Vision and Applications* 12(1): 22–31.
- LAWS, K. (1980): *Texture Image Segmentation*, Ph.D. Thesis, Dept. of Engineering, University of Southern California, Los Angeles, USA.
- LINDBERG, T. (1994): *Scale-Space Theory in Computer Vision*, Kluwer Academic Publishers, Boston, USA.
- LITTMANN, E., NEUMANN, H. und REDOULOUX, L. (1996): Extraction of Illusory Contours by Perceptual Grouping, *Mustererkennung 1996*, Springer, Berlin, 243–251.
- MACKANESS, W. A. und MACKECHNIE, G. A. (1997): Detection and Simplification of Road Junctions in Automated Map Generalisation, *International Cartographic Conference*, 1013–1021.
- MARR, D. (1982): *Vision*, Freeman and Company, New York, USA.
- MAYER, H. (1998): *Automatische Objektextraktion aus digitalen Luftbildern*, Deutsche Geodätische Kommission (C) 494, München.
- MAYER, H., LAPTEV, I. und BAUMGARTNER, A. (1998): Multi-Scale and Snakes for Automatic Road Extraction, *Fifth European Conference on Computer Vision*, 720–733.
- MAYER, H. und STEGER, C. (1998): Scale-Space Events and Their Link to Abstraction for Road Extraction, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 53(2): 62–75.
- MCKEOWN, D. M. (1990): Toward Automatic Cartographic Feature Extraction, *Mapping and Spatial Modelling for Navigation*, Band F65 of *Nato ASI Series*, Springer-Verlag, Berlin, 149–180.
- MCKEOWN, D. M., HARVEY, W. A. und WIXSON, L. E. (1989): Automating Knowledge Acquisition for Aerial Image Interpretation, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 46: 37–81.

- MCKEOWN, D. M. und DENLINGER, J. L. (1988): Cooperative Methods for Road Tracking in Aerial Imagery, *Computer Vision and Pattern Recognition*, 662–672.
- 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.
- MOHAN, R. und NEVATIA, R. (1989): Using Perceptual Organization to Extract 3-D Structures, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 11(11): 1121–1139.
- MOHAN, R. und NEVATIA, R. (1992): Perceptual Organization for Scene Segmentation and Description, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 14(6): 616–635.
- MOISSINAC, H., MAÎTRE, H. und BLOCH, I. (1995): Graph Based Urban Scene Analysis Using Symbolic Data, *Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision II*, Band 2486, SPIE, 93–104.
- MORAVEC, H. P. (1979): Visual Mapping by a Robot Rover, *6th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 599–601.
- MORISSET, B. und RUAS, A. (1997): Simulations and Agent Modelling for Road Selection in Generalisation, *International Cartographic Conference*, 1376–1380.
- MUKHERJEE, A., PARUI, S. K., CHAUDHURI, D., CHAUDHURI, B. B. und KRISHNAN, R. (1996): An Efficient Algorithm for Detection of Road-Like Structures in Satellite Images, *13th International Conference on Pattern Recognition*, Band III, C, 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, Schweiz, 105–114.
- NEVATIA, R. und BABU, K. R. (1980): Linear Feature Extraction and Description, *Computer Graphics and Image Processing* 13: 257–269.
- NIEMANN, H. (1985): Wissensbasierte Bildanalyse, *Informatik Spektrum* 8: 201–214.
- PLIETKER, B. (1994): Semiautomatic Revision of Street Objects in ATKIS Database DLM 25/1, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 30, Part 4, 311–317.
- PRICE, K. (1999): Road Grid Extraction and Verification, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 32, 3-2W5, 101–106.
- QUAM, L. H. (1978): Road Tracking and Anomaly Detection, *Image Understanding Workshop*, 51–55.
- RAMER, U. (1972): An Iterative Procedure for the Polygonal Approximation of Plane Curves, *Computer Graphics and Image Processing* 1: 244–256.
- RAY, B. K. und RAY, K. S. (1993): Determination of Optimal Polygon from Digital Curve Using L_1 Norm, *Pattern Recognition* 26(4): 505–509.
- REIMER, U. (1991): *Einführung in die Wissensrepräsentation: Netzartige und schema-basierte Repräsentationsformate*, Teubner, Stuttgart.
- ROSENFELD, A. und KAK, A. (1976): *Digital Picture Processing*, Academic Press, Inc., New York, USA.
- ROUX, M. und MAÎTRE, H. (1996): Urban Scene Interpretation Using Aerial Images and Maps, *Workshop on 3D City Models*, Institut für Photogrammetrie, Universität Bonn.
- RUSKONÉ, R. (1996): *Road Network Automatic Extraction by Local Context Interpretation: Application to the Production of Cartographic Data.*, PhD thesis, Université Marne-La-Vallée, Frankreich.
- RUSKONÉ, R., AIRAULT, S. und JAMET, O. (1994): A Road Extraction System Using the Connectivity Properties of the Network, *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung* (5/94): 174–180.

- SANDAKLY, F. und GIRAUDON, G. (1994): Multispecialist System for 3D Scene Analysis, *11th European Conference on Artificial Intelligence*, 771–775.
- SANDINI, G., QUESTA, P., SCHEFFER, D., DIERICKX, B. und MANNUCCI, A. (2000): A Retina-like CMOS Sensor and its Application, *1st IEEE SAM Workshop*.
- SARKAR, S. und BOYER, K. L. (1993): Perceptual Organization in Computer Vision: A Review and a Proposal for a Classificatory Structure, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 23(2): 382–399.
- SATO, Y. (1992): Piecewise Linear Approximation of Plane Curves by Perimeter Optimization, *Pattern Recognition* 25(12): 1535–1543.
- SERRA, J. (1982): *Image Analysis and Mathematical Morphology*, Academic Press, Inc., London, Großbritannien.
- SHAFER, G. und PEARL, J. (Herausgeber) (1990): *Readings in Uncertain Reasoning*, Morgan Kaufmann Publishers, Los Altos, USA.
- SOMMER, G. (1992): Wissensverarbeitung in der Bildanalyse – Teil I, II, III, *bild&ton* 45(5/6, 7/8, 11/12): 103–110, 151–156, 314–321.
- STARK, L. und BOWYER, K. (1991): Achieving Generalized Object Recognition through Reasoning about Association of Function to Structure, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 13(10): 1097–1104.
- 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, Fakultät für Informatik, Technische Universität München: Herbert Utz Verlag, München.
- STEGER, C., GLOCK, C., ECKSTEIN, W., MAYER, H. und RADIG, B. (1995): Model-Based Road Extraction from Images, *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images*, Birkhäuser Verlag Basel, Schweiz, 275–284.
- STEGER, C., MAYER, H. und RADIG, B. (1997): The Role of Grouping for Road Extraction, *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II)*, Birkhäuser Verlag Basel, Schweiz, 245–256.
- STRAT, T. M. (1995): Using Context to Control Computer Vision Algorithms, *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images*, Birkhäuser Verlag Basel, Schweiz, 3–12.
- STRAT, T. M. und FISCHLER, M. A. (1995): The Role of Context in Computer Vision, *Workshop on Context-Based Vision*, IEEE, 2–12.
- STRAT, T. (1992): *Natural Object Recognition*, Springer, New York, USA.
- TÖNJES, R. (1997): 3D Reconstruction of Objects from Aerial Images Using a GIS, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 32, 3-2W3, 140–147.
- TRINDER, J. C. und LI, H. (1996): Extraction of Man-Made Features by 3-D Active Contour Models, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 31, Part B3, 874–879.
- TRINDER, J. C. und WANG, Y. (1998): Knowledge-Based Road Interpretation in Aerial Images, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 32, 4, 635–640.
- VASUDEVAN, S., CANNON, R. L. und BEZDEK, J. C. (1988): Heuristics for Intermediate Level Road Finding Algorithms, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* (44): 175–190.
- VOSSelman, G. und DE KNECHT, J. (1995): Road Tracing by Profile Matching and Kalman Filtering, *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images*, Birkhäuser Verlag Basel, Schweiz, 265–274.

- WALTER, V. und FRITSCH, D. (1995): Matching Techniques for Road Network Data in Different Data Models, *28th International Symposium on Automotive Technology and Automation*, 633–640.
- WEIDNER, U. (1997): *Gebäudeerfassung aus digitalen Oberflächenmodellen*, Deutsche Geodätische Kommission (C) 474, München.
- WERTHEIMER, M. (1923): Untersuchungen zur Lehre von der Gestalt II, *Psychologische Forschung* 4: 301–350.
- WIEDEMANN, C. (1998): Empirical Evaluation of Automatically Extracted Road Axes, URL: www.photo.verm.tu-muenchen.de/staff/wied/evaluation/evaluationofroads.html, Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität München.
- WIEDEMANN, C. (2001): *Extraktion von Straßennetzen aus optischen Satellitenbilddaten*, Dissertation, Technische Universität München.
- WIEDEMANN, C. und EBNER, H. (2000): Automatic Completion and Evaluation of Road Networks, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 33, B3/2, 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 32, 3-2W5, 95–100.
- WIEDEMANN, C. und MAYER, H. (1996): Automatic Verification of Roads in Digital Images Using Profiles, *Mustererkennung 1996*, Springer-Verlag, Berlin, 609–618.
- ZADEH, L. A. (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 32, 3/1, 408–417.
- ZHANG, C., BALTSAVIAS, E. und GRÜN, A. (2001): Updating of Cartographic Road Databases by Image Analysis, *Workshop on Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps (III)*, Balkema Publishers, Lisse, Niederlande, 243–253.
- ZHAO, H., KUMAGAI, J., NAKAGAWA, M. und SHIBASAKI, R. (2002): Semi-Automatic Road Extraction from High-Resolution Satellite Images, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 34, 3A, 406–411.
- ZLOTNICK, A. und CARNINE, P. (1993): Finding Road Seeds in Aerial Images, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing: Image Understanding* 57: 243–260.

Dank

An erster Stelle spreche ich meinen herzlichen Dank meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heinrich Ebner, aus. Die zahlreichen Diskussionen mit ihm waren für mich sowohl fachlich als auch persönlich sehr wertvoll. Darüber hinaus hat er es in ausgezeichneter Weise verstanden, mich zu motivieren und günstige Rahmenbedingungen für wissenschaftliches Arbeiten zu schaffen.

Ebenso großer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Helmut Mayer, der das Korreferat übernommen hat. Seine Anregungen und Ideen haben meine Arbeit stets vorangetrieben und bereichert. Ich möchte ihm insbesondere auch dafür danken, dass er trotz seiner großen Arbeitsbelastung stets Zeit fand, meine Arbeit intensiv zu betreuen.

Bei Herrn Dr. Carsten Steger und Herrn Dr. Wolfgang Eckstein bedanke ich mich sehr herzlich für die kollegiale und freundschaftliche Zusammenarbeit im Rahmen des gemeinsamen Forschungsprojektes zur Straßenextraktion, durch das der Grundstein für die vorliegende Arbeit gelegt wurde.

Einen wesentlichen Anteil am guten Gelingen dieser Arbeit hat auch die heitere, fördernde und zugleich fordernde Atmosphäre am Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung. Dafür, dass ich diese Arbeit in einer solchen Umgebung erstellen durfte, bedanke ich mich bei allen derzeitigen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl. Mein besonderer Dank gilt hierbei Herrn Dr. Christian Wiedemann und Herrn Dipl.-Ing. Stefan Hinz für das Korrekturlesen und für die zahlreichen inspirierenden Diskussionen über das Thema "automatische Straßenextraktion".

Mein größter Dank gilt schließlich meiner Frau Martha, die mich während der Erstellung dieser Arbeit immer wieder bestärkt und ermuntert hat. Ihr Rückhalt hat entscheidend zum Erfolg beigetragen.

Lebenslauf

Name: Albert Johann Baumgartner
Anschrift: Mozartring 2a
D – 84405 Dorfen

Geburtsort: Deggendorf, Bayern
Geburtsdatum: 04. Oktober 1967
Nationalität: deutsch
Familienstand: verheiratet

Schulbildung:
Sept. 1973 — Juli 1978 Volksschule Geiersthal
Sept. 1978 — Juni 1987 St.-Michaels-Gymnasium Metten
Allgemeine Hochschulreife

Zivildienst:
Juli 1987 — Feb. 1989 Kinderkrankenhaus a.d. Lachnerstraße, München

Studium:
Mai 1989 — April 1990 Rechtswissenschaften, Universität Passau
Nov. 1990 — Juli 1995 Vermessungswesen, TU München
Dipl.-Ing. Vermessungswesen

Beruf:
Juli 1995 — Mai 1998 wissenschaftlicher Angestellter am Lehrstuhl
für Photogrammetrie und Fernerkundung der
Technischen Universität München
seit Juni 1998 wissenschaftlicher Assistent am o.g. Lehrstuhl

Auszeichnungen:
1995 Harbert-Buchspende
Deutscher Verein für Vermessungswesen
2000 Talbert Abrams Award
American Society for Photogrammetry and Remote Sensing