

DEUTSCHE GEODÄTISCHE KOMMISSION
bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 600

Birgit Wessel

**Automatische Extraktion von Straßen
aus SAR-Bilddaten**

München 2006

**Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission beim Verlag C. H. Beck**

ISSN 0065-5325

ISBN 3 7696 5039 5

Automatische Extraktion von Straßen
aus SAR-Bilddaten

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

von

Dipl.-Ing. Birgit Wessel

München 2006

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission beim Verlag C. H. Beck

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:

Deutsche Geodätische Kommission

Alfons-Goppel-Straße 11 • D – 80 539 München

Telefon +49 - (0)89 - 23 031 -0 / -1113 • Telefax +49 - (0)89 - 23 031 -1283 / -1100

E-mail hornik@dgfi.badw.de • <http://dgk.badw.de>

Prüfungskommission

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

Prüfer der Dissertation: Univ.-Prof.i.R. Dr.-Ing., Dr.-Ing.E.h. H. Ebner

Univ.-Prof. Dr.-Ing. O. Hellwich, TU Berlin

Univ.-Prof. Dr.-Ing. U. Stilla

Die Dissertation wurde am 07.03.2006 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 12.05.06 angenommen.

© 2006 Deutsche Geodätische Kommission, München

Alle Rechte vorbehalten. Ohne Genehmigung der Herausgeber ist es auch nicht gestattet,
die Veröffentlichung oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen

Zusammenfassung

Diese Arbeit stellt einen Ansatz zur automatischen Extraktion von Straßen aus SAR-Bilddaten vor. Für die Extraktion werden explizit modellierte Eigenschaften von Straßen sowie deren Nachbarschaftsbeziehungen im lokalen und globalen Umfeld verwendet. Der vorgestellte Ansatz ist für offenes, ländliches Gebiet und für Bilddaten mit einer Bodenpixelgröße von ca. zwei Metern geeignet.

Generell basiert der Ansatz zur automatischen Straßenextraktion auf der Extraktion von Linien aus SAR-Bilddaten. Für die differential-geometrische Linienextraktion wird eine SAR-spezifische Vorverarbeitung vorgestellt, mit der das Specklerauschen reduziert und die Messwerte radiometrisch kalibriert werden. Eine Vorklassifikation von städtischen und ländlichen Gebieten ermöglicht die Durchführung der Linienextraktion gezielt auf ländlichen Gebieten. Durch die Gruppierung und Bewertung der Linien nach geometrischen und radiometrischen Kriterien entstehen Hypothesen für Straßen, die mit Hilfe einer kürzesten Pfadsuche zu einem Straßennetz miteinander verbunden werden.

Dieses Verfahren wird auf verschiedenen Szenen flugzeuggetragener SAR-Sensoren (E-SAR, AER II, AeS 1) angewendet. Eine Analyse der erzielten Ergebnisse zeigt die Stärken und Schwächen des Verfahrens auf. Für fehlerhafte Extraktionen, die auf spezielle Eigenschaften der SAR-Rückstreuung zurückzuführen sind, werden die Abbildungseigenschaften der verantwortlichen Objekte modelliert. Darauf aufbauend werden Verbesserungen hinsichtlich der Modellierung von Straßen und deren Nachbarschaften vorgenommen.

So werden benachbarte Objekte, die das Erscheinungsbild von Straßen beeinflussen, wie Bäume, Brücken, bewegte Fahrzeuge und Verkehrsschilder, als Kontextinformation in die Straßenextraktion integriert. Dadurch können kleinere Lücken im extrahierten Straßennetz geschlossen und die topologische Korrektheit der extrahierten Straßen erhöht werden. Eine weitere Verbesserung der Straßenextraktion wird durch die Einführung von Städten aus der Vorklassifikation erzielt. Mit dieser Information können neue, sichere Startstücke für Straßen gewonnen werden, die die Vollständigkeit des extrahierten Straßennetzes verbessern. Darüber hinaus wird eine automatische Extraktion von Autobahnen vorgestellt, die auf einer expliziten Modellierung der geometrischen, radiometrischen und multi-skalen Eigenschaften von Autobahnen beruht.

Die Leistungsfähigkeit dieses Verfahrens wird anhand von verschiedenen SAR-Szenen aus ländlichen und industriellen Gebieten demonstriert und durch einen Vergleich der Ergebnisse mit manuell erfassten Referenzdaten evaluiert. Eine Diskussion der Vorteile und Defizite des Verfahrens schließt die Arbeit ab.

Summary

This thesis presents an approach for the automatic extraction of roads from SAR imagery. For the extraction explicitly modelled road characteristics and knowledge about their local and global context are used. The proposed approach aims at open rural areas and is suitable for imagery with a pixel size of approximately 2 m on ground.

Generally, this approach for automatic road extraction is based on the extraction of lines from SAR imagery with a differential-geometry approach. For this, a SAR-specific preprocessing is presented to reduce the speckle noise and to calibrate radiometrically the intensity values. A pre-classification of urban and rural areas allows to perform a selective extraction of lines in rural areas. The lines are grouped and evaluated according to different geometric and radiometric criteria. Finally, road hypotheses are generated, which are connected by a shortest path search algorithm to form a road network.

This approach is applied on several scenes from airborne SAR sensors (E-SAR, AER II, AeS 1) An analysis of the achieved results demonstrates the strengths and weaknesses of the approach. Some false alarms are caused by objects with SAR-specific backscatter characteristics, which are described in detail. In addition to this, improvements concerning the road model and the neighbourhood of roads are made.

Neighbourhood objects that influence the appearance of roads in the image like trees, bridges, moving vehicles, and traffic signs are introduced as context information into the road extraction. Thereby, small gaps in the road network can be closed and the topological correctness can be improved. Another improvement is achieved by the introduction of urban areas from the pre-classification. These areas deliver new and reliable seed information and improve the completeness of the extraction results. In addition, an automatic extraction of highways is proposed based on an explicit modeling of the geometric, radiometric and scale-dependent characteristics of highways.

The capability of this approach is demonstrated by several test sites from rural and industrial scenes. The achieved results are evaluated in comparison with manual plotted reference data. A discussion of the advantages and deficiencies concludes the thesis.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
1.1	Motivation	9
1.2	Zielsetzung dieser Arbeit	10
1.3	Aufbau	10
2	Radar mit synthetischer Apertur	11
2.1	Grundprinzip und Auflösung abbildender Radarsysteme	11
2.1.1	Grundprinzip abbildender Radarsysteme	11
2.1.2	Auflösung in Entfernung	12
2.1.3	Auflösung in Azimut	13
2.2	Geometrisch bedingte Abbildungseffekte	15
2.2.1	Foreshortening, Layover, Schatten	15
2.2.2	Spezielle geometrische Effekte	16
2.2.3	Geokodierung	17
2.3	Radiometrische Eigenschaften	18
2.3.1	Die Radargleichung	18
2.3.2	Einfluss objektspezifischer Eigenschaften	19
2.3.3	Radiometrische Kalibrierung	21
2.4	Statistische Eigenschaften	22
2.4.1	Der Speckle-Effekt	22
2.4.2	Statistische Eigenschaften homogener Flächen	23
2.4.3	Speckle-Reduzierung	25
2.5	SAR-Polarimetrie	27
2.6	SAR-Systeme	29
3	Bisherige Arbeiten zur automatischen Straßenextraktion	31
3.1	Modellierung und Strategie	31
3.1.1	Straßenmodell	31
3.1.2	Kontextmodell	34
3.1.3	Extraktionsstrategie	36
3.2	Verfahren zur automatischen Straßenextraktion	36
3.2.1	Verfahren für optische Bilddaten	38
3.2.2	Verfahren für SAR-Bilddaten	42
3.2.3	Folgerungen	46
3.3	Der TUM-LOREX-Ansatz	47

4	Straßenextraktion für SAR-Bilddaten	52
4.1	Abbildungseigenschaften von Straßen in SAR-Bilddaten	52
4.1.1	Eigenschaften für verschiedene Frequenzen, Einfallswinkel und Polarisationen	52
4.1.2	Polarimetrische und interferometrische Bilddaten	56
4.1.3	Schlussfolgerungen für die Datenauswahl	58
4.2	Modifikation des TUM-LOREX-Ansatzes für SAR-Bilddaten	59
4.3	SAR-spezifische Vorverarbeitung – Anpassungen an Straßen	61
4.3.1	Korrektur der Einfallswinkelabhängigkeit	62
4.3.2	Reduzierung des Specklerauschens für die Linienextraktion	65
4.3.3	Skalierung der SAR-Messwerte für die Straßenextraktion	66
4.4	Ausrichtung auf relevante Bildbereiche	68
4.4.1	Klassifikation von Kontextgebieten	68
4.4.2	Segmentierung potentieller Straßenregionen	69
4.5	Extraktion und Bewertung	70
4.5.1	Bewertungsschema für Extraktionsergebnisse	70
4.5.2	Ergebnisse und Bewertung	72
5	Analyse der Straßenextraktion für SAR-Bilddaten	82
5.1	Analyse der Stärken und Schwächen	82
5.1.1	Korrekte Extraktionen	82
5.1.2	Fehlende Extraktionen	82
5.1.3	Unkorrekte Extraktionen	84
5.2	Abbildungseigenschaften von SAR-spezifischen Problembereichen	86
5.2.1	Bäume	86
5.2.2	Fahrzeuge	87
5.2.3	Brücken	89
5.2.4	Verkehrsschilder	90
5.3	Folgerungen für die Extraktion	90
6	Verbesserung der Straßenextraktion für SAR-Bilddaten	92
6.1	Nutzen von lokalem Kontext: Kontextobjekte	92
6.1.1	Integration der Kontextobjekte in die Straßenextraktion	93
6.1.2	Ergebnisse und Bewertung	94
6.2	Nutzen von globalem Kontext: Kontextgebiete	96
6.2.1	Integration der Stadtgrenze in die Straßenextraktion	96
6.2.2	Ergebnisse und Bewertung	96
6.3	Separate Behandlung von Autobahnen	100
6.3.1	Modell für Autobahnen	100
6.3.2	Extraktion von Autobahnen	101
6.3.3	Ergebnisse und Bewertung	101
7	Diskussion und Ausblick	104
7.1	Zusammenfassung des neuen Verfahrens	104
7.2	Diskussion	104
7.3	Ausblick	106

A Anhang	108
A.1 SAR-Systemparameter	108
A.2 Der Steger-Linienoperator	108
A.3 Algorithmus von Dijkstra	109
A.4 Prozessierung der Rohdaten in Azimut	109
Verzeichnis der Abkürzungen und Variablen	112
Literaturverzeichnis	115

1. Einleitung

1.1 Motivation

Luft- und Satellitenbilder bilden in der Photogrammetrie und Fernerkundung die Basis für thematische Auswertungen und für die Extraktion von Objekten. Die Auswertung dieser Bilddaten findet heutzutage zunehmend neue Anwendungsgebiete, etwa in der Raum- und Verkehrsplanung, bei der Überwachung des Ökosystems oder bei Naturkatastrophen. Zu dem gestiegenen Bedarf an Informationen zählen auch aktuelle Daten über das Straßennetz. Für viele Aufgaben ist das Straßennetz von elementarer Bedeutung, beispielsweise werden digitale Straßendaten für die Routenplanung, Navigation und Planungsaufgaben benötigt. Besonders dringend ist z. B. auch der Bedarf an aktuellen Straßendaten nach Naturkatastrophen, um den Grad der Zerstörung der Infrastruktur zu ermitteln und die Hilfsmaßnahmen effektiv planen zu können. Straßen dienen ganz allgemein als wichtige Versorgungs- und Kommunikationswege, auf die eine Gesellschaft essentiell angewiesen ist. Die automatische Extraktion von Straßen aus digitalen Bilddaten ist derzeit Gegenstand der Forschung (STILLA et al., 2005).

In der Bildanalyse befassen sich seit einigen Jahren zahlreiche Forschungsarbeiten mit der vollautomatischen Objektextraktion. Die Schwierigkeit bei diesen Verfahren liegt darin, den Erkennungsprozess mit Methoden der Bildanalyse zu realisieren: die Erfassung von Strukturen, deren Gruppierung und die Zuweisung von Semantik. Diese Schwierigkeiten sind bisher nicht ausreichend gelöst.

Zur Erfassung und Aktualisierung von Straßendaten werden Bilddaten in der Praxis immer noch manuell ausgewertet (ENGLISCH und HEIPKE, 1998). Ein Operateur kann durch seine visuellen Fähigkeiten die Bilddaten meist problemlos interpretieren. Die manuelle, interaktive Erfassung ist jedoch recht zeitintensiv und kostenaufwändig. Zudem wächst der Wunsch nach kürzeren Zeiträumen zwischen den Aktualisierungen, was den Bedarf an automatischen Auswerteverfahren weiterhin erhöht.

Ein möglicher Ansatz die automatische Erkennung von Straßen weiter voranzutreiben, besteht in der Nutzung zusätzlicher oder andersartiger Informationsquellen. Bisherige Forschungsarbeiten zur Straßenextraktion haben hauptsächlich optische Bilddaten verwendet, die im sichtbaren und im nahen Infrarot-Bereich des elektromagnetischen Spektrums Reflexionen der Erdoberfläche aufzeichnen. Die Nutzung von Radardaten zur Erkennung von Straßen ist bisher minimal ausgeschöpft worden.

Radar ist ein aktives Verfahren, das selbst ausgesendete und an der Erdoberfläche reflektierte Mikrowellenstrahlung aufzeichnet. Aus diesem Verfahren ergeben sich eine Reihe von prinzipiellen Vorteilen gegenüber optischen Sensoren. Die wesentlichen Vorteile von Radar bestehen in der Unabhängigkeit der Aufnahme von der Tageszeit und wegen der hohen Durchlässigkeit der Atmosphäre für Mikrowellenstrahlung in der weitgehenden Unabhängigkeit von Witterungsverhältnissen. Eine Aufnahme mit Radarsensoren bietet sich insbesondere dann an, wenn die Aufnahme zeitnah und somit auch nachts oder bei ungünstigen Witterungsbedingungen erfolgen muss, wie etwa bei Erdbeben oder Überschwemmungen. Wegen der Wetterunabhängigkeit und des Tag- und Nachtbetriebs haben sie auch das Potenzial für eine regelmäßige, operationelle Überwachung der Erdoberfläche, beispielsweise zur Verkehrsüberwachung.

Zur Bildauswertung werden vor allem Daten der höher aufgelösten SAR-Systeme (*Synthetic Aperture Radar*) verwendet. Die Auswertung von SAR-Daten hat sich seit dem Start des ersten europäischen Erdbeobachtungssatelliten ERS 1 im Jahr 1990 enorm entwickelt. Verschiedene Klassifizierungsverfahren zur thematischen Kartierung der Erdoberfläche haben sich ebenso wie Verfahren zur Erzeugung digitaler Geländemodelle und zur Bestimmung von Bewegungen der Erdoberfläche etabliert.

Die ständig gestiegene Auflösung der SAR-Sensoren ermöglicht zunehmend auch die Erkennung von Straßen oder einzelnen Gebäuden. In dieser Arbeit soll das Potenzial von hoch aufgelösten SAR-Bilddaten für die automatische Extraktion von Straßen aufgezeigt werden. Dabei steht die Adaption eines automatischen Extraktionsverfahrens für Straßen an SAR-Bilddaten im Vordergrund der Arbeit. Es sollen aber auch die grundsätzlichen Vorteile und Schwierigkeiten von SAR-Bilddaten für die Erkennung von Straßen erörtert werden.

1.2 Zielsetzung dieser Arbeit

In dieser Arbeit wird ein für optische Satellitenbilddaten etabliertes Verfahren zur Straßenextraktion an SAR-Bilddaten angepasst und erweitert. Der Ansatz ist für Satellitenbilder mit einer Auflösung von ca. zwei Metern Bodenpixelgröße und für offene, ländliche Gebiete geeignet. Bei der Anpassung an SAR-Bilddaten sind vor allem die speziellen Auswirkungen des Sensorprinzips auf die Abbildung zu berücksichtigen. SAR-Bilddaten unterscheiden sich von optischen Bilddaten im Wesentlichen durch die unterschiedliche Wellenlänge, den Speckle-Effekt und die schräge Aufnahmegeometrie seitlich senkrecht zur Flugrichtung. Diese Abbildungseigenschaften werden modelliert und in die Straßenextraktion integriert. Durch eine eingehende Analyse der erzielten Ergebnisse soll aufgezeigt werden, an welchen Stellen Straßen erfasst werden können und welche Gründe an anderen Stellen für ein Scheitern verantwortlich sind. Dabei werden auch die Relationen von Straßen zu anderen Objekten untersucht, sowie Wege aufgezeigt, wie diese Kontextinformation für die Straßenextraktion nutzbar gemacht werden kann.

1.3 Aufbau

Kapitel 2 beschäftigt sich mit den Grundlagen von Radar mit synthetischer Apertur. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den Eigenschaften der SAR-Bilddaten.

In Kapitel 3 werden bisherige Arbeiten zur Straßenextraktion aus optischen und SAR-Bilddaten vorgestellt. Dabei stehen die Modellierung des Objektes Straße, die Kontextmodellierung und die Extraktionsstrategie im Vordergrund. Die Stärken und Schwächen dieser Ansätze werden herausgearbeitet, um daraus Folgerungen für diese Arbeit abzuleiten.

Kapitel 4 beschreibt das an SAR-Bilddaten angepasste Extraktionsverfahren für Straßen. Dieses umfasst insbesondere die Modellierung und Integration der radiometrischen Eigenschaften von Straßen in die Extraktion. Schließlich werden anhand von mehreren Testgebieten erste Ergebnisse erzeugt und evaluiert.

Kapitel 5 beschäftigt sich mit der Analyse der in Kapitel 4 erzielten Extraktionsergebnisse. Es werden detailliert die Gründe sowohl für erfolgreiche als auch für fehlerhafte Extraktionen erforscht und darauf aufbauend die Abbildungseigenschaften der für die fehlerhaften Extraktionen verantwortlichen Kontextobjekte skizziert. Sie bilden die Grundlage für die folgenden Verbesserungen.

In Kapitel 6 wird das Verfahren zur Straßenextraktion durch Einbeziehung von lokalem und globalem Kontextwissen und einer expliziten Modellierung und Extraktion von Autobahnen verbessert. Die einzelnen Schritte dieser Verbesserungen werden detailliert beschrieben und die damit erzielten Ergebnisse werden anhand von Testgebieten dargestellt und bewertet.

Eine Diskussion des Verfahrens sowie Ansatzpunkte für zukünftige Verbesserungen einer automatischen Extraktion von Straßen aus SAR-Bilddaten werden in Kapitel 7 gegeben.

2. Radar mit synthetischer Apertur

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Grundlagen von Radar mit synthetischer Apertur (SAR: *Synthetic Aperture Radar*) und dessen Abbildungseigenschaften beschrieben. Ausgehend von der Beschreibung des Grundprinzips abbildender Radarsysteme (Abschnitt 2.1) werden die geometrischen, die radiometrischen und die statistischen Eigenschaften von SAR-Bilddaten erläutert (Abschnitte 2.2, 2.3 und 2.4). In Abschnitt 2.5 wird das Konzept der SAR-Polarimetrie vorgestellt. Abschließend folgt eine kurze Beschreibung der SAR-Systeme, deren Daten in dieser Arbeit verwendet werden (Abschnitt 2.6).

2.1 Grundprinzip und Auflösung abbildender Radarsysteme

Der Begriff Radar steht für *Radio Detection and Ranging* und bezeichnet ein Verfahren zur Zielerfassung und Entfernungsmessung mittels Funkmesstechnik. Die Aufgabe der ersten Radaranwendungen bestand in der Detektion von Flugzeugen und Schiffen im zweiten Weltkrieg. Vor diesem militärischen Hintergrund begann rund dreißig Jahre später die Entwicklung von Radarverfahren für die Fernerkundung.

Radar ist ein aktives Verfahren, das die elektromagnetische Strahlung zur „Beleuchtung“ der aufzunehmenden Objekte selbst aussendet und über eine Antenne wieder empfängt. Radarsysteme arbeiten mit Mikrowellen im Wellenlängenbereich zwischen 1 m und 1 mm (0,3– 300 GHz). Bei Mikrowellen wird das elektromagnetische Spektrum in Frequenzbänder aufgeteilt. Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die genutzten Frequenzbänder und deren Bezeichnungen.

Band	Frequenz		Wellenlänge
K	10.9– 36.0	GHz	27.5– 8.33 mm
X	5.75– 10.9	GHz	5.21– 2.75 cm
C	4.2– 5.75	GHz	7.14– 5.21 cm
S	1.55– 4.2	GHz	19.4– 7.14 cm
L	0.39– 1.55	GHz	76.9– 19.4 cm
P	0.225– 0.39	GHz	133– 76.9 cm

Tabelle 2.1. Frequenzbänder im Mikrowellenbereich aus (ULABY et al., 1981)

Die Atmosphäre ist für Mikrowellen mit Frequenzen unterhalb von 20 GHz nahezu durchlässig, d. h. selbst kleine Wassertropfen können durchdrungen werden. Dadurch sind Radarverfahren auch bei Wolken, Nebel und Regen einsetzbar (LILLESAND und KIEFER, 1994).

In der Fernerkundung lassen sich drei Kategorien aktiver Mikrowellensysteme unterscheiden: Altimeter, Scatterometer und abbildende Systeme. Die beiden ersten, nicht-abbildenden Systeme sind nicht weiter Gegenstand dieser Arbeit. Abbildende Radarsysteme liefern nach der Bildgenerierung die Abbildung einer Oberfläche im Mikrowellenbereich des elektromagnetischen Spektrums. Ein besonderes Merkmal abbildender Radarsysteme ist ihre Aufnahmegeometrie. Der Sensor blickt senkrecht zur Flugrichtung *seitlich schräg* nach unten auf die Erdoberfläche (Abbildung 2.1). Diese Systeme werden deswegen auch als Seitensichtradare (SLAR: *Side Looking Aperture Radar*) bezeichnet. Für abbildende Radarsysteme ist die Seitensicht eine notwendige Voraussetzung, da zur räumlichen Trennung der Signale die Laufzeit verwendet wird. Benachbarte Bodenpunkte in der Nähe des Nadirs können nicht aufgelöst werden, weil sie fast die gleiche Laufzeit haben.

Im Wesentlichen gibt es zwei unterschiedliche Sensortypen für Seitensichtradare: Systeme mit realer Apertur (RAR: *Real Aperture Radar*) und Systeme mit synthetischer Apertur (SAR: *Synthetic Aperture Radar*). Als Apertur wird in der Radarliteratur die Länge der Antenne bezeichnet. Das Aufnahmeprinzip ist für beide Sensortypen gleich.

2.1.1 Grundprinzip abbildender Radarsysteme

Die Radarantenne sendet extrem kurze, kohärente Mikrowellensignale von hoher Energie senkrecht zur Flugrichtung schräg nach unten ab. Die Energie wird nicht in alle Richtungen gleichmäßig abge-

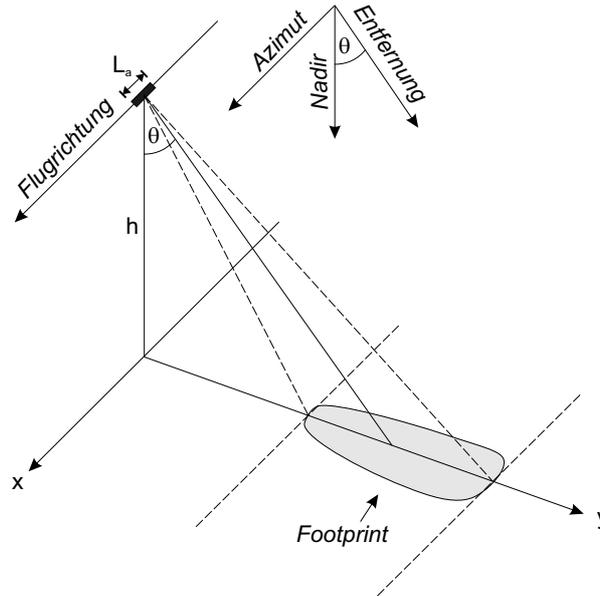


Abbildung 2.1. SAR-Aufnahmegometrie

strahlt sondern durch eine spezielle Abstrahlcharakteristik auf einen begrenzten Bereich gebündelt. Der bestrahlte Bereich am Boden wird *Footprint* genannt. Die Bündelung bewirkt eine Verstärkung der Energie, die als Antennengewinn bezeichnet wird. Am Boden wird das Signal reflektiert und ein Teil der Strahlung wird von der Antenne wieder aufgenommen. Bei den meisten Systemen sind Sende- und Empfangseinheit identisch, wobei die Antenne ständig zwischen Sende- und Empfangsmodus umschaltet. Die von der Geländeoberfläche zurückgestreuten Echos (Amplituden und Phasen der gestreuten Wellen) werden in einen I-Wert (*In-phase Component*) und einen Q-Wert (*Quadrature Component*) zerlegt und entsprechend der Position und Laufzeit in der zugehörigen Zeile und Spalte der Rohdatenmatrix als komplexe Zahl $I + iQ$ gespeichert. Aus den aufgenommenen, komplexen Signalen wird eine zweidimensionale Abbildung der Oberfläche generiert. Die orthogonalen Bildkoordinatenachsen sind die in Flugrichtung verlaufende *Azimut-Achse* und die senkrecht zur Flugrichtung in Blickrichtung verlaufende *Entfernungs-Achse*.

Bei RAR-Systemen wird jeder Bodenpunkt nur einmal beleuchtet. Die Aussendung der Impulse ist so geschaltet, dass durch die Flugbewegung jeder Impuls eine neue Geländezeile quer zur Flugrichtung aufnimmt. Das Bild der Szene entsteht im Wesentlichen durch eine Aneinanderreihung der aufgenommenen Bildzeilen. Beim SAR hingegen werden die Radarsignale mit einer wesentlich höheren Impulswiederholfrequenz (PRF: *Pulse Repetition Frequency*) ausgestrahlt als beim RAR. Dies führt zu einer deutlichen Steigerung der Auflösung in Flugrichtung. Die Redundanz erfordert aber auch spezielle Techniken bei dem Prozess der Bildgenerierung (BAMLER und SCHÄTTLER, 1993; MOREIRA, 2001).

Im Folgenden werden das Konzept und die räumliche Auflösung von RAR und SAR näher erläutert.

2.1.2 Auflösung in Entfernung

Das Auflösen zweier Objektpunkte in Entfernungsrichtung ist beim **Radar mit realer Apertur** dann möglich, wenn beide Signale u_1 und u_2 räumlich voneinander trennbar sind. Dazu müssen sich ihre Laufzeiten (t_1 und t_2) mindestens um die Länge der Impulsdauer τ voneinander unterscheiden: $|t_2 - t_1| \geq \tau$. Im Grenzfall ergibt sich für die Auflösung in Schrägentfernung δ_{sr}^{RAR} (*Slant Range*) nach Abbildung 2.2(a)

$$\delta_{sr}^{RAR} = \frac{c\tau}{2}, \quad (2.1)$$

mit c für die Lichtgeschwindigkeit. Der Faktor zwei folgt aus dem zweifachen Zurücklegen der Strecke im Hin- und Rückweg. Projiziert man die Entfernungsauflösung mit dem Einfallswinkel θ auf den

Boden (*Ground Range*) erhält man die Auflösung in Grundrissgeometrie δ_{gr}^{RAR} (Abbildung 2.2(b))

$$\delta_{gr}^{RAR} = \frac{c\tau}{2 \sin \theta} \quad \text{bzw.} \quad \delta_{gr}^{RAR} = \frac{c}{2B \sin \theta}. \quad (2.2)$$

Die Auflösung in Entfernung ist damit maßgeblich durch die Länge der Impulsdauer τ bzw. durch die Bandbreite $B = \frac{1}{\tau}$ bestimmt und unabhängig von der Höhe über Grund.

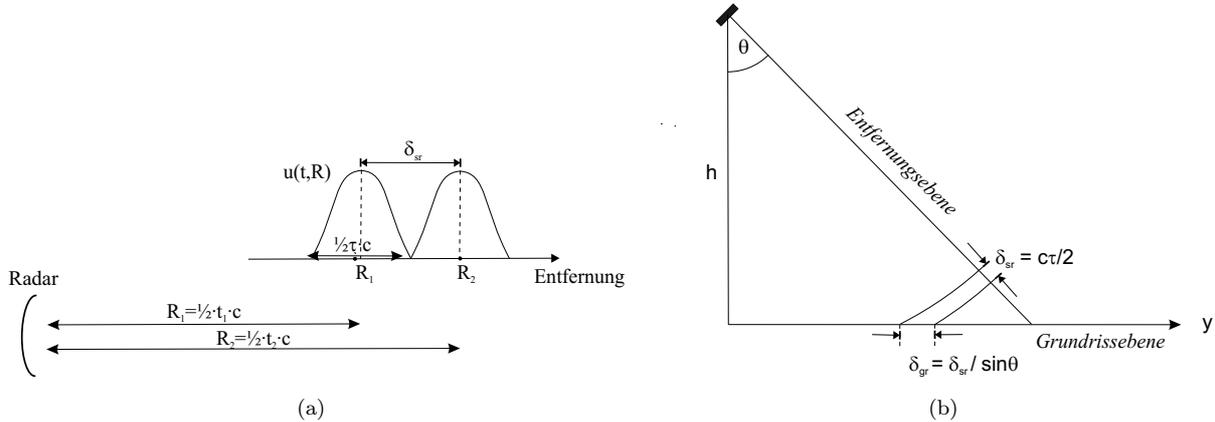


Abbildung 2.2. Geometrische Auflösung in Entfernung (a) Abstand zweier Pulse: $R_2 - R_1 = \delta_{sr}$ (b) Auflösung in *Entfernungs-* und *Grundrisssebene*

Eine Erhöhung der Auflösung in Entfernung ist also nur über eine kürzere Impulsdauer zu realisieren. In der Praxis ist es jedoch schwierig den Impuls beliebig zu verkürzen, da bei einer Verkürzung der Impulsdauer die Höhe der zu sendenden Energie ansteigt. Die Höhe der Energie ist aber durch die Hardware begrenzt.

Bei modernen **SAR-Systemen** wird anstatt eines kurzen Impulses eine so genannte *Impulskompression* durchgeführt. Bei der Impulskompression wird ein Impuls so mit einer Frequenz moduliert, dass die Bandbreite des sich ergebenden Signals erhöht wird. Dieses so veränderte Signal, dessen Frequenz sich mit der Zeit ändert, wird als Chirp bezeichnet. Durch das umgekehrt proportionale Verhältnis der Bandbreite zur Impulsdauer entspricht die höhere Bandbreite B_c einer kürzeren Impulsdauer. Beim SAR wird die Bandbreite beispielsweise dadurch erhöht, dass ein längerer Impuls mit einer linearen Frequenz moduliert wird (siehe Abbildung 2.3).

Nach dem Empfang des frequenzmodulierten Signals kann mit einem Matched-Filter-Ansatz der rückgestreute Impuls auf eine relativ schmale Breite im Ortsraum komprimiert werden. Hierfür wird das Signal mit einer konjugiert komplexen, zeitinvertierten Kopie der Chirp-Referenzfunktion multipliziert. Der Chirp erreicht eine effektive Impulsdauer von $\tau_{eff} = 1/B_c$. Damit ergibt sich eine geometrische Entfernungsauflösung für SAR-Systeme δ_{sr}^{SAR} von

$$\delta_{sr}^{SAR} = \frac{c}{2B_c}. \quad (2.3)$$

Bei einer Bandbreite von 100 MHz wie bei dem E-SAR-System (HORN, 1996) entspricht dies einer Auflösung in Entfernung von 1,5 m .

2.1.3 Auflösung in Azimut

Für ein herkömmliches **Radar mit realer Apertur** entspricht die geometrische Auflösung in Flugrichtung in etwa der Breite des Footprints in Flugrichtung. Da ein Bodenpunkt im Prinzip nur einmal aufgenommen wird, können zwei Objektpunkte nur voneinander unterschieden werden, wenn sie nicht im gleichen Footprint bzw. der gleichen Antennenkeule liegen. Als Antennenkeule oder Öffnungswinkel der Antenne bezeichnet man die beiden Winkel in und quer zur Flugrichtung des Radars, die die ausgeleuchtete Fläche am Boden definieren. Sie sind durch die Richtcharakteristik der Antenne bestimmt.

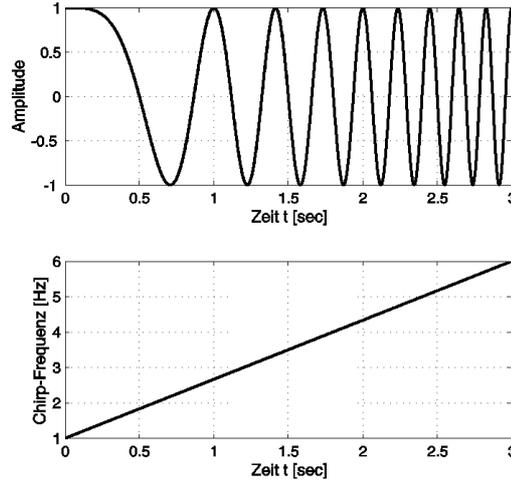


Abbildung 2.3. Linearer Chirp: Amplitude moduliert mit einer linearer Frequenz in Abhängigkeit von der Zeit

Der Öffnungswinkel der Antenne in Flugrichtung θ_a ist üblicherweise als Winkel definiert, in dem die Signalleistung der Hauptkeule um höchstens 3 dB von dem Maximalwert abfällt¹. Eine Antenne der Länge L_a hat näherungsweise einen Öffnungswinkel von

$$\theta_a \approx \lambda/L_a, \quad (2.4)$$

mit λ der Wellenlänge der emittierten Strahlung. Mit diesem Öffnungswinkel ergibt sich für eine bestimmte Entfernung R die Breite des Footprints δ_{az}^{RAR} am Boden zu

$$\delta_{az}^{RAR} = R \cdot \theta_a \approx \frac{R\lambda}{L_a}. \quad (2.5)$$

Zwei Punkte müssen mindestens um δ_{az}^{RAR} auseinander liegen, um aufgelöst werden zu können. Aus der Formel geht hervor, dass die Auflösung in Azimut nur durch eine kürzere Wellenlänge, eine geringere Entfernung oder durch eine längere Antenne verbessert werden kann.

Beim **Radar mit synthetischer Apertur** verwendet man für eine Verbesserung der Auflösung in Azimut den Trick der künstlichen Verlängerung der Antenne. Dabei wird die Impulswiederholfrequenz (PRF) so erhöht, dass die Objektpunkte nahezu kontinuierlich beleuchtet werden. Das Abbild eines Objektpunktes wird dann nicht mehr aus *einer* Aufnahme, sondern aus all jenen Aufnahmen konstruiert, in denen er enthalten ist. Durch dieses Verfahren ergibt sich die Länge der synthetischen Antenne L_{sa} aus der Länge der Flugstrecke des Sensors, innerhalb der sich ein Objektpunkt in der Antennenkeule befindet (Abbildung 2.4). L_{sa} entspricht damit der Breite der Antennenkeule am Boden

$$L_{sa} = \delta_{az}^{RAR} = R \cdot \theta_a \approx \frac{R\lambda}{L_a}. \quad (2.6)$$

Die Winkelauflösung in Azimut θ_{sa} ist beim SAR doppelt so hoch wie beim Radar mit realer Apertur (vgl. Gleichung 2.4)

$$\theta_{sa} = \frac{\lambda}{2L_{sa}}. \quad (2.7)$$

Der Faktor zwei ist durch das nicht gleichzeitige Abstrahlen der einzelnen Antennenelemente beim SAR begründet. Dadurch kommt es sowohl beim Hinweg als auch beim Rückweg zu Phasenunterschieden, während es beim Radar mit realer Apertur durch das gleichzeitige Abstrahlen aller Elemente nur zu

¹Die Abstrahlung von der Radarantenne erfolgt nicht durch eine physikalisch abgegrenzte Strahlkeule, sondern sie muss „künstlich“ definiert werden. Die Antenne besitzt ein Leistungsmaximum in einer zentralen Hauptstrahlrichtung. Darüber hinaus existieren in andere Strahlrichtungen unerwünschte, aber physikalisch unvermeidbare Nebenkeulen, mit geringerer Leistung.

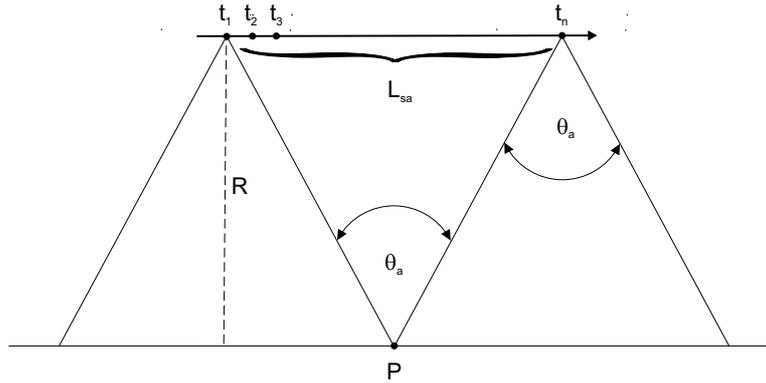


Abbildung 2.4. Geometrische Auflösung in Azimut: Länge der synthetischen Apertur L_{sa}

einer Phasendifferenz auf dem Rückweg kommt (MOREIRA, 2001; KRAUS und SCHNEIDER, 1988). Für die maximale Auflösung in Azimut mit synthetischer Apertur δ_{az}^{SAR} ergibt sich

$$\delta_{az}^{SAR} = R \cdot \theta_{sa} \approx \frac{L_a}{2}. \quad (2.8)$$

Die Auflösung in Azimut bei Radar mit synthetischer Apertur ist also nur abhängig von der Länge der Antenne und nicht mehr von der Entfernung.

Für das Zusammenfügen der einzelnen Aufnahmen zur Bildung der synthetischen Apertur gibt es mehrere Ansätze (siehe ULABY et al., 1982). Ein häufig verwendeter Ansatz basiert auf dem Doppler-Effekt, wobei die Tatsache ausgenutzt wird, dass sich der Sensor relativ zum Objekt bewegt und sich dadurch die empfangene Frequenz von der ausgesendeten Frequenz unterscheidet (siehe auch Anhang A.4).

2.2 Geometrisch bedingte Abbildungseffekte

Aufgrund der schrägen Sicht bei der Aufnahme ergeben sich für Radarbilder einige besondere, geometrische Eigenschaften. In diesem Abschnitt werden die geometrischen Effekte erläutert, die durch das Aufnahmeverfahren, die Geländeform und den Prozess der Geokodierung verursacht werden. Alle geometrischen Effekte haben auch eine radiometrische Auswirkung auf das Bild.

2.2.1 Foreshortening, Layover, Schatten

Die Schrägsicht führt grundsätzlich zu geometrischen Verzerrungen gegenüber einer Grundrissdarstellung. Darüber hinaus kommt es aufgrund der Schrägsicht zu Effekten wie Foreshortening, Layover und Schatten, d. h. zu geometrisch bedingten Abbildungseffekten, die durch unebenes Gelände verursacht werden. Die geometrischen und radiometrischen Verzerrungen können durch eine Umrechnung in die Grundrissebene oder durch eine Georeferenzierung (teilweise) behoben werden (vgl. Abschnitt 2.2.3).

Foreshortening: Dem Radar zugeneigte Geländeformen werden im Schrägsichtbild verkürzt dargestellt. Ihre Oberfläche wird von der Wellenfront der Radarimpulse nahezu gleichzeitig erreicht und verschiedene Reflexionssignale fallen zeitlich zusammen (Abbildung 2.5(a)). Ein Beispiel sind Berghänge, die in Richtung des Radars verkürzt erscheinen. Für die Radiometrie bedeutet dies eine Aufhellung des betroffenen Gebietes, da die Rückstreuung größerer Flächen in Entfernungsrichtung zusammengestaucht wird.

Layover: Bei noch steileren Einfallswinkeln, z.B. im Nahbereich, an Häuserfronten oder an Waldrändern kommt es zu einem Umklappeffekt (Layover). Layover tritt auf, wenn die Wellenfront den oberen Teil einer Geländeform zu einem früheren Zeitpunkt als den unteren erreicht. Dabei findet eine Überlagerung der Signale statt. In Abbildung 2.5(b) fällt die Rückstreuung der ansteigenden Strecke \overline{BC} (aktiver Layover) mit den passiven Layoverbereichen vor der Erhebung (\overline{AB}) und nach der Erhebung

(\overline{CD}) auf denselben Bereich im Bild zusammen. Eine Unterscheidung dieser Bereiche ist damit nicht mehr möglich. Bei Bergen führt der Layover dazu, dass die Lage des Gipfels zum Radar hin verschoben wird. Im Extremfall, bei steilen Bergen wie in Abbildung 2.5(b), wird der Berggipfel vor dem Bergfuß abgebildet. Radiometrisch erscheinen Layoverbereiche durch den dreifachen Rückstreubeitrag extrem hell im Bild. Diese Effekte spielen insbesondere in urbanen Räumen eine wichtige Rolle (STILLA et al., 2003).

Radarschatten: Vom Sensor weggeneigte Flächen werden nicht mehr vom Radar beleuchtet, wenn ihre Steigung größer als der Depressionswinkel ($\beta = 90 - \theta$) ist (Abbildung 2.5(c)). Von diesen im Radarschatten liegenden Bereichen gibt es keine Rückstreuung. Radiometrisch erscheinen sie im Bild dunkel. Abweichungen in der Intensität können in sehr bewegten oder bebauten Gebieten zustande kommen, wenn eine Überlagerung des Schattenbereichs mit Layover stattfindet.

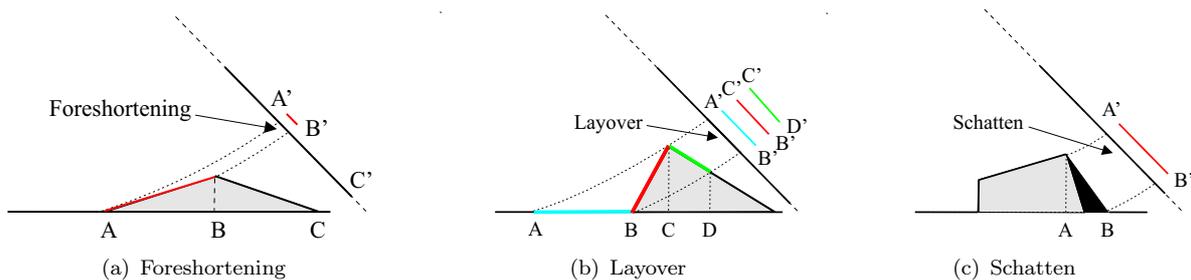


Abbildung 2.5. Geometrisch bedingte Abbildungseffekte

2.2.2 Spezielle geometrische Effekte

Neben den durch die Höhenunterschiede des Geländes verursachten, geometrischen Effekten gibt es noch weitere, aufnahmebedingte Effekte, die sich auf die Geometrie der Daten auswirken. Hier werden kurz einige Effekte angesprochen, die bei der Interpretation von Radardaten eine Rolle spielen.

Versetzung und Verschmierung bewegter Objekte: Bewegte Objekte werden in SAR-Bilddaten je nach Bewegungsrichtung versetzt und/oder verschmiert abgebildet. Zur richtigen Positionierung der Rückstreuwerte geht bei der Bildgenerierung die relative Geschwindigkeit zwischen der Erde und dem Radar mit ein. Wenn Objekte eine davon abweichende Geschwindigkeit aufweisen, werden sie nicht korrekt abgebildet. Eine Bewegung in Entfernungsrichtung führt zu einer Versetzung des Objektes in Flugrichtung. Diese Azimutversetzung Δ_{az} ergibt sich aus dem Abstand des Radars zum Ziel R , der zusätzlichen relativen Geschwindigkeit eines Objektes im Verhältnis zu seiner Umgebung v_{Obj} und der Geschwindigkeit des Radarsensors v_{SAR} (SCHREIER, 1993)

$$\Delta_{az} = \frac{R \cdot v_{Obj}}{v_{SAR}}. \quad (2.9)$$

In den Bilddaten sind vor allem Versetzungen von bewegten Objekten wie Zügen, Schiffen oder Autos zu beobachten. Bei einer Bewegung in Azimutrichtung kann das Objekt nicht richtig fokussiert werden und es kommt zu einer Verschmierung in Azimut. Bei einer Bewegung mit beiden Richtungskomponenten kommt es zu einer Kombination aus Versetzung und Verschmierung. Für die Betrachtung von Straßen bedeutet dies, dass nur Fahrzeuge, die sich genau in Flugrichtung bewegen, auf der Straße abgebildet werden und zwar verschmiert in Azimut.

Räumliche Korrelation: Bei der Umsetzung der SAR-Daten in eine Bildmatrix werden die Daten meistens überabgetastet, d. h. die geometrische Auflösung ist besser als die verwendete Bodenpixelgröße, z.B. wird bei ERS-1 Daten eine geometrische Auflösung von rund 12,5m erreicht, aber nur eine Bodenpixelgröße von 25m verwendet. Dies führt zu einer Korrelation benachbarter Pixel. Die Korrelationen sind zudem nicht zirkular symmetrisch wie bei optischen Systemen, sondern aufgrund der

unterschiedlichen Prozessierung in Entfernung und Azimut winkelabhängig. Die räumlichen Korrelationen beeinflussen die Gültigkeit von Modellen und Algorithmen zur Detektion und zur Ableitung von Parametern. Insbesondere bei niedrig aufgelösten Satellitenbilddaten ist die räumliche Korrelation zu berücksichtigen. Für hoch auflösende SAR-Bilddaten besteht die Möglichkeit, die Bilddaten so zusammen zu fassen, dass keine Korrelationen mehr bestehen (OLIVER und QUEGAN, 1998).

Bewegungskompensation: Bei flugzeuggetragenen SAR-Systemen trifft die Annahme einer konstanten Fluggeschwindigkeit entlang einer idealen Trajektorie, wie bei satellitengetragenen Systemen, nicht zu. Durch eine nicht gleichförmige Bewegung des Flugzeugs entstehen Fehler, die zu veränderten Phasenwerten, Laufzeitschwankungen und einer Amplitudenmodulation des Rückstreusignals führen. Diese Störungen bewirken geometrische Verzerrungen, eine Verringerung der räumlichen Auflösung in Azimutrichtung und eine Verminderung des Bildkontrastes. Die rechnerische Korrektur der Bewegungsfehler wird allgemein als Bewegungskompensation (*Motion Compensation*) bezeichnet. Sie geschieht unter Verwendung der Position und der Lage des Flugzeugs, die mit INS (Inertialen Navigationssystemen) und GPS (*Global Positioning System*) aufgezeichnet werden (KLAUSING und HOLPP, 2000).

Ambiguities: Mit Ambiguities wird eine zusätzliche unerwünschte Rückstreuung eines Objektes bezeichnet. Die Hauptursache für Ambiguities ist die Existenz von Nebenkeulen in der Richtcharakteristik der Radarantenne. Die Bildgenerierung basiert auf der Prozessierung der aufgezeichneten Rückstreuwerte der Antennenhauptkeule. Aber auch die Nebenkeulen senden, wenn auch mit geringerer Leistung, Energie zur Erdoberfläche und es kommt zu „Geisterabbildungen“ von Objekten. Ambiguities werden beispielsweise manchmal in Gebieten mit geringerer Rückstreuung (z. B. an Wasseroberflächen) sichtbar, wenn es in diesen Gebieten zu hohen Rückstreuungen kommt, die von einem völlig anderen Ort (z. B. von einer Stadt) stammen (CURLANDER und MCDONOUGH, 1991).

2.2.3 Geokodierung

Bei der Geokodierung wird ein Bild von seiner ursprünglichen Geometrie in eine Referenzgeometrie mit regelmäßigem Raster und übergeordnetem Referenzsystem, z. B. in ein Landeskoordinatensystem, transformiert.

Das aufgenommene SAR-Bild liegt nach der Bildgenerierung in Entfernungsgeometrie vor. In einem ersten Schritt der Referenzierung kann das Schrägsichtbild in die Grundrissgeometrie projiziert werden. Dies erfolgt über die Geometrie der Aufnahme mit $Y = R \cdot \sin \theta$ (vgl. Abbildung 2.2(b)). Theoretisch liefert diese einfache Transformation in die Grundrissgeometrie bereits eine geometrisch fehlerfreie Referenzierung, wenn die Voraussetzungen erfüllt sind, dass keine Verdrehungen der Plattform, eine ideale Flugbahn und eine horizontale Geländeebene vorliegen. In der Praxis sind diese Voraussetzungen selten erfüllt.

Im Allgemeinen erfolgt die Geokodierung von Radarbildern nach der Methode der parametrischen Rektifizierung, die in einer etwas abgewandelten Form dem Ansatz der geometrischen Rektifizierung von Scannerbildern entspricht (KRAUS, 1990). Die parametrischen Verfahren unterscheiden sich hinsichtlich der Genauigkeit der Beschreibung der Erdoberfläche. Bei Satellitenaufnahmen reicht es oftmals aus, statt einer Ebene die Erdoberfläche mit Hilfe eines Ellipsoids zu beschreiben, um die Erdkrümmung zu berücksichtigen (ROTH et al., 1993). Bei höheren Genauigkeitsanforderungen oder bei stärker bewegtem Gelände ist für die Geokodierung ein digitales Geländemodell (DGM) der Erdoberfläche erforderlich. Dadurch können die geländebedingten, geometrischen Verzerrungen (Abschnitt 2.2.1) korrekt entzerrt werden (MEIER et al., 1993).

Auch die radiometrischen Verzerrungen können mit Hilfe eines DGM teilweise korrigiert werden. Fore-shorteningbereiche können wieder auf ihre normale Länge gestreckt und die hohen Rückstreuwerte auf diesen Bereich verteilt werden. Eine korrekte radiometrische Korrektur von Layover- und Schattenbereichen ist hingegen nicht möglich. Im Schatten liegen keine Informationen vor und er kann deshalb im georeferenzierten Bild nicht beseitigt werden. Beim Layover überlagern sich die Rückstreuwerte mehrerer Rückstreuebenen, so dass es nicht möglich ist, die Rückstreuwerte des Layover korrekt zu verteilen (BOLTER et al., 1998).

2.3 Radiometrische Eigenschaften

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit den radiometrischen Eigenschaften von Radarbildern. Die theoretische Grundlage für die Rückstreuung bildet die Radargleichung. Nachfolgend werden die Einflüsse objektspezifischer Eigenschaften, die Kalibrierung der Rückstreuwerte und die radiometrische Auflösung erläutert.

2.3.1 Die Radargleichung

Die am Sensor empfangene Leistung der Radarrückstreuung wird durch die Radargleichung beschrieben (siehe ULABY et al., 1982). Sie beschreibt die von der Antenne empfangene Leistung P_r pro Impuls in Abhängigkeit von der ausgesendeten Leistung P_t , des Antennengewinns G , der Wellenlänge λ , des Abstands zum Ziel R und den Streueigenschaften σ für die Polarisation jj :

$$P_r = P_t \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma_{jj}. \quad (2.10)$$

Die Distanz R zwischen Antenne und Auflösungszelle geht mit der vierten Potenz ein. Die zur Antenne hin rückgestreute Leistung P_r wird als *Rückstreuung* bezeichnet. Die Rückstreuung eines Punktzieles wird als *Radarrückstreuquerschnitt* σ (*Radar Cross Section*, RCS in [m^2]) bezeichnet. Er beschreibt das Reflexionsverhalten eines Ziels bezogen auf eine Raumeinheit, d. h. die Fähigkeit, einfallende elektromagnetische Wellen zum Radarempfänger zu reflektieren. Bei Flächenzielen wird der Radarrückstreuquerschnitt auf eine Auflösungszelle dA bezogen und dadurch einheitenlos zu

$$\sigma^0 = \frac{\sigma_{jj}}{dA} \left[\frac{m^2}{m^2} \right] \quad \text{mit} \quad dA = \delta_{gr} \cdot \delta_{az}. \quad (2.11)$$

Dieser normalisierte Radarrückstreuquerschnitt, auch als Rückstreukoeffizient σ^0 bezeichnet, wird oft im logarithmischen Maß in Dezibel [dB] angegeben. Eingesetzt in Gleichung 2.10 ergibt sich nach ULABY et al. (1982) für Radar mit realer Apertur eine Rückstreuung von

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma^0 \delta_{gr} \delta_{az}}{(4\pi)^3 R^4}. \quad (2.12)$$

Diese Gleichung stellt die Radargleichung für ein Flächenziel dar. Sie kann zum einen für die radiometrische Kalibrierung (Abschnitt 2.3.3) dienen, zum anderen kann mit ihr die Qualität des aufgenommenen Bildes ermittelt werden. Ein Faktor für die Qualität abbildender Radarsysteme ist das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR)

$$SNR = \frac{P_r}{P_N} = \frac{P_r}{F_n k B T_{eff}} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma^0 \delta_{gr} \delta_{az}}{(4\pi)^3 R^4 F_n k B T_{eff}}. \quad (2.13)$$

Das Rauschen P_N setzt sich aus der Rauschzahl F_n , der Boltzmann Konstanten k , der Bandbreite B und der effektiven Rauschtemperatur T_{eff} zusammen. Die Größen beziehen sich maßgeblich auf das thermische Rauschen der Elektronik am Empfänger. Das Speckle-Rauschen (Abschnitt 2.4) geht hier nicht ein.

Die Gleichungen 2.10 bis 2.13 beziehen sich auf Radar mit realer Apertur. Beim SAR wird ein Objekt von mehreren Impulsen beleuchtet. Die Anzahl der empfangenen Impulse n von einem Objekt ist abhängig von der Zeit t_{sa} , in der sich das Objekt im Beleuchtungskegel der Antenne befindet und der Impulswiederholrate (PRF, [$\frac{1}{s}$]). Die Impulsanzahl n lässt sich mit Hilfe der Länge der synthetischen Apertur L_{sa} , der Plattformgeschwindigkeit v_{SAR} und der Impulswiederholrate PRF und unter Verwendung von Gleichung 2.6 ausdrücken als (KLAUSING und HOLPP, 2000):

$$n = t_{sa} \cdot PRF = \frac{L_{sa} \cdot PRF}{v_{SAR}} = \frac{R \cdot \lambda \cdot PRF}{v_{SAR} \cdot L_a}. \quad (2.14)$$

Durch Multiplikation der Radargleichung 2.12 für RAR mit der Anzahl n der kohärent integrierten Signale ergibt sich die Radargleichung für SAR zu

$$P_{r,SAR} = P_r \cdot n = \frac{P_t G^2 \lambda^3 \sigma^0 \delta_{gr} \delta_{az} PRF}{(4\pi)^3 R^3 v_{SAR} L_a}. \quad (2.15)$$

Nach Umformungen mit der mittleren Leistung $\bar{P} = P_t \cdot \tau \cdot PRF$ und $B = 1/\tau$ ergibt sich nach ULABY et al. (1982) und CURLANDER und MCDONOUGH (1991) für das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) im SAR der Ausdruck

$$SNR = \frac{P_{r,SAR}}{P_N} = \frac{\bar{P} G^2 \lambda^3 \sigma^0 \delta_{gr} \delta_{az}}{(4\pi)^3 R^3 v_{SAR} L_a F_N k T_{eff}}. \quad (2.16)$$

Aus der Radargleichung geht hervor, dass die Radarrückstreuung abhängig von systembedingten Einflüssen und objektspezifischen Eigenschaften ist. Die systembedingten Einflüsse auf die rückgestreute Leistung (z. B. Frequenz, Polarisierung oder Einfallswinkel) sind bekannt und können bei der Prozessierung und Kalibrierung (siehe Abschnitt 2.3.3) berücksichtigt werden (OLMSTED, 1993). Der Einfluss objektspezifischer Eigenschaften wird durch den Radarrückstreukoeffizienten ausgedrückt.

2.3.2 Einfluss objektspezifischer Eigenschaften

Der Radarrückstreukoeffizient ist im Wesentlichen durch objektspezifische Eigenschaften bestimmt. Für eine bestimmte Wellenlänge ist er abhängig von den elektrischen Eigenschaften und der Art des Streumechanismus der Oberfläche. Je nach Beschaffenheit des angestrahlten Materials (Oberflächenrauigkeit, Struktur und Verteilung von Inhomogenitäten unter der Geländeoberfläche) kommt es zu unterschiedlichen Rückstreumechanismen. Die Eindringtiefe in das Material hängt hauptsächlich von der komplexen relativen Dielektrizitätskonstanten ab.

Rückstreumechanismen

Grundsätzlich können zwei Arten von Streumechanismen unterschieden werden: Oberflächenstreuung und Volumenstreuung. Oberflächenstreuung tritt an der obersten Grenzschicht zwischen zwei homogenen Medien auf. Sie hängt stark von der Oberflächenrauigkeit ab. Allgemein gilt eine Oberfläche als rau, wenn die Höhenvariation größer oder gleich der Größenordnung der Wellenlänge ist ($\sigma_h \geq \lambda$). Die Oberflächenrauigkeit ist neben der Wellenlänge auch vom lokalen Einfallswinkel abhängig. Dringt die Welle weiter in den Boden ein oder wird an Vegetation reflektiert, kommt es zur Volumenstreuung. Abbildung 2.6 stellt einige häufig vorkommende Rückstreumechanismen schematisch dar, die im Folgenden genauer beschrieben werden.

Spiegelnde Reflexion: Bei glatten Oberflächen $\sigma_h \ll \lambda$ kommt es zu einer spiegelnden Reflexion (Abbildung 2.6(a)). Es findet keine Streuung statt, sondern eine Totalreflexion. Der vom Radarsystem ausgesendete Mikrowellenimpuls wird entsprechend dem Reflexionsgesetz (Einfallswinkel = Ausfallswinkel) reflektiert und bleibt vollständig kohärent. Glatte Oberflächen haben einen hohen Reflexionsgrad. Dies führt aber nicht zwangsweise zu einer hohen Rückstreuung zum Radar, weil der einfallende Impuls vom Sensor weg reflektiert wird. Die Rückstreuung zum Radar wird verschwindend klein und verursacht auf dem Radarbild sehr dunkle bzw. schwarze Pixel.

Diffuse Reflexion: Mit zunehmender Rauigkeit wird die Reflexion mehr und mehr diffus (vgl. Abbildung 2.6(a) - 2.6(c)). Bei leicht rauen Oberflächen $\sigma_h < \lambda$ (Abbildung 2.6(b)) bleibt ein hoher kohärenter Anteil bestehen, ein geringerer Teil wird diffus zurückgestreut. Bei sehr rauen Oberflächen $\sigma_h > \lambda$ wird die Welle komplett diffus gestreut (Lambert'sche Oberfläche). Ein Lambert'scher Strahler emittiert Strahlung richtungsunabhängig, d. h. völlig diffus, wenngleich jeder einzelne Strahl dem Reflexionsgesetz genügt. Das Radarbild enthält in diesem Fall hellere Pixel.

Rückstrahl-Effekte: treten auf, wenn zwei oder mehr benachbarte, glatte Flächen so angeordnet sind, dass mehrere spiegelnde Reflexionen hintereinander stattfinden und das Reflexionssignal wieder in

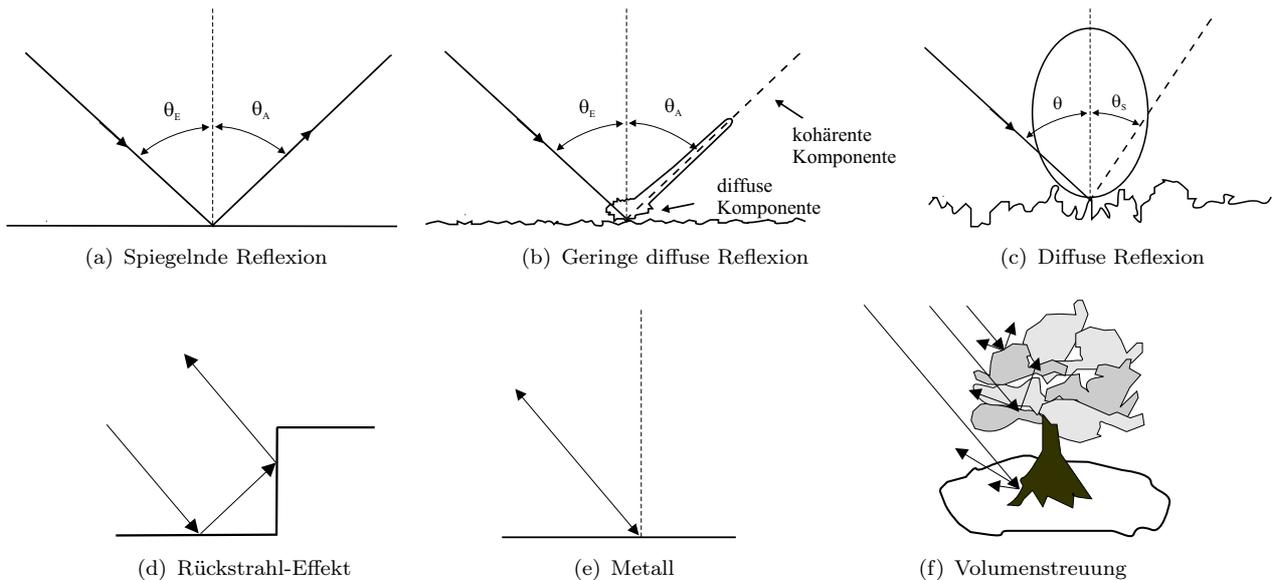


Abbildung 2.6. Unterschiedliche Rückstreumechanismen: Oberflächenstreuung: (a)-(e) und Volumenstreuung (f)

Richtung Sensor zurückgeworfen wird (z. B. Zweifachreflexion an Hauswänden, siehe Abbildung 2.6(d)). Objekte mit diesen Eigenschaften werden als *Corner-Reflektoren* (Winkelreflektoren) bezeichnet. Der Rückstrahl-Effekt selbst wird deshalb auch oft Corner-Reflektor-Effekt genannt. Verursacht durch die Corner-Reflektoren entsteht eine hohe Rückstreuung und teilweise Überstrahlungen im Radarbild. Bei einzelnen Punktstreuern äußert sich dies durch helle Kreuze in Entfernungs- und Azimutrichtung im SAR-Bild, da auch die Rückstreuungen der Nebenkeulen der Antenne noch groß genug sind, um die Nachbarsignale der Hauptkeule zu überdecken (Ambiguities). Als Corner-Reflektoren werden ebenfalls die zweiflächigen (*dihedral*) oder dreiflächigen (*trihedral*) metallischen Reflektoren bezeichnet, die bei Messkampagnen zur Kalibrierung des Bildes verwendet werden. Die Winkelreflektoren werden möglichst exakt zur Einfallsrichtung des Radarsignals ausgerichtet, um eine maximale Reflexion des Signals zu ermöglichen. Bei einem Dreifachreflektor wird das Signal durch Dreifachreflexion zum Sensor zurückgeworfen, egal an welcher Stelle des Reflektors das Signal auftrifft.

Zu gerad- und ungeradzahligen Mehrfachreflexionen in Sensorrichtung kommt es auch bei metallischen Objekten. Bei schrägem Einfall an länglich ausgerichteten, metallischen Objekten entsteht eine Dipolreflexion (Abbildung 2.6(e)) (KLAUSING und HOLPP, 2000). Metallische Strukturen wie beispielsweise Autos, eiserne Brücken oder Hochspannungsmasten verursachen eine starke Rückstreuung (KRAUS und SCHNEIDER, 1988).

Volumenstreuung: Im Gegensatz zur Reflexion an der Oberfläche dringen Radarwellen bei der *Volumenstreuung* in die Oberflächenschicht ein (Abbildung 2.6(f)). Die Streuung findet dann in einem Materialvolumen statt, z. B. im Boden an Bodenpartikeln oder in der Vegetationsdecke an Blättern, Zweigen und Baumstämmen. Dabei bestimmt die Eindringtiefe das Volumen, das zur Rückstreuung beiträgt. Die Ursache für die Rückstreuung des Volumens liegt in unregelmäßig verteilten Einschlüssen oder Diskontinuitäten des Mediums begründet. Volumenstreuung ist stets diffus und die Strahlung wird dabei teilweise entpolarisiert. Der Einfluss des Einfallswinkels ist wesentlich geringer als bei der Oberflächenstreuung. Insbesondere tritt Volumenstreuung bei Waldflächen auf, da nahezu alle Radarwellen mehr oder weniger stark in die inhomogene Volumenstruktur der Baumkronen eindringen.

Eindringtiefe und Dielektrizitätskonstante

Ausschlaggebend für die Eindringtiefe der Mikrowellen in die Erdoberfläche ist die komplexe relative Dielektrizitätskonstante $\epsilon_r = \epsilon_r' - i\epsilon_r''$. Sie ist eine materialspezifische Größe und hängt von der Wellenlänge ab. Grundsätzlich kann eine Reflexion elektromagnetischer Wellen nur stattfinden, wenn sich die Dielektrizitätskonstanten der angrenzenden Stoffe voneinander unterscheiden. Im Mikrowellenbereich

hat Luft einen Betragswert von 3, andere natürliche, trockene Stoffe Werte von 3 bis 8. Der Realteil ϵ'_r gibt Auskunft über die frequenzabhängige Eindringtiefe in verschiedene Oberflächenschichten. Je größer die Wellenlänge der Strahlung, desto tiefer dringt sie ein. Der Imaginärteil ϵ''_r verkörpert ein Maß für die frequenzabhängige elektrische Leitfähigkeit (KRAUS und SCHNEIDER, 1988). Er ist für viele trockene Stoffe im Mikrowellenbereich sehr klein. Nimmt jedoch die Feuchtigkeit und damit die Leitfähigkeit zu, steigt ϵ''_r und damit auch ϵ_r fast linear an. Die Dielektrizitätskonstante ist für Stoffe mit hohem Wassergehalt und Metalle sehr groß, z. B. hat Wasser einen Betragswert von über 80. Die Eindringtiefe nimmt mit zunehmender Leitfähigkeit ab, weil Mikrowellen durch Wirbelstromverluste gedämpft werden. Bei Böden kann die Eindringtiefe vom cm-Bereich für trockene Böden auf einige Millimeter für feuchte Böden absinken. Noch deutlicher ist dies bei Eis zu beobachten. Bei reinem Eis kann die Eindringtiefe einige Meter betragen, bei Wasser hingegen bestenfalls einige Zentimeter. ULABY et al. (1986) analysieren den Einfluss der Dielektrizitätskonstanten für verschiedene, natürliche Oberflächen wie unterschiedliche Bodenarten, Vegetation, Schnee und Seeeis. Der Reflexionsgrad nimmt mit zunehmendem ϵ_r (sowohl ϵ'_r als auch ϵ''_r) zu.

2.3.3 Radiometrische Kalibrierung

Bei der radiometrischen Kalibrierung werden die Instrumentenfehler und die Fehler während der Laufzeit des Signals korrigiert und das Signal auf den Radarrückstreukoeffizienten reduziert. Objekteigenschaften werden damit über verschiedene Aufnahmepositionen, Einfallswinkel, Polarisationen, Frequenzen und Zeiten hinweg vergleichbar. Für eine vollständige, radiometrische Kalibrierung unterscheidet man zwischen einer internen, einer relativen und einer absoluten Kalibrierung.

Die *interne Kalibrierung* versucht die instrumentellen Einflüsse gemäß der Radargleichung zu korrigieren (Abschnitt 2.3.1). Beispielsweise wird die unterschiedliche Abstrahlstärke der Antennenkeule (Antennenhelligkeitsdiagramm) in Abhängigkeit vom Rollwinkel der Plattform um die Längsrichtung berücksichtigt.

Die *relative Kalibrierung* beseitigt die Einflüsse des Einfallswinkels und der Topographie, die zu radiometrischen Verzerrungen führen. Sie wird oft erst vom Anwender durchgeführt und wird daher im folgenden Abschnitt näher erläutert.

Für die *absolute Kalibrierung* wird das Leistungsniveau auf die Leistung bekannter Ziele um einen konstanten Faktor, der Kalibrierungskonstanten K , verschoben. Damit wird die Rückstreuung verschiedener Sensoren vergleichbar. Bei flugzeuggetragenen Aufnahmen werden Ziele mit bekanntem Radarrückstreukoeffizienten wie Transponder oder Corner-Reflektoren eingesetzt. Bei Satelliten erfolgt die absolute Kalibrierung durch Aufnahmen über den Regenwald, von dem die Rückstreuung und das Specklerauschen bekannt sind (CURLANDER und MCDONOUGH, 1991).

Des Weiteren wird bei polarimetrischen Aufnahmen eine *polarimetrische Kalibrierung* durchgeführt, um die empfangenen Signale in allen Kanälen aufeinander abzustimmen. Eine polarimetrische Kalibrierung beinhaltet eine Phasen- und Amplitudenkalibrierung sowie eine *Crosstalk*-Kalibrierung für einen Abgleich zwischen den Kanälen (ULABY und ELACHI, 1990).

Nach der Kalibrierung entspricht die Intensität dem Wert des Rückstreukoeffizienten σ^0 für das Objekt.

Relative Kalibrierung: Korrektur reliefbedingter Einflüsse

Die Intensität der Rückstreuung hängt stark vom Einfallswinkel ab. Unter der Voraussetzung von Oberflächenstreuung ist im ebenen Gelände allein dadurch ein Intensitätsabfall zu verzeichnen, dass der Einfallswinkel von nahen zu fernen Zielen flacher wird (*Near-Far-Range-Intensitätsabfall*). Im unebenen Gelände variiert der Einfallswinkel zudem lokal. Daher ist dort der *lokale Einfallswinkel* zwischen der Flächennormalen der Oberfläche und der Einfallrichtung des Radarstrahls mit einzubeziehen (Abbildung 2.7). Der Near-Far-Range-Intensitätsabfall verhält sich für jede Objektklasse anders, so dass er streng genommen für jede Klasse separat korrigiert werden muss. Insbesondere für eine Klassifikation wäre dies wünschenswert. Da die Objektklassen aber im Allgemeinen nicht bekannt sind, wird meistens nur eine Korrektur der Intensitäten in Abhängigkeit von der Geländeneigung durchgeführt. Eine

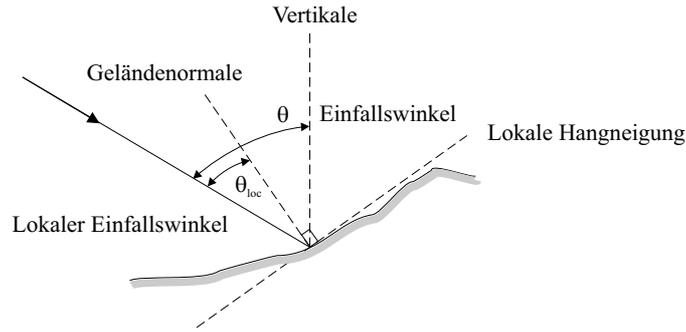


Abbildung 2.7. Einfallswinkel θ und lokaler Einfallswinkel θ_{loc}

allgemein gültige Korrekturfunktion zur Beseitigung des Einflusses der Geländeneigung kann aufgrund der Objektklassenabhängigkeit nicht angegeben werden.

Es existieren zahlreiche Korrekturmodelle die den Zusammenhang zwischen Einfallswinkel und Rückstreuintensität approximieren (BAYER, 1990): Kosinusmodelle, polynomische Modelle, Mittelwertmodelle und bivariable Modelle. Für E-SAR-Daten wird eine Sinusfunktion mit der Formel

$$\sigma^0 = 10 \log \left\{ (DN + 32768)^2 \cdot \sin \theta_{loc} \right\} + K \quad (2.17)$$

empfohlen, mit θ_{loc} als lokalem Einfallswinkel (*local Incidence Angle*) und DN (*digital Number*) aus den Daten. Sie korrigiert den allgemeinen Near-Far-Range-Intensitätsabfall und führt mit K die absolute Kalibrierung durch.

Gerade bei glatten Oberflächen wie Straßen ist die Variation der Rückstreuung bei steilen Einfallswinkeln zwischen 10° und 30° nicht unerheblich (ULABY und DOBSON, 1989) und kann daher bei Satellitenaufnahmen mit ihren steileren Einfallswinkeln relevant werden. Die einfallswinkelabhängige Rückstreuung wird in dieser Arbeit speziell untersucht und korrigiert.

2.4 Statistische Eigenschaften

Eine charakteristische Eigenschaft von SAR-Bildern ist ihre körnige Erscheinung. Diese Charakteristik der Bilder wird als *Speckle* bezeichnet. Speckle ist allen kohärenten Abbildungssystemen (z. B. Laser, Sonar) eigen (GOODMAN, 1975). In den folgenden Abschnitten werden der Speckle-Effekt sowie seine Auswirkungen auf die Statistik homogener Flächen beschrieben. Anschließend werden Möglichkeiten zur Speckle-Reduzierung vorgestellt.

2.4.1 Der Speckle-Effekt

Der SAR-Sensor sendet kohärente, elektromagnetische Wellen, die durch Amplitude A und Phase ϕ beschrieben werden können. Die ausgesendeten Wellen interagieren an der Oberfläche mit diskreten Streuelementen. Das Gesamtsignal einer Auflösungszelle setzt sich aus den rückgestreuten Wellen jedes einzelnen Streuelements zusammen. Das empfangene Signal u lässt sich als Summe der rückgestreuten Wellen aller Streuelemente einer Auflösungszelle beschreiben als

$$u = A e^{i\phi} = \sum_{k=1}^n A_k e^{i\phi_k}. \quad (2.18)$$

Da eine Auflösungszelle um ein Vielfaches größer ist als die Wellenlänge, tragen n einzelne Streuelemente zum rückgestreuten Signal bei. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 2.8 veranschaulicht. Die erzeugte Amplitude an den einzelnen Streuelementen wird durch die Länge der Vektoren und die Phase durch die Richtung der Vektoren dargestellt (Abbildung 2.8(a)). Selbst wenn alle Streuelemente identische Streueigenschaften aufweisen würden, hätten die einzelnen Wellen einen unterschiedlich

langen Weg innerhalb der Auflösungszelle, was zu einer unterschiedlichen Phase je Streuelement führt. Das rückgestreute Gesamtsignal ergibt sich aus phaseninkohärenten, zufälligen Überlagerungen der reflektierten Wellen (Abbildung 2.8(b)). Dies kann zu konstruktiver oder destruktiver Interferenz führen, die sich in der empfangenen Leistung niederschlägt. Diese „zufälligen“ Signalschwankungen werden als *Speckle-Effekt* bezeichnet und wachsen mit der Intensität des Signals.

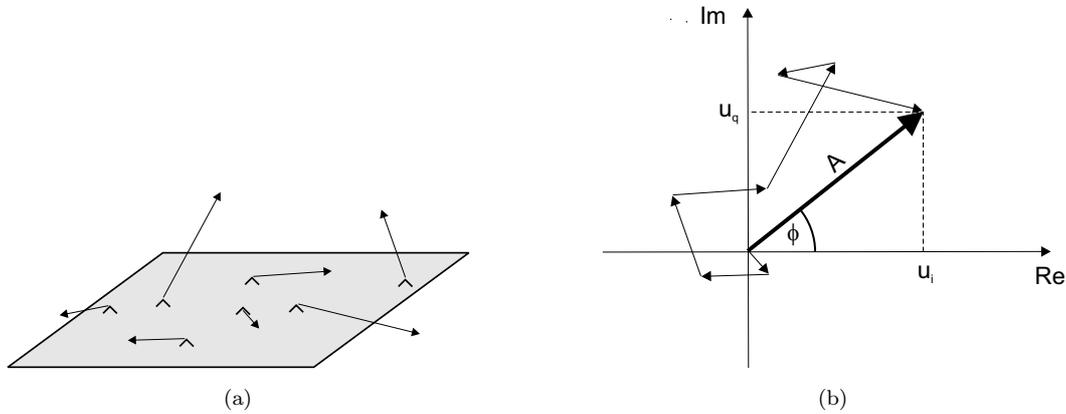


Abbildung 2.8. (a) Einzelne Streuelemente in einer Auflösungszelle und ihre rückgestreuten Wellen als Vektoren (Länge=Signalstärke, Richtung=Phase) (b) Signal als Summe der rückgestreuten Wellen einzelner Streuelemente

Der Speckle-Effekt ist theoretisch jedoch kein zufälliger Effekt sondern das Ergebnis eines deterministischen, elektromagnetischen Prozesses, der aufgrund der Aufsummierung der kohärenten Signale zustande kommt. Theoretisch ergeben sich unter gleichen Gegebenheiten die gleichen Interferenzen. Aufgrund des Einflusses der n Streuelemente liefert eine erneute Messung aber in der Praxis selten dasselbe Ergebnis. Der einzelne Messwert wird deshalb als Zufallsgröße betrachtet. Eine Zufallsgröße ist definiert als Messwert, der bei verschiedenen, unter gleichen Bedingungen ausgeführten Messungen verschiedene, zufällige Werte annehmen kann.

2.4.2 Statistische Eigenschaften homogener Flächen

Das empfangene Signal unterliegt als Zufallsgröße statistischen Schwankungen, die sich durch eine Verteilungsfunktion und deren Momente beschreiben lassen. Im Folgenden wird die Verteilung für das gängige *Rayleigh-Echo-Modell* (ULABY und DOBSON, 1989) hergeleitet.

Durch die Annahmen des Rayleigh-Echo-Modells, das von einer großen Anzahl von zufällig verteilten Streuelementen innerhalb einer Auflösungszelle ausgeht, kann für alle voneinander unabhängigen Teilsignale der zentrale Grenzwertsatz angenommen werden. Er besagt, dass die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen voneinander unabhängiger Teilsignale normalverteilt sind, wenn jedes Teilsignal als Summe einer großen Anzahl voneinander unabhängiger Summanden aufgefasst werden kann, von denen jeder zur Summe nur einen unbedeutenden Beitrag liefert. Dementsprechend folgen der Real- und Imaginärteil des Empfangssignals u ,

$$\begin{aligned} u_i &= \operatorname{Re}\{u\} = A \cos \phi & \text{und} \\ u_q &= \operatorname{Im}\{u\} = A \sin \phi, \end{aligned} \quad (2.19)$$

der Normalverteilung. Für sie ergeben sich mit Mittelwert gleich null und Varianz σ_u^2 die Wahrscheinlichkeitsdichten

$$f_{u_i}(u) = f_{u_q}(u) = \frac{1}{\sigma_u \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2\sigma_u^2}}. \quad (2.20)$$

Die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsdichte von Real- und Imaginärteil ist durch eine zirkulare Gauß-Verteilung gegeben

$$f_{u_i, u_q}(u_i, u_q) = f_{u_i}(u_i) \cdot f_{u_q}(u_q) = \frac{1}{2\pi\sigma_u^2} e^{-\frac{u_i^2 + u_q^2}{2\sigma_u^2}}. \quad (2.21)$$

Daraus lässt sich unter Verwendung der in Gleichung (2.19) angegebenen Transformationsvorschriften und mit Hilfe der Funktionaldeterminanten $\det[\partial(u_i, u_q)/\partial(A, \phi)]$ die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsdichte für die Amplitude und die Phase ableiten zu

$$f_{A,\phi}(A, \phi) = \det \left[\frac{\partial(u_i, u_q)}{\partial(A, \phi)} \right] f_{u_i u_q}(u_i, u_q) = \frac{A}{2\pi\sigma_u^2} e^{(-\frac{A^2}{2\sigma_u^2})}. \quad (2.22)$$

Durch Integrieren über beide Variablen können die Randdichtefunktionen für Amplitude und Phase ermittelt werden. Für die Phase ergibt sich eine Gleichverteilung mit einer Dichte der Verteilung von konstant $f_\phi = \frac{1}{2\pi}$ innerhalb des Definitionsbereichs von $[-\pi, \pi[$.

Für die Amplitude $A = |u|$ erhält man eine Rayleigh-Verteilung

$$f_A(A) = \frac{A}{\sigma_u^2} e^{(-\frac{A^2}{2\sigma_u^2})} \quad \text{für } A > 0. \quad (2.23)$$

Der bestimmende Parameter σ_u der Verteilung ist durch den Mittelwert des Signals μ_A festgelegt

$$\sigma_u = \frac{\mu_A}{\sqrt{\pi/2}}. \quad (2.24)$$

σ_u steht in einem linearen Verhältnis zur Standardabweichung

$$\sigma_A = \sqrt{2 - \pi/2} \sigma_u = \sqrt{4/\pi - 1} \mu_A. \quad (2.25)$$

Für die Intensität I

$$I = |u|^2 = (\text{Re}\{u\})^2 + (\text{Im}\{u\})^2 \quad (2.26)$$

ergibt sich eine negativ exponentialverteilte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, beschrieben durch

$$f_I(I) = \frac{1}{2\sigma_u^2} e^{(-\frac{I}{2\sigma_u^2})} \quad \text{mit} \quad (2.27)$$

$$\mu_I = 2\sigma_u^2 \quad \text{und} \quad \sigma_I = \mu_I = 2\sigma_u^2.$$

Die Varianz σ_I stellt einen Schätzwert für die zu Grunde liegende Intensität $\epsilon\{I\} = \mu_I = \sigma_I$ dar.

Die Log-Intensität D , die mit dem natürlichen Logarithmus gebildet wird $D = \ln I$, folgt einer Fischer-Tippett Verteilung (ARSENAULT und APRIL, 1976)

$$f_D(D) = \frac{e^D}{2\sigma_u^2} e^{(-\frac{e^D}{2\sigma_u^2})}. \quad (2.28)$$

Ihr Mittelwert beträgt $\mu_D = \ln(2\sigma^2) - \gamma_e$, worin γ_e die Eulersche Konstante ($=0.577$) ist. Die Varianz ist konstant $\sigma_D^2 = \frac{\pi^2}{6}$ und nicht abhängig von der Signalstärke.

Betrachtet man die Messung der Amplitude bzw. Intensität, so entspricht sie einer Stichprobe entnommen aus den obigen Verteilungen. Sie enthält also Objektinformationen, die entsprechend der jeweiligen Verteilung verrauscht sind. Der Messwert für die Intensität ist stärker verrauscht als der Messwert für die Amplitude, was sich auch in dem Variationskoeffizienten (*Coefficient of Variation*)

$$C_v = \frac{\sigma_I}{\mu_I} \quad (2.29)$$

von konstant 1.0 ausdrückt, verglichen mit 0.52 für die Amplitude.

Jeder Messwert beinhaltet auch eine Phasenmessung. Für eine einzelne SAR-Szene trägt jedoch die Phase keine Information über Flächenobjekte. Die Phase ist gleichverteilt und damit von dem Objekt unabhängig. Sie wird in der Polarimetrie und Interferometrie relevant, wo unter bestimmten Voraussetzungen durch differentielle Verarbeitung von Paaren von Phasenbildern der informationstragende Teil der Phase extrahiert werden kann (vgl. Abschnitt 2.5).

Weitere Modelle und Verteilungen für SAR-Daten

Die bisherigen Überlegungen zu den statistischen Eigenschaften basieren auf dem *Rayleigh-Echo-Modell* (Abschnitt 2.4.2). Oberflächen, die die Voraussetzungen für dieses Modell gut erfüllen, sind unbewachsenes Ackerland, landwirtschaftlich genutzte Flächen, dichte Waldkronen und schneebedeckte Gebiete. In Erweiterung zu diesem Modell kann die beobachtete Intensität eines Pixels auch als zusammengesetzte Größe aufgefasst werden. Bei den meisten Speckle-Filtern wird die Intensität als Produkt einer deterministischen Signalkomponente σ (Radarrückstreuquerschnitt) mit einer exponentialverteilten, zufälligen Störkomponente S_Z modelliert (LEE, 1981b, 1986)

$$I = \sigma \cdot S_Z. \quad (2.30)$$

Die Störkomponente repräsentiert den Einfluss des multiplikativen Speckle-Effekts, der die Verteilung bestimmt. Additive Störungen wie thermisches Rauschen, werden bei diesem Modell nicht berücksichtigt². Im Gegensatz zum multiplikativen Rauschen ist additives Rauschen generell nur bei kleineren Signalintensitäten relevant.

Alternativ zu den bisherigen Annahmen in Abschnitt 2.4.2 können aber auch andere Modelle und damit Verteilungen verwendet werden, beispielsweise die log-normal Verteilung, die Weibull Verteilung oder die K-Verteilung (OLIVER und QUEGAN, 1998). Bei letzterer wird ein gammaverteilter Radarrückstreuquerschnitt angenommen, moduliert mit einem gammaverteilten Rauschprozess. Die durch zwei Parameter beschriebene Gammaverteilung hat den Vorteil, dass mit ihr Verteilungen zwischen der Gauß'schen und der Rayleigh-Verteilung relativ gut beschrieben werden können. Wohlbekannte geometrische Strukturen haben dagegen ein deterministisches Rückstreuverhalten. Wenn das Signal von einer oder einigen wenigen, starken Streuelementen dominiert wird, wie es in städtischen Bereichen durch den Corner-Reflektor an Hauswänden oft der Fall ist, kann der Prozess durch die Rice-Verteilung beschrieben werden (ULABY und DOBSON, 1989). Welche Verteilung für ein Objekt letztlich zutrifft, ist über einen Test zu prüfen.

2.4.3 Speckle-Reduzierung

Für die Steigerung der radiometrischen Auflösung ist es nötig den Einfluss des Speckle-Effekts zu reduzieren. Die Speckle-Reduzierung erfolgt über eine Mittelbildung über mehrere unabhängige Samples. Hierfür gibt es zwei Methoden. Im Folgenden werden beide Vorgehensweisen eingehender beschrieben. Bei der ersten Methode erfolgt die Mittelung direkt während der Prozessierung (Multilook-Prozessierung). Bei der zweiten Methode wird nach der Bildgenerierung über Filter gemittelt (LEE, 1986).

Multilook-Prozessierung

Bei der Multilook-Prozessierung werden mehrere, unabhängige Bilder aus den Daten *einer* SAR-Aufnahme erstellt. Dazu wird bei der Prozessierung der empfangenen SAR-Daten die Bandbreite in Azimut- und/oder Entfernungsrichtung in mehrere Subbereiche aufgeteilt (Abbildung 2.9(a)). Für jedes Subband wird ein eigenes SAR-Bild, ein so genannter Look, berechnet. Die in Abbildung 2.9(a) dargestellte Aufteilung des Azimut-Spektrums entspricht im Ortsraum einer Aufteilung der Antennenkeule in mehrere Subbereiche (Abbildung 2.9(b)). In dem Beispiel sind drei Looks gebildet worden, die sich gegenseitig überlappen. Wegen der geringeren Bandbreite der Teilbilder reduziert sich jedoch gleichzeitig die geometrische Auflösung, die mit der Bandbreite zusammenhängt (vgl. Gleichung 2.8). Die Multilook-Daten entstehen durch Mittelung der Looks.

Die statistischen Eigenschaften der Bilddaten ändern sich durch die Multilook-Prozessierung. Bei Intensitätsbildern verringert sich die Standardabweichung für eine homogene Fläche mit der Wurzel der Anzahl voneinander unabhängiger Looks. In der Praxis überlagern sich die einzelnen Subbänder meistens (siehe Abbildung 2.9), so dass die Anzahl der effektiv voneinander unabhängigen Looks kleiner ist

²Rauschen beinhaltet additives und multiplikatives Rauschen. Additives Rauschen ist unabhängig von der Signalstärke und auch vorhanden, wenn kein Signal vorhanden ist. Multiplikatives Rauschen ist proportional zur mittleren Signalstärke.

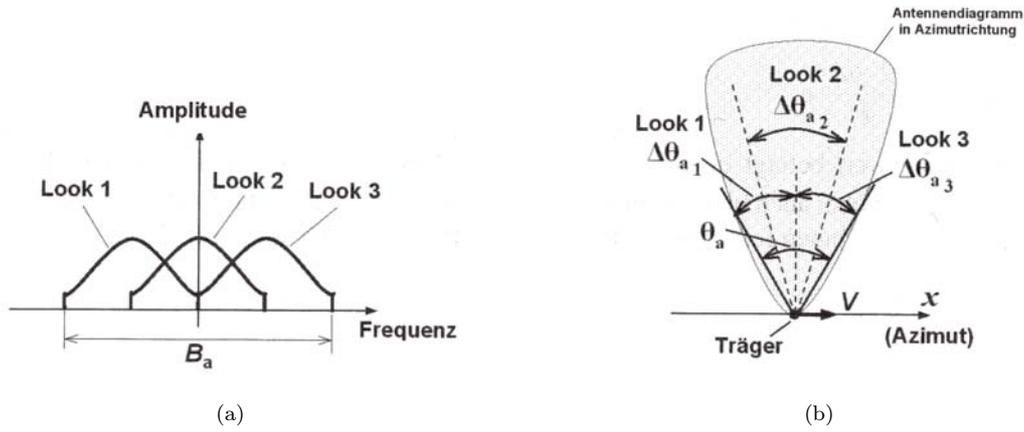


Abbildung 2.9. Multilook-Prozessierung mit drei überlappenden Looks (a) im Frequenzbereich und (b) im Ortsraum (nach KLAUSING und HOLPP, 2000)

als die Anzahl der Teilbilder (weiterführende Informationen zur Berechnung der Anzahl der *effektiven Looks*, siehe z. B. bei KLAUSING und HOLPP (2000)).

Die Dichtefunktion eines Multilook-Intensitätsbildes I_L aus L unkorrelierten Teilbildern

$$I_L = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L I_i \quad (2.31)$$

ist χ^2 -verteilt

$$f_{I_L}(I_L) = \frac{L^L}{(2\sigma_u^2)^L \Gamma(L)} I^{L-1} e^{-\frac{LI}{2\sigma_u^2}} \quad I \geq 0. \quad (2.32)$$

$\Gamma(\cdot)$ ist die Gammafunktion³. Der Mittelwert ist lookunabhängig $\bar{I} = 2\sigma_u^2$. Die χ^2 -Verteilung ist ein Spezialfall der Gammaverteilung. Sie hat zwei Parameter, den Freiheitsgrad $m = 2L$ und σ_u . Zur Ermittlung der Statistik von Multilook-Amplitudenbildern sind die zwei Arten der Amplitudenberechnung zu unterscheiden. Multilook-Amplitudenbilder können entweder durch Wurzelziehen der Multilook-Intensität I_L (*quadratisches Amplitudenbild*) oder durch Mittelwertbildung auf Basis der Amplitude (*arithmetische Amplitudenbilder*) berechnet werden. Für quadratische Amplitudenbilder

$$A_L = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L I_i} \quad (2.33)$$

ergibt sich eine χ -Verteilung⁴ (XIE et al., 2002) beschrieben durch

$$f_{A_L}(A) = \frac{2L^L}{(2\sigma_u^2)^L \Gamma(L)} A^{2L-1} e^{-\frac{LA^2}{2\sigma_u^2}} \quad A \geq 0. \quad (2.34)$$

Für arithmetische Amplitudenbilder

$$A_L = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L A_i \quad (2.35)$$

ist die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion nicht geschlossen darstellbar (HAGG, 1998).

³Die Eulersche Definition der Gammafunktion lautet $\Gamma(x) = \int_0^\infty e^{-t} t^{x-1} dt$ (BRONSTEIN und SEMENDJAJEW, 1991).

⁴Eine χ -Verteilung ergibt sich, wenn die Variable I einer χ^2 -Verteilung folgt und sich die Variable A durch $A = \sqrt{\frac{I}{m}}$ ausdrücken lässt. In diesem Fall entspricht $A = \sqrt{I}$.

Bei einem Look, $L = 1$, ergibt sich aus Gleichung 2.32 für die Intensität die Exponentialverteilung und aus Gleichung 2.34 die Rayleigh-Verteilung für Amplitudenbilder. Mit zunehmender Anzahl von Looks streben alle Verteilungen gegen die Gaußverteilung. ULABY et al. (1986) haben beobachtet, dass sich die Rückstreuwerte von Flächen, die die Kriterien des Rayleigh-Echo-Modells erfüllen, ab einer Anzahl von $L = 4$ Looks gut durch die Gaußverteilung repräsentieren lassen.

Speckle-Filter

Die Reduzierung des Speckleraussehens über Filter erfolgt im Vergleich zur Multilook-Prozessierung in zwei Schritten. Zunächst wird ein hoch aufgelöstes Bild unter Ausnutzung der vollen Bandbreite generiert. Dann werden die Bilder mit einem Tiefpassfilter geglättet, der mehrere benachbarte Pixel gewichtet miteinander mittelt. Im einfachen Fall wird ein einzelner Grauwert durch das lokale Mittel in Azimut- und/oder Entfernungsrichtung ersetzt. Die räumliche Auflösung reduziert sich hierbei in Abhängigkeit von der verwendeten Filtergröße.

Schmale Objekte, Kanten oder dominante Einzelsteuer verschmieren jedoch bei einfachen Filterverfahren. Spezielle Speckle-Filter wurden deshalb entwickelt, um Bilddetails weitgehend zu erhalten, aber dennoch den Speckle in homogenen Bereichen zu reduzieren. Diesen Filtern ist gemein, dass sie ihre Filterfunktion abhängig vom Bildinhalt adaptieren. Sie werden als adaptive Filter bezeichnet und sind nichtlinear. Die meisten Filter basieren auf dem Speckle-Modell von Gleichung 2.30 und testen mit dem lokalen Variationskoeffizienten eine Region auf Homogenität (HAGG, 1998).

Zu der Gruppe von Filtern, die entsprechend der statistischen Abschätzung der Homogenität den Glättungsgrad einstellen, gehören der Lee-Filter (LEE, 1980), Enhanced Lee-Filter (LOPES et al., 1990b), MAP-Filter (KUAN et al., 1987), Gamma-MAP-Filter (LOPES et al., 1990a) und Kuan-Filter (KUAN et al., 1985). Eine weitere Gruppe bezieht geometrische Relationen mit ein. Sie gewichten nichtstationäre Bildbereiche innerhalb des Filterkerns geringer oder lassen sie bei der Berechnung ganz außen vor. Zu diesen Filtern gehören der Frost-Filter (FROST et al., 1982), Enhanced Frost-Filter (LOPES et al., 1990b) und Refined Lee-Filter (LEE, 1981a). LOPES et al. (1990b) haben verschiedene Filter miteinander verglichen und kommen zu dem Schluss, dass die letzteren beiden Filter sich besonders gut zur Erhaltung von Kanten eignen. Darüber hinaus werden neuerdings auch Filter entwickelt, die versuchen Texturinformationen zu erhalten (WALESSA und DATCU, 2000).

2.5 SAR-Polarimetrie

Die SAR-Polarimetrie beschäftigt sich mit der Auswertung komplexer Radarsignale in verschiedenen Polarisierungen und den polarimetrischen Eigenschaften der rückgestreuten Wellen. Polarimetrische Auswertungen sind möglich, da die ausgesendeten, polarisierten Wellen durch Interaktion mit den Rückstreuelementen ihre Polarisation ändern. Aus diesen Veränderungen können unterschiedliche Rückstreumechanismen und physikalische Parameter wie Bodenfeuchte oder Vegetationsbiomasse innerhalb einer Auflösungszelle abgeleitet werden. Für die Ableitung dieser Parameter ist eine polarimetrische Zerlegung (polarimetrische Dekomposition) der Signale erforderlich.

Polarimetrische Dekomposition

Elektromagnetische Wellen sind transversale Wellen, die orthogonal zur Ausbreitungsrichtung zirkulieren. Als Polarisation wird der vektorielle Zustand in der Ebene orthogonal zur Ausbreitungsrichtung verstanden. Jedweder Polarisationszustand kann in dieser Ebene als zweidimensionaler Vektor beschrieben werden. Im Allgemeinen sind elektromagnetische Wellen elliptisch polarisiert, d. h. die Spur der Spitze ihres Vektors erzeugt in der Ebene orthogonal zur Ausbreitungsrichtung eine Ellipse. Bei vollpolarimetrischen SAR-Systeme werden meistens linear zirkulierende Polarisierungen verwendet. Durch das Senden und Empfangen von zwei orthogonal zueinander stehenden, linearen Polarisierungen kann das Polarisationsverhalten von Objekten voll erfasst werden. Das Streuverhalten der Objekte einer

Auflösungszelle kann mit der komplexen Streumatrix S wiedergegeben werden. Bei einer horizontalen und vertikalen Polarisationsbasis ergibt sich die Streumatrix

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix}. \quad (2.36)$$

Die Indizes stehen für horizontale (H) und vertikale (V) Polarisation. Der erste Index steht für die Polarisation der Sendeantenne, der zweite für die Empfangsantenne. Das Element S_{VH} steht demzufolge für das Signal eines vertikal polarisiert gesendeten und horizontal polarisiert empfangenen Signals. Die Extraktion der in der Streumatrix enthaltenen Informationen erfolgt in der Regel durch eine vektorielle Zerlegung der Matrix. Ziel der Zerlegung ist eine Neuordnung der Informationen, so dass den entstehenden Ziel-Komponenten eine physikalische Bedeutungen zugewiesen werden kann. Zur Dekomposition der Streumatrix (*Coherent Target Decomposition Theory*) wurden viele verschiedene Transformationen entwickelt (CLOUDE und POTTIER, 1996). Im Folgenden soll die Dekomposition nach Pauli näher beschrieben werden, da die Elemente des Pauli-Zielvektors physikalisch gut interpretierbare Größen darstellen.

Die Streumatrix wird generell im Rahmen der polarimetrischen Zerlegung mit Hilfe von Zusammenstellungen – Sets komplexer 2×2 Basismatrizen (ψ_X) – beschrieben. Das Basismatrizen set ψ_P von Pauli (*Pauli Spin Matrices*) setzt sich zusammen aus

$$\psi_P : \sqrt{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \sqrt{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \sqrt{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \sqrt{2} \begin{bmatrix} 0 & -j \\ j & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.37)$$

Die Komponenten des Pauli-Zielvektors k_P lassen sich aus der Spur der einzelnen Basismatrizen $k_P = \frac{1}{2} \text{spur}([S][\psi_P])$ ableiten. Der Pauli-Zielvektor k_P ergibt sich durch

$$k_P = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{HH} + S_{VV} \\ S_{HH} - S_{VV} \\ S_{HV} + S_{VH} \\ j(S_{VH} - S_{HV}) \end{bmatrix} \begin{array}{l} \text{ungeradzahlige Streueignisse} \\ \text{geradzahlige Streueignisse} \\ \text{Volumenstreueignisse} \\ 0 \end{array} \quad (2.38)$$

Die Elemente des Pauli-Zielvektors lassen Rückschlüsse auf die einzelnen Rückstreumechanismen zu. Die Pauli-Komponente k_1 steht für eine ungeradzahlige Anzahl von Streueignissen, z. B. für Einfachreflexionen (*single-bounce*) oder Dreifachreflexionen an dreiflächigen Corner-Reflektoren. Die zweite und dritte Komponente bezeichnen geradzahlige Streueignisse. Die zweite Komponente k_2 steht für geradzahlige Streueignisse, d. h. für Streueignisse, bei denen sich die Gleichpolarisation um 90° verschiebt und die Phasenlage umkehrt, z. B. von S_{HH} nach $-S_{VV}$. Diese Rückstreuung findet z. B. bei der Zweifach-Reflexion (*double-bounce*) an so genannten zweiflächigen Objekten statt. Der dritte Term der Pauli-Dekomposition enthält zusätzlich eine Rotation. Dieser Term steht damit für die Anteile der geradzahligen Rückstreuung, die durch Reflexion an zwei um 45° zur Blickrichtung des Radar gedrehten Ebenen entstehen. Im Wesentlichen kennzeichnet er den Prozess der Volumenstreuung, der zu einer ausgeprägten Bevorzugung der Kreuzpolarisation führt. Die vierte Komponente steht für alle nicht symmetrischen Rückstreuverhältnisse. Sie verschwindet nach dem Reziprozitätstheorem für monostatische, kalibrierte Radarsysteme. Als monostatische Radarsysteme werden Systeme bezeichnet, bei denen Sende- und Empfangseinheit auf einer gemeinsamen Plattform montiert sind. Für sie gilt $S_{HV} = S_{VH} = S_X$ (ULABY und ELACHI, 1990). Die Streumatrix ausgedrückt mit den Elementen des Pauli-Zielvektors lautet

$$[S] = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & k_3 + jk_4 \\ k_3 - jk_4 & k_1 - k_2 \end{bmatrix}. \quad (2.39)$$

Die Pauli-Zerlegung bildet auch die Grundlage für die bekannte Entropie/Anisotropie/Alpha (H/A/ α) Eigenwert-Dekomposition nach CLOUDE und POTTIER (1996, 1997). Bei dieser Dekomposition wird aus Gleichung 2.38 die Kohärenzmatrix mit $[T] = k_P \cdot k_P^*$ erzeugt. Mittels Eigenwertanalyse wird $[T]$ in die Einheitsvektoren \underline{e}_i und die reellen Eigenwerte $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ zerlegt. Über die Eigenwerte werden dann die Maße für die polarimetrische Klassifikation berechnet (CLOUDE und POTTIER, 1996, 1997).

Der von Entropie und α -Winkel aufgespannte Merkmalsraum lässt sich unabhängig von realen Werten in verschiedene Rückstreumechanismen aufteilen (Abbildung 2.10). Eine Klassifikation kann so ohne Kenntnis von Trainingsdaten stattfinden.

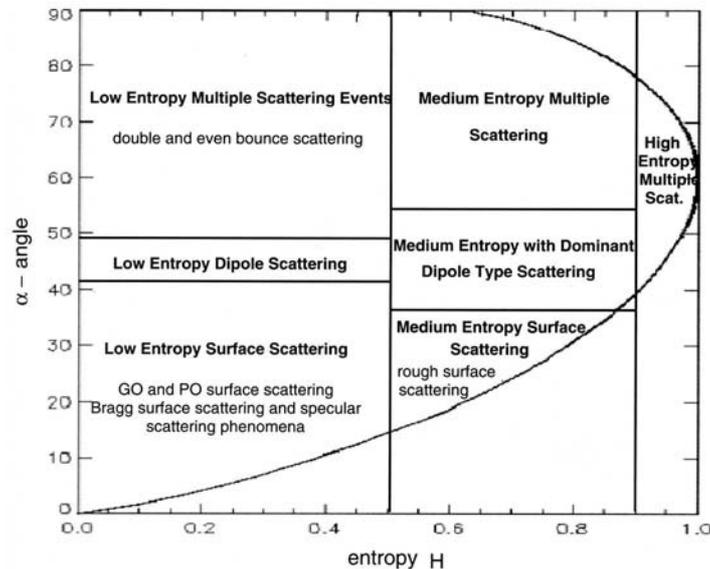


Abbildung 2.10. Entropie- α Merkmalsraum mit physikalischen Rückstreumechanismen (CLOUDE und POTTIER, 1995)

2.6 SAR-Systeme

Im Vergleich zu optischen Fernerkundungsverfahren ist die Radarfernerkundung eine relativ junge Technologie. Ursprünglich zur Erkennung und Entfernungsmessung von Flugzeugen eingesetzt, entwickelte Radar sich seit 1951 mit der Idee der synthetischen Apertur zu einem hoch auflösenden Abbildungsverfahren der Erdoberfläche. Seit den siebziger Jahren werden SAR-Messungen aus dem Weltraum durchgeführt. Der erste SAR-Satellit war der amerikanische SEASAT im Jahr 1978. Er zeichnete allerdings nur für ca. 100 Tage Daten auf. In den 80er Jahren wurden die Shuttle-Missionen SIR-A bzw. B und SIR-C/X-SAR im Jahr 1994 gestartet. Es folgten die Satelliten ERS-1 (Start 1991), JERS-1 (Start 1992), RADARSAT (Start 1995), ERS-2 (Start 1995) und der ERS-Nachfolger ENVISAT (Start 2002). Mit diesen Systemen stehen seit dem Beginn der 90er Jahre erstmals zivilen Nutzern kontinuierlich aufgenommene Radardaten satellitengetragener Systeme zur Verfügung. In den nächsten zwei Jahren wird mit dem Start von ALOS (PALSAR), COSMO-SkyMed, RADARSAT-2, SAR-Lupe und TerraSAR-X eine Reihe weiterer, hoch auflösender Satelliten hinzukommen. Diese anstehenden Satellitenmissionen werden Bodenaufösungen bis zu einem Meter erreichen sowie polarimetrische und interferometrische Auswertungen ermöglichen. Wie bei den Satelliten konnte auch bei den flugzeuggetragenen Systemen das Auflösungsvermögen in den letzten Jahren weiter verbessert werden, wie das Beispiel des SAR-Sensors PAMIR (BRENNER und ENDER, 2002) mit einer Auflösung im Dezimeterbereich zeigt. Zur Zeit wird des Weiteren an bistatischen Systemen geforscht, die einen variableren Einsatz der Interferometrie und Polarimetrie ermöglichen (KRIEGER et al., 2004).

In dieser Arbeit werden im Hinblick auf die künftigen Satellitenmissionen Daten von hoch auflösenden, flugzeuggetragenen Systemen verwendet (E-SAR, AeS-1 und AER-II). Diese Systeme werden im Folgenden detaillierter vorgestellt. Die wichtigsten Systemparameter sind im Anhang in Tabelle A.1 zusammengestellt.

Das E-SAR-System

Das experimentelle, flugzeuggetragene SAR-System (E-SAR) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) ist seit 1989 im Einsatz. Seit Mitte der neunziger Jahre stehen E-SAR-Daten auch

externen Anwendern zur Verfügung. Das System ist derzeit in der Lage, Gebiete im multifrequenten, multipolarimetrischen und interferometrischen SAR-Modus aufzuzeichnen. Als Radarkanäle stehen X-, C- und S-Band in den Kopolarisationen (HH, VV) sowie L- und P-Band im vollpolarimetrischen Modus (HH, VV, HV, VH) zur Verfügung. Die Breite des Aufnahmestreifens ist variabel und liegt im normalen Aufnahmemodus (*Stripmap*) in der Regel bei 3 km. Im X-Band wird in diesem Modus eine Bodenauflösung von ca. 2 m für Multilookbilder in Grundrissgeometrie erreicht. Die Aufnahme interferometrischer Daten ist prinzipiell im X-Band durch single-pass bzw. im L- und P-Band durch repeat-pass Interferometrie möglich. Die Basislinie für die single-pass Interferometrie beträgt 1,62 m in Across-track und 0,87 m in Along-track (HORN, 1996; SCHEIBER, 1998).

Das AeS-1-System

Das hoch auflösende, flugzeuggetragene AeS-1-System ist spezialisiert auf single-pass SAR-Interferometrie. Es ist seit 1996 im operationellen Einsatz. Konzipiert wurde es von der Firma Aerosensing Radarsysteme GmbH, jetzt Intermap Inc. Das System besteht aus einem im X- und P-Band arbeitenden Radar mit horizontaler Polarisation (HH). X-Band-Multilook-Daten werden in einer Auflösung von $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ in Grundrissgeometrie geliefert. Für single-pass Interferometrie stehen die Basislinien 0.6 m, 1.8 m und 2.4 m zur Verfügung (SCHWÄBISCH und MOREIRA, 2000).

Das AER-II-System

Das flugzeuggetragene, experimentelle X-Band System AER-II (*Airborne Experimental Radar*) wurde von der FGAN (Forschungsgesellschaft für Angewandte Naturwissenschaften e. V.) entwickelt und wird seit 1996 operationell an Bord einer Transall C-160 betrieben. Das System ist ausgestattet mit einer aktiven *phase-array* Antenne und kann dadurch in mehreren Modi betrieben werden. Die *phase-array* Antenne erlaubt das Aufsplitten der Antenne in bis zu 4 Subaperturen. Dadurch sind vollpolarimetrische Aufnahmen, eine zweifache Along-track Aufnahme in einem Überflug und polarimetrisch-interferometrische Aufnahmen möglich. Zudem erlaubt eine elektronisch steuerbare Antennenkeule das simultane Aufnehmen mehrerer Szenen oder Steifensegmente wie auch Spotlight- oder Multiaspekt-aufnahmen (ENDER, 1998). Es wird eine Auflösung von ca. 1 m in Grundrissgeometrie erreicht.

3. Bisherige Arbeiten zur automatischen Straßenextraktion

Die automatische Extraktion von Straßen aus Bildern fällt in das Gebiet der Bildanalyse. Seit ca. 30 Jahren beschäftigen sich Forscher mit der Detektion und Extraktion von Objekten aus digitalen Bilddaten der realen Welt. Frühere Arbeiten zur Straßenextraktion beziehen sich vor allem auf den Aspekt der Extraktion von Linien und deren Gruppierung zu einem Netzwerk (BAJCSY und TAVAKOLI, 1976). In letzter Zeit hat sich mehr und mehr eine Modellierung von Straßen durchgesetzt, die über geometrische und radiometrische Eigenschaften hinausgeht und Straßen als semantische Objekte beschreibt.

In diesem Kapitel werden zunächst Arbeiten zur Modellierung von Straßen und zur Extraktionsstrategie vorgestellt (Abschnitt 3.1). In Abschnitt 3.2 werden bisherige Arbeiten zur Straßenextraktion aus optischen und SAR-Bilddaten beschrieben und diskutiert. Abschnitt 3.3 stellt den TUM-LOREX-Ansatz zur Straßenextraktion ausführlicher dar, da dieser Ansatz die Grundlage dieser Arbeit bildet.

3.1 Modellierung und Strategie

Die Grundlage für eine erfolgreiche Extraktion von Straßen bildet eine explizite Modellierung. Das hier zugrunde gelegte Modell wird unterteilt in ein Straßenmodell, das die Eigenschaften von Straßen beschreibt (Abschnitt 3.1.1) und in ein Kontextmodell, das die Relationen von Straßen zu Nachbarobjekten beinhaltet (Abschnitt 3.1.2). Die Art und Weise wie dieses Modellwissen für die Extraktion genutzt wird, bestimmt die Extraktionsstrategie (Abschnitt 3.1.3).

3.1.1 Straßenmodell

Ein Straßenmodell kann nach FÖRSTNER (1993) in ein Objektmodell und ein Bildmodell untergliedert werden. Die Modellierung von Straßen erfolgt damit durch eine Beschreibung von Straßen in der realen Welt (Objektmodell) und durch eine Beschreibung der Abbildung der realen Welt im digitalen Bild (Bildmodell). Bei dem Objektmodell handelt es sich um eine idealisierte Beschreibung der Wirklichkeit aus welchem sich unter Annahme eines Sensormodells das Bildmodell ableiten lässt. Das Objektmodell und das Bildmodell werden im Hinblick auf die Aufgabenstellung und den verwendeten Maßstab aufgestellt. Das reale Objekt kann noch weitere Eigenschaften haben, die aber für die Erfüllung der Aufgabenstellung nicht relevant sind.

Objektmodell

Das Objektmodell beschreibt Straßen in der realen Welt. Die Objekte und Objektteile der realen Welt müssen in einer allgemein gültigen Form beschrieben und benannt werden, z. B. mit ihrem Objektnamen. Darüber hinaus sind ihre Form und Oberflächeneigenschaften festzuhalten, da sie das Erscheinungsbild des Objektes im Bild beeinflussen. Einige Autoren (BAUMGARTNER et al., 1999; TÖN-JES et al., 1999; CLÉMENT et al., 1993) unterteilen hierzu die Ebene der realen Welt zusätzlich in eine „Geometrie- und Materialebene“.

Die Eigenschaften von Straßen ergeben sich im Wesentlichen aus ihrer Funktion Orte miteinander zu verbinden und als Transportwege für die Erschließung des menschlichen Lebensraumes zu dienen. Dies hat zur Folge, dass Straßen ein topologisch komplett verknüpftes Netz bilden. Im Folgenden werden die Eigenschaften von Straßen im Hinblick auf offenes Gelände und eine Auflösung von ca. 2 m in vier Kategorien eingeteilt: geometrische, physikalische, topologische und kontextbezogene Eigenschaften (siehe Tabelle 3.1). Es gibt auch andere Einteilungen, die auf andere Auflösungen oder Gebiete abzielen. HINZ (2004a) konzentriert sich z. B. vor allem auf städtische Gebiete und höher aufgelöste Bilddaten und führt zusätzlich eine Kategorie Teilobjekte mit ein. VOSSELMAN und DE KNECHT (1995) unterscheiden noch die Kategorie funktionale Eigenschaften.

Die geometrischen Eigenschaften von Straßen ergeben sich aus ihrer Funktion als Fahrbahn für Fahrzeuge zu dienen. Straßen weisen gewisse Mindestbreiten, maximal zulässige Steigungen, Querneigungen

Geometrische Eigenschaften
1. Straßen sind lang gestreckte Objekte
2. Straßen besitzen über längere Abschnitte eine konstante Breite
3. Straßen besitzen stückweise parallele Ränder
4. Die Straßenbreite liegt in einem bestimmten Bereich (je nach Straßenklasse)
5. Straßen besitzen einen maximalen Krümmungsradius (je nach Straßenklasse)
6. Straßen sind relativ eben: geringe Querneigung, maximale Steigung (je nach Straßenklasse)
Physikalische Eigenschaften
7. Die Oberfläche von Straßen ist fest, relativ glatt und homogen
8. Straßen bestehen aus bestimmten Materialien wie Asphalt, Beton, etc.
9. Straßen sind ortsfeste Objekte
Topologische Eigenschaften
10. Straßen bilden ein hierarchisches, durchgängig zusammenhängendes Netz
11. Straßen enden ohne Anschluss oder Abschluss
Kontextbezogene Eigenschaften
12. Straßen verbinden Orte miteinander
13. Straßen besitzen Relationen zu Nachbarobjekten (lokaler Kontext)
14. Ihre Erscheinungsform ist abhängig von der großräumigen Umgebung (globaler Kontext)

Tabelle 3.1. Komponenten des Straßenmodells für die reale Welt

und Krümmungsradien auf. Dabei sind diese Merkmale größtenteils abhängig von der Straßenkategorie. Kleinere Straßen und Feldwege folgen mehr dem natürlichen Verlauf des Geländes und haben in Folge dessen kleinere Krümmungsradien und mehr Steigungen als übergeordnete Straßen. Übergeordnete Straßen wie Bundesstraßen oder Autobahnen besitzen dagegen mehr Tunnel und Brücken.

Die physikalischen Eigenschaften von Straßen ergeben sich ebenfalls aus der Funktion einen entsprechenden Untergrund für Fahrzeuge bereitzustellen. Ein fester, relativ glatter Untergrund ist notwendig, um Lasten stand zu halten und einen gewissen Fahrkomfort zu gewährleisten. Daraus ergibt sich meistens, dass es sich um homogene, relativ glatte Flächen handelt. Darüber hinaus sind Straßen ortsfeste Objekte, die in funktionstüchtigem Zustand keiner signifikanten Änderung unterliegen.

Aus der Funktion von Straßen, Orte miteinander zu verbinden, geht hervor, dass Straßen ein durchgängig zusammenhängendes Netzwerk bilden. Das Netzwerk untergliedert sich hierarchisch in verschiedene Straßenkategorien (ATKIS-OK, 2003). Aus diesen topologischen Eigenschaften folgt auch, dass Straßen sich an Knotenpunkten schneiden und in der Regel nicht abrupt enden.

Die Eigenschaft, dass Straßen Orte miteinander verbinden, kann sowohl zu den topologischen Eigenschaften als auch zu den kontextbezogenen Eigenschaften gezählt werden. Als Kontext bezeichnet man Relationen zwischen Straßen und anderen Objekten.

In (WIEDEMANN, 2002) wurden für die Straßenextraktion aus optischen Satellitenbilddaten insbesondere die Modellkomponenten 1, 2, 4, 5 und 7 (geometrische und physikalische Eigenschaften) sowie 10 (Netzwerkeigenschaften) verwendet.

In dieser Arbeit werden darauf aufbauend für SAR-Bilddaten zusätzlich die Modellkomponente 8 (mittlerer Grauwert) und die Komponenten 12, 13 und 14 (kontextbezogene Eigenschaften) in die Extraktion eingebracht. Diese Komponenten spielen für SAR-Bilddaten eine wichtige Rolle.

Bildmodell

Das Erscheinungsbild von Straßen in digitalen Bildern ist von dem verwendeten Sensor abhängig. Deshalb werden in dieser Arbeit Bildmodelle für optische und für SAR-Bilddaten unterschieden. Beide Bildmodelle variieren zusätzlich bezüglich der Auflösung. Dieses Verhalten kann durch eine weiter gehende Modellierung der Bildmodelle im Maßstabsraum berücksichtigt werden. Für die Beschreibung der Bildmodelle werden die Eigenschaften aus dem Objektmodell (Tabelle 3.1) ins Bild übertragen.

Bildmodell für optische Bilddaten: Das Bildmodell für optische Bilddaten bildet die Grundlage für viele Arbeiten zur Straßenextraktion.

Die *geometrischen Eigenschaften* des Objektmodells bleiben in optischen Bildern weitestgehend erhalten oder können durch die bekannte Geometrie der aufgenommenen Bilder ins Bildmodell übertragen werden. Geometrische Parameter für das Bildmodell, wie z. B. der maximale Krümmungsradius, die minimale und maximale Straßenbreite, können direkt aus dem Objektmodell abgeleitet werden.

Für die Übertragung der *physikalischen Eigenschaften* von Straßen ins Bild reicht das Wissen über die Materialien und Reflexionseigenschaften, allein nicht aus, um Rückschlüsse über die *radiometrischen Eigenschaften* zu ziehen. Neben dem Sensormodell, das die Aufnahmegeometrie und die Reflexionseigenschaften modelliert, müssen auch die Beleuchtung durch die Sonne und die Atmosphäre berücksichtigt werden. Darüber hinaus werden die radiometrischen Eigenschaften von der Umgebung bestimmt. Für die Erkennbarkeit von Straßen ist vor allem der Kontrast zwischen der Straße und ihrer Umgebung wichtig. Aus diesen Eigenschaften ergeben sich die radiometrischen Parameter für das Bildmodell von Straßen wie z. B. der minimale oder maximale Grauwert, der Gradient von Kanten oder die Standardabweichung der Grauwerte.

Die *topologischen Eigenschaften* aus dem Objektmodell bleiben auch im Bildmodell im Wesentlichen unverändert erhalten. Sie können insofern verändert erscheinen, da nur ein Teil des Straßennetzes abgebildet wird.

Auf den *Kontext* und seinen Einfluss auf die Bildeigenschaften wird in Abschnitt 3.1.2 näher eingegangen.

Bildmodell für SAR-Bilddaten: Bei SAR-Bilddaten in Schrägsichtgeometrie kommt es zu geometrischen Verzerrungen. Diese sind jedoch bekannt und können über Abbildungsvorschriften korrigiert werden, beispielsweise indem die Bilder in die Grundrissgeometrie überführt werden. Die *geometrischen Eigenschaften* des Objektmodells bleiben somit in dem Fall von korrigierten SAR-Bildern weitestgehend erhalten.

Die *radiometrischen Eigenschaften* im Bild lassen sich bei SAR-Bilddaten relativ zuverlässig aus den *physikalischen Eigenschaften* des Objektmodells ableiten. Denn die Radiometrie hängt im Wesentlichen von den physikalischen Parametern Oberflächenrauhigkeit, Dielektrizitätskonstante und verwendeter Wellenlänge ab (vgl. Abschnitt 2.3.2). Daher kann über die Art und Intensität der Rückstreuung auf die Radiometrie geschlossen werden. Für Straßen ergibt sich aufgrund ihrer relativ glatten Oberfläche im Verhältnis zur Wellenlänge eine spiegelnde Reflexion. Somit kommt der überwiegende Teil der Strahlung nicht zum Sensor zurück (vgl. Abbildung 2.6(a)). Straßen erscheinen daher im Allgemeinen als dunkle Linien. Dieses Verhalten trifft für alle in der Radarfernerkundung gängigen Wellenlängenbereiche zu. Für die radiometrischen Eigenschaften des Bildmodells bedeutet dies, dass neben den Parametern, die bereits für optische Bilddaten aufgestellt worden sind, ebenso die niedrige Rücksteuintensität zu den radiometrischen Parametern gezählt werden kann. Darüber hinaus hat der Speckle-Effekt einen erheblichen Einfluss auf die Radiometrie im Bild. So liegt die Standardabweichung der Grauwerte bei Intensitätsdaten in der Größenordnung des Signals (vgl. Abschnitt 2.4).

Bei SAR-Bilddaten bleiben die *topologischen Eigenschaften* aus dem Objektmodell ebenfalls unbeeinflusst.

Kontextbezogene Eigenschaften spielen bei SAR-Bilddaten eine wichtige Rolle. Denn erhöhte Nachbarobjekte führen wegen der sehr schrägen Aufnahmegeometrie nicht nur zu Sichtverdeckungen (Radarschatten), sondern auch zu Layover-Effekten. Dadurch werden bei erhabenen Objekten auch auf der Sensor zugewandten Seite geometrische und radiometrische Abbildungsfehler erzeugt (siehe hierzu auch Abschnitt 3.1.2).

Bildmodell im Maßstabsraum: Sowohl für optische als auch für SAR-Bilddaten variiert das Erscheinungsbild von Objekten zusätzlich mit der Bodenpixelgröße. In den verschiedenen Maßstäben treten einzelne Objektmerkmale unterschiedlich stark hervor. Straßen erscheinen beispielsweise in Bildern höherer Auflösung als lang gestreckte, homogene Flächen mit konstanter Breite. In Bildern niedrigerer Auflösung erscheinen sie als Linien. Die verschiedenen Auflösungsstufen eines Bildes stellen Realisie-

rungen im Maßstabsraum dar. Das Verhalten eines Objektes im Maßstabsraum wird als *Maßstabsraumereignis* bezeichnet. Der Maßstabsraum an sich ist kontinuierlich und kann über einen Maßstabsparameter σ skaliert werden. In der Signal- und Bildverarbeitung wird vor allem der lineare und der Gauß'sche Maßstabsraum verwendet. Niedrigere Auflösungsstufen können aus dem Originalbild durch eine Faltung mit dem Gauß'schen Faltungskern $g_\sigma(x, y)$ erzeugt werden

$$g_\sigma(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.1)$$

wobei x und y die Zeilen und Spalten des Bildes darstellen. Durch die Glättung im Maßstabsraum nimmt zum einen der Detailreichtum des Bildes ab, wobei Punkte und Linien zum Teil beseitigt werden. Zum anderen hat die Beseitigung von Detailstrukturen zur Folge, dass Objekte oft besser extrahiert werden können. Beispielsweise werden Detailstrukturen wie Fahrbahnmarkierungen oder Straßenteilobjekte eliminiert und erleichtern so die Extraktion. Grundsätzlich gilt, je kleiner der Maßstab desto grundlegender sind die Eigenschaften, die in den Vordergrund treten (MAYER, 1998b). Bei der Verwendung mehrerer Auflösungsstufen für die Objektextraktion müssen die jeweiligen Maßstabsraumereignisse berücksichtigt werden. Aber nicht jeder Maßstab ist gleich gut für die Extraktion eines Objektes geeignet. In neueren Arbeiten werden insbesondere die Modellierung und die Auswahl geeigneter Auflösungsstufen betont (MAYER, 1998b; MAYER und STEGER, 1998; BAUMGARTNER et al., 1999; COULOIGNER und RANCHIN, 2000; STRAUB und HEIPKE, 2001; PAKZAD und HELLER, 2004). In dieser Arbeit wird für Autobahnen das Maßstabsraumverhalten in verschiedenen Maßstäben modelliert.

3.1.2 Kontextmodell

Für die Bildanalyse einer natürlichen Szene ist die alleinige Modellierung des zu extrahierenden Objektes meist nicht ausreichend. Die Abbildung natürlicher Objekte hängt in hohem Maße auch von ihrer Umgebung ab. Beispielsweise wird die Sichtbarkeit und damit die Extraktion von Straßen stark durch angrenzende Bäume oder Gebäude beeinträchtigt. Derartiges Wissen, das über das eigentlich zu extrahierende Objekt hinausgeht, wird als *Kontextwissen* bezeichnet und kann in einem so genannten *Kontextmodell* formuliert werden.

Der Begriff Kontext wird in der Literatur für die Nutzung sehr unterschiedlichen Wissens verwendet: manchmal bezieht er sich lediglich auf Zusatzinformationen wie Aufnahmeparameter und Aufnahmebedingungen (BURLINA et al., 1995), manchmal auf die Pixelumgebung benachbarter Grauwerte eines Objektes (HELLWICH, 1997), manchmal auf die räumliche Beziehung einzelner Objektteile zu einem zusammengesetzten Gesamtobjekt (DE GUNST und VOSSELMAN, 1997) und manchmal auf eine möglichst vollständige Beschreibung der aufgenommenen Szene in der Umgebung des zu erkennenden Objektes (MCKEOWN et al., 1985; STRAT und FISCHLER, 1995). In jüngeren Arbeiten (MAYER, 1998a; BAUMGARTNER, 2003; HINZ und BAUMGARTNER, 2003) hat sich der Begriff Kontext eingebürgert als Bezeichnung für die Beziehungen zwischen einem gesuchten Objekt und seiner Umgebung mit den sich daraus ergebenden Abbildungen.

Kontext kann auf lokaler und globaler Ebene betrachtet werden. Im Lokalen bezieht er sich auf die direkte Relation zwischen einem Objekt und dessen umgebenden Einflüssen. Im Globalen betrachtet er die generelle Erscheinungsform des Objektes in Abhängigkeit des großräumigen Zusammenhangs seines Auftretens.

Lokaler Kontext : Kontextobjekte

Mit lokalem Kontext werden die unmittelbaren Beziehungen zwischen dem zu extrahierenden Objekt und seinen Nachbarobjekten bezeichnet. Diese Nachbarobjekte werden deshalb auch als Kontextobjekte bezeichnet. Die Nachbarschaftsbeziehungen beinhalten z. B. geometrische Eigenschaften wie Nähe und Parallelität. Die Kontextobjekte beeinflussen auch das Erscheinungsbild des gesuchten Objektes. Das Objekt „Straße“ steht in Relation zu Kontextobjekten wie Gebäuden, Bäumen oder Fahrzeugen.

In Bezug auf das Erscheinungsbild treten vor allem Verdeckungen zwischen der Straße und ihren Kontextobjekten auf. Beispiele hierzu sind in Abbildung 3.1 für SAR-Bilddaten dargestellt.

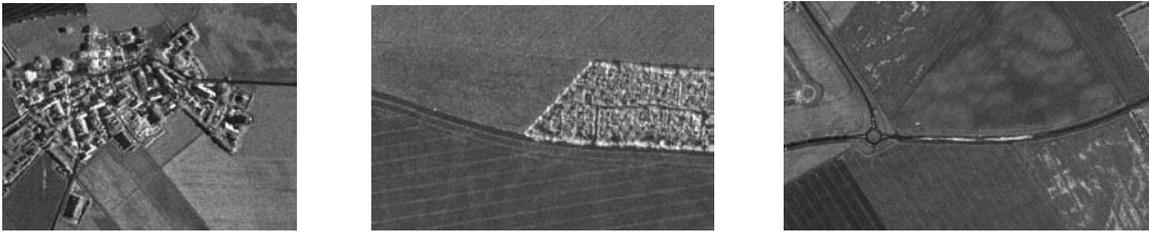


Abbildung 3.1. Beispiele für lokale Kontextrelationen: Verdeckung der Fahrbahn durch Gebäude, Vegetation und Fahrzeuge

Verdeckungen treten sowohl in optischen als auch in SAR-Bilddaten auf – wenn auch mit unterschiedlicher Ausprägung. In der Optik kommt es neben den sichttoten Räumen, die durch Schrägsichten an erhabenen Objekten entstehen, zusätzlich zu Sichtbeeinträchtigungen aufgrund von Schatten bedingt durch die Sonneneinstrahlung. Bei SAR-Bilddaten ergeben sich an erhabenen Objekte ebenfalls sichttote Räume, die im Schrägsichtbild nicht abgebildet werden. Bei entzerrten SAR-Bilddaten äußern sich diese Bereiche als Radarschatten. Zusätzlich kommt es beim SAR zu Layover auf der dem Sensor zugewandten Objektseiten und im Falle von bewegten Fahrzeugen zu Versetzungen und Verschmierungen. Für die Relationen der Objekte „Gebäude“, „Vegetation“ und „Fahrzeug“ zu Straßen ist in Abbildung 3.2 für SAR-Bilddaten ein Modell aufgestellt.

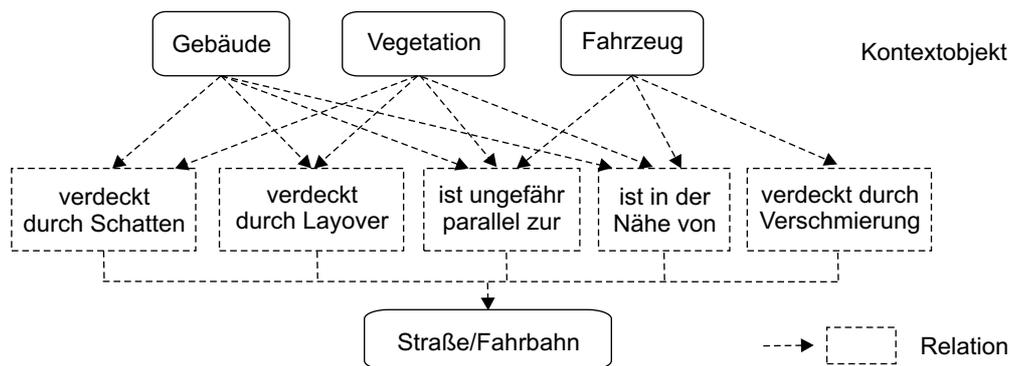


Abbildung 3.2. Modell für lokale Kontextrelationen in SAR-Bilddaten

Mit dieser Modellierung des lokalen Kontextes kann die Extraktion unterstützt werden. Durch die Extraktion von Fahrzeugen beispielsweise, lässt sich eine Verdeckung der Fahrbahn erklären (HINZ, 2004b). Damit können Kontextobjekte auch eine positive Evidenz für Straßen liefern, denn Fahrzeuge bewegen sich meistens auf Straßen. Diese Tatsache wird in KOCH (2005) dazu verwendet, direkt über die Spur von Fahrzeugen aus Bildsequenzen auf Straßen zu schließen. Die Relationen von Straßen zu ihren benachbarten Objekten können aber ebenso andersherum verwendet werden, wenn es z. B. darum geht Fahrzeuge zu detektieren, bilden Straßen die Hintergrundobjekte (STILLA und MICHAELSEN, 2002). Die Abbildung der Kontextobjekte ist aber stark sensorabhängig. Im Fall von SAR-Bilddaten werden nur Fahrzeuge auf der Straße abgebildet, die genau in Azimutrichtung fahren. In diesem Fall sind sie stark verschmiert. Fahren sie nicht in Azimutrichtung, werden sie neben der Fahrbahn abgebildet.

Globaler Kontext : Kontextgebiete

In den verschiedenen, großräumigen Zusammenhängen treten unterschiedliche Objektbeziehungen zwischen der Straße und ihren Kontextobjekten auf. MAYER (1998a) und BAUMGARTNER (2003) unterscheiden für Straßen die Kontextgebiete *Siedlung*, *offene Landschaft* und *Wald*. Durch die Angabe eines

bestimmten, globalen Kontextes ist das Erscheinungsbild einer Straße bereits zum Teil im Lokalen beschrieben.

Beispiele für diese drei Kontextgebiete sind in Abbildung 3.3 dargestellt. Im Kontextgebiet *Siedlung* sind Straßen umgeben von Objekten wie Gebäuden oder Autos. Die Gebäude stehen dicht und parallel zur Straße. Im globalen Kontext *Wald* ist mit einer starken Verdeckung der Straße durch Bäume und deren Layover und Radarschatten zu rechnen. In der *offenen Landschaft* sind Verdeckungen seltener. Aus der Unterschiedlichkeit der Kontextgebiete folgt, dass die Art und Anzahl der Kontextobjekte jeweils variiert und dass das Modell „Straße“ für die globalen Kontexte in Teilmodelle untergliedert werden muss. Weiterhin ist nicht jedes Verfahren zur Extraktion zwangsweise für alle globalen Kontexte gleich gut geeignet. Das Grauwertprofil quer zur Straßenrichtung, wie es in der offenen Landschaft angenommen wird, trifft beispielsweise nicht für Siedlungsgebiete zu (BORDES et al., 1997).

BORDES et al. (1995, 1997) und STRAT und FISCHLER (1995) sehen zwei Arten wie Kontextgebiete für die Extraktion genutzt werden können. Zum einen kann das Setzen der Parameter für die Straßenextraktionsalgorithmen automatisiert werden, indem für die jeweiligen Kontextgebiete bereits optimierte Parametersätze vorgehalten werden, die dem Anwender ein mit unter aufwändiges Parametertuning abnehmen.

Zum anderen können Kontextgebiete zur automatischen Auswahl von geeigneten Straßendetektoren genutzt werden. Eine Auswahl von Detektoren ist deshalb sinnvoll, da in den verschiedenen Kontextgebieten jeweils unterschiedliche Algorithmen am besten geeignet sind.

3.1.3 Extraktionsstrategie

Die Extraktionsstrategie steuert die Bildinterpretation, indem sie die Art und Reihenfolge der Bildverarbeitungsoperationen festlegt (MAYER, 1998a). Die Strategie besteht also grundsätzlich aus zwei Komponenten, zum einen aus der Wahl geeigneter Methoden und zum anderen aus der Festlegung der Reihenfolge der Methoden für den Erkennungsprozess. Die Wahl der Methoden ist meist stark anwendungsabhängig und wird deshalb in Abschnitt 3.2 für die Straßenextraktion genauer beschrieben. Durch eine genaue Planung der Reihenfolge wird festgelegt, wann welches Modellwissen über die Objekte zur Extraktion genutzt wird. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen der datengetriebenen, der modellgetriebenen und der hybriden oder gemischten Steuerung (siehe z. B. BAUMGARTNER, 2003; HINZ, 2004a).

Bei Luftbildern von städtischen Gebieten wird meistens eine hybride Extraktionsstrategie verfolgt. Der Ablauf der Extraktionsstrategie kann nach CLÉMENT et al. (1993) in drei Teilschritte unterteilt werden. In einem ersten Schritte erfolgt eine datengetriebene Merkmalsextraktion, bei der zunächst leicht extrahierbare Objektteile und kleinere Objekte wie Linien oder Punkte aus den Bilddaten extrahiert werden. Die Merkmalsextraktion liefert Hypothesen für bestimmte Objekte. Im zweiten Schritt werden die aufgestellten Hypothesen modellgetrieben validiert und weitere Hypothesen generiert und zwar auf der Grundlage der Attribute, die aus dem Objektmodell für das Bild abgeleitet worden sind. Die Hypothesen werden im Laufe der Objektvalidierung angenommen oder abgelehnt. Aber nicht nur die aufgestellten Hypothesen sind unsicher, auch eine generalisierte und damit unscharfe Beschreibung des Objektmodells hat ihre Unsicherheiten. Diese Unsicherheiten müssen mit Hilfe von Konfidenzmaßen mitmodelliert werden. Der letzte Schritt ist die Konfliktauflösung, bei der unter Verwendung von (Zusatz-)Wissen versucht wird, Mehrdeutigkeiten und Konflikte in der Detektion aufzulösen.

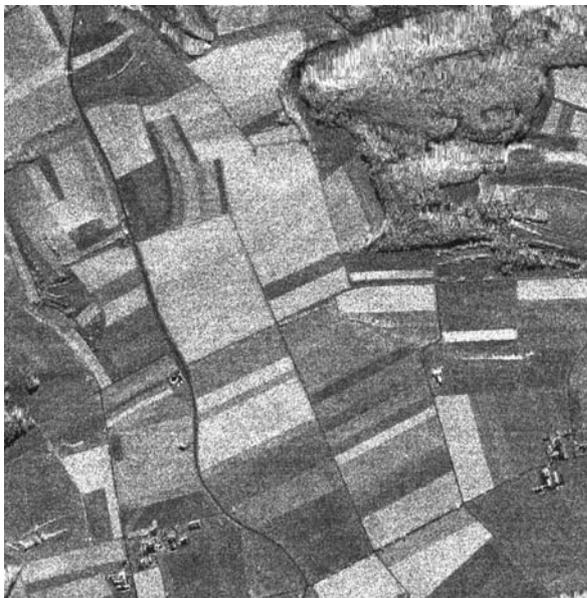
3.2 Verfahren zur automatischen Straßenextraktion

In diesem Abschnitt soll ein kurzer Überblick über Verfahren zur automatischen Extraktion von Straßen gegeben werden. Die meisten Ansätze zur automatischen Straßenextraktion lassen sich im Wesentlichen in zwei Phasen unterteilen (HINZ, 2004a):

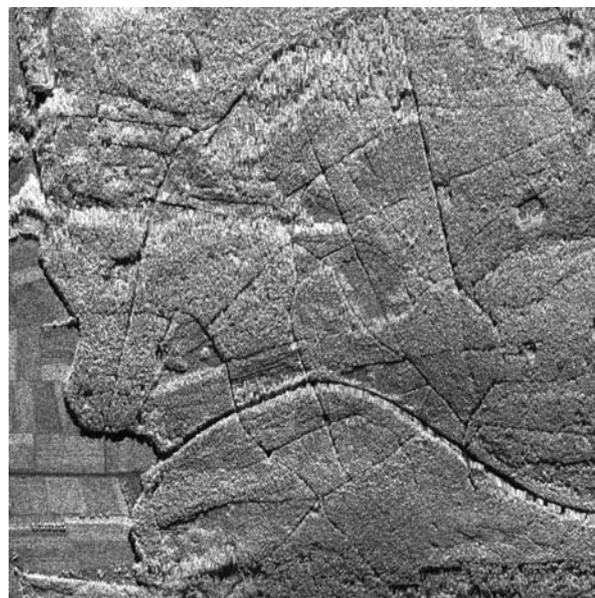
- Phase 1: lokale Modellierung, in der Straßenstücke detektiert werden



(a) Siedlung



(b) Offene Landschaft



(c) Wald

Abbildung 3.3. Beispiele für Kontextgebiete

- Phase 2: globale Modellierung, in der die Verfolgung und Vervollständigung der extrahierten Stücke zu einem Straßennetz vorgenommen wird

In Phase 1 werden Methoden aus dem Bereich der digitalen Bildverarbeitung zur Extraktion von Linien oder Kanten eingesetzt. Sie versuchen die Objekte aufgrund ihrer radiometrischen, geometrischen und statistischen Eigenschaften zu erfassen. Dabei kommen Methoden wie Segmentierung, Merkmalsextraktion, Polygonapproximation sowie Algorithmen zur Datenfusion und Gruppierung von Teilstrukturen zum Einsatz.

In Phase 2 werden weniger bildbezogene Methoden angewendet, sondern eher Suchalgorithmen (FISCHLER et al., 1981; VOSSELMAN, 1992; GEMAN und GEMAN, 1984), Markoff-Zufallsfelder (TUPIN et al., 1998; STOICA et al., 2004), neuronale Netze (BHATTACHARYA und PARUI, 1997) oder Dynamic Programming (GRUEN und LI, 1997) sowie Ansätze mit verschiedenen Maßstäben (BAUMGARTNER et al., 1999) oder Bewertungsmethoden (ZADEH, 1989; SHAFER und PEARL, 1990).

Da die Straßenextraktion aus optischen Bildern grundlegende Methoden für die Extraktion aus SAR-Bilddaten größtenteils beinhaltet, werden in Abschnitt 3.2.1 zunächst verschiedene Verfahren zur Straßenextraktion aus optischen Bildern vorgestellt. In Abschnitt 3.2.2 folgt die Darstellung der Arbeiten auf SAR-Bilddaten. Anschließend werden die Ansätze diskutiert und Folgerungen für diese Arbeit gezogen.

3.2.1 Verfahren für optische Bilddaten

Die folgende Auswahl verschiedener Verfahren zur Straßenextraktion aus optischen Bilddaten soll einen Überblick über die Vorgehensweisen geben. Entsprechend ihrer Auflösung kommen unterschiedliche Verfahren und Modelle zum Einsatz. Daher werden sie in Verfahren für niedrig aufgelöste und Verfahren für mittel bis höher aufgelöste Bilddaten eingeteilt. Für einen weiter gehenden Literaturüberblick zur Straßenextraktion aus optischen Bildern sei auf MAYER (1998a), WIEDEMANN (2002), BAUMGARTNER (2003) und MENA (2003) verwiesen.

Verfahren für niedrig aufgelöste Bilddaten

Straßen erscheinen in Bilddaten mit niedriger Auflösung als Linien. Die meisten der hier beschriebenen Ansätze beschränken sich auf die Extraktion von Straßen in der offenen Landschaft.

Eines der ersten Systeme zur vollautomatischen Extraktion von Straßen aus Luftbildern niedriger Auflösung wurde am SRI International, Menlo Park, in Kalifornien entwickelt (FISCHLER et al., 1981; FISCHLER und WOLF, 1983).

Zur Extraktion von Linien werden zwei verschiedene Typen von Operatoren eingesetzt und anschließend miteinander kombiniert (Phase 1). Operatoren vom Typ I, wie z. B. der „Duda-Straßenoperator“ (FISCHLER et al., 1981) zeichnen sich durch eine hohe Zuverlässigkeit in den Ergebnissen aus, dadurch dass sie nur korrekte Extraktionsergebnisse liefern und keine Fehlextraktionen. Die hohe Korrektheit der Typ I Operatoren geht zu Lasten der Vollständigkeit. Diese Aufgabe übernehmen die Typ II Operatoren, die recht vollständige Extraktionsergebnisse liefern, aber zusätzlich zu den Straßen auch Fehlextraktionen hervorbringen. Für die Kombination der Operatortypen werden die Ergebnisse der Typ II Operatoren jeweils in einer Kosten-Matrix abgelegt. Die Kosten werden aufgrund von Wissen über Kontrast und Geradlinigkeit berechnet und können skaliert werden, um miteinander vergleichbar zu sein. Ausgehend von den weitgehend korrekten Ergebnissen der Typ I Operatoren wird in jeder Typ II Kostenmatrix die beste Verbindung zwischen zwei Typ I Linienclustern berechnet. Die Suche nach dem optimalen Pfad erfolgt mit dem F* Algorithmus. Für das endgültige Ergebnis werden diejenigen Pfade ausgewählt, für die die normierten Kosten am geringsten sind.

Die große Stärke dieses Ansatzes ist die Fusionsstrategie, bei der unterschiedliche Operatoren zur Linienextraktion miteinander kombiniert werden und Wissen über die Wirkungsweise der Operatoren mit eingeht. Die Defizite dieses Ansatzes liegen in den teilweise unzureichenden low-level Operatoren und in der Vernachlässigung der geometrischen Eigenschaften von Straßen.

Der obige Ansatz wurde in mehreren Etappen erweitert (FISCHLER, 1994; HELLER et al., 1998; FISCHLER und HELLER, 1998). FISCHLER (1994) entwickelte einen generischen Linker für lineare Strukturen in verrauschten Bildern, der die Bestimmung des Pfades über einen *Minimum Spanning Tree* (MST) durchführt. Weitere Arbeiten (HELLER et al., 1998; FISCHLER und HELLER, 1998) beschäftigen sich mit der Operationalisierung des Systems und haben es zu einem interaktiven, drei Komponenten-System ausgebaut. Die erste Komponente führt die beschriebene Extraktion von Straßen in niedriger Auflösung durch. Die Ergebnisse werden an eine zweite, hoch auflösende Komponente weitergegeben. Diese verfeinert die Position der Straßenmittelachsen mittels eines Mehrbildansatzes zu einer 3D-Position. Weitere Attribute wie die Oberflächennormale, das Oberflächenmaterial und die Straßenbreite werden berechnet. Die dritte Systemkomponente bildet eine interaktive Nachbearbeitungseinheit. Die Erfassungszeit lässt sich mit diesem System um den Faktor 10 gegenüber einer rein manuellen Erfassung reduzieren.

MERLET und ZERUBIA (1994, 1996) von der Universität Hebron in Jerusalem und dem INRIA (Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique) in Sophia Antipolis, Frankreich erweitern den von FISCHLER et al. (1981) verwendeten F* Algorithmus um Nachbarschaften von mehr als zwei Pixeln. Dies ermöglicht ihnen den Kontrast, den Grauwert und die Kurveninformation aus den Nachbarschaften in die Berechnung der Kosten mit einzubeziehen. Die präsentierten Ergebnisse

für die Extraktion von Straßen und geologischen Strukturen aus SPOT Bildern zeigen eine hohe Zuverlässigkeit. Die Kostenberechnungen beziehen sich jedoch nur recht lokal auf Nachbarschaftspixel. Objektbezogene Merkmale für ganze Linien werden nicht berechnet.

Auf Markoff-Zufallsfeldern basierend modellieren STOICA et al. (2000, 2004) und LACOSTE et al. (2002) von dem INRIA, Sophia Antipolis in Frankreich die Straßenextraktion. Sie fassen Straßennetze als eine Realisierung eines Markoff-Zufallsprozesses auf, in denen die Variablen die Straßensegmente sind, die miteinander interagieren. Die Grundidee ihrer Extraktionsstrategie basiert auf einem interagierenden *Gibbs point process*, bei dem zu den extrahierten Segmenten zusätzliche Segmente zufällig ins Bild „geworfen“ werden, die solange zufällig verschoben werden, bis sie ins Straßennetzwerk passen. Die Verschiebungen werden über eine *Reversible Jump Monte Carlo Markov Chain* (RJMC) Dynamik simuliert.

Bei der Modellierung von Markoff-Zufallsfeldern ist eine stochastische Modellierung möglich, in der auch geometrische Zwänge eingebracht werden können. Das Wahrscheinlichkeitsdichtemodell hat zwei Komponenten. Zum einen geht die Interaktionsenergie zwischen den einzelnen Segmenten mit ein. Hier wird das Vorwissen über die geometrischen Eigenschaften eines Straßennetzwerkes wie Kollinearität, Abstand, Länge und Orientierung von Segmenten modelliert. Zum anderen wird die Datenenergie herangezogen, die bei der Linien- bzw. Kantendetektion für jedes Segment aus den Grauwerten ermittelt wird. Die Zugehörigkeit der Segmente zum Netzwerk wird dann mit einem Hypothesentest überprüft. In STOICA et al. (2004) werden sowohl Ergebnisse für optische Luft- und Satellitenbilder als auch für Radarbilder (ERS) vorgestellt. Die Hauptstrukturen werden jeweils gut detektiert. Aufgrund der Template-basierten Linien- und Kantenextraktion ist es jedoch nicht möglich, verschiedene Linienbreiten oder eine richtungsunabhängige Erfassung der Linien zu realisieren.

Der Straßenextraktionsansatz der Technischen Universität München (TUM) für optische Satellitenbilddaten mit einer Bodenpixelgröße von ca. zwei Metern (WIEDEMANN und HINZ, 1999; WIEDEMANN und EBNER, 2000; WIEDEMANN, 2002) beruht auf einem expliziten Straßenmodell. Die Eigenschaften von Straßen gehen auf drei Ebenen ein: lokale (radiometrische), regionale (geometrische) und globale (funktionale und topologische) Eigenschaften des Straßennetzes werden berücksichtigt.

In Phase 1 werden Linien aus den Bilddaten mit einem differential-geometrischen Ansatz (STEGER, 1998a) unter Berücksichtigung der lokalen, radiometrischen Eigenschaften extrahiert und zu potentiellen Straßenstücken weiterverarbeitet. Die potentiellen Straßenstücke werden entsprechend ihrer Übereinstimmung mit einem regionalen, radiometrisch-geometrischen Straßenmodell bewertet. Es besteht die Möglichkeit mehrere spektrale Kanäle für die Extraktion zu verwenden. Die bewerteten Ergebnisse aus den einzelnen Kanälen werden anschließend in einem Fusionschritt zusammengeführt. In Phase 2 wird der beste Pfad zwischen zwei entfernten Orten gesucht. Dazu wird aus den potentiellen Straßenstücken ein gewichteter Graph erzeugt. Kleinere Lücken zwischen den Straßenstücken werden durch eingefügte Verknüpfungshypothesen überbrückt, die ebenfalls anhand lokaler, geometrischer Kriterien bewertet und gewichtet werden (STEGER et al., 1997). Die Vereinigung der Pfade der geringsten Kosten zwischen zuverlässigen Startstücken ergibt das Straßennetz.

In der Arbeit (WIEDEMANN und EBNER, 2000) werden die Netzwerkeigenschaften von Straßen noch weiter gehend integriert, indem eine zusätzliche Vervollständigung des Straßennetzwerkes durchgeführt wird. In das Netz werden aufgrund von berechneten „Umweg-“ bzw. „Verbindungsfaktoren“ neue Verknüpfungshypothesen eingefügt, die im Bild verifiziert werden. Dadurch kann insbesondere eine bessere topologische Verknüpfung des Netzwerkes erreicht werden. BACHER und MAYER (2003, 2004) haben das Verfahren für Multispektraldaten erweitert. Sie schließen nach der Extraktion mit den Verfahren der TUM verbleibende Lücken mit Hilfe von Snakes. Diese werden nicht direkt auf die Bilddaten aufgesetzt, sondern auf dem Ergebnis einer multispektralen Fuzzy-Klassifikation aus IKONOS Satellitenbilddaten. Darüber hinaus führen sie in niedriger aufgelösten IRS-Daten Kanten als Kandidaten für die Netzwerkgenerierung mit ein. GERKE et al. (2004) und BUSCH et al. (2005) verwenden das Verfahren von WIEDEMANN (2002) als Grundlage für ein semi-automatisches Verfahren zur Aktualisierung und Qualitätsüberprüfung von Straßendaten.

Verfahren für mittel bis hoch aufgelöste Bilddaten

In Bildern mit einer Bodenauflösung besser als einem Meter erscheinen Straßen als flächenhafte Objekte. Die entwickelten Verfahren beziehen sich daher nicht nur auf die Detektion von Linien, sondern auch auf Kanten. Viele Verfahren beginnen mit der Detektion von Straßenrändern. Der Bereich zwischen parallelen Kantenpaaren wird dann auf die gesuchte Straßenbreite, Langgestrecktheit und Homogenität hin untersucht. Zusätzlich werden in höher aufgelösten Bilddaten aber auch verstärkt weitere Informationen wie digitale Oberflächenmodelle (DOM) oder Kontext mit in die Extraktion von Straßen und in die anschließende Verifikation integriert.

Die an der Carnegie Mellon University Pittsburgh (CMU) entwickelten Verfahren basieren auf zwei kooperativen Straßenverfolgern für mittel bis hoch aufgelöste Bilder (MCKEOWN und DENLINGER, 1988; AVIAD und CARNINE, 1988; ZLOTNICK und CARNINE, 1993; HARVEY, 1999; HARVEY et al., 2004).

Der ursprünglich semi-automatische Ansatz von MCKEOWN und DENLINGER (1988) wurde von AVIAD und CARNINE (1988) und ZLOTNICK und CARNINE (1993) durch die Einführung einer automatischen Startpunktsuche zu einem automatischen Verfahren erweitert. AVIAD und CARNINE (1988) und ZLOTNICK und CARNINE (1993) gruppieren zunächst anti-parallele Kanten, aus denen plausible Straßenmittellachsenpunkte mit Breiteninformation generiert werden. Durch Verknüpfen dieser Mittelpunkte unter Glattheitsbedingungen werden die Startsegmente zur Initialisierung erzeugt. Die Straßenverfolgung verwendet zwei kooperative Straßenverfolger (MCKEOWN und DENLINGER, 1988). Der erste Verfolger, der so genannte Kantentracker, verfolgt parallele Kanten beginnend an den detektierten Startsegmenten, solange bis die Kantenstärke als zu gering bewertet wird. Parallel zum Kantentracker wird der zweite Verfolger, ein Profiltracker, gestartet. Der Profiltracker arbeitet mittels Korrelation eines Referenzprofils zum Grauwertprofil senkrecht zum prädierten Weg. Durch die komplementären Modelle ergänzen sich beide Verfolger. Für den Fall, dass ein Verfolger eine Straße nicht detektieren kann, wird die Extraktion mit dem anderen Verfolger weitergeführt. Zur Verbesserung des Systems wurden zusätzlich Straßenmerkmale implementiert, die für eine Unterbrechung des Erscheinungsbildes der Straße verantwortlich sein können, wie z. B. Kreuzungen, Veränderungen der Straßenbreite und Fahrzeuge. Wenn ein Hinweis auf eines dieser Merkmale besteht, wird diese Möglichkeit entsprechend berücksichtigt z. B. kann eine fehlende Kante ein Hinweis für eine Kreuzung sein oder eine Unterbrechung des Profiltrackers ein Hinweis für ein Fahrzeug. Die Fortsetzung des Trackings kann dann weiterhin erlaubt werden. Die Kombination der beiden Straßentracker liefert recht stabile Ergebnisse. HARVEY (1999) stellt eine andere Methode zur automatischen Generierung von Startpunkten vor. Er führt lokal eine Histogrammanalyse der Kantenrichtungen durch. Die Vorgehensweise ähnelt einer Hough-Transformation, die bei komplexeren Daten grundsätzlich den Vorteil hat, dass sie weniger stör anfällig auf fragmentierte Kantenergebnisse reagiert als andere Ansätze.

Die jüngsten Entwicklungen (HARVEY et al., 2004) haben zu dem semi-automatischen Straßenextraktionssystem ROADMAP geführt. Es beinhaltet die obige, automatische Extraktion und manuelle Editierfunktionen. In der vorgestellten Evaluierung wird eine manuelle mit einer semi-automatischen Erfassung verglichen. Gegenüber einer rein manuellen Erfassung erreicht das ROADMAP System einen Zeitvorteil von einem Faktor größer als zwei.

BARZOHAR und COOPER (1996) und BARZOHAR et al. (1997) haben ein System zur Straßendetektion und -verfolgung aus Luftbildern basierend auf Dynamic Programming realisiert. Mit Hilfe einer lokalen *Maximum A Posteriori Probability* (MAP) Schätzung werden in einzelnen Bildfenstern Straßen unter Verwendung von Dynamic Programming detektiert (Phase 1). Die Netzwerkgenerierung (Phase 2) erfolgt dann ebenfalls mittels Dynamic Programming. Ausgehend von den Bildfenstern mit den am besten bewerteten Straßen aus Phase 1 wird das Straßennetz durch eine optimale, globale Schätzung verfolgt. Das Ergebnis des Verfahrens sind extrahierte Straßenränder. Der Ansatz zeigt aber in komplexeren Gebieten mit Kreuzungen, Schattenbereichen und Verdeckungen durch Bäume oder Autos Schwächen. Daher wird in (BARZOHAR et al., 1997) für die zweite Phase statt Dynamic Programming

ein generalisierter Kalman Filter verwendet, der eine Verfolgung paralleler Kanten mittels der Bayes-Schätzung vornimmt. Lokale Störungen können dadurch überbrückt werden.

Der Ansatz der TUM zur automatischen Extraktion von Straßen aus mittel bis hoch aufgelösten Luftbildern (BAUMGARTNER et al., 1997, 1999; BAUMGARTNER und HINZ, 2000; BAUMGARTNER, 2003) nutzt im Vergleich zu anderen Ansätzen insbesondere das Maßstabsraumverhalten von Straßen sowie globale und lokale Kontextinformationen.

Vor der Extraktion wird das Bild automatisch mit einer Texturklassifikation in die verschiedenen globalen Kontextgebiete Siedlung, Wald und offene Landschaft unterteilt. Die Extraktion erfolgt dann für die offene Landschaft in zwei Auflösungsstufen. In einer hohen Auflösung werden Kanten extrahiert und in einer niedrigen Auflösung Linien. Diese werden gemeinsam unter Verwendung von explizitem Wissen über Straßen zu Straßenabschnitten gruppiert. Es folgt ein iteratives, mehrstufiges Verfahren, in dem die Straßenabschnitte mit geraden Verbindungen und kubischen Bezier-Kurven zu längeren Straßenabschnitten miteinander verknüpft werden. Die eingefügten Verknüpfungshypothesen werden anschließend im Bild verifiziert. In einfachen Fällen wird die Hypothese durch die radiometrischen Eigenschaften bestätigt. Die nächste Verifikationsmöglichkeit besteht durch den Einsatz von so genannten *Ribbon-Snakes*, die auch schwache oder stark fragmentierte Kanteninformation nutzen können. Eine letzte Möglichkeit sieht die Verifikation durch lokalen Kontext vor, z. B. durch Schattenwurf von Bäumen und Gebäuden. Die Vernetzung der Straßenabschnitte erfolgt über extrahierte Kreuzungen und Einmündungen. Der Ansatz zeigt eine hohe Zuverlässigkeit und Vollständigkeit, auch in Bereichen mit lokalen Störungen, die durch die Verifikation der Verknüpfungen aufgrund von Bildinformation und lokalem Kontext sicher überbrückt werden können.

Ein vergleichbar umfassender Ansatz wurde von RUSKONÉ et al. (1994) und RUSKONÉ (1996) für Luftbilder am Institut Géographique National (IGN) entwickelt. Er validiert ebenfalls sein im wesentlichen durch eine Straßenverfolgung generiertes Straßennetz durch die Interpretation von lokalem Kontext. Die Straßenverfolgung basiert auf der Detektion von Startpunkten und der Verfolgung von homogenen, lang gestreckten Regionen. Zum Verbinden der extrahierten Straßenstücke werden Hypothesen aufgestellt, die aufgrund von geometrischen Kriterien wie Distanz und Richtung gebildet werden. Das resultierende Netzwerk wird geometrisch mit Snakes korrigiert. Für die Validierung werden die extrahierten Straßenabschnitte einer Klassifikation unterzogen. Neben der Klasse „Straße“ dürfen abschnittsweise auch die Klassen „Kreuzung“, „Schatten“, „Baum“ oder „Feld“ existieren, um die eingefügten Hypothesen zu bestätigen. In (RUSKONÉ, 1996) wird darüber hinaus ein *Agent*-Prinzip vorgeschlagen, d. h. es werden nach der Klassifikation Detektionsprogramme angestoßen, um die Art der Kontextobjekte genauer festzustellen. Mit diesem Wissen kann dann die weitere Detektion gesteuert werden.

Bei der Straßenextraktion in städtischen Gebieten spielt die Analyse von Kontextbeziehungen eine noch wichtigere Rolle. STILLA und JURKIEWICZ (1991) realisieren mit einem Blackboard-Ansatz ein kontext-gesteuertes, automatisches Erkennungssystem zur Interpretation von Straßen und Gebäuden. Das System arbeitet auf Luftbildern und basiert auf Produktionen, die Objektprimitive miteinander verknüpfen.

Die Objektprimitive werden aus verschiedenen Binärbildern extrahiert. Ihre Umrisse werden durch Geradenstücke approximiert. Die bewerteten Objektprimitive lassen sich zu immer komplexeren Objekten gruppieren wie zunächst Streifen, dann Rechtecke und schließlich Straßen. Der Aufbau der Objekte vollzieht sich mit Hilfe geeigneter Produktionen, die das Modellwissen enthalten und als Überprüfungsprogramme realisiert sind. Ausgehend von einem gefundenen Objekt Straße werden beispielsweise benachbarte Objektprimitive auf die Objekte Haus, dann Häuserreihe und doppelte Häuserreihe überprüft und zu dem Objekt „Teilsiedlung“ gruppiert. Somit ergibt sich der Gesamt Ablauf zu einem Ableitungsgraphen. Am Ende des Ableitungsgraphen steht das Objekt „Siedlung“. In ihrer Arbeit zeigen die Autoren, dass die Modellierung mit „graphenproduzierenden“ Produktionen eine einfache und allgemeine Formulierung des Kontextwissens erlaubt. Die Analyse stützt sich auf eine recht einfache Vorverarbeitung, die Schwierigkeiten bei der Erfassung aller notwendigen Strukturen hat. Zusätzlich ergeben sich Fehlinterpretationen durch Schatten und die fehlende 3D-Information von Objekten.

In dem Ansatz der TUM von HINZ (2001), HINZ und BAUMGARTNER (2003) und HINZ (2004a) werden im dichten, urbanen Gebiet Straßen automatisch aus hoch auflösenden Luftbildern ($< 0.2\text{ m}$) und einem digitalen Oberflächenmodell (DOM) extrahiert. Die Extraktion beruht auf einer expliziten Modellierung der Straße samt ihrer Teilobjekte und Kontextbeziehungen.

Mit Hilfe des DOM werden zunächst Straßenschluchten als potentielle Regionen für Straßen in der Nähe von Häusern detektiert. Für die Lokalisierung von einzelnen Fahrspuren werden Bereiche zwischen Kanten und gruppierten Fahrbahnmarkierungen auf Homogenität geprüft. Bei Lücken in der Fahrspurdetektion wird ein spezielles Modul zur automatischen Erkennung von Fahrzeugen und Fahrzeugkolonnen aufgerufen (HINZ, 2004b), so dass Störungen der homogenen Straßenfläche erklärt werden können. Die Höheninformation aus dem DOM wird des Weiteren dazu verwendet, Schattenbereiche zu präzisieren und damit die Parameter für die Schwellwerte in Schattengebieten beispielsweise zur Detektion von Fahrbahnmarkierungen automatisch anzupassen. Ein anderes Problem sind die in Stadtgebieten vorkommenden Sichtverdeckungen durch hohe Gebäude. Dies wird mit einem Mehrbildansatz gelöst. So können aus der Kenntnis der Position der Bildaufnahme über das DOM potentielle Sichtverdeckungen berechnet und geeignete Bilder ausgewählt werden.

In der hohen Auflösung ist es möglich durch explizite Modellierung und Verwendung von Straßenteilobjekten und Kontextinformationen eine sehr detaillierte und sogar Fahrbahn genaue Extraktion der Straßen zu erreichen.

3.2.2 Verfahren für SAR-Bilddaten

Die Verfahren zur Straßenextraktion aus SAR-Daten unterscheiden sich gegenüber optischen Bilddaten vor allem in der ersten Phase, der Detektion von Linien. Viele Standardverfahren zur Linien- und Kantenextraktion sind für optische Bilddaten und nicht für SAR-Bilddaten entwickelt worden. Der erste Teil dieses Abschnittes geht deshalb näher auf Arbeiten zur Extraktion von Linien aus SAR-Bilddaten ein. Im zweiten Teil werden dann Verfahren zur Straßenextraktion aus SAR-Bilddaten vorgestellt.

Verfahren zur Extraktion von Linien aus SAR-Bilddaten

Zur Extraktion von Linien haben sich generell gradienten- und *Template*-basierte Ansätze etabliert. Gradientenbasierte Ansätze betrachten die Bilddaten als verrauschte Werte einer Bildfunktion (HARALICK und SHAPIRO, 1992). In dieser Bildfunktion werden Linien als Tal- und Rückenlinien detektiert. Einige der gradientenbasierten Verfahren basieren auf richtungsunabhängigen Ableitungen der Bildfunktion (LINDEBERG, 1998; STEGER, 1998a). Hierfür führen sie vorab eine Gauß'sche Glättung der Bilddaten durch, um die Ableitungen stabil zu ermitteln. Diese Verfahren haben sich insbesondere für optische Bilder durchgesetzt und sind wissenschaftlich und technisch ausgereift. Bei den Template-basierten Ansätzen werden Templates d. h. Masken verwendet. Ein Template zur Detektion von Linien besteht aus drei Bereichen. Zur Bestimmung der Linie werden z. B. die Differenzen der Mittelwerte der Bereiche betrachtet. Diese Auswertung erfolgt für mehrere Richtungen. Die Richtung der maximalen Antwort wird als Linienrichtung angesehen.

Mit den gradienten- und Template-basierten Ansätzen ergibt sich für optische Bilder eine konstante Fehlalarmrate (*Constant False Alarm Rate*, CFAR), d.h. die Anzahl der Fehlextraktionen ist unabhängig vom mittleren Grauwert. Bei SAR-Daten führt die Anwendung dieser herkömmlichen Detektoren zu „Scheinkanten“, die keine reale Bedeutung haben (BOVIK, 1988). Der Grund für dieses Verhalten liegt im Speckle-Effekt, durch den mit zunehmendem Grauwert die Varianz im gleichen Maße ansteigt. Dadurch ergeben sich bei der Differenzbildung von Mittelwerten im höheren Grauwertbereich vermehrt Fehlextraktionen.

Für die Gewährleistung einer konstanten Fehlalarmrate für die Kanten- bzw. Linienextraktion aus SAR-Bilddaten gibt es nach BORGHYS et al. (2000) generell zwei Herangehensweisen.

1. Die Verwendung von Operatoren, die auf dem Verhältnis von Intensitäten anstatt der Differenz basieren. Speziell für SAR-Daten bedeutet dies, dass mit dem Verhältnis von Intensitäten eine konstante Fehlalarmrate erreicht werden kann.

2. Durch Logarithmierung des Radarsignals: $\ln I = \ln \sigma + \ln S$. Dadurch kann das multiplikative Rauschen in ein additives Rauschen überführt werden. Die logarithmierten Daten lassen eine Unterscheidungen von Grauwertdifferenzen zu, da die Varianz unabhängig vom Mittelwert ist. Gradientenbasierte Algorithmen können dann zum Einsatz kommen.

Für die erste Herangehensweise wurden spezielle, SAR-spezifische Kanten- und Linienoperatoren entwickelt, die statt der Differenz Intensitätsquotienten als Unterscheidungskriterium für Flächen nutzen. Die Verfahren basieren überwiegend auf Template-Verfahren (TOUZI et al., 1988; HELLWICH et al., 1996; HELLWICH, 1997; TUPIN, 1997; TUPIN et al., 1998; BORGHYS et al., 2002, 2004). Nachteile der Template-basierten Ansätze sind generell ihre starren Linienbreiten und die Richtungsabhängigkeit durch diskrete Orientierungen der Templates. Ebenso kann die Langgestrecktheit von Linien nur schwer berücksichtigt werden.

Bei der zweiten Herangehensweise können die ausgereiften Verfahren für optische Bilddaten angewendet werden. Jedoch ist fraglich, ob sich das Specklerauschen wirklich vollständig durch eine Logarithmierung der Daten beseitigen lässt. Oft werden die Bilddaten deshalb zusätzlich durch inkohärentes Zusammenfassen mehrerer Pixel (z. B. durch Multilookbildung) Speckle-reduziert. Dies geht jedoch zu Lasten der räumlichen Auflösung.

Beide Herangehensweisen zur Liniendetektion aus SAR-Daten haben ihre Vor- und Nachteile. Gerade in Bezug auf eine optimale Liniendetektion aus SAR-Daten besteht nach wie vor noch Forschungsbedarf. Für zukünftige Entwicklungen wäre insbesondere eine an SAR-angepasste, richtungsunabhängige Liniendetektion wünschenswert.

Verfahren zur Extraktion von Straßen aus SAR-Bilddaten

Aufgrund der bisher noch geringen Auflösung von SAR-Daten bilden sich Straßen in SAR-Bildern als Linien ab.

In VASUDEVAN et al. (1988) werden Straßen mit dem aus der Optik bekannten „Duda-Straßenoperator“ (FISCHLER et al., 1981) extrahiert. Bei diesem Operator werden lineare Strukturen maskenbasiert extrahiert, indem sie innerhalb der Maske auf einen homogenen Grauwert und hohen Kontrast (Differenz) zur Umgebung geprüft werden. Die gefundenen Strukturen werden dann aufgrund geometrischer Bedingungen (Nähe und Kollinearität) miteinander verknüpft. Besonders hervorzuheben ist, dass der Ansatz sowohl für optische Satellitenbilder (Landsat 4 und 5) als auch für Radarbilder angewendet wurde. VASUDEVAN et al. (1988) stellen aber selbst fest, dass die Modellierung auf allen Ebenen im *low-*, *mid-* und *high-level* noch verfeinert werden muss.

HUBER und LANG (2001) haben den Duda-Straßenoperator für SAR-Bilddaten modifiziert. In ihrem Ansatz zur Straßenextraktion betrachten sie statt der Differenz zwischen Straßenpixel und Umgebung den Quotienten. In einer Weiterentwicklung, die in (HOHEISEL, 2003) beschrieben wird, verwenden sie diesen so genannten SAR-Straßen-Operator zur Bewertung von bereits mit dem Steger-Linienoperator extrahierten Linien. Auf globaler Ebene wird ein aktives Konturmodell (*Snakes*) angewendet, das durch einen generischen Algorithmus optimiert wird. Dieses Verfahren liefert recht vollständige Ergebnisse in vorstädtischen und ländlichen Gebieten, allerdings auch eine größere Anzahl von Fehlextraktionen.

Der Ansatz am ENST (École Nationale Supérieure des Télécommunications) in Paris, Frankreich gehört zu den umfassendsten objekt-basierten Ansätzen der Straßenextraktion aus SAR-Satellitenbilddaten (TUPIN et al., 1998). Er basiert auf einem für SAR-Daten spezialisierten Detektor zur Extraktion von linearen Strukturen und einer globalen Modellierung unter Verwendung von Markoff-Zufallsfeldern (MRF).

In der ersten Phase werden zwei Liniendetektoren, D1 und D2, die den Speckle mit berücksichtigen, verwendet. Beide Detektoren sind Template-basiert und arbeiten mit einer festen Breite für Straßen.

Das Template besteht aus drei Regionen. Die mittlere Region muss zu beiden Seiten eine Kante aufweisen, um als Linie akzeptiert zu werden. Der Liniendetektor D1 verwendet ein Quotienten-basiertes Unterscheidungskriterium (TOUZI et al., 1988). Der zweite Liniendetektor D2 basiert auf der Korrelation zwischen den Pixeln des Bildes und einer idealen Kante unter Verwendung des Kontrastes und des Variationskoeffizienten für die Homogenität. Die Ergebnisse der beiden Detektoren D1 und D2 werden miteinander fusioniert. Es folgen Nachverarbeitungsschritte, um aus dem Binärbild vektorielle Straßensegmente zu erhalten. Aus den Straßensegmenten wird ein Graph aufgebaut, zu dem geometrisch sinnvolle Verbindungen hinzugefügt werden. Die Teilgraphen des aufgebauten Graphen werden als Cliques in das Markoff-Zufallsfeld übernommen. Das Potential der Cliques wird zum einen aus der Radiometrie bzw. der Stärke der Liniendetektoren bezogen und zum anderen aus der Übereinstimmung mit einem geometrischen Modell. Ein *Simulated Annealing* Algorithmus sucht den Weg mit der minimalen Energie im Zufallsfeld. Zur Validierung wird die Straßenextraktion auf vier SAR-Satellitenbildern getestet. Dabei werden in ländlichen Gebieten die Hauptstraßen gut erkannt. Probleme gibt es mit kleineren Straßen und in der Stadt. Durch den Template-basierten Ansatz zur Liniendetektion sind die Ergebnisse richtungsabhängig und auf eine feste Straßenbreite beschränkt.

Ausgehend von diesem Ansatz zur Straßenextraktion wird in (TUPIN, 2000; TUPIN et al., 2002) ein Mehrbildansatz mit zwei orthogonalen Sichten vorgestellt. Die Ergebnisse aus den einzelnen Sichten werden komplett mit einem UND-Operator fusioniert. Die Vollständigkeit des städtischen Straßennetzes profitiert erheblich von den zwei Sichten. Gerade im innerstädtischen Bereich kommt es zu größeren Sichtproblemen durch Verdeckungen, die mit Multiaspekt- oder Multi-Einfallswinkel-Sichten kompensiert werden können. Es ist aber anzumerken, dass bei der Extraktion in der Stadt nicht selten statt der Straßen die Schatten der Gebäude detektiert werden. Dies führt zu Lagefehlern, zu Problemen bei der Fusion und zur Verschlechterung der Zuverlässigkeit der Ergebnisse. Die feste Straßenbreite, die für die Liniendetektoren nötig ist, wird in (TUPIN et al., 2002) durch die Extraktion in verschiedenen Maßstäben umgangen.

Für hoch aufgelöste SAR-Daten (<1 m) kombinieren LISINI et al. (2006) den beschriebenen Ansatz mit einer parallel durchgeführten Klassifikation. Alle Pixel erhalten jeweils aus der Liniendetektion und aus der Klassifikation einen Wahrscheinlichkeitswert für die Zugehörigkeit zur Klasse Straße. Beide Wahrscheinlichkeiten gehen in das Markoff-Zufallsfeld ein. Allerdings werden durch die Klassifikation die Formmerkmale für Straßen nur unzureichend verwendet.

An der Pohang University of Science and Technology in Korea wurde ein mehrstufiger, objekt-basierter Ansatz zur Extraktion von Straßen aus Satellitenbildern (ERS-1) entwickelt (JEON et al., 1999, 2000, 2002).

In ihren ersten Arbeiten konzentrieren sich JEON et al. (1999, 2000) auf die Positionskorrektur und Aktualisierung vorhandener Straßendaten. Hierbei werden Snakes verwendet, die mit bestehenden Straßen initialisiert werden. Die Datengrundlage für die Snakes ist nicht das Bild sondern ein so genanntes Potentialfeld, welches aus den Bilddaten und extrahierten Linien abgeleitet wird und weniger Speckle-Störungen enthält. In der Weiterentwicklung (JEON et al., 2002) werden Straßen komplett automatisch extrahiert. Zunächst wird in einem Vorverarbeitungsschritt der Speckle mit dem Sigma-Filter (LEE, 1983) reduziert und der Suchbereich mit einer Schwellwertoperation auf dunkle Bereiche beschränkt. Die Extraktion der Linien erfolgt schließlich mit dem Steger-Algorithmus (STEGER, 1998a). Die längsten Linien dieser Extraktion werden als Startstücke für einen generischen Kürzeste-Wege-Algorithmus ausgewählt. Alle extrahierten Linien werden aufgrund ihrer Nähe, Kollinearität, Grauwerthomogenität und Länge bewertet. Ausgehend von den Startstücken werden die Linien durch den generischen Algorithmus miteinander zu Straßen verbunden. Durch die generische Pfadsuche werden letztlich nur diejenigen Linien als Straßenstücke ausgewählt, die gute Bewertungen haben. Gefundene Verbindungen werden gruppiert und dienen erneut als Startstücke. Das Ergebnis der generischen Gruppierung ist noch unvollständig. Bestehende Lücken werden mit Snakes geschlossen, die nicht direkt auf dem SAR-Bild, sondern auf dem Potentialfeld (JEON et al., 1999) angewandt werden. In dem Testgebiet werden aufgrund der niedrigen Auflösung von ERS-1 Bilddaten vorwiegend eine Autobahn mit einer Breite von 20 m und größere Straßen detektiert. Die Szenen zeichnen sich durch relativ lange, un-

gestörte Straßenabschnitte aus. Die Extraktion funktioniert dort gut. Bei stärker durch Störeinflüsse gekennzeichneten Straßenabschnitten werden dagegen keine Straßen gefunden.

DELL'ACQUA und GAMBA (2001) vom Dipartimento di Elettronica, Università di Pavia stellen drei Extraktionsalgorithmen für Straßen in städtischen Gebieten vor, deren Ergebnisse in (DELL'ACQUA et al., 2003) zu einem gemeinsamen Straßennetz miteinander fusioniert werden. Die Algorithmen wurden anhand von flugzeuggetragenen SAR-Daten entwickelt.

Allen drei Algorithmen geht eine grobe Klassifikation in Straßen- und Nicht-Straßenpixel voraus. Die Durchführung der Klassifikation basiert auf einem *Fuzzy C Means* Ansatz. Die sich ergebenden Fuzzy-Zugehörigkeitswerte für jedes Pixel stehen den Extraktionsalgorithmen zur Verfügung. Der erste Algorithmus zur Straßendetektion besteht aus einer erweiterten Hough-Transformation (CWHT). Zur Detektion verschiedener Linienbreiten wird dieser Ansatz in mehreren Auflösungsstufen angewendet. Der zweite Ansatz ist eine modifizierte Version der rotierenden Hough-Transformation. Das Bild wird hierbei nach und nach gedreht und es werden jeweils nur horizontale und vertikale Segmente erfasst. Beide Ansätze können aufgrund der Hough-Transformation nur gerade Linien detektieren. Für die Erfassung gekrümmter Linien ist der dritte Ansatz zuständig. Er führt auf Grundlage des Klassifikationsergebnisses eine kürzeste Pfadsuche mittels Dynamic Programming durch. Ergebnisse sind u.a., dass mit diesem Verfahren bei einer amerikanischen Stadt mit ihren sehr regelmäßigen Strukturen eine Vollständigkeit von rund 80 % erreicht werden kann. In (DELL'ACQUA et al., 2003) werden die Ergebnisse aus zwei orthogonalen Sichten fusioniert. Als Testgebiet dient der Innenstadtbereich einer italienischen Stadt. Die Vollständigkeit der Ergebnisse ist trotz der Fusion mit knapp über 20 % recht niedrig, u. a. aufgrund der fehlenden Geradlinigkeit der Straßen.

CHANUSSOT et al. (1999) von der Université de Savoie, Frankreich präsentieren einen Ansatz zur Extraktion von linearen Strukturen und zur Fusion verschiedenartiger Linieninformationen. Die Detektion linearer Strukturen beginnt mit einer Filtervorverarbeitung gefolgt von einer morphologischen Linienextraktion. Anstelle eines klassischen Speckle-Filters wählen sie einen gerichteten Median-Filter in Richtung der größten Homogenität eines jeden Pixels. Auf den Speckle-reduzierten Bildern findet ausschließlich eine morphologische Linienextraktion statt. Linien werden hierbei aufgrund ihrer Form und ihrem geringeren Grauwert in Bezug zur Umgebung detektiert. Da es sich lediglich um einen Algorithmus der Phase 1 handelt, ergibt sich eine unvollständige und unkorrekte Detektion des Straßennetzes wie sie bei allen low-level Detektoren üblich ist.

KATARTZIS et al. (2001) vom Department of Electronics and Informatics (ETRO) Vrije Universität Brüssel kombinieren diesen Ansatz mit dem MRF-Ansatz von TUPIN et al. (1998). Die Detektion der Liniensegmente wird von CHANUSSOT und LAMBERT (1998) übernommen und durch einen Linientracker verfeinert. Die globale Verknüpfung der Liniestücke erfolgt mit einem leicht veränderten Bayesschen Netzwerk von TUPIN et al. (1998). In dieser Modifikation können Straßen aufgrund der morphologischen Linienextraktion unabhängig von ihrer Breite und Richtung detektiert werden. Probleme treten bei stärker gekrümmten Straßen auf. Dieser Ansatz wurde zwar für optische Luftbilder entwickelt, ist aber aufgrund des Verfahrens von CHANUSSOT et al. (1999) ebenso für SAR-Bilddaten anwendbar.

WANG und ZHENG (1998) führen nach einer Reihe von Vorverarbeitungsschritten die Straßenextraktion mittels einer Hough-Transformation durch. In der Vorverarbeitungsphase werden in einem ersten Segmentierungsschritt auf dem HH-polarisierten Amplitudenbild per Schwellwert dunkle, potentielle Straßenbereiche segmentiert. In einem zweiten Segmentierungsschritt wird unter Hinzunahme der VV-Polarisation die Segmentierung weiter verfeinert. Vor allem Schattenbereiche können mit der für Straßen gültigen Bedingung, dass die Intensität von Straßen in der VV-Polarisation größer ist als in der HH-Polarisation, ausgeschlossen werden. Die Detektion von Straßen erfolgt in einem morphologisch gefilterten Bild über eine Hough-Transformation. Dabei können nur gerade Straßen gefunden werden, was eine ziemliche Einschränkung für diesen Ansatz bedeutet. Die Vorverarbeitungsschritte sind dafür relativ robust an die SAR-Daten angepasst.

3.2.3 Folgerungen

Aus der vorangegangenen Vorstellung der Verfahren zur Straßenextraktion aus optischen und SAR-Bilddaten werden in diesem Abschnitt Schlussfolgerungen bezüglich einer geeigneten Extraktionsstrategie für die Straßenextraktion aus SAR-Bilddaten gezogen. Generell ist bei einer Beurteilung des eingesetzten Modells und der Methoden zu bedenken, dass auch immer die verwendeten Bilddaten und die jeweiligen Aufgabenstellungen für eine erfolgreiche Bildanalyse entscheidend sind. Nachfolgende Erkenntnisse ergeben sich aus den beschriebenen Verfahren.

Bezüglich des Modells

- Das Modell sollte geometrische, radiometrische und topologische Eigenschaften von Straßen detailliert erfassen, um Mehrdeutigkeiten bestmöglich ausschließen zu können.
- Das Modell sollte das Maßstabsraumverhalten von Straßen beinhalten. Diese Art der Modellierung unterstützt eine effiziente Ausnutzung der Straßeneigenschaften.
- Das Modell sollte explizit in all seinen Bestandteilen formuliert werden, um das Wissen für die Bildanalyse verfügbar zu machen.
- Das Modell sollte die Nutzung von Kontextinformation für die Extraktion vorsehen.
- Lokaler Kontext sollte so modelliert werden, dass er zur Validierung von Straßenstücken genutzt werden kann.
- Globaler Kontext sollte zur Steuerung der Extraktion durch den jeweiligen Landschaftstyp herangezogen werden.

Bezüglich der Methoden

- Für die sichere Extraktion von Straßenabschnitten sollte bereits in der ersten Phase detailliertes Modellwissen über geometrische und radiometrische Straßeneigenschaften ausgeschöpft werden.
- Für die Linienextraktion aus SAR-Bilddaten sollten speziell die Vorverarbeitungsschritte auf ihre Eignung für die Straßenextraktion hin überprüft werden.
- In der zweiten Phase der Straßenextraktion können für SAR- und optische Bilddaten prinzipiell die gleichen Verfahren angewendet werden.
- Die Netzwerkeigenschaften von Straßen sollten stärker berücksichtigt werden. Auch die Verbindungsfunktion zwischen Städten sollte stärker in die Netzwerkbildung mit einfließen. Hierfür sind großräumige Testgebiete auszuwerten.

In der vorliegenden Arbeit werden diese Erkenntnisse als Herausforderung für die Weiterentwicklung der Straßenextraktion angesehen, denn sie sind bisher für SAR-Bilddaten nicht durchgängig umgesetzt. Die Ausgangsbasis bildet dabei ein bestehender Ansatz zur Extraktion von Straßen. Er wurde für niedrig aufgelöste, optische Satellitenbilddaten an der Technischen Universität München entwickelt.

Er bietet die Möglichkeit, die in bisherigen Ansätzen nur unzureichend berücksichtigten Netzwerkeigenschaften und Kontextinformationen zu integrieren. Im folgenden Abschnitt wird daher der TUM-LOREX Ansatz zur Straßenextraktion aus optischen Satellitenbilddaten genauer beschrieben.

3.3 Der TUM-LOREX-Ansatz

In dieser Arbeit wird als Ausgangsbasis für die Extraktion von Straßen der Ansatz der Technischen Universität München zur Extraktion von Straßennetzen aus optischen Satellitenbilddaten verwendet (TUM-LOREX: *T*echnische *U*niversität *M*ünchen-*L*ow Resolution *R*oad *E*xtraction), (STEGER et al., 1997; WIEDEMANN, 2002). Die Extraktionsstrategie des TUM-LOREX-Ansatzes sieht einen modularen Ablauf vor, bei dem mehrere Schritte nacheinander ausgeführt werden (siehe Abbildung 3.4). Als Eingangsdaten sind optische Bilddaten mit einer Bodenpixelgröße von ca. zwei Metern vorgesehen. Auch die Berücksichtigung von mehreren spektralen Kanälen ist möglich, indem die einzelnen Kanäle als separate Bilder (*Bild 1 – Bild n*) in die Extraktion mit eingehen. Die einzelnen Schritte der Straßenextraktion des TUM-LOREX-Ansatzes (Abbildung 3.4) werden im Folgenden genauer beschrieben.

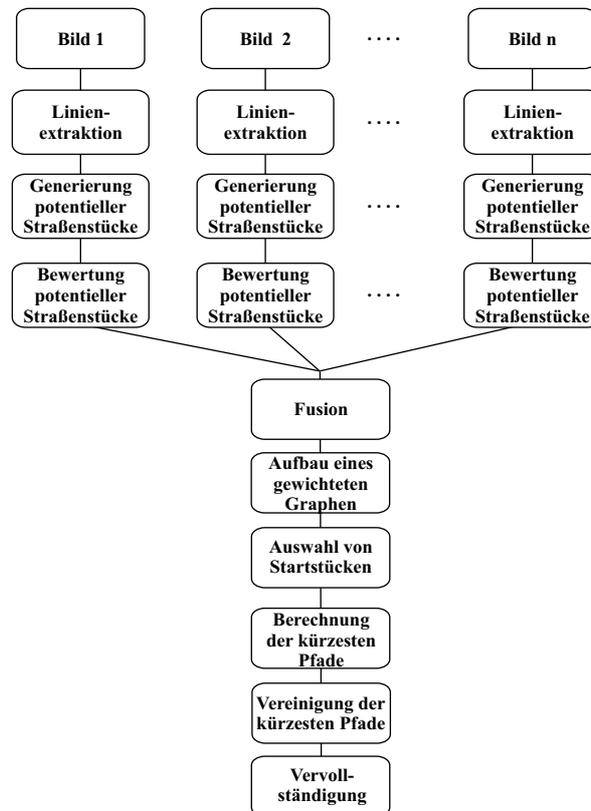


Abbildung 3.4. Ablauf der Extraktion bei TUM-LOREX

Linienextraktion

Im ersten Schritt werden Linien aus den Bilddaten extrahiert, jeweils separat für jedes Eingangsbild bzw. für jeden Kanal. Die Linienextraktion wird mit dem Ansatz von STEGER (1998a,b) durchgeführt. Der Steger-Linienoperator basiert auf einem expliziten Modell für Linien und nutzt differentialgeometrische Eigenschaften der Bildfunktion zur Detektion. Er geht von einem balkenförmigen oder parabolischen Profil der Linien aus und bestimmt die Position ihrer Grauwertmaxima bzw. -minima im Bild. Im Vergleich zu anderen Verfahren hat er den Vorteil, dass er für Linien mit unterschiedlicher Breite eingesetzt werden kann und die Position und Breite für jeden Linienpunkt subpixelgenau liefert. Er extrahiert sowohl helle als auch dunkle Linien und korrigiert eine verschobene Position der Linie, wenn unterschiedliche Kontraste auf beiden Seiten vorliegen (siehe auch Anhang A.2).

Das Ergebnis der Linienextraktion sind Pixelketten (Linien) und Kreuzungspunkte, jeweils mit Subpixelgenauigkeit und mit den Attributen Breite, Richtung und Grauwert für jedes Pixel.

Generierung potentieller Straßenstücke

Die extrahierten Linien repräsentieren jedoch nicht ausschließlich Straßen, sondern es werden auch andere lineare Strukturen oder Objekte wie z.B. schmale Felder erfasst. Jede einzelne Linie sollte für die folgende Bewertung aber nur eine Objektart umfassen. So kann z. B. eine längere, einzelne Linie gleichzeitig anfänglich eine Straße und im weiteren Verlauf eine Feldstruktur erfassen. Linien werden daher an Stellen aufgetrennt, an denen angenommen werden kann, dass sie ihre Bedeutung ändern. Ein Indiz für eine Bedeutungsänderung kann z. B. eine besonders starke Krümmung der Linie sein. Deshalb werden die extrahierten Linien nach einer Glättung bzw. Polygonapproximation (RAMER, 1972) durch Auftrennen an den Stellen hoher Krümmung in potentielle Straßenstücke überführt und somit für die folgende Bewertung vorbereitet.

Bewertung potentieller Straßenstücke

Die Bewertung der potentiellen Straßenstücke hat das Ziel mehr Evidenz für das Vorhandensein von Straßen in den Gruppierungsvorgang einzuführen. Für die Bewertung der Straßenstücke werden mit Hilfe des Straßenmodells Bewertungsmaße aufgestellt. Aus den mitgelieferten Attributen der Linienextraktion für jedes Pixel können für jedes potentielle Straßenstück folgende Bewertungsmaße berechnet werden:

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

Zur Bestimmung der Bewertung dieser Maße wird im TUM-LOREX-Ansatz die Fuzzy-Logik verwendet. Mit Fuzzy-Logik (engl. fuzzy=unsicher) kann unsicheres, natürlichsprachliches Wissen repräsentiert, modelliert und bewertet werden. Im Rahmen der hier vorgenommenen Bewertung gehen die Aussagen des Straßenmodells über die Bewertungsmaße in die Bewertung ein. Die vage Aussage *Straßen sind lang gestreckte Objekte* wird beispielsweise durch das Bewertungsmaß *Länge des extrahierten Straßenstückes* überprüft. Durch Membership-Funktionen oder auch Fuzzy-Funktionen genannt kann aufgrund intuitiv festzusetzender Schwellwerte die Aussage auf ihren Grad an Richtigkeit bewertet werden (siehe Abbildung 3.5). Im TUM-LOREX-Ansatz kommen lineare Fuzzy-Funktionen zum Einsatz. Der Ausgang der Membership-Funktionen ist eine Bewertung (Fuzzy-Wert oder *test-score*) (ZADEH, 1989). Der Fuzzy-Wert wird in der Regel zum Zwecke der Vergleichbarkeit verschiedener Bewertungen auf den Intervallbereich $[0,1]$ skaliert. Zur Vereinigung der Fuzzy-Werte aller Bewertungsmaße zu einem gemeinsamen Fuzzy-Wert pro potentielltem Straßenstück wird der Fuzzy-UND-Operator verwendet, bei dem die minimalste aller Bewertungen ausgewählt wird.

Fusion

Die bisherigen Schritte zur Linienextraktion und Bewertung der Linien werden für jedes Eingangsbild oder jeden Kanal einzeln durchgeführt. Wenn für die Extraktion mehrere Eingangsbilder genutzt werden sollen, werden die Straßenstücke aus den verschiedenen Eingangsdaten nach der Fuzzy-Bewertung miteinander fusioniert. Da das Straßennetzwerk möglichst mit Hilfe der am besten bewerteten, potentiellen Straßenstücke generiert werden soll, werden die Linien zunächst entsprechend ihrer Bewertung sortiert, beginnend mit der am besten bewerteten Linie. Die Fusion erfolgt dann über eine *best first*

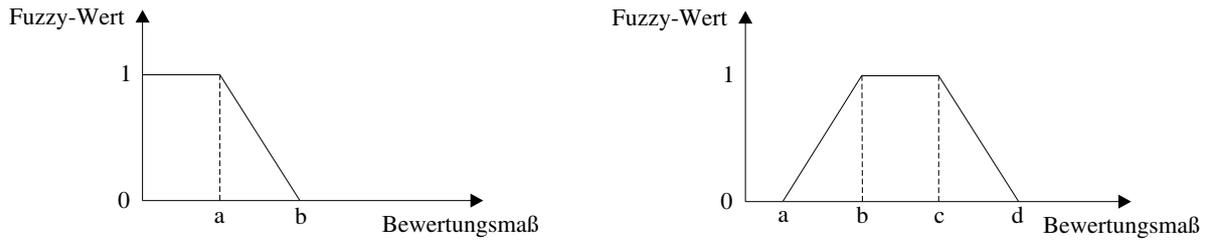


Abbildung 3.5. Lineare Fuzzy-Funktionen

Strategie. Die Kandidaten werden beginnend mit den am besten bewerteten Straßenstücken in das zunächst leere Fusionsergebnis eingetragen. Bei den nachfolgenden Straßenstücken wird geprüft, ob sie sich ganz oder teilweise mit bereits eingetragenen Stücken überlappen. Ist dies der Fall, bleibt die besser bewertete Linie bestehen und ihre Bewertung wird erhöht, weil dieses Straßenstück durch das zusätzliche Straßenstück gestützt werden kann. Die sich nicht überlappenden Teile werden mit ihrer ursprünglichen Bewertung in das Fusionsergebnis übernommen. Die Fusion ist beendet, wenn alle potentiellen Straßenstücke in das Fusionsergebnis eingetragen worden sind. Da es bedingt durch die Fusion zu möglichen neuen Kreuzungen kommen kann, werden die Straßenstücke daraufhin überprüft, ob ein anderes Stück in ihrer Nähe endet. Wenn dies der Fall ist, werden an den nötigen Stellen neue Kreuzungspunkte eingefügt.

Aufbau eines gewichteten Graphen

Der im Folgenden verwendete Gruppierungsalgorithmus für den Aufbau eines Straßennetzes in einem gewichteten Graphen sucht jeweils zwischen zwei zuverlässigen Startpunkten den kürzesten Pfad nach dem Algorithmus von DIJKSTRA (1959). Dazu wird aus den potentiellen Straßenstücken nach der Fusion ein gewichteter Graph aufgebaut.

Da die extrahierten, potentiellen Straßenstücke in der Regel das Straßennetz nicht vollständig erfassen – meist gibt es Lücken zwischen den einzelnen Stücken und mehrere Zusammenhangskomponenten – werden zusätzlich Verknüpfungshypothesen eingefügt. Im ersten Schritt werden die potentiellen Straßenstücke in einen gewichteten Graphen überführt, in einem zweiten Schritt die Verknüpfungshypothesen eingefügt. Bei der Überführung in einen Graphen entsprechen die potentiellen Straßenstücke dabei den Kanten, die Endpunkte den Knoten im Graphen.

Verknüpfungshypothesen werden zwischen allen Knoten des Graphen eingeführt, die nicht adjazent sind, d.h. die nicht durch eine Kante miteinander verbunden sind. Um lediglich sinnvolle Verknüpfungshypothesen zu erhalten, werden alle Hypothesen entsprechend ihrer Eignung als Verknüpfung durch folgende Maße bewertet:

- Richtungsdifferenzen zwischen den zu verknüpfenden Straßenstücken und der Verknüpfungshypothese.
- Absolute Länge der Verknüpfungshypothese.
- Relative Länge der Verknüpfungshypothese (verglichen mit der Länge des schlechter Bewerteten der beiden zu verknüpfenden Straßenstücke).
- Ebenheit der Verknüpfungshypothese (Mittelwert des absoluten Gradienten entlang der Verknüpfung; nur wenn Höheninformation verfügbar ist).

Zudem gibt es eine Bedingung, die verhindert, dass eine Verknüpfungshypothese eine bessere Bewertung erhält, als eines der beiden zu verknüpfenden Straßenstücke. Die Bewertung der Verknüpfungsmasse erfolgt wie bei der Bewertung der potentiellen Straßenstücke mit Fuzzy-Funktionen, die am Ende zu einem Fuzzy-Wert pro Verknüpfungshypothese zusammen gefasst werden.

Ein Sonderfall bei der Fuzzy-Bewertung ist die Bewertung der Richtungsdifferenz zwischen zwei Straßenstücken. Damit geradlinige Fortsetzungen innerhalb einer Straße und rechtwinklige Einmündungen

an Kreuzungen gleichzeitig unterstützt werden, wird hier eine Fuzzy-Funktion gewählt, die sowohl bei Kollinearität als auch bei Rechtwinkligkeit den Wert 1 liefert.

Neben den potentiellen Straßenstücken und den Verknüpfungshypothesen müssen auch ihre Bewertungen als Kosten in den gewichteten Graphen eingeführt werden. Denn der optimale Pfad ist letztlich derjenige, für den die Summe der Kosten seiner Kanten minimal ist. Die Kosten der Kanten w_{ij} werden aus den Bewertungen (Fuzzy-Wert, r_{ij}) ermittelt. Für die potentiellen Straßenstücke wird der Fuzzy-Wert r_{ij} einer Kante zwischen den Knoten i und j unter Anwendung von Gleichung 3.2 in Kosten transformiert und der entsprechenden Kante des Graphen zugewiesen. Ist eine Linie als ideal bewertet worden (Fuzzy-Wert 1), wird ihre tatsächliche Länge als Kosten verwendet. Stimmt die Verbindung nicht so gut mit dem Straßenmodell überein, werden ihre Kosten künstlich erhöht, indem die Länge des Straßenstücks l_{ij} mit der Bewertung der Linie skaliert wird. Bei den Verknüpfungshypothesen wird als Näherung für die Länge des (fehlenden) Straßenstücks immer die gradlinige Verbindung zwischen zwei Knoten als Abstand d_{ij} eingefügt und durch den hypothetischen Fuzzy-Wert skaliert. Bei einer Verbindung mit einem Fuzzy-Wert Null, sind die Kosten der Verbindung unendlich. Dann wird keine Kante in den Graphen eingefügt. Mit folgender Formel werden diese Regeln umgesetzt:

$$w_{i,j} = \begin{cases} l_{i,j} & \text{für potentielle Straßenstücke, wenn } r_{i,j} = 1, \\ l_{i,j}/r_{i,j} & \text{für potentielle Straßenstücke, wenn } r_{i,j} > 0, \\ d_{i,j}/r_{i,j} & \text{für eingefügte Verknüpfungshypothesen, wenn } r_{i,j} > 0, \\ \infty & \text{wenn } r_{i,j} = 0. \end{cases} \quad (3.2)$$

Auswahl von Startstücken

Für die Extraktion des Straßennetzes werden Startstücke benötigt, die dann durch die kürzeste Pfade suchte miteinander verbunden werden. Wenn keine externen Startstücke z. B. aus einem GIS zur Verfügung stehen, müssen die Startstücke innerhalb des Systems generiert werden. Ein Startstück sollte mit hoher Wahrscheinlichkeit Teil des Straßennetzes sein. Eine Bewertung und somit Abschätzung für eine Wahrscheinlichkeit ist im vorliegenden System für alle potentiellen Straßenstücke durch ihre Fuzzy-Werte gegeben. Alle Straßenstücke, deren Fuzzy-Wert über einem bestimmten Schwellwert liegt, können als vorläufige Startstücke betrachtet werden.

Berechnung und Vereinigung der kürzesten Pfade

Zur Bestimmung des kürzesten Pfades in einem gewichteten Graphen können unterschiedliche Verfahren eingesetzt werden. Allgemein bekannt sind der Algorithmus von Dijkstra, der A* Algorithmus und der F* Algorithmus. In der TUM-LOREX-Straßenextraktion wird der Algorithmus von Dijkstra (DIJKSTRA, 1959) verwendet. Er sucht ausgehend von zwei Startknoten den Pfad mit den minimalen Kosten im Graphen (siehe Anhang A.3). Ein (Teil-)Straßennetz gilt als extrahiert, wenn mindestens zwei Startstücke miteinander verbunden werden können, deren resultierender Pfad eine gewisse Mindestlänge aufweist. Das resultierende Netzwerk ergibt sich letztlich aus der Vereinigung der extrahierten Teilnetze.

Vervollständigung

Das resultierende Netzwerk sollte entsprechend der Netzwerkcharakteristik von Straßen durchgängig sein. Meistens existieren jedoch noch Lücken in dem Extraktionsergebnis. Das Ziel der Vervollständigung ist es, ein topologisch korrektes Ergebnis herzustellen. In (WIEDEMANN, 2002) wird die Extraktion und das Extraktionsergebnis so lange als „vorläufig“ bezeichnet, bis eine Vervollständigung des resultierenden Netzes durchgeführt wurde (WIEDEMANN und EBNER, 2000). Hierzu werden nach bestimmten Netzwerkriterien Verknüpfungshypothesen generiert und im Bild verifiziert.

Zunächst erfolgt eine Bestimmung von Punkten im Netzwerk, bei denen der *Umwegfaktor*, um von Punkt A nach Punkt B zu gelangen, jeweils sehr groß wäre. Der Umwegfaktor ist definiert als die Länge des extrahierten Netzwerkes zwischen den Punkten im Verhältnis zur optimalen, z. B. euklidischen

Distanz. Zwischen Punkten mit hohem Umwegfaktor wird die Straßenextraktion erneut durchgeführt. Um auch eine nicht so deutlich im Bild erscheinende Verbindung zu extrahieren, werden die Parameter „weicher“ eingestellt als bei der bisherigen Extraktion.

Der Umwegfaktor kann nur innerhalb einer Zusammenhangskomponente berechnet werden. Für mögliche Verknüpfungshypothesen zwischen verschiedenen Zusammenhangskomponenten wird ein *Verbindungsfaktor* berechnet. Er ist für zwei Punkte verschiedener Zusammenhangskomponenten definiert als das Produkt der Längen der beiden Zusammenhangskomponenten geteilt durch die optimale Entfernung zwischen den Punkten. Der Verbindungsfaktor ist damit groß für große Zusammenhangskomponenten, die nahe beieinander liegen. Es erfolgt auch hier eine Verifizierung im Bild. Der Umweg- und der Verbindungsfaktor werden so lange neu berechnet, bis keine signifikanten Verknüpfungshypothesen mehr vorliegen.

Ein System zur automatischen Extraktion von Objekten, sollte Bewertungen über die Qualität der jeweiligen Teilstücke mitliefern, damit eine Nachbearbeitung nur noch an unsicheren Teilen des Straßennetzes erfolgen muss. Maße zur internen Bewertung wurden von HINZ und WIEDEMANN (2004) in das TUM-LOREX-Verfahren eingeführt. Sie werden aus Wissen abgeleitet, das bisher nicht für die Extraktion genutzt wurde, beispielsweise die Länge eines *extrahierten* Straßenabschnittes oder deren durchschnittlicher Krümmungsradius. In dieser Arbeit werden keine internen Bewertungen verwendet, da sie im Rahmen der Aufgabenstellung von untergeordneter Bedeutung sind.

Das extrahierte Straßennetzwerk weist in Bezug auf die Qualität der Ergebnisse zwei unterschiedliche Kategorien auf. Zum einen besteht es aus Straßenstücken, die als potentielle Straßenstücke im Bild extrahiert wurden. Zum anderen gibt es Verknüpfungen, die lediglich aufgrund von geometrischen Bedingungen ohne eine Verifikation im Bild eingefügt worden sind. Die fehlende Verifikation der Verknüpfungshypothesen ist ein Schwachpunkt, der bereits in dem Verfahren von STEGER et al. (1997) enthalten ist. Die Verifikation der Verknüpfungen ist nur implizit durch ihre Funktion gegeben, dadurch dass sie global auf dem besten Pfad zwischen zwei zuverlässigen Straßenstücken liegen. In dieser Arbeit soll u.a. der lokale Kontext stärker berücksichtigt werden, damit Lücken zuverlässiger geschlossen werden können.

4. Straßenextraktion für SAR-Bilddaten

In diesem Kapitel wird ein neues Verfahren zur Straßenextraktion aus SAR-Bilddaten basierend auf dem TUM-LOREX-Ansatz vorgestellt. Zunächst werden die Eigenschaften von Straßen für verschiedene SAR-Bildtypen erörtert (Abschnitt 4.1). Ausgehend von diesen Eigenschaften wird eine Extraktionsstrategie aufgestellt (Abschnitt 4.2), die die SAR-Spezifika in die Extraktionsstrategie des bestehenden TUM-LOREX-Ansatzes integriert. Insbesondere wird für SAR-Bilddaten eine geeignete, SAR-spezifische Vorverarbeitung beschrieben (Abschnitt 4.3). Diese umfasst die Korrektur der Einfallswinkelabhängigkeit der Rückstreuwerte, eine Reduzierung des Specklerausens und eine geeignete Skalierung der Messwerte für die Linienextraktion. Entsprechend dem TUM-LOREX-Ansatz erfolgt auch in dem neuen Verfahren eine Ausrichtung auf offenes Gelände (Abschnitt 4.4). In Abschnitt 4.5 wird die neue Straßenextraktion für SAR-Bilddaten anhand verschiedener Datensätze evaluiert.

4.1 Abbildungseigenschaften von Straßen in SAR-Bilddaten

In diesem Abschnitt werden zunächst die Abbildungseigenschaften von Straßen in den verschiedenen SAR-Bilddaten erörtert. Darauf aufbauend werden Aussagen für eine geeignete Datenauswahl und für die Extraktionsstrategie abgeleitet.

4.1.1 Eigenschaften für verschiedene Frequenzen, Einfallswinkel und Polarisationen

Die Abbildung von Straßen in SAR-Bilddaten ändert sich je nach Frequenz, Polarisation und Einfallswinkel. Im Folgenden werden die Abbildungseigenschaften von Straßen in Abhängigkeit von diesen SAR-Konfigurationen beschrieben. Da für die Straßenextraktion auch die Umgebung relevant ist, werden auch die Abbildungseigenschaften der Objektklassen „Feld“ und „Wald“ behandelt.

Abbildungseigenschaften für verschiedene Frequenzen

In Abbildung 4.1 ist eine Szene des E-SAR-Sensors für zwei verschiedene Frequenzen (X- und L-Band) dargestellt. In dem Ausschnitt lassen sich Straßen, Gebäude und Vegetation deutlich erkennen. Das

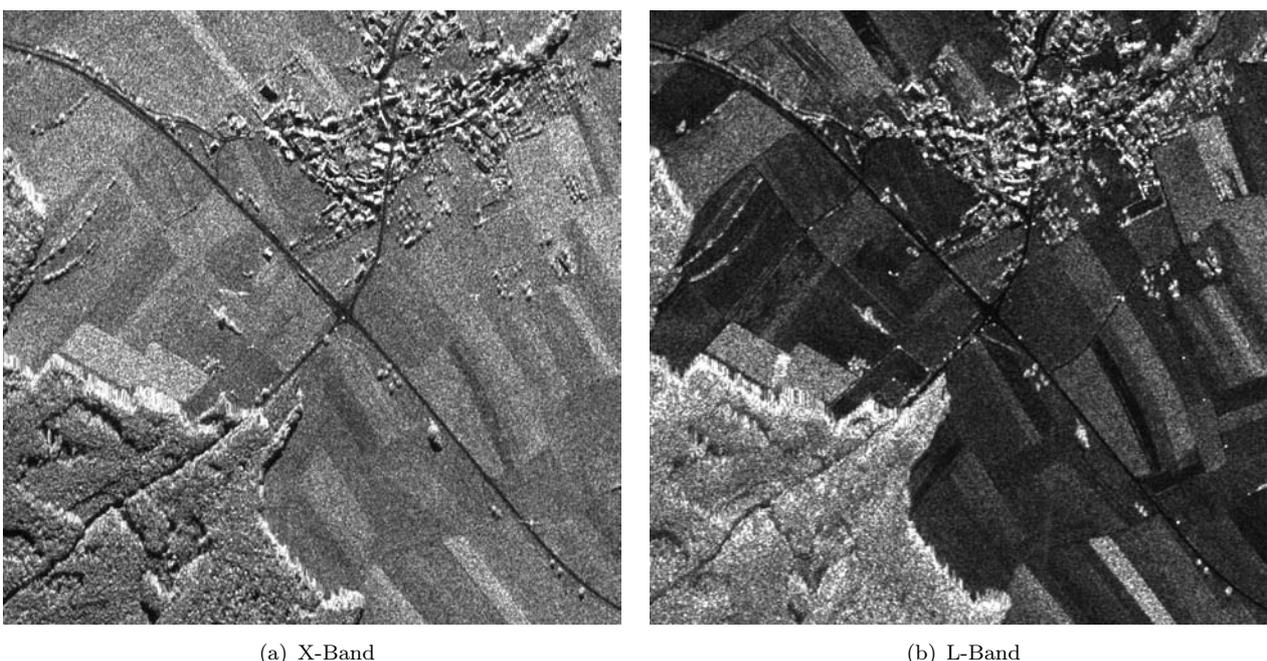


Abbildung 4.1. SAR-Szene in verschiedenen Frequenzen

Erscheinungsbild dieser Objekte in den verschiedenen Radarfrequenzen (X-, C-, L- und P-Band) wird im Folgenden beschrieben.

Straßen erscheinen im SAR generell relativ dunkel bedingt durch ihre relativ glatte Oberfläche im Verhältnis zur Wellenlänge λ des Radars und der daraus folgenden Totalreflexion des Radarsignals am Boden. Aufgrund des Rayleigh-Kriteriums wird eine Oberfläche als glatt definiert, wenn die Standardabweichung der Oberfläche σ_h die Bedingung erfüllt (ULABY et al., 1982)

$$\sigma_h < \frac{\lambda}{8 \cos \theta}, \quad (4.1)$$

wobei θ der Einfallswinkel ist. Für Straßen mit Wellenlängen im P- und L-Band ist diese Bedingung eindeutig erfüllt (vgl. Tabelle 4.1). Die Intensität am Radar setzt sich dadurch nur noch aus thermischem Rauschen zusammen. Im X- und C-Band erscheinen Straßen ebenfalls dunkel. Hier wird aber ein kleiner Anteil der Energie zum Radar zurück reflektiert. Bei extrem rauen, z. B. nicht asphaltierten Straßen kann es dort zu Abweichungen von dem generell dunklen Erscheinungsbild von Straßen kommen.

Felder reflektieren je nach Vegetationsstand und Wassergehalt recht unterschiedlich. Wenn die Wellenlänge ungefähr der Größenordnung des Durchmessers der Äste und Blätter entspricht, überwiegt Volumenstreuung gegenüber der Oberflächenstreuung und die Rückstreuung ist relativ hoch. Insbesondere das X-Band hat im Allgemeinen bei Feldern mit Pflanzen wie Weizen, Sojabohnen etc. eine hohe Rückstreuung. Im L-Band wird tendenziell die Vegetation stärker durchdrungen, so dass die Reflexion teilweise auch vom Oberboden herrührt.

Höhere Vegetation und **Wald** weisen in allen Radarfrequenzen ähnliche Rückstreueigenschaften auf. Es findet Volumenstreuung statt, bei der die Strahlung in Abhängigkeit von der Wellenlänge mehr oder minder tief (L-Band oder X-Band) in die Vegetationsschicht eindringt. Bei einzeln stehenden Bäumen und Waldrändern entsteht Layover, so dass an der dem Sensor zugewandten Seite ein heller Streifen entsteht, der eventuell vorhandene Straßen teilweise oder ganz überstrahlen kann. An der dem Sensor abgewandten Seite der Vegetation kommt es zu Radarschatten, der keine Information über mögliche Straßen enthält.

Die geometrische Auflösung ist ebenfalls abhängig von der Frequenz. Grundsätzlich gilt, dass mit einer kürzeren Wellenlänge eine höhere geometrische Auflösung erzielt werden kann.

In Bezug auf verschiedene Frequenzen kann als Konsequenz für die Abbildungseigenschaften im SAR Folgendes festgehalten werden:

- Asphaltierte Flächen liefern in den gängigen Radarfrequenzbändern (X-, C-, L- und P-Band) nur geringe Rückstreuwerte.
- Aufgrund der höheren geometrischen Auflösung und dem stärkeren Kontrast zur Umgebung weisen kürzere Wellenlängen (z. B. das X-Band) gegenüber längeren Wellenlängen (z. B. dem L-Band) Vorteile für die Extraktion auf.

Band	Frequenz	Wellenlänge	Grenze nach dem Rayleigh-Kriterium ($\theta = 20^\circ$) – ($\theta = 60^\circ$)
<i>P</i>	450 MHz	70 cm	9 cm – 18 cm
<i>L</i>	1.3 GHz	23 cm	3 cm – 5 cm
<i>C</i>	5.3 GHz	5.6 cm	0.7 cm – 1.4 cm
<i>X</i>	9.6 GHz	3 cm	0.4 cm – 0.8 cm
<i>K_u</i>	17 GHz	1.8 cm	0.2 cm – 0.4 cm
<i>K_a</i>	35.6 GHz	0.84 cm	0.1 cm – 0.2 cm

Tabelle 4.1. Grenzen für glatte Oberflächen nach dem Rayleigh-Kriterium für verschiedene Frequenzbänder. Die Grenzen variieren mit dem Einfallswinkel von 20° bis 60° innerhalb der Streifenbreite.

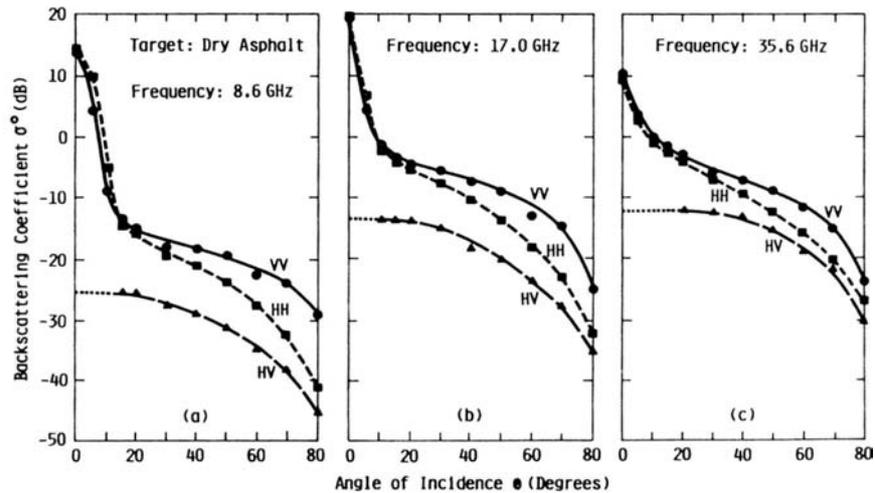


Abbildung 4.2. Rückstreuverhalten von trockenem Asphalt in verschiedenen Frequenzen und Polarisationen. Die Scatterometermessungen im X-Band (a) im K_u -Band (b) und im K_a -Band (c) zeigen den Einfluss des Einfallswinkels auf die Rückstreuung (aus ULABY et al., 1986).

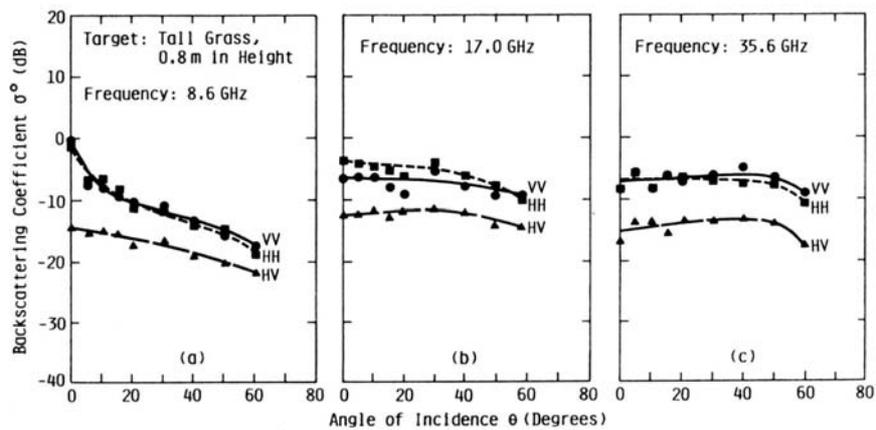


Abbildung 4.3. Rückstreuverhalten von hohem Gras in verschiedenen Frequenzen und Polarisationen. Die Scatterometermessungen im X-Band (a) im K_u -Band (b) und im K_a -Band (c) zeigen den Einfluss des Einfallswinkels auf die Rückstreuung (aus ULABY et al., 1986).

Abbildungseigenschaften für verschiedenen Einfallswinkel

Aufgrund der Topographie und des variierenden Einfallswinkels innerhalb der Streifenbreite ergeben sich unterschiedliche lokale Einfallswinkel. Die Rauigkeit einer Oberfläche variiert nach dem Rayleigh-Kriterium (Gleichung 4.1) z. B. auch hinsichtlich des lokalen Einfallswinkels (vgl. Tabelle 4.1).

Es gilt, je kleiner der Einfallswinkel zum Sensor ist, desto rauer erscheint eine Oberfläche z. B. die von **Straßen** und desto höher wird dadurch die Rückstreuung. Bodenmessungen mit Scatterometern haben dieses Rückstreuverhalten von Straßen bestätigt (vgl. Abbildung 4.2). Bei Straßen, die unter einem extrem kleinen Einfallswinkel ($< 20^\circ$) aufgenommen worden sind, z. B. bei steilen Einfallswinkeln im gebirgigen Gelände, kann es also zu stärkeren Rückstreuungen kommen.

Dies deckt sich ebenfalls mit dem Rayleigh-Kriterium: mit zunehmendem lokalem Einfallswinkel nimmt die wirksame Rauigkeit ab. Bei hohem Gras ist die Abhängigkeit vom Einfallswinkel weniger markant (Abbildung 4.3).

Ein Zusammenhang zwischen lokalem Einfallswinkel und variierenden Rückstreuintensitäten ist hingegen bei der Klasse **Wald** nicht mehr gegeben. Hier herrscht Volumenstreuung mit einem konstanten Rückstreuanteil für alle Einfallswinkel vor.

Generell gilt: Da die Veränderung der Rückstreuintensität mit dem Einfallswinkel bekannt ist, kann dieser Effekt für die jeweilige Landnutzungsklasse mit einer relativen oder absoluten Kalibrierung

(Abschnitt 2.3.3) korrigiert werden. Zum Beispiel kann mit einer speziell für Straßen ausgelegten Einfallswinkelkorrektur dann nicht nur mit dem relativen Merkmal 'dunkel' gearbeitet werden, sondern es können dann auch die radiometrisch korrigierten Messwerte herangezogen werden.

In Bezug auf den Einfallswinkel kann für die Abbildungseigenschaften Folgendes festgehalten werden:

- Die Rückstreuwerte von Straßen sind im Near-Range höher als im Far-Range.
- Mit einer radiometrischen Kalibrierung können auch aus der Stärke der Rückstreuung von Straßen Informationen für die Objektextraktion gewonnen werden.

Abbildungseigenschaften für verschiedene Polarisationen

Die Intensität der Rückstreuung ist von der Polarisation abhängig. Abbildung 4.4 zeigt die Abhängigkeit der Rückstreuintensität einer offenen Landschaft anhand eines Beispiels. Die Bilder wurden so skaliert, dass sie den gleichen Grauwertbereich abbilden [0 - 756], um die Rückstreuwerte untereinander vergleichbar zu machen.

In dem Erscheinungsbild von **Straßen** in den verschiedenen Polarisationen lässt sich beobachten, dass die Rückstreuung im X-Band in der VV-Polarisation geringfügig stärker ist als in der HH-Polarisation. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Rückstreuwerte für Straßen in der VV-Polarisation in allen Frequenzen oberhalb der Rückstreuwerte der HH-Polarisation liegen (Abbildung 4.2). Dieses Verhalten ist sowohl durch experimentelle Ergebnisse (ULABY und DOBSON, 1989) als auch durch theoretische Rückstrahlmodelle (FUNG und CHENG, 2004) belegt. Eine stärkere Rückstreuung in der VV-Polarisation gegenüber anderen Polarisationen konnte auch für andere relativ glatte Flächen wie Wasser und niedrige Vegetation nachgewiesen werden (ULABY und DOBSON, 1989; MÜLLENHOFF und PRINZ, 2004). Am geringsten ist die Rückstreuung von relativ glatten Flächen in den Kreuzpolarisationen (HV, VH). In den kreuzpolarisierten Kanälen zeigen sich grundsätzlich niedrigere Rückstreuwerte, da hier nur die depolarisierte Strahlung registriert wird (vgl. Abbildung 4.4 und 4.2).

Bei **höherer Vegetation** und **Bäumen** sind die Rückstreuwerte in den Gleichpolarisationen ungefähr gleich hoch und fallen deutlich stärker aus als in den kreuzpolarisierten Kanälen (Abbildung 4.3). Der Grund für die Stärke der Rückstreuung liegt darin, dass bei der HH- und VV-Polarisation Doppelreflexionen an Baumstämmen und Ästen vorherrschen. Insbesondere bei vertikaler Polarisation ist dies der Fall, da die vertikale Struktur der Vegetationsschicht dort am stärksten durchdrungen wird. Die Abbildung von Bäumen im L-VV Band ist daher durch eine relativ hohe Intensität gekennzeichnet (Abbildung 4.4(e), Kennzeichnung A). Im Gegensatz dazu wird in den Kreuzpolarisationen (Abbildung 4.4(f), Kennzeichnung A) nur der Anteil der Depolarisation sichtbar. Depolarisierte Strahlung entsteht im Kronenbereich von Bäumen und im Buschwerk durch Zweige und Blätter.

Büsche treten dagegen im L-Band in den Gleichpolarisationen (HH,VV) weniger stark hervor als in den Kreuzpolarisationen, wie z. B. in Abbildung 4.4 bei den Büschen mit der Kennzeichnung B zu sehen ist. Dies lässt den Schluss zu, dass Büsche neben Straßen in den Gleichpolarisationen weniger das Erscheinungsbild von Straßen behindern als in den Kreuzpolarisationen, insbesondere im L-VV-Band hat das Buschwerk (Kennzeichnung B, oben) eine relativ geringe Rückstreuung.

Felder haben einen geringeren depolarisierenden Einfluss auf die Strahlung. Bei höherem Vegetationsstand treten dagegen auch Felder in den kreuzpolarisierten Kanälen stärker hervor. Eine Kombination der polarimetrischen Kanäle des L-Bandes eignet sich daher in diesem Fall sehr gut zur Trennung von Volumenstreuung gegenüber rauen Oberflächen oder Corner-Reflektoren.

Die beiden Kreuzpolarisationen (HV und VH) weisen bei kalibrierten SAR-Systemen identische Rückstreuwerte auf. Infolgedessen kann zur Datenreduktion auf die Kreuzpolarisation VH verzichtet werden.

In Bezug auf verschiedene Polarisationen kann für die Abbildungseigenschaften Folgendes festgehalten werden:

- Straßen weisen in der HH-Polarisation in allen gängigen Radarfrequenzen geringere Rückstreuwerte auf als in der VV-Polarisation.

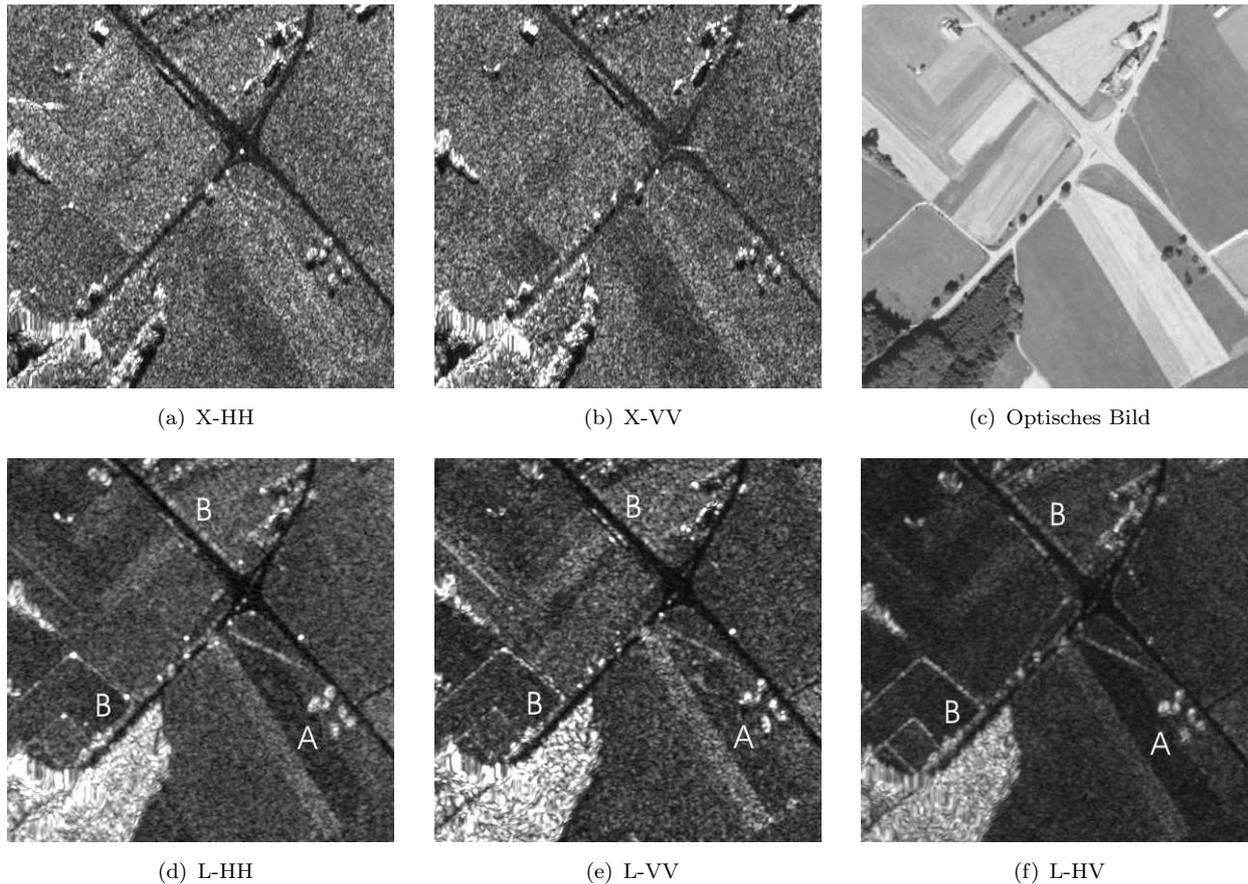


Abbildung 4.4. Beispiele verschiedene Frequenzen und Polarisationen in Ground Range Geometrie

- Das Erscheinungsbild von Bäumen und Büschen ist in der VV- und HH-Polarisation stärker in Stammnähe, so dass dort weniger die Straßenextraktion behindert wird als bei den Kreuzpolarisationen.

4.1.2 Polarimetrische und interferometrische Bilddaten

Die bei der Polarimetrie und der Interferometrie entstehenden Bilddaten beinhalten neben Amplituden- auch Phaseninformationen. Die polarimetrischen und interferometrischen Bilddaten werden in diesem Abschnitt auf ihren Informationsgehalt im Hinblick auf die Extraktion von Straßen untersucht.

Eigenschaften von polarimetrischen Bilddaten

Die Phasenverhältnisse zwischen den Polarisationen enthalten zusätzliche Informationen zu den Intensitäten. Über die Zerlegung der komplexen, vollpolarimetrischen Streumatrix (vgl. Abschnitt 2.5) können Rückschlüsse über physikalische Streuprozesse gezogen werden. Im Folgenden werden für die zwei gängigsten Zerlegungen, die Pauli-Dekomposition und die Dekomposition nach Cloude, die Abbildungseigenschaften für Straßen erörtert.

Mit Hilfe der Pauli-Dekomposition lassen sich drei physikalisch interpretierbare Komponenten berechnen, die den Grad an Einfachreflexionen (Abbildung 4.5(a)), Doppelreflexionen (Abbildung 4.5(c)) und Volumenrückstreuung (Abbildung 4.5(b)) repräsentieren. Abbildung 4.5(d) zeigt für dieses Beispiel die Komponenten der Pauli-Zerlegung als RGB-Komposit. Da bei Straßen der dominierende Rückstreuemechanismus die Einfachreflexion ist, müssten in dem entsprechendem Kanal (blauer Kanal, Abbildung 4.5(a)) hohe Intensitäten für Straßen auftreten.

In dem Beispiel sind die Werte für Einfachreflexion für Straßen allerdings gering. Diese widersprüchliche Tatsache liegt an den niedrigen Rückstreuwerten von Straßen. Bei niedrigen Rückstreuwerten hat

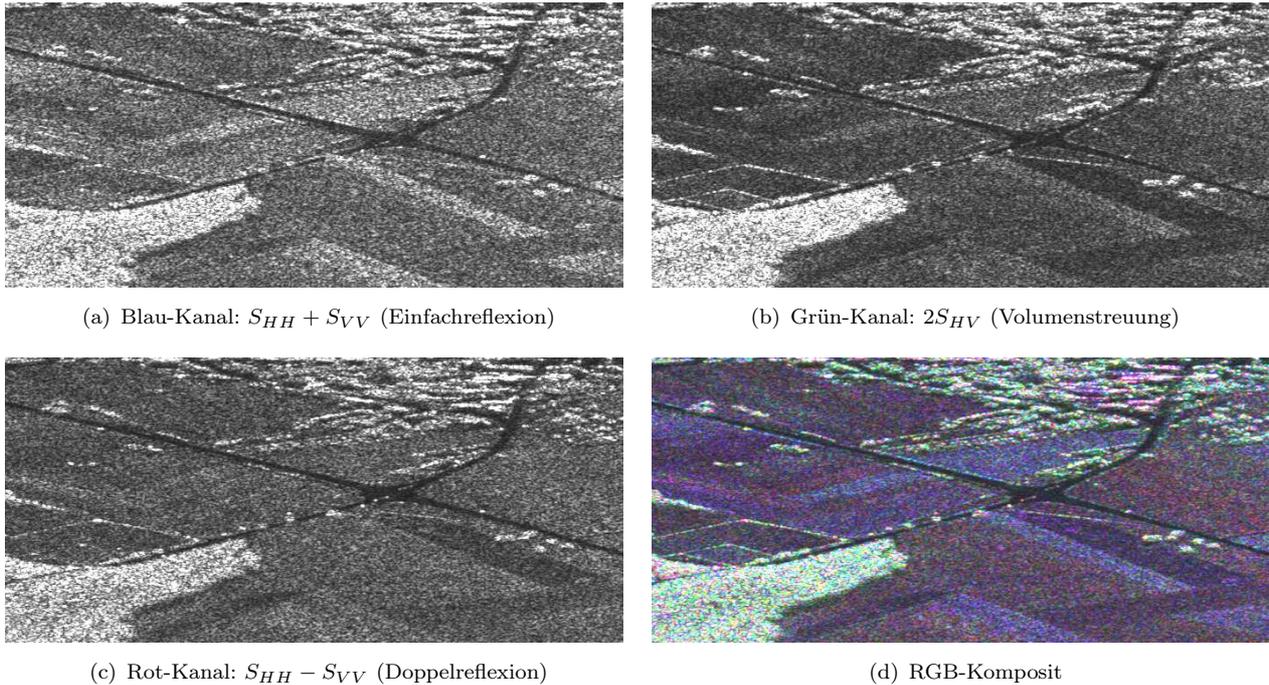


Abbildung 4.5. Komponenten der Pauli-Dekomposition eines vollpolarimetrischen E-SAR-Datensatzes in Schrägsichtgeometrie

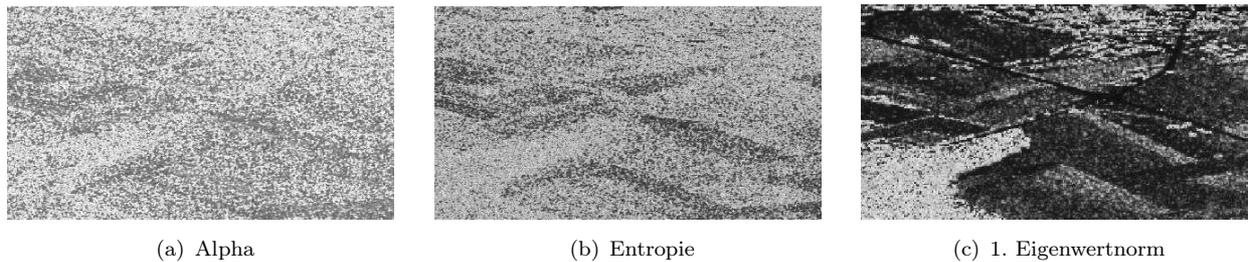


Abbildung 4.6. Bilddaten der Cloude-Dekomposition

das thermische Rauschen einen relativ hohen Anteil am Signal, so dass auch die Phase relativ stark ver-rauscht ist. Durch dieses so genannte Phasenrauschen liegt in den geringen Signalen keine verwertbare Phaseninformation mehr vor. Dies gilt insbesondere für glatte Oberflächen mit hohen Dielektrizitätskonstanten (wie z. B. Wasser), wo es zu vollständigem Phasenrauschen kommt. Aber auch für Straßen konnte dieser Effekt beobachtet werden (THIEL, 2005). Als Folge des vollständigen Phasenrauschens und der niedrigen Rückstreuwerte ist der Anteil der Einfachreflexion von Straßen gering, wie man dem Beispiel entnehmen kann.

Bei der Dekomposition nach Cloude werden die Komponenten Entropie, Alpha und Anisotropie nach CLOUDE und POTTIER (1996, 1997) basierend auf den Eigenwertvektoren (vgl. Abschnitt 2.5) berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Um das Phasenrauschen zu reduzieren wird hier über mehrere Bodenpunkte gemittelt. Dies führt jedoch zu einer Verringerung der geometrischen Auflösung, die z. B. im Falle des L-Bandes für die Detektion von Straßen nicht mehr ausreicht.

Für eine Auswertung der Polarimetrie in Bezug auf Straßen ist daher Folgendes festzuhalten:

- Durch die geringe Rückstreuung und das dadurch relativ hohe, thermische Rauschen liegen für Straßen keine bzw. nur eine sehr geringe verwertbare Phaseninformationen vor.

Eigenschaften von interferometrischen Bilddaten

Im Folgenden werden einige, wesentliche Merkmale für Straßen in interferometrischen Produkten wie dem InSAR-Betragsbild, dem Kohärenzbild und den Höhenwerten betrachtet.

Das InSAR-Betragsbild ($|u_1 \cdot u_2^*|$) eines interferometrischen Datensatzes ähnelt dem Intensitäts- bzw. Amplitudenbild eines einfach aufgenommenen SAR-Datensatzes. Asphaltierte Flächen wie Straßen und Parkplätze erscheinen hier dunkel. Das Kohärenzbetragsbild liefert eine Messung für die enthaltenen Ähnlichkeiten der beiden Datensätze. Es ist stark mit dem InSAR-Betragsbild korreliert. Straßen haben in dem Kohärenzbetragsbild geringe Werte. Der Grund liegt darin, dass sich auch hier das Phasenrauschen bei Flächen mit geringen Rückstreuwerten auf die Stabilität der interferometrischen Phase auswirkt. Die Kohärenzwerte können unter der Voraussetzung, dass angrenzende Objekte höhere Kohärenzwerte aufweisen, Informationen über lineare Objekte enthalten (HELLWICH und STRECK, 1996; HELLWICH et al., 1996). Um das Phasenrauschen zu reduzieren, wird allerdings auch bei der Berechnung der Kohärenz über mehrere Pixel hinweg gemittelt, so dass sich die Auflösung im Vergleich zu den originalen Bilddaten erheblich verschlechtert.

Mit der niedrigen Kohärenz sind auch die Höhenwerte verrauscht. Dadurch sind auch die interferometrischen Höhenwerte für Straßen weniger für die Extraktion geeignet.

Für eine Auswertung interferometrischer Produkte in Bezug auf Straßen ist Folgendes festzuhalten:

- Straßen erscheinen im InSAR-Betragsbild ähnlich wie in Intensitäts- und Amplitudenbildern.
- Straßen besitzen in der Kohärenz geringe Werte.
- Trotz der niedrigen Kohärenz sind Informationen über lineare Strukturen enthalten, allerdings in reduzierter Auflösung.

4.1.3 Schlussfolgerungen für die Datenauswahl

Ausgehend von den in den vorangegangenen Abschnitten erläuterten Eigenschaften von Straßen in verschiedenen SAR-Bilddaten werden hier einige Empfehlungen und Anforderungen an geeignete Daten für die Extraktion von Straßen zusammengestellt.

Auswahl von Frequenzen und Polarisationen: Die Rückstreuwerte von Straßen sind in allen Radarfrequenzen niedrig. In den VV-polarisierten Daten sind sie geringfügig höher als in HH-polarisierten Daten. Für die Extraktion von Straßen aus Daten des X-Bandes ist daher die HH-Polarisation zu empfehlen. Der Kontrast der dunkel reflektierenden Straße zur Umgebung ist dort in den meisten Fällen höher und Linien können somit sicherer extrahiert werden. Im L-Band erscheinen Straßen generell dunkler als im X-Band und weisen in den gleichpolarisierten Kanälen einen guten Kontrast zur Umgebung auf. In den Kreuzpolarisationen (HV, VH) ist der Kontrast schwächer als in den gleichpolarisierten Kanälen und Straßen werden durch angrenzende Vegetation stärker verdeckt. Für die Extraktion von Straßen sollte die Verdeckung der Straße durch Vegetation so gering wie möglich sein. Daher empfiehlt es sich im L-Band die VV-Polarisation zu bevorzugen, da die Vegetation besser durchdrungen wird.

Einfallswinkelabhängigkeit: Die Intensität der Rückstreuung von Straßen nimmt mit zunehmendem Einfallswinkel ab. Der Ort, wo die Straße im Streifen auftritt, ist bei der Extraktion von Straßen zu berücksichtigen. Mit einer Korrektur der Einfallswinkelabhängigkeit der Grauwerte der Klasse Straße könnten für die Extraktion einheitliche Parameter für den Grauwert von Straßen eingestellt werden.

Polarimetrische und Interferometrische Bilddaten: Polarimetrische und interferometrische Auswertungen eignen sich generell eher für Objekte mit größerer Ausdehnung als für schmale, linienförmige Objekte. Denn aufgrund des Phasenrauschens muss über mehrere Pixel hinweg gemittelt werden. Durch dieses Vorgehen wird jedoch die Auflösung und damit die Sichtbarkeit gerade für schmale Objekte erheblich reduziert. Bei Straßen kommt entscheidend hinzu, dass sie aufgrund ihrer glatten Oberfläche ein so hohes Rauschen der Phasenwerte aufweisen, dass keine auswertbare Phaseninformation mehr vorliegt. Bei flächenhaften Objekten können allerdings die verschiedenen polarimetrischen Eigenschaften gut für eine Klassifikation genutzt werden.

4.2 Modifikation des TUM-LOREX-Ansatzes für SAR-Bilddaten

Diese Arbeit setzt auf einer bestehenden Software zur Straßenextraktion aus optischen Bilddaten der Technischen Universität München (TUM-LOREX) auf. Der TUM-LOREX-Ansatz sieht einen sequentiellen Ablauf von einzelnen Operatoren vor. Dieser sequentielle Ablauf der Extraktion wird auch in dieser Arbeit fortgeführt. In diesem Abschnitt wird ein Überblick über den für SAR-Bilddaten modifizierten Ablauf der Straßenextraktion gegeben. Zusätzliche Modellerweiterungen werden in Kapitel 5 und 6 vorgestellt.

Nach der Einteilung aus Abschnitt 3.2 kann die Extraktion grundsätzlich in zwei Phasen unterteilt werden. Die Phase 1 besteht aus der Linienextraktion inklusive der Nachbearbeitung und der Bewertung der Linien. Für die Phase 2 ergeben sich mit der Auswahl von Startstücken und dem Netzwerkaufbau grundsätzlich die gleichen Aufgaben wie für optische Bilddaten. Sie ist eher als datenunabhängig einzustufen. Dadurch können dort prinzipiell die gleichen Verfahren wie bei optischen Bilddaten eingesetzt werden. Die Modifikation der TUM-LOREX-Software konzentriert sich daher auf die Phase 1.

Die Neuerungen und Anpassungen für SAR-Bilddaten wurden in den Extraktionsablauf des TUM-LOREX-Ansatzes integriert (Abbildung 4.7). Im Folgenden wird ein Überblick über die neue, modifizierte Extraktionsstrategie für SAR-Bilddaten gegeben. Die SAR-spezifischen Neuerungen und Anpassungen werden in den nachfolgenden Abschnitten (4.3, 4.4) näher erläutert. Der TUM-LOREX-Ansatz wurde bereits in Abschnitt 3.3 dargestellt.

Auswahl der Datengrundlage

Basierend auf den Überlegungen im vorangegangenen Abschnitt sollte eine Vorauswahl der SAR-Bilddaten stattfinden. In der Analyse der potentiellen SAR-Datengrundlagen (Abschnitt 4.1) hat sich gezeigt, dass vor allem Betragsbilder hoch auflösender SAR-Sensoren sinnvoll für eine Detektion von Straßen sind. Ebenso haben sich im X-Band die HH-Polarisation und im L-Band die VV-Polarisation als geeignet herausgestellt. Auch die Auswertung mehrerer Frequenzen scheint sinnvoll, damit ergänzende Informationen die Extraktion stützen können. Die ausgewählten Bilddaten sind für die Straßenextraktion weiter aufzubereiten.

SAR-spezifische Vorverarbeitung

Für die Bereitstellung einer geeigneten Datengrundlage werden die für SAR-Bilddaten üblichen Vorverarbeitungsschritte für die Extraktion von Straßen optimiert. Im Rahmen dieser an Straßen angepassten, SAR-spezifischen Vorverarbeitung spielen insbesondere folgende Korrekturen eine Rolle

- Korrektur der Einfallswinkelabhängigkeit
- Reduzierung des Specklerausens und
- Skalierung der SAR-Messwerte.

Die Reduzierung des Specklerausens und die Skalierung der SAR-Messwerte erfolgen vor allem im Hinblick auf die verwendete Linienextraktion. Diese Vorverarbeitungsschritte werden in Abschnitt 4.3 näher erläutert.

Ausrichtung auf relevante Bildbereiche

Im Rahmen der Extraktion gilt es, zunächst die sicheren und leichter zu extrahierenden Straßenstücke zu detektieren, um ausgehend von diesen Straßenstücken, das Straßennetz weiter zu vervollständigen. Zur Vermeidung der Extraktion von unkorrekten Hypothesen wird der Suchraum vor der Extraktion auf ländliche Bereiche ausgerichtet. Hierfür erfolgt eine Klassifikation der Kontextgebiete „Wald“, „Siedlung“ und „offene Landschaft“. Zur Klassifikation werden die Merkmale dieser Gebiete im X- und L-Band herangezogen. Zur weiteren Eingrenzung des Suchraums erfolgt eine Segmentierung niedriger Grauwertbereiche. Durch diese Eingrenzungen der SAR-Szene auf potentielle Straßenregionen wird die Extraktion von unkorrekten Hypothesen reduziert.

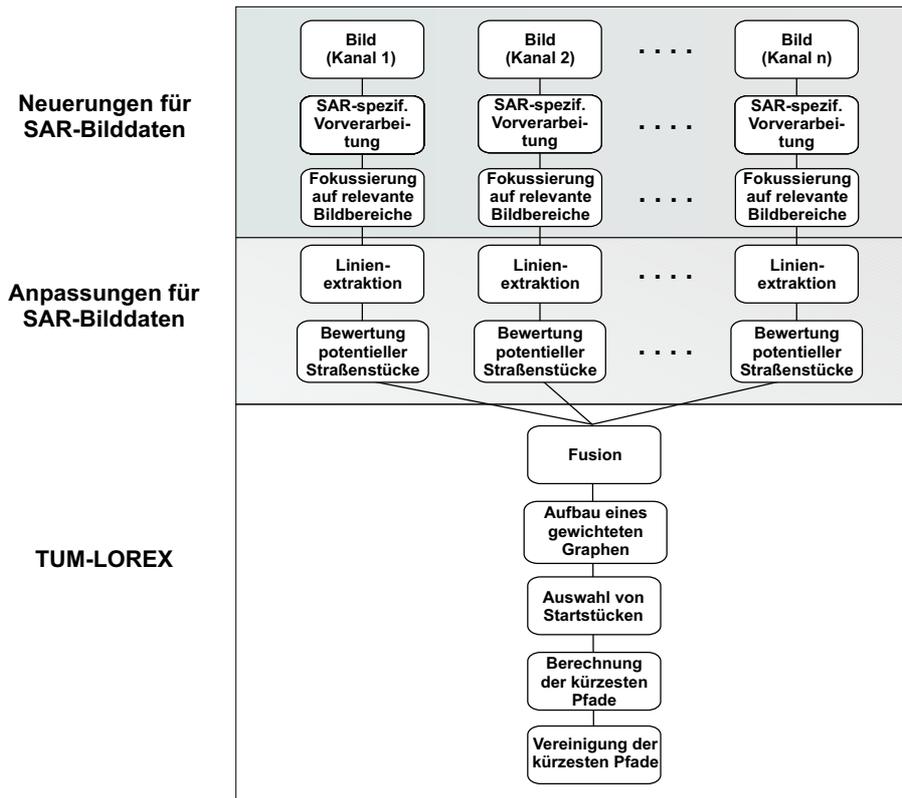


Abbildung 4.7. Modifizierte Extraktionsstrategie für SAR-Bilddaten

Linienextraktion

Die Extraktion von Linien erfolgt im TUM-LOREX-Ansatz mit dem Steger-Algorithmus, der in Anhang A.2 genauer beschrieben ist. Für die Linienextraktion aus SAR-Bilddaten existieren, wie in Abschnitt 3.2.2 gezeigt wurde, unterschiedliche Herangehensweisen. Es können gradientenbasierte Linienoperatoren auf bereits Speckle-reduzierten Bilddaten oder SAR-spezifische Linienoperatoren verwendet werden. Der differential-geometrische Steger-Algorithmus des TUM-LOREX-Ansatzes bietet den Vorteil, dass er richtungsunabhängig, robust, subpixelgenau und über mehrere Breiten hinweg Linien extrahieren kann. Deshalb wird er auch in dieser Arbeit verwendet. Als Voraussetzung für seine Anwendung wird in der Vorverarbeitung der Speckle weitestgehend reduziert. In Abschnitt 4.3.2 werden entsprechende Maßnahmen zur Speckle-Reduktion untersucht.

Durch die Extraktion von dunklen Linien werden vor allem Hypothesen für Straßen, Flüsse und Radarschatten extrahiert. Mit der Linienextraktion ist die Extraktion von Hypothesen für Straßen abgeschlossen.

Bewertung potentieller Straßenstücke

Aus der Menge aller Hypothesen werden mit Hilfe der Bewertungsmaße des TUM-LOREX-Ansatzes schrittweise geeignete Kandidaten ausgewählt (vgl. Abschnitt 3.3). In diese Bewertung wurde zusätzlich der mittlere Grauwert als Bewertungsmaß für eine SAR-spezifische Bewertung integriert. Durch die niedrige Rückstreuung von Straßen in allen Radarfrequenzen dient dieses Maß insbesondere zur Eliminierung unkorrekter Hypothesen. Die Bewertung der mittleren Grauwerte erfolgt dabei ebenso wie bei den übrigen Bewertungsmaßen über eine Fuzzy-Funktion. Hypothesen mit einem mittleren Grauwert größer als b in Abbildung 4.8 werden verworfen.

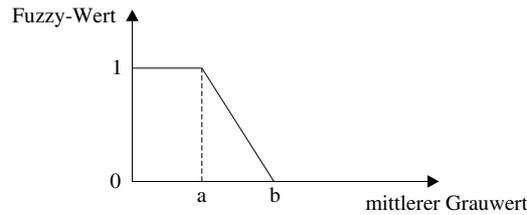


Abbildung 4.8. Fuzzyfunktion zur Bewertung des Bewertungsmaßes *mittlerer Grauwert*

Fusion von potentiellen Straßenstücken aus verschiedenen SAR-Bilddaten

Aufgrund der teilweise eingeschränkten Sichtbarkeit von Straßen im Bild durch Verdeckungen und Überstrahlungen angrenzender Objekte sowie durch unterschiedliche Kontrastverhältnisse können im Allgemeinen nicht alle Teile des Straßennetzes vollständig aus einem Bild extrahiert werden. Durch die Verwendung verschiedener SAR-Bilddaten (z. B. verschiedener Frequenzen oder Beleuchtungsrichtungen) können zusätzliche Hypothesen extrahiert werden, wodurch die Straßenextraktion zuverlässiger wird. In dieser Arbeit werden zwei Möglichkeiten der Fusion untersucht. Zum einen werden potentielle Straßenstücke von zwei verschiedenen Frequenzen (X- und L-Band) extrahiert und miteinander fusioniert, zum anderen werden Straßenstücke, die durch unterschiedliche Parametereinstellungen bei der Linienextraktion erzeugt wurden, miteinander fusioniert.

Generierung des Straßennetzes

Nach der Fusion verschiedener Bildinformation findet die Generierung des Straßennetzwerkes statt. Die Herstellung des Straßennetzwerkes basiert, soweit sie dieses Kapitel betrifft, auf den Algorithmen des TUM-LOREX-Ansatzes (Abschnitt 3.3). Die Netzwerkgenerierung umfasst

- den Aufbau eines gewichteten Graphen,
- die Auswahl von Startstücken,
- die Berechnung der kürzesten Pfade und
- die Vereinigung der kürzesten Pfade.

4.3 SAR-spezifische Vorverarbeitung – Anpassungen an Straßen

In diesem Abschnitt werden einige Vorverarbeitungsschritte zur Aufbereitung von SAR-Daten für die Straßenextraktion untersucht. Die hier vorgestellten Vorgehensweisen zur Vorverarbeitung beziehen sich auf SAR-Daten, bei denen Datensätze im X- und L-Band sowie digitale Oberflächenmodelle zur Berechnung der lokalen Einfallswinkel vorliegen. Abbildung 4.9 gibt einen Überblick über die Reihenfolge der einzelnen Verarbeitungsschritte. Als erstes wird eine Korrektur der Einfallswinkelabhängigkeit der Grauwerte vorgenommen (Abschnitt 4.3.1). Hierfür wird zunächst geprüft, ob ein signifikanter Near-Far-Range Intensitätsabfall für Straßen vorliegt und inwieweit diese Abhängigkeit der Grauwerte vom Einfallswinkel für die Bildauswertung korrigiert werden muss. Der nächste Schritt ist die Reduzierung des Specklerausens (Abschnitt 4.3.2). Zuletzt werden die verschiedenen Datenskalierungen für die Straßenextraktion in Abschnitt 4.3.3 untersucht.

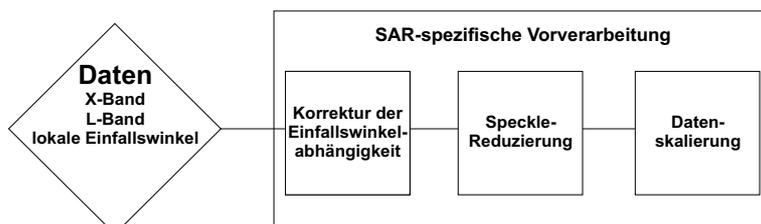


Abbildung 4.9. Schritte zur Vorverarbeitung der Daten

4.3.1 Korrektur der Einfallswinkelabhängigkeit

Die Rückstreuwerte von SAR-Bilddaten unterliegen generell einem Near-Far-Range Intensitätsabfall, d. h. die Intensität der Rückstreuung nimmt bei ansonsten gleichen Bedingungen zum Far-Range hin ab. Dieser Intensitätsabfall lässt sich auch bei Straßen beobachten. In Abbildung 4.10 sind die Rückstreuwerte (DN) von Straßen im X-Band für einen E-SAR Streifen in Abhängigkeit vom lokalen Einfallswinkel aufgetragen. Um die Rückstreuwerte für die Detektion von Straßen korrekt zu nutzen, muss diese Abhängigkeit vom Einfallswinkel korrigiert oder bei der Extraktion mit berücksichtigt werden.

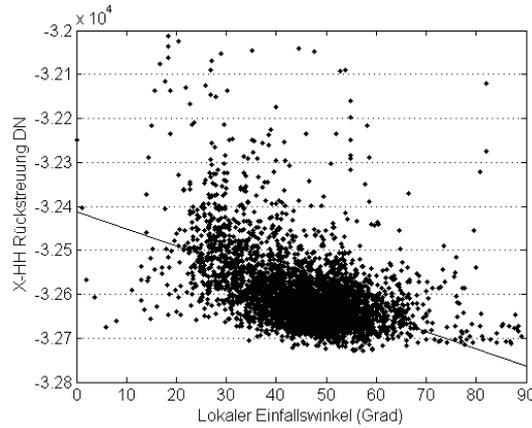


Abbildung 4.10. Abhängigkeit der Rückstreuwerte vom lokalen Einfallswinkel für Straßen im X-Band; berechnet aus einem Aufnahmestreifen des E-SAR Sensors

Standardkorrektur

Bei der Verarbeitung von E-SAR-Daten wird der Intensitätsabfall üblicherweise mit der absoluten radiometrischen Korrektur der Rückstreuwerte korrigiert. Dabei werden die Rückstreuwerte (DN) zunächst logarithmiert und mit Hilfe der absoluten Kalibrierungskonstanten K in so genannte *Beta-Null* (β^0) Werte überführt. Mit einer Sinusfunktion wird dann die Abhängigkeit vom lokalen Einfallswinkel θ_{loc} korrigiert:

$$\beta^0 = 10 \log (DN + 32768)^2 + K \quad (4.2)$$

$$\sigma^0 = \beta_0 \cdot \sin \theta_{loc}. \quad (4.3)$$

Bei den Beta-Null Werten (Abbildung 4.11(a)) kommt es zu einem signifikanten linearen Intensitätsabfall von rund 10 dB vom Near- zum Far-Range. Dieser Intensitätsabfall sollte eigentlich mit der absoluten radiometrischen Kalibrierung auf Sigma-Null für E-SAR Daten korrigiert worden sein.

Wie sich aber in Abbildung 4.11(b) zeigt, liegt auch bei den absolut radiometrisch kalibrierten Werten noch ein Intensitätsabfall vor. Er wird sogar noch auf einen Umfang von rund 20 dB verstärkt.

Die Ursache für die fehlerhafte Korrektur der Daten liegt in der Grundannahme, dass von einer Lambert'schen Reflexion, d. h. einer diffusen Streuung unabhängig von der Richtung, ausgegangen wird. Für diese Annahme ist eine Korrektur mit einer Sinusfunktion ausreichend. Eine diffuse Streuung liegt, im Falle der mehr oder weniger gerichteten Streuung bei Straßen, allerdings nicht vor.

Verbesserte Korrekturen

Im Folgenden wird eine Verbesserung der Korrektur vorgeschlagen. Eine Vorgehensweise wäre physikalisch basierte Korrekturansätze zu verwenden. Diese Modelle erfordern allerdings eine umfangreiche Parametrisierung mit den Eigenschaften der Landoberfläche (z. B. Landbedeckung, Boden- und Vegetationseigenschaften). Solche Parameter stehen aber in der Regel in einem Vorverarbeitungsschritt nicht zur Verfügung, sondern sind meistens das eigentliche Ziel der Anwendungen. Eine andere Vorgehensweise wären empirische Modellansätze, die weniger detailliertes Wissen über die Oberflächentypen

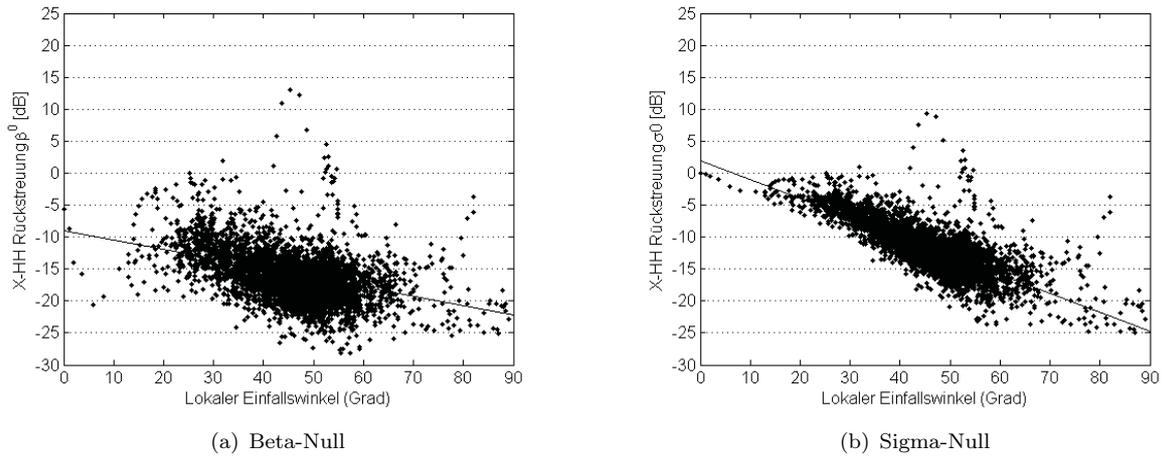


Abbildung 4.11. Korrektur der Rückstreuwerte mit a) nach Gleichung 4.2 und b) nach Gleichung 4.3

benötigen. BAYER (1990) und HEROLD et al. (2000b) schlagen zur Korrektur der Reliefeinflüsse einen empirischen Modellansatz vor, der die Abhängigkeit der Radarrückstreuintensität vom lokalen Einfallswinkel über den Kosinus korrigiert. Als Erweiterung zu der einfachen Kosinuskorrektur für einen Lambert'schen Streuer

$$\sigma^0[dB] = \beta^0 \cdot \cos \theta_{loc}, \quad (4.4)$$

fügen sie einen Exponenten q ein

$$\sigma^0[dB] = \beta^0 \cdot \cos^q \theta_{loc}, \quad (4.5)$$

der die Steigung der zu ermittelnden Regressionsgeraden der Landnutzungsklassen enthält. Mit dieser Formel wird der Near-Far-Range Intensitätsabfall individuell für jede Landnutzungsklasse korrigiert.

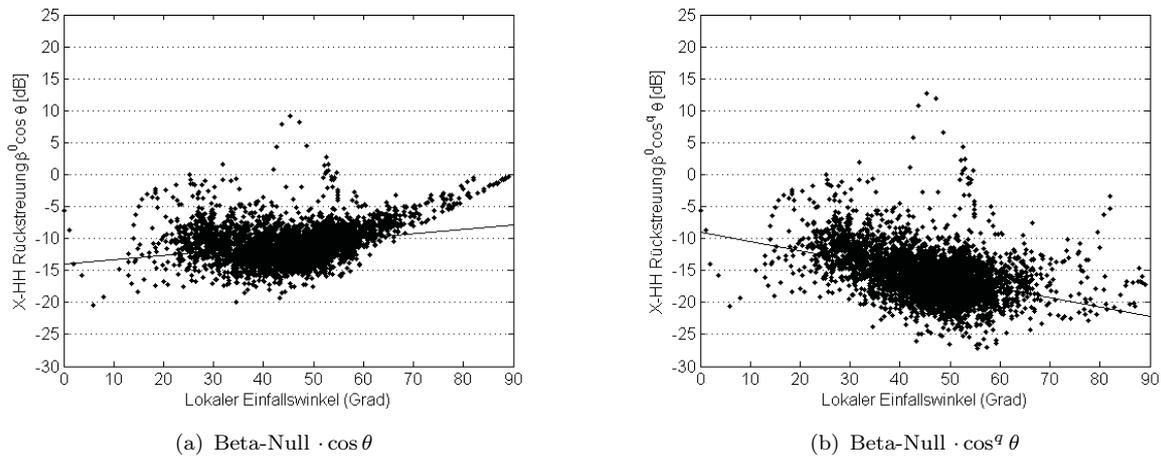


Abbildung 4.12. Korrektur der Rückstreuwerte mit a) einer einfachen Kosinusfunktion nach Gl. 4.4 und mit b) einer erweiterten Kosinusfunktion nach Gl. 4.5

Abbildung 4.12 zeigt die Anwendung dieser Korrekturverfahren für Straßen. Der Intensitätsabfall der Grauwerte wird durch die Transformation bei beiden Kosinuskorrekturen allerdings ebenfalls nicht ausreichend korrigiert. Bei der Korrektur nach Gleichung 4.4 (Abbildung 4.12(a)) zeigt sich ein Anstieg der Grauwerte insbesondere bei größeren Einfallswinkeln. Bei der Korrektur nach Gleichung 4.5 (Abbildung 4.12(b)) bleibt ein Intensitätsabfall von rund 15 dB bestehen.

In Anlehnung an diesen Ansatz wird daher ein Verfahren vorgeschlagen, bei dem die Grauwerte um die Steigung der Regressionsgeraden reduziert werden. Dadurch werden die Grauwerte auf ein einheitliches Grauwertniveau transformiert (Abbildung 4.13), mit den Formeln

$$\beta_{lin}^0[dB] = \beta^0 - q \cdot \theta_{loc} \quad \text{bzw.} \quad \sigma_{lin}^0[dB] = \sigma^0 - q \cdot \theta_{loc}. \quad (4.6)$$

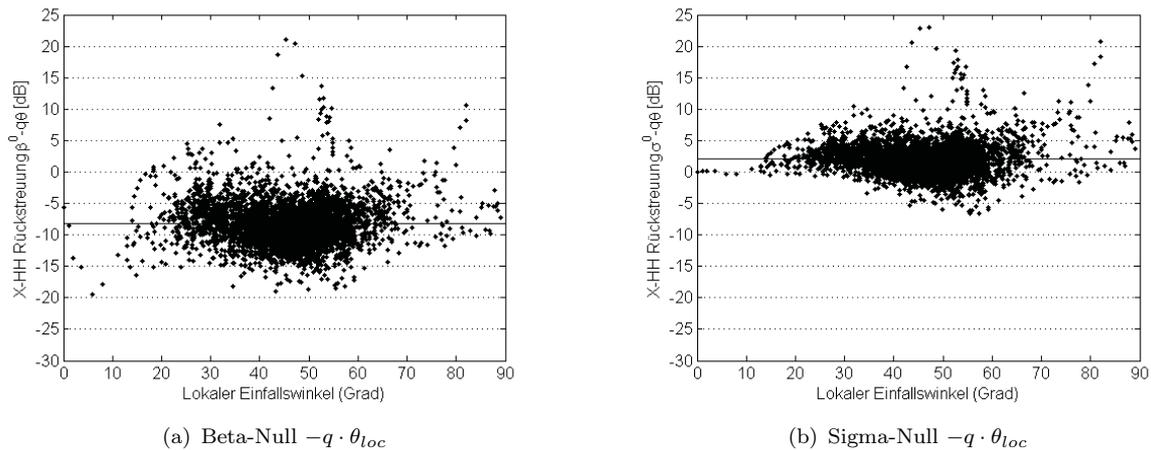


Abbildung 4.13. Rückstreuwerte korrigiert um die Steigung der Regressionsgeraden nach Gleichung 4.6 a) β_{lin}^0 und b) σ_{lin}^0

Konsequenzen für die Einfallswinkelkorrektur von Straßen

Für die Anwendung der vorgeschlagenen, straßenspezifischen Einfallswinkelkorrektur ist jedoch die Kenntnis der linearen Steigung vonnöten. Diese zu berechnen ist im Allgemeinen aber nicht möglich, da in der Regel die Informationen über die Lage der Straßen nicht vorliegen. Bei einem Vergleich mit weiteren E-SAR Streifen hat sich aber herausgestellt, dass sich die Steigung des einfallswinkelabhängigen Intensitätsabfalls für alle getesteten Streifen in derselben Größenordnung bewegt. So ist es denkbar, zumindest mit einer Hypothese für die mittlere Steigung, den einfallswinkelabhängigen Intensitätsabfall von Straßen vor der Extraktion zu minimieren. Für eine allgemeingültige Korrektur der Steigung sind weitere Untersuchungen notwendig. Als Zahlenwert ergibt sich ein Steigungsfaktor von -0.1 für die Korrektur von Beta-Null Werten bzw. -0.25 für die Korrektur von Sigma-Null Werten.

Neben den Rückstreuwerten von Straßen ist aber auch ihr Kontrast zur Umgebung wichtig. Der Intensitätsabfall für niedrige Vegetation hat bei E-SAR Daten im L-Band ein recht ähnliches Verhalten wie der von Straßen (HEROLD et al., 2000b). Auch dort ist für Beta-Null Werte eine Steigung von -0.1 aufgetreten. Niedrige Vegetation und Straßen ändern sich also im gleichen Verhältnis, so dass der Kontrast gleich bleibt. Aufgrund des Kontrastes ist also keine Korrektur für die Detektion von Linien erforderlich. Das Ziel einer Korrektur der Einfallswinkelabhängigkeit der Rückstreuwerte von Straßen liegt damit in der Überführung auf Grauwerte mit einem konstanten Grauwertniveau für alle Einfallswinkel. Dadurch lässt sich bei der Straßenextraktion der Schwellwert für den mittleren Grauwert von Straßen präziser einstellen und hilft so Fehlextraktionen zu reduzieren. Alternativ ließe sich diese Abhängigkeit auch durch eine Schwellwertfunktion in Abhängigkeit vom lokalen Einfallswinkel direkt bei der Extraktion berücksichtigen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden:

- Durch die Ermittlung einer mittleren Steigung für Straßenwerte kann der Near-Far-Range Intensitätsabfall pauschal vorweg reduziert werden. In dieser Arbeit werden daher die Rückstreuwerte der E-SAR Daten mit einer angenommenen mittleren Steigung von -0.1 für Beta-Null Werte und -0.25 für Sigma-Null Werte korrigiert.
- Die standardmäßig vorgesehene Kalibrierung der Rückstreuwerte auf Sigma-Null ist ohne zusätzliche Korrektur aufgrund der starken Einfallswinkelabhängigkeit für Straßen nicht zu empfehlen. Falls keine näheren Informationen über die Abhängigkeit der Straßen Grauwerte vom Einfallswinkel vorliegen, sollten Amplituden-, Intensitäts- oder logarithmierte Werte für die Straßenextraktion genutzt werden.
- Für satellitengetragene Systeme ist die Variation des Einfallswinkels über die Streifenbreite deutlich geringer und daher vernachlässigbar. Eine Korrektur muss dort wahrscheinlich höchstens im gebirgigen Gelände angebracht werden.

4.3.2 Reduzierung des Specklerausens für die Linienextraktion

In dieser Arbeit wird der Steger-Algorithmus (Anhang A.2) zur Linienextraktion herangezogen, da er den Vorteil gegenüber anderen Linienoperatoren besitzt, richtungsunabhängig, robust, subpixelgenau und über mehrere Breiten hinweg Linien zu extrahieren. Der Linienoperator basiert auf Ableitungen der Bildfunktion. Deshalb sollte für seine Anwendung auf SAR-Bilddaten das Specklerausens weitestgehend reduziert sein und ein annähernd gaußverteiltes Bildrauschen vorliegen. Bereits Speckle-reduziert sind z. B. gefilterte Singlelookbilder oder Multilookbilder.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden gefilterte Singlelookbilder und Multilookbilder im Hinblick auf ihre Eignung für die Extraktion von Straßen untersucht. Bei der Untersuchung geht es darum, eine Speckle-reduzierte Datengrundlage zu schaffen, bei der die Linienextraktion in erster Linie möglichst vollständige und in zweiter Linie möglichst korrekte Ergebnisse liefert. Tests mit unterschiedlichen Speckle-reduzierten Daten haben gezeigt, dass Multilookbilder diese Anforderungen besser erfüllen als gefilterte Singlelookbilder. Bei gefilterten Singlelookbildern, z. B. mit dem Frost-Filter (FROST et al., 1982) oder dem Refined Lee-Filter (LEE, 1981a), kommt es zu einer vermehrten Anzahl von falschen und fehlenden Extraktionen. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass adaptive Speckle-Filter die Bilddaten vor allem im Bereich von Kanten weniger stark glätten. Die Eignung von Multilookbildern zur Reduzierung des Specklerausens wurde bereits in Abschnitt 2.4.3 diskutiert. Sie haben den Vorteil, dass sie sich bereits ab einer Anzahl von vier Looks in annähernd gaußverteiltes Rauschen überführen lassen (ULABY et al., 1986). Abbildung 4.14(a) zeigt für ein Multilook-Amplitudenbild die Ergebnisse der Steger-Linienextraktion. Nahezu alle Straßen konnten durch die Linienextraktion erfasst werden. Eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung des Specklerausens besteht in der Logarithmierung der Daten. Durch die Logarithmierung von Intensitätsdaten wird das multiplikative Specklerausens gemäß dem klassischen Speckle-Modell (Rayleigh-Echo-Modell, Abschnitt 2.4.2) in ein annähernd additives Rauschen überführt. Bei der Verwendung von logarithmierten Multilookdaten als Datengrundlage für die Linienextraktion wird eine ebenso hohe Vollständigkeit wie für Multilook-Amplitudenbilder erreicht, verbunden mit einer erheblich geringeren Anzahl von Fehlextraktionen (Abbildung 4.14(b)). Bei der Logarithmierung selbst handelt es sich jedoch um eine Skalierung der Bilddaten und nicht um einen Speckle-Filter. Diese Skalierung und weitere werden im Hinblick auf ihre Eignung für die Straßenextraktion im folgenden Abschnitt näher erörtert.

Für die Linienextraktion ist festzuhalten, dass sowohl mit Multilook-Amplitudendaten als auch mit logarithmierten Multilook-Intensitätsdaten eine hohe Vollständigkeit bei der Detektion von Straßen mit dem Steger-Linienoperator erreicht werden kann.



(a) Extrahierte Linien der Multilook-Amplitude



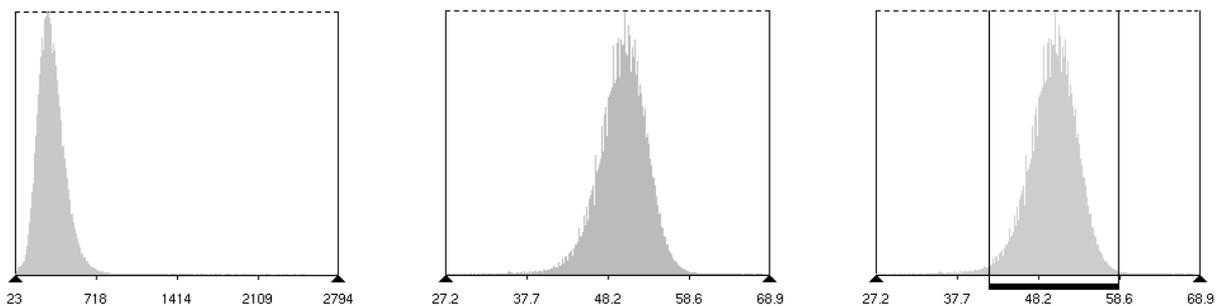
(b) Extrahierte Linien der Multilook-Log-Intensität

Abbildung 4.14. Vergleich der Steger-Linienextraktion auf Multilook-Amplitudendaten und Log-Intensitätsbilddaten

4.3.3 Skalierung der SAR-Messwerte für die Straßenextraktion

Bei einer Skalierung von Messwerten werden die Werte in einen anderen Wertebereich überführt. Eine passende Skalierung kann beispielsweise bewirken, dass sich Kontraste verstärken und so die Extraktion von gesuchten Objekten erleichtert wird. SAR-Messwerte zeichnen sich durch einen extrem hohen Dynamikumfang aus. Als Dynamikumfang bezeichnet man den Bereich zwischen den maximalen und minimalen Signalwerten. Abbildung 4.15(a) zeigt die Verteilung der SAR-Messwerte für einen Bildausschnitt. Für die Reduzierung des Dynamikumfangs haben sich nichtlineare Skalierungen durchgesetzt, wie z. B. die Logarithmierung (Abbildung 4.15(b)). Nichtlineare Skalierungen haben den Vorteil, dass der gesamte Dynamikbereich auf einen wesentlich geringeren Umfang abgebildet werden kann. Allerdings geht durch die nichtlineare Transformation Information verloren. Eine andere in der Bildverarbeitung gängige Methode zur Datenreduktion ist das Beschneiden des Grauwertbereichs (*Clipping*) auf die jeweils interessierenden Grauwertbereiche (Abbildung 4.15(c)).

Die verschiedenen Möglichkeiten zur Skalierung der Daten werden im Hinblick auf ihre Eignung für die Linien- und Straßenextraktion genauer untersucht. Es wurden hierfür einige der gängigsten Skalierungen ausgewählt: die logarithmische Skalierung, die lineare Skalierung auf 8 bit und das Beschneiden der Grauwerte mit anschließender linearer Skalierung auf 8 bit.



(a) Histogramm der SAR-Messwerte ($DN+32769$) (b) Histogramm der logarithmierten SAR-Messwerte ($\text{Log}(I) = 10 \cdot \log(DN+32769)^2$) (c) Clipping: Beschneiden der Grauwerte auf einen Wertebereich

Abbildung 4.15. Histogramme eines Ausschnitts einer E-SAR-Szene (DN : Digital Number, Messwert)



(a) Extrahierte Straßen der Multilook-Amplitude



(b) Extrahierte Straßen der Multilook-Log-Intensität

Abbildung 4.16. Vergleich der Straßenextraktion auf Multilook-Amplituden- und Log-Intensitätsbilddaten

Logarithmische Skalierung

Wie in Abschnitt 4.3.2 angesprochen, werden aus den Multilook-Amplituden über das Quadrat und den Logarithmus logarithmierte Intensitäten erzeugt: $\text{Log}(I) = 10 \cdot \log(DN + 32769)^2$. Bei der Liniextraktion auf den logarithmierten Daten ist eine hohe Vollständigkeit und Korrektheit zu verzeichnen (Abbildung 4.14(b)). Das Ergebnis der extrahierten Straßen aus logarithmierten Intensitätsdaten (Abbildung 4.16(b)) beinhaltet dagegen zwar ausschließlich korrekte aber relativ wenige Straßen. Der Grund für das unvollständige Ergebnis der Straßenextraktion aus logarithmierten Daten liegt an der logarithmischen Skalierung, die die Grauwerte im oberen Grauwertbereich komprimiert und im unteren Grauwertbereich streckt (vgl. Abbildung 4.17). Dies hat zur Folge, dass gerade die niedrigen Grauwerte

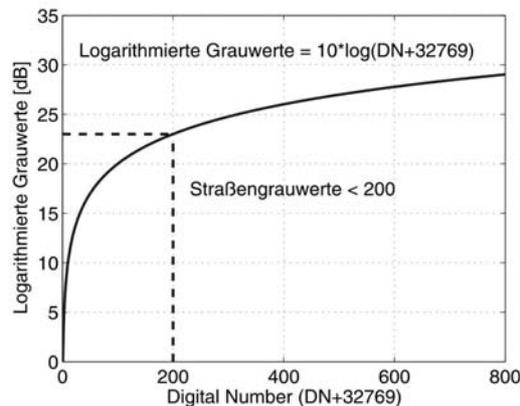


Abbildung 4.17. Logarithmische Skalierung der SAR-Daten: die Grauwerte von Straßen liegen im Grauwertbereich unter 200. Dieser Bereich wird gestreckt, während die Grauwerte im höheren Grauwertbereich gestaucht werden.

wie die von Straßen auf einen größeren Grauwertbereich gespreizt werden und sich dadurch eine höhere Standardabweichung ergibt. Dagegen verringern sich, aufgrund der logarithmisch bedingten Stauchung der höheren Grauwerte, die Grauwerte und die Standardabweichung der Grauwerte von Fehlextraktionen im oberen Grauwertbereich, beispielsweise von Linien im Feld. Somit verlieren die Bewertungsmaße mittlerer Grauwert und die Grauwert-Standardabweichung an Bedeutung bei der Diskriminierung von „falschen“ und „richtigen“ potentiellen Straßenstücken, wodurch letztlich in logarithmierten Daten weniger Straßen extrahiert werden als in dem entsprechenden Resultat auf Multilook-Amplitudendaten (Abbildung 4.16(a)).

Der Grund für das vor allem vollständigere Ergebnis der Straßenextraktion bei Multilook-Amplitudendaten liegt darin, dass die zunächst vermehrt auftretenden Fehlextraktionen der Liniextraktion im Laufe der Straßenextraktion weitgehend reduziert werden können, vor allem aufgrund der schlechten Bewertung des mittleren Grauwertes und der Standardabweichung der Grauwerte.

Lineare Skalierung von 16 auf 8 bit

In Bezug auf eine lineare Skalierung wurde untersucht, ob sich die Ergebnisse der Linien- und Straßenextraktion verändern, wenn statt auf den originären 16 bit Bilddaten auf 8 bit skalierten Bilddaten extrahiert wird. Es hat sich gezeigt, dass sich die Ergebnisse der Linien- und Straßenextraktion bei einer linearen Skalierung auf 8 bit in der Vollständigkeit und in der Zuverlässigkeit nicht von den Ergebnissen der 16 bit-Daten unterscheiden. Die Ergebnisse sind für 16 und 8 bit bei Multilook-Amplitudenbilder nahezu identisch. Dies lässt sich dadurch erklären, dass sich zwar die Grauwertunterschiede zwischen den einzelnen Objektklassen verringern, aber ihre Verhältnisse zueinander erhalten bleiben. Der Verlust der hohen radiometrischen Auflösung scheint demnach für die Extraktion von Straßen nicht wesentlich zu sein.

Clipping

Die letzte getestete Methode zur Skalierung ist das Beschneiden des Grauwertbereichs (*Clipping*), d. h. Messwerte außerhalb definierter Grenzen werden durch einen Minimal- bzw. Maximalwert ersetzt (Abbildung 4.15(c)). Bei SAR-Daten sind gerade einzelne, sehr große Amplituden- bzw. Intensitätswerte, z. B. bei metallischer Reflexion, für die hohe Dynamik verantwortlich. Bei einem Clipping ausschließlich der hohen Messwerte auf einen Sättigungswert wird die Erkennbarkeit von Straßen nicht beeinflusst, da es sich um dunkle Objekte handelt. Innerhalb des Minimal- und Maximalwertes werden die SAR-Messwerte linear auf 8 bit skaliert. Die Vollständigkeitsrate der Straßenextraktion ist ähnlich hoch wie bei den linear skalierten Multilook-Amplitudendaten. Zudem hat sich gezeigt, dass durch das Clipping die Einstellung der Parameter für den Kontrast bei der Linienextraktion wesentlich erleichtert wird, da der Kontrast stärker hervortritt als in linear skalierten Daten.

Zusammenfassend kann für die Skalierung der SAR-Messwerte für die Straßenextraktion festgehalten werden:

- Die Log-Intensität eignet sich wegen der Spreizung der Grauwerte im unteren Grauwertbereich schlechter für die Straßenextraktion als linear skalierte Messwerte.
- Eine lineare Dynamikreduzierung wirkt sich nicht auf die Linienextraktion aus. Dadurch kann bei Bedarf eine Transformation der Grauwerte auf 8 bit vorgenommen werden.
- Ein Beschneiden der Grauwerte auf den relevanten Grauwertbereich erleichtert die Extraktion von Linien und Straßen, da die Schwellwerte leichter einzustellen sind.

Auf Basis dieser Ergebnisse wird für die Straßenextraktion das Clipping auf relevante Grauwertbereiche mit einer anschließenden linearen Skalierung eingesetzt.

4.4 Ausrichtung auf relevante Bildbereiche

Eine Einschränkung des Suchbereichs auf relevante Bildbereiche erhöht die Zuverlässigkeit der Extraktion und reduziert den Rechenaufwand. Mögliche Suchbereiche lassen sich durch eine Klassifikation oder Segmentation von Gebieten ermitteln. So ist es beispielsweise möglich, über Kontextgebiete Regionen, die von Interesse sind oder für die die Straßenextraktion vorrangig eingesetzt werden soll, automatisch auszuwählen. Nach dem Kontextmodell aus Abschnitt 3.1.2 werden für Straßen die globalen Kontexte *Siedlung*, *offene Landschaft* und *Wald* unterschieden. Für das vorgestellte Verfahren ist eine Extraktion von Straßen im offenem Gelände am erfolgversprechendsten. Daher wird in den Verfahrensablauf eine Klassifikation der globalen Kontexte integriert, damit die Straßenextraktion gezielt in der offenen Landschaft durchgeführt werden kann. Des Weiteren kann durch die Verwendung der Eigenschaft, dass Straßen in SAR-Bilddaten dunkel erscheinen, der Suchraum weiter eingeschränkt werden. Die Voraussetzung für diese Einschränkungen des Suchbereichs ist allerdings, dass Kontextgebiete und potentielle Straßenregionen mit ausreichender Zuverlässigkeit extrahiert werden können. Es folgt eine Beschreibung der Extraktion dieser Bereiche.

4.4.1 Klassifikation von Kontextgebieten

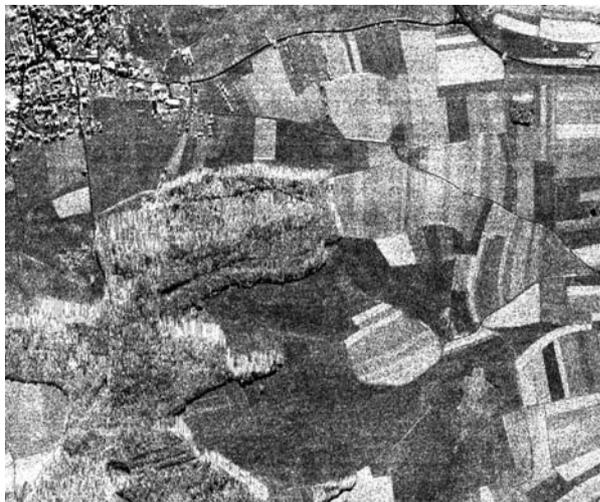
Die Klassifikation von Kontextgebieten basiert auf der Grundlage eines X- und L-Band Datensatzes bestehend aus den Polarisierungen HH, HV, VV und VH im L-Band und der HH- und VV-Polarisation im X-Band. Dabei wird der Einfluss des lokalen Einfallswinkels als korrigiert vorausgesetzt. Die Klassifikation wurde von Herrn cand. geod. Stefan Kühn auf Basis der eCognition Software erarbeitet (DEFINIENS, 2005; KÜHN, 2001).

Zunächst wird eine Segmentierung des Bildes vorgenommen. Darauf aufbauend erfolgt eine Klassifikation der Klassen „Siedlung“, „Wald“, „Schatten- und Wasserflächen“ sowie „niedrige Vegetation“. Die Klassifikation basiert auf einem vierstufigen Regelwerk. In der ersten Stufe werden in dem vorsegmentierten Bild die Klassen „Siedlung“, „Wald“, „Schatten“ und „Vegetation“ aufgrund frequenzabhängiger

und polarimetrischer Merkmale klassifiziert. Eine Klassifikation von Schattenflächen ist durch die niedrige Intensität von Schatten im X-Band möglich. Die kreuzpolarisierten Kanäle des L-Bandes (HV und VH) ermöglichen die Klassifikation von Wald. In den nachfolgenden Stufen werden die Klassen räumlich so aggregiert, dass Schatten lokal nur in Verbindung mit Wald bestehen kann. Außerdem werden Schatten- und Waldflächen, die vollständig von Siedlungsbereichen umgeben sind, der Klasse Siedlung zugeordnet. Abbildung 4.18 zeigt das Ergebnis der Klassifikation.

Eine Übertragbarkeit auf andere Testgebiete ist aufgrund des regelbasierten Verfahrens möglich. Allerdings sind die Klassifizierungsparameter anzupassen, so dass die Extraktion in diesem Punkt nur bedingt automatisch abläuft.

Mit der hier verwendeten polarimetrischen Datengrundlage im X- und L-Band lässt sich eine Klassifikation der Kontextgebiete für Straßen recht zuverlässig vornehmen, da es sich um Bildbereiche handelt, die ein eindeutig unterschiedliches Rückstreuverhalten aufweisen. Der weiter gehende Extraktionsablauf kann sich dadurch auf die offene Landschaft beschränken. Neben dem hier vorgestellten Verfahren gibt es noch weitere Klassifikationsverfahren, die für diese Datengrundlage entwickelt worden sind (z. B. HEROLD et al., 2000a).



(a) Ausgangsszene



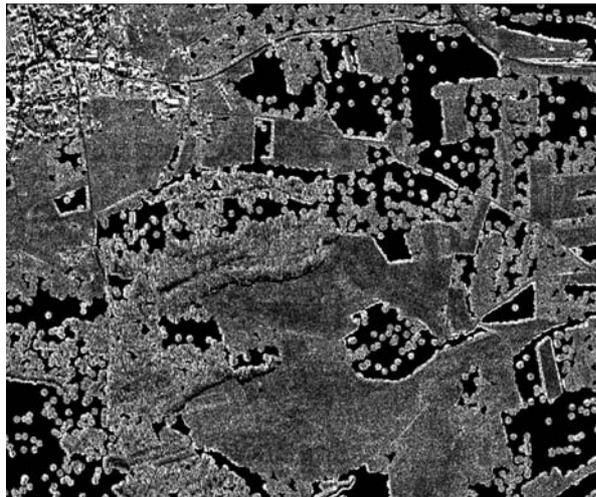
(b) Klassifikationsergebnis: *offene Landschaft* (schwarz), *Siedlung* (dunkelgrau), *Wald* (weiß) und *Schatten* (hellgrau)

Abbildung 4.18. Klassifikation der Kontextgebiete aufgrund multifrequenter und multipolarimetrischer Datensätze

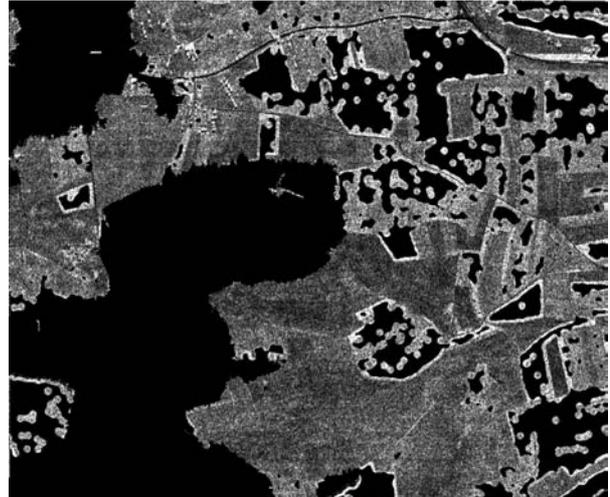
4.4.2 Segmentierung potentieller Straßenregionen

Zur weiteren Einschränkung des Suchraums für die Straßenextraktion wird die Intensität der Rückstreuung herangezogen. Da sich Straßen wie in Abschnitt 4.1 beschrieben im Allgemeinen in SAR-Bilddaten dunkel abbilden, ist es allein aufgrund einer Schwellwertbildung möglich, Bereiche, die potentiell Straßen beinhalten, zu extrahieren. Um möglichst sicher alle Straßen zu erfassen, wird im Anschluss an die Extraktion von dunklen Pixeln eine morphologische Dilatation durchgeführt. Dies hat zur Folge, dass nicht nur niedrige Grauwerte sondern auch ihre Umgebung als potentielle Regionen für Straßen detektiert werden. Durch diese Art der Extraktion von Gebieten mit niedrigen Grauwerten werden allerdings nicht nur Straßenpixel ausgewählt, sondern auch andere Objekte wie beispielsweise Schattengebiete, Wasserflächen oder einzelne, dunkle Regionen. Dadurch liefert die Schwellwertbildung nur einen recht unzuverlässigen Hinweis auf potentielle Straßen (Abbildung 4.19(a)).

In dieser Arbeit wird der Suchraum für Straßen auf segmentierte potentielle Straßenregionen innerhalb der klassifizierten offenen Landschaft begrenzt (Abbildung 4.19(b)), um dadurch gleichzeitig sowohl Fehlextraktionen zu vermeiden als auch die Rechenzeit zu reduzieren.



(a) Segmentierung dunkler Bildregionen



(b) Kombination der Suchräume aus Abbildung 4.18(b) und 4.19(a)

Abbildung 4.19. Einschränkung des Suchraums durch a) Segmentierung dunkler Bildregionen b) Kombination des Suchraums von a) mit der klassifizierten, offenen Landschaft aus Abbildung 4.18(b)

4.5 Extraktion und Bewertung

In diesem Abschnitt wird anhand von vier Datensätzen der bisher beschriebene Ansatz zur automatischen Straßenextraktion aus SAR-Bilddaten (Abschnitte 4.1 – 4.4) evaluiert. Hierfür wird zunächst ein Schema zur externen Bewertung linearer Extraktionsergebnisse erläutert (Abschnitt 4.5.1). Anschließend werden die ausgewählten Datensätze vorgestellt und die erzielten Extraktionsergebnisse mit den vorgestellten Maßen quantitativ bewertet und diskutiert (Abschnitt 4.5.2). Eine detailliertere Analyse der Stärken und Schwächen des Systems wird in Kapitel 5 vorgenommen.

4.5.1 Bewertungsschema für Extraktionsergebnisse

Bei der Bewertung von Extraktionsergebnissen ist grundsätzlich zwischen interner und externer Bewertung zu unterscheiden. Bei der internen Bewertung geht es um die Selbstdiagnose, bei der innerhalb eines Systems Maße zur Beurteilung der Qualität der erzielten Ergebnisse ermittelt und weitergegeben werden. Jedes Verfahren zur automatischen Extraktion sollte interne Maße zur Beurteilung der Qualität der erzielten Ergebnisse liefern, möglichst mit statistischen Genauigkeitsangaben oder vereinfachte Angaben im Sinne des „Ampel-Paradigmas“ (FÖRSTNER, 1996). Bei der externen Bewertung geht es um die Bewertung der erzielten Ergebnisse durch Daten, die mit anderen Methoden erhoben worden sind. Im Allgemeinen werden die Ergebnisse mit möglichst fehlerfreien Referenzdaten verglichen. Dabei werden keine internen Bewertungsmaße berücksichtigt. Grundsätzlich ermöglicht die Evaluierung der Ergebnisse in Bezug auf Referenzdaten eine Einschätzung der Stärken und Schwächen eines Systems. In dieser Arbeit werden die erzielten Extraktionsergebnisse mit dem externen Evaluierungsverfahren von HEIPKE et al. (1998) und WIEDEMANN (2002) bewertet.

Externe Bewertung

Das Schema zur externen Bewertung vektorieller Datensätze beruht bei HEIPKE et al. (1998) und WIEDEMANN (2002) auf den Maßen *Vollständigkeit*, *Zuverlässigkeit* und *geometrische Genauigkeit*. Die Berechnung dieser Bewertungsmaße setzt zunächst die lokale Zuordnung von Teilen der extrahierten Daten gegenüber Teilen der Referenzdaten voraus. Die Zuordnung wird mit der so genannten „Puffer-Methode“ durchgeführt, bei der jedes Linienstück innerhalb einer gewissen Distanz (Pufferbreite) der Referenz zugeordnet wird. Die Berechnung der Bewertungsmaße erfolgt dann auf Basis der zugeordneten Linienstücke bzw. der darauf befindlichen Punkte.

Die **Vollständigkeit** gibt an, wie viele der vorhandenen Straßen detektiert werden konnten. Sie ist definiert als der prozentuale Anteil der extrahierten Straßenteile, die innerhalb einer gewissen Pufferbreite Teilen der Referenz zugeordnet werden konnten, bezogen auf die Länge der gesamten Referenz:

$$\text{Vollständigkeit} = \frac{\text{Länge der zugeordneten Referenz}}{\text{Länge der Referenz}} \cdot 100 \text{ [\%]} \quad (4.7)$$

Die **Zuverlässigkeit** kann als Wahrscheinlichkeit interpretiert werden mit der ein extrahiertes Straßensegment wirklich eine Straße darstellt. Sie ist definiert als der prozentuale Anteil der extrahierten Straßen, die korrekt innerhalb der Pufferbreite dem Referenznetzwerk zugeordnet werden konnten, bezogen auf die Länge aller extrahierten Straßen:

$$\text{Zuverlässigkeit} = \frac{\text{Länge der zugeordneten Extraktion}}{\text{Länge der Extraktion}} \cdot 100 \text{ [\%]} \quad (4.8)$$

Die Werte für Vollständigkeit und Zuverlässigkeit liegen im Optimalfall bei 100 %, was bedeutet, dass alle Straßen extrahiert werden konnten und dass das Extraktionsergebnis keine falschen Straßen enthält. Zusätzlich wird die **geometrische Genauigkeit** über den RMS-(Root Mean Square-)Fehler berechnet. Der RMS-Fehler ist als mittlere quadratische Abweichung zwischen den extrahierten Straßenachsen und den Achsen der Referenzdaten definiert. Auf beiden Achsen werden hierfür gleichabständige Punkte eingeführt zwischen denen die Distanzen berechnet werden:

$$\text{RMS-Fehler} = \sqrt{\frac{\text{Quadratsumme der Distanzen zwischen homologen Punkten}}{\text{Anzahl der homologen Punkte}}} \text{ [m]} \quad (4.9)$$

Diese drei Maße dienen zur externen Beurteilung der extrahierten Ergebnisse. Sie geben allerdings keinen Aufschluss über die Topologie des extrahierten Straßennetzes. Hierfür können beispielsweise die Maße *Zusammenhang* und *Umwegfaktor* herangezogen werden (WIEDEMANN und EBNER, 2000). Diese Maße werden im Folgenden jedoch nicht verwendet, da die extrahierten Straßennetze relativ fragmentiert sind, so dass auch ohne diese objektiven Maße klar ist, dass die topologische Korrektheit nicht sehr groß ist. Ein Grund für die Fragmentierung der Ergebnisse liegt darin, dass das Wissen über die Netzwerkeigenschaften von Straßen nicht bzw. nicht ausreichend verwendet wurde. Weitere Bewertungsmaße wie die Qualität nach HARVEY (1999) werden ebenfalls nicht herangezogen, da sie sich letztlich durch die Werte der Vollständigkeit und Zuverlässigkeit ausdrücken lassen und daher keine zusätzlichen Informationen beinhalten.

Bedeutung von Referenzdaten

Neben den Bewertungskriterien spielen auch die Eigenschaften der Referenzdaten eine große Rolle. Referenzdaten zeichnen sich grundsätzlich durch eine höhere Qualität aus als die Daten, die von der Extraktion zu erwarten sind. Sie werden in der Regel manuell erstellt. Es ist aber zu beachten, dass (1) Referenzdaten nicht vollständig fehlerfrei sind und (2) ihre Erfassung sich auf eine andere Datenquelle stützen kann, als diejenige auf der die Extraktion vollzogen wird. Daraus ergibt sich, dass im Vorfeld die Zielsetzung der Bewertung zu klären ist. KLAUSMANN et al. (1999) unterscheiden hierfür die „reale“ und die „erfassbare“ Referenz. Die reale Referenz bezeichnet eine Referenz, die der realen Welt besonders nahe kommt. Die erfassbare Referenz basiert auf dem für die Extraktion zur Verfügung stehenden Datenmaterial und bezeichnet die bestmöglich erzielbaren Ergebnisse, die von einem geübten Operateur erzielt werden können.

In dieser Arbeit werden die automatisch erzielten Ergebnisse sowohl durch einen Vergleich mit der erfassbaren Referenz als auch mit der realen Referenz validiert. Die erfassbare Referenz wurde auf der Grundlage der Testdatensätze von einem Operateur erstellt, der mit dem Verfahren zur Straßenextraktion nicht vertraut ist, um eine möglichst unabhängige *manuelle Referenz* zu erhalten. Als reale Referenz wurden ATKIS-Daten verwendet (*ATKIS-Referenz*), die für zwei der vier Datensätze zur Verfügung standen.

Die Referenzdaten wurden entsprechend der Straßenhierarchie in Klassen unterteilt, um für jede Klasse individuell die Vollständigkeit ermitteln zu können. Weiterhin wurden aus den Referenzdaten wie bereits aus den Bilddaten (Abschnitt 4.4) die Stadt- und Waldgebiete herausgenommen, da für diese Bereiche keine Extraktion stattfindet.

4.5.2 Ergebnisse und Bewertung

Die Evaluierung der vorgestellten Straßenextraktion für SAR-Bilddaten erfolgt anhand von vier Datensätzen, die sich inhaltlich und in Bezug auf ihre räumliche Auflösung unterscheiden. Inhaltlich wird zwischen ländlichen Gebieten und Stadtrandgebieten differenziert, um den Einsatz in verschiedenen Kontextgebieten bewerten zu können. In Bezug auf die räumliche Auflösung finden Extraktionen für Bilddaten mit zwei Meter Bodenpixelgröße statt, für die der Ansatz ursprünglich konzipiert worden ist, wie auch für einen Meter, was in etwa dem derzeitigen Stand der Auflösung flugzeuggetragener SAR-Systeme entspricht. Die räumliche Auflösung bezieht sich dabei auf Bilddaten, die mit einer Anzahl von vier Looks gebildet worden sind. Die 2-Meter-Datensätze stammen von dem E-SAR-Sensor (*Ländlich-2m*, *Stadtrand-2m*). Die 1-Meter-Datensätze wurden mit dem AER-II-Sensor der FGAN-FHR und dem AeS-1-Sensor der Firma Intermap Technologies GmbH aufgenommen (*Ländlich-1m*, *Stadtrand-1m*)¹. Eine Übersicht über die verwendeten Datensätze gibt Tabelle 4.2. Weitere Parameter zu den Daten bzw. Sensoren finden sich in Tabelle A.1. Im Folgenden werden die einzelnen Datensätze eingehender vorgestellt und anschließend die Extraktionsergebnisse bewertet und diskutiert (siehe auch WESSEL et al. (2002); WESSEL und WIEDEMANN (2003)).

Datensatz	Sensor	Band	Polarisation	Gebiet
<i>Ländlich-2m</i>	E-SAR	X	HH,VV	Ehingen
	E-SAR	L	HH,HV,VV	Ehingen
<i>Stadtrand-2m</i>	E-SAR	X	HH,VV	Erfurt
	E-SAR	L	HH,HV,VV	Erfurt
<i>Stadtrand-1m</i>	AeS-1	X	HH	München
<i>Ländlich-1m</i>	AER-II	X	HH,HV,VV	Adendorf

Tabelle 4.2. Überblick über die Datensätze

Datensatz *Ländlich-2m*

Der Datensatz *Ländlich-2m* beinhaltet ein größeres, ländliches Gebiet im ehemaligen Donautal bei Ehingen in der Nähe von Ulm. Es wurde mit dem E-SAR-Sensor aufgenommen und besteht aus einem vollpolarimetrischen Datensatz im L-Band und einem Datensatz mit zwei Polarisationen im X-Band (HH und VV). Die Auflösung der Multilook-Amplitudenbilder beträgt im X-Band 1.8 m in Azimut und 2.2 m in Entfernung, im L-Band 3.0 m bzw. 2.2 m. Die Aufnahme erfolgte im September 2000. Die gesamte Szene umfasst eine Fläche von 7.5 km × 11 km und besteht aus drei Streifen, aus denen ein Mosaik erstellt wurde. Die Szene beinhaltet kleinräumig bewirtschaftete Felder, größere Waldflächen und Siedlungsgebiete. Die Ortschaften sind durch das Straßennetz miteinander verbunden. Eine Bundesstraße verläuft diagonal vom nordwestlichen zum südöstlichen Bildrand (Abbildung 4.20). Die restlichen Straßen sind Nebenstraßen. Darüber hinaus gibt es zahlreiche Feldwege. Neben einigen Straßen befinden sich Büsche und Baumreihen, die die Straßen (teilweise) mit Schatten und Layover verdecken. Bei dem Datensatz *Ländlich-2m* handelt es sich aufgrund der großen Gebietsausdehnung um den umfangreichsten der bearbeiteten Datensätze. Für die Bearbeitung wurde das Gebiet in mehrere Kacheln unterteilt. Die Vorverarbeitung erfolgte gemäß Abschnitt 4.3, d. h. an den Multilook-Amplitudenbilddaten wurde

¹Die beiden letztgenannten Datensätze wurden der Autorin freundlicherweise von der FGAN-FHR und Intermap Technologies GmbH zur Verfügung gestellt.

eine Einfallswinkelkorrektur vorgenommen, hohe Grauwerte wurden geclippt und der Grauwertbereich wurde anschließend linear auf 8 bit skaliert. Mittels einer Klassifikation (siehe Abschnitt 4.4) konnte die offene Landschaft segmentiert werden. Waldflächen sind in Abbildung 4.20 schwarz, Siedlungsbereiche weiß umrandet dargestellt. Diese Gebiete wurden von der Extraktion ausgeschlossen.

Für die Evaluierung der Ergebnisse standen zwei Referenzdatensätze zur Verfügung. Die manuellen Referenzdaten wurden von einem Operateur erfasst, der mit dem Verfahren der Straßenextraktion nicht vertraut ist. Die Einteilung in Nebenstraßen und Hauptstraßen fand im Zweifelsfall aufgrund eines nachträglichen Vergleichs mit ATKIS-Daten statt. Die ATKIS-Daten stammen aus einer Luftbildbefliegung von 1999. Aus beiden Referenzdatensätzen wurden ebenfalls die Wald- und Siedlungsgebiete herausgenommen.

Für den Datensatz *Ländlich-2m* erfolgt zunächst eine Bewertung der Ergebnisse der Straßenextraktion ohne und mit SAR-spezifischer Datenvorverarbeitung. Außerdem werden Untersuchungen mit unterschiedlichen Linienbreiten, mit einer Fusion unterschiedlicher Linienbreiten und mit einer Fusion von Extraktionen im X- und L-Band dargestellt und evaluiert. Ferner wird auf die Unterschiede der Referenzdaten näher eingegangen.

Extraktion ohne und mit SAR-spezifischer Datenvorverarbeitung

Tabelle 4.3 zeigt die Bewertungen der extrahierten Straßen, die ohne und mit SAR-spezifischer Vorverarbeitung erzielt worden sind. Den Extraktionen liegen georeferenzierte Multilook-Amplitudenbilddaten zu Grunde. Die Zunahme der Zuverlässigkeit bei einer SAR-spezifischen Datenvorverarbeitung ist größtenteils auf die Einführung des mittleren Grauwertes als Bewertungsmaß für potentielle Straßen zurückzuführen. Dadurch können vor allem Fehlextraktionen in Feldern vermieden werden. Andererseits ist aber auch der Rückgang der Vollständigkeit durch das Bewertungsmaß mittlerer Grauwert zu erklären. Denn durch benachbarte Objekte und deren Layover kommt es abschnittsweise zu höheren mittleren Grauwerten, so dass diese Abschnitte damit als potentielle Kandidaten für Straßen herausfallen. Insgesamt gesehen verbessert aber die SAR-spezifische Vorverarbeitung die Zuverlässigkeit um rund 30 %.

Datensatz <i>Ländlich-2m</i>	Vergleich mit manueller Referenz	
	ohne	SAR-Vorverarbeitung mit
Vollständigkeit Gesamt [%]	77	71
Bundesstraßen [%]	89	82
Nebenstraßen [%]	72	67
Zuverlässigkeit Gesamt [%]	58	86
RMS [m]	2.3	2.3

Tabelle 4.3. Datensatz *Ländlich-2m*: Bewertung der Ergebnisse ohne und mit SAR-spezifischer Vorverarbeitung

Extraktion mit verschiedenen Linienbreiten

Grundsätzlich werden bei der Linienextraktion mit dem Stegeroperator nicht nur Linien der eingestellten Linienbreite erfasst, sondern auch schmalere. Da Bundes- und Nebenstraßen teilweise aber recht unterschiedliche Breiten aufweisen, soll in diesem Absatz die Extraktion mit verschiedenen Linienbreiten untersucht werden. Tabelle 4.4 zeigt die Ergebnisse der separaten Extraktion mit Linienbreiten von 8 m, 10 m und 13 m. Überraschend ist der gegenläufige Effekt, dass die etwas breiteren Bundesstraßen mit einer geringeren Linienbreite vollständiger erfasst werden als mit einer größeren. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass durch Layover und angrenzende Bewaldung die Straße abschnittsweise

nicht komplett sichtbar ist, so dass diese Bereiche mit einer geringeren Linienbreite besser erfasst werden können. Ebenso existieren bei Nebenstraßen abschnittsweise breitere Bereiche oder Bereiche, die durch den Schatten angrenzender Bäume „künstlich“ verbreitert sind. Sie können allesamt mit einer größeren Linienbreite besser extrahiert werden. Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Extraktionsergebnisse unterschiedlicher Linienbreiten teilweise komplementäre Informationen beinhalten. Diese Informationen können durch eine Fusion vereint werden. Das Ergebnis einer gemeinsamen Extraktion mit Linienbreiten von 8 m und 13 m ist in Tabelle 4.4 und Abbildung 4.20 dargestellt. Durch die Fusion dieser Linien können mehr Straßen extrahiert werden, als in den jeweiligen Extraktionen mit nur einer Linienbreite. Die Fusion geht allerdings zu Lasten der Zuverlässigkeit, so dass insgesamt gesehen, hier die Extraktion mit einer Linienbreite von 13 m bessere Ergebnisse erzielt als die Extraktion mit den zwei Linienbreiten von 8 m und 13 m.

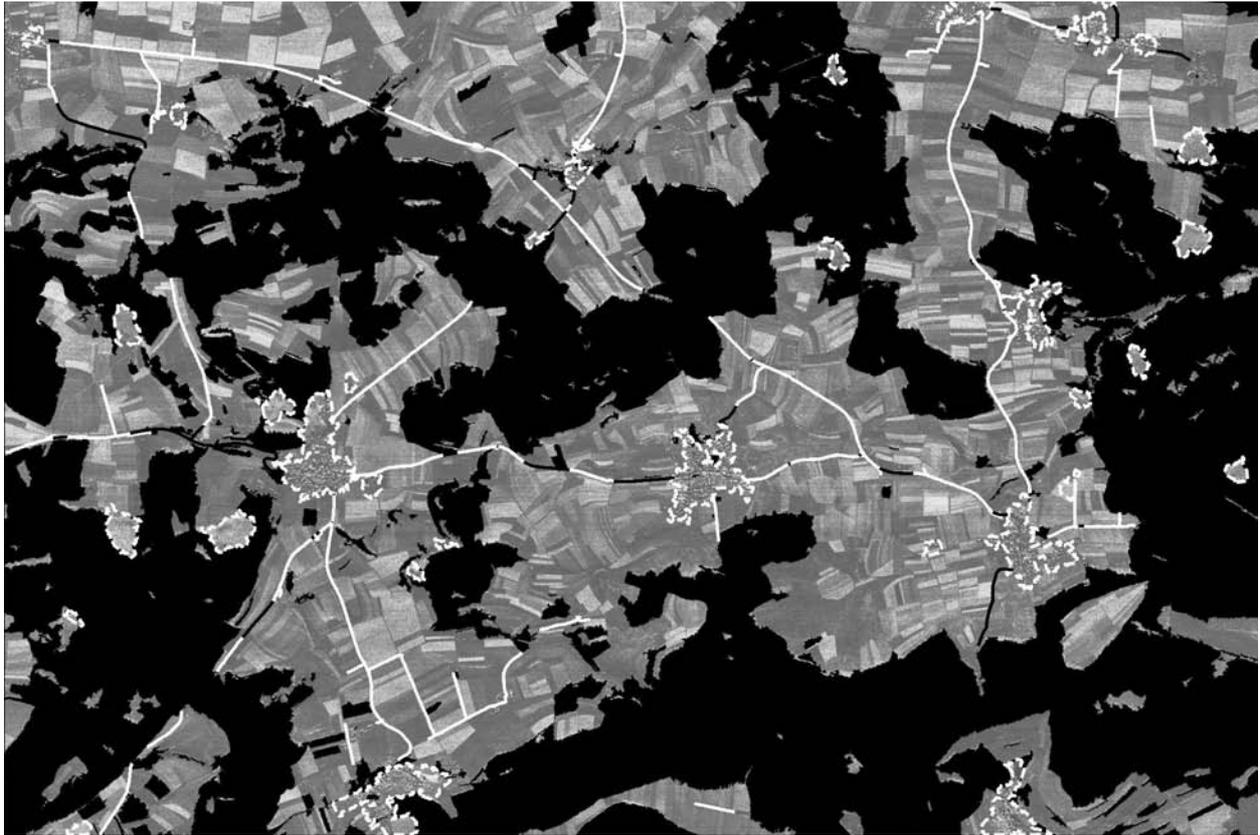
Datensatz <i>Ländlich-2m</i>	Eine Linienbreite			Zwei Linienbreiten	
	Manuelle Referenz X-HH (8m) X-HH (10m) X-HH (13m)			Referenz	
				Manuell	ATKIS
	X-HH (8m)	X-HH (10m)	X-HH (13m)	X-HH (13m) X-HH (8m)	X-HH (13m) X-HH (8m)
Vollständigkeit Gesamt [%]	67	75	71	79	69
Bundesstraßen [%]	87	83	82	92	90
Nebenstraßen [%]	60	73	67	74	63
Zuverlässigkeit Gesamt [%]	82	79	86	71	72
RMS [m]	2.1	2.2	2.3	2.2	2.8

Tabelle 4.4. Datensatz *Ländlich-2m*: Bewertung der Ergebnisse bei Extraktion mit verschiedenen Linienbreiten (8 m, 10 m, 13 m) und mit der Fusion von zwei Linienbreiten (8 m, 13 m)

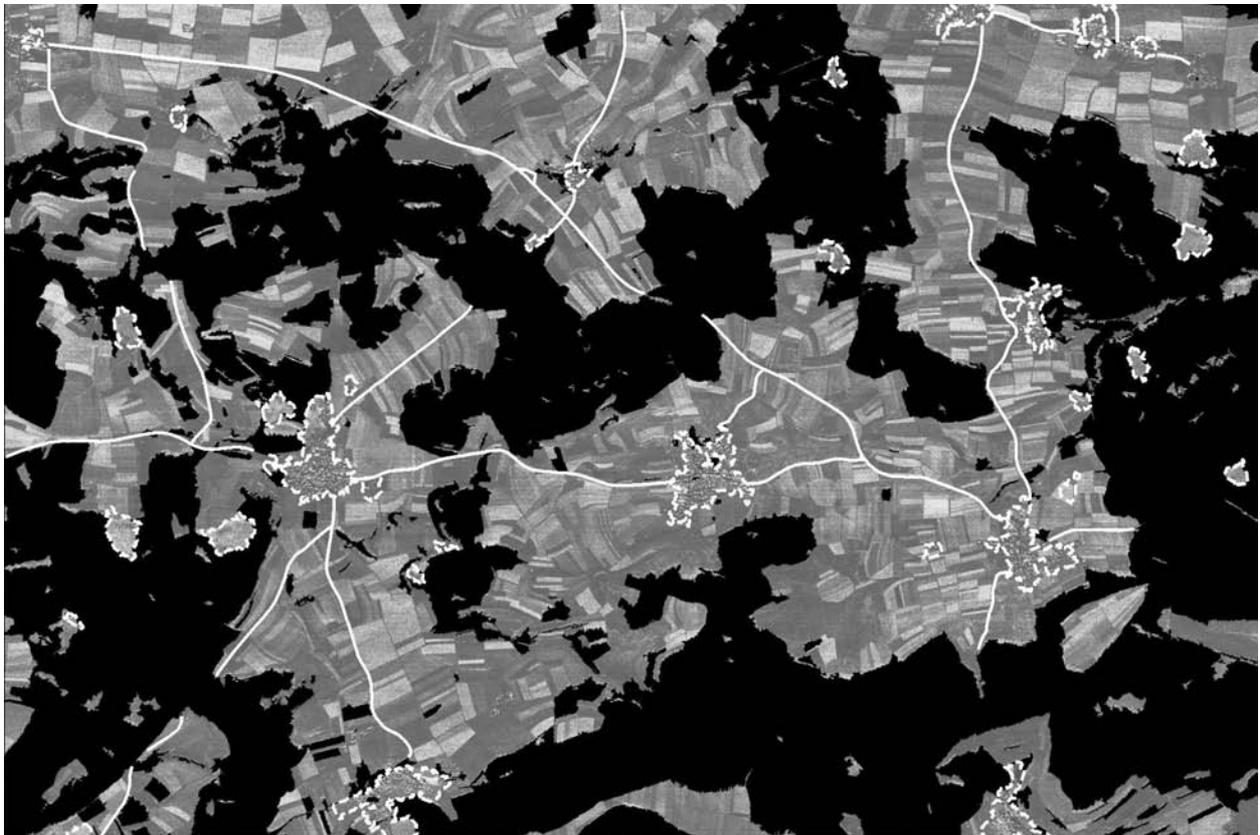
Extraktion im X- und L-Band

Neben der Extraktion mit zwei verschiedenen Linienbreiten wurde untersucht, inwieweit verschiedene Frequenzbänder komplementäre Informationen enthalten, die die Extraktion stützen können. Hierfür stand ein vollpolarimetrischer Datensatz des L-Bandes zur Verfügung. Der Vorteil des L-Bandes ist, dass Straßen dort eine extrem geringe Rückstreuintensität haben und sich so deutlich von anderen Objekten unterscheiden. Für diese Untersuchung wurden Extraktionen mit dem L-Band in VV-Polarisation durchgeführt, denn in der VV-Polarisation ist der Einfluss der angrenzenden Vegetation am geringsten (vgl. Abschnitt 4.1.1). Es wurden Extraktionen allein auf dem L-VV Kanal, in Kombination mit dem X-HH Kanal und in Kombination mit zwei verschiedenen Linienbreiten mit dem X-HH Kanal durchgeführt. Diese Ergebnisse sind in Tabelle 4.5 dargestellt. Das Extraktionsergebnis allein auf dem L-Band ist wesentlich schlechter als das entsprechende Ergebnis im X-Band. Nur 42% der Straßen konnten im L-Band gefunden werden, im Gegensatz zu 71% im X-Band. Durch eine Fusion des L-Bandes mit dem X-Band kann die Vollständigkeit der Ergebnisse gesteigert werden. Die höchste Vollständigkeit von 73% wurde durch eine Kombination der Extraktionen im L-VV Band (13 m Linienbreite) und X-HH Band (mit 8 m und 13 m Linienbreite) erzielt. Die Zuverlässigkeit ändert sich mit den verschiedenen Kombinationen nicht.

Ein Vergleich aller Ergebnisse basierend auf X- und L-Band Daten (Tabelle 4.5) mit den Ergebnissen aus den X-Band Daten (Tabelle 4.4) zeigt aber, dass durch das L-Band die Extraktion insgesamt gesehen nicht verbessert werden konnte. Dies liegt in erster Linie an der geringeren Auflösung des L-Bandes. Straßen sind dort nicht mehr so gut sichtbar bzw. klar abgegrenzt wie im X-Band. Auch der Kontrast zu Feldern ist aufgrund der größeren Wellenlänge geringer. Dies beeinträchtigt vor allem



(a) Extraktion mit SAR-Vorverarbeitung und zwei verschiedenen Linienbreiten



(b) Manuell erfasste Referenz

Abbildung 4.20. Datensatz *Ländlich-2m*: Gegenüberstellung von Extraktionsergebnis und manueller Referenz

die Extraktion von Nebenstraßen. Die niedrigere Auflösung bewirkt außerdem ein stärkeres Auftreten von Mischpixeln zwischen der Straße und der Umgebung. Dadurch kann der Schwellwert für den mittleren Grauwert von Straßen nicht „scharf“ genug eingestellt werden. Das notwendige, lockerere Einstellen des Bewertungsmaßes „mittlerer Grauwert“ für ein potentiell Straßenstück führt jedoch zu einer vermehrten Anzahl von Fehlextraktionen in der Klasse Feld. Die Verringerung der Vollständigkeit bei einer gemeinsamen Extraktion aus X- und L-Band Daten (Tabelle 4.5) gegenüber einer Extraktion allein aus X-Band Daten (Tabelle 4.4, zwei Linienbreiten) liegt aber auch an der Umsetzung der Fusion. Im Rahmen der Fusion werden die gut bewerteten Linienstücke zuerst in das Fusionsergebnis übernommen. Linienstücke im X- und L-Band wechseln sich dabei ab. Sie weisen aber aufgrund der radiometrischen Unterschiede ihrer Bänder teilweise geometrische Versätze auf, so dass sie nicht immer problemlos miteinander verknüpft werden können. Diese Schwierigkeiten werden derzeit bei der Fusion nicht berücksichtigt und führen daher zum Wegfall von Linienstücken und zu niedrigeren Vollständigkeitswerten.

Datensatz <i>Ländlich-2m</i>	Fusion von X- und L-Band Daten		
	Manuelle Referenz		
		X-HH (8m)	X-HH (13m)
	L-VV (13m)	L-VV (13m)	L-VV (13m)
Vollständigkeit Gesamt [%]	42	55	73
Bundesstraßen [%]	71	75	88
Nebenstraßen [%]	32	48	67
Zuverlässigkeit Gesamt [%]	68	69	66
RMS [m]	2.3	2.3	2.0

Tabelle 4.5. Datensatz *Ländlich-2m*: Bewertung der Ergebnisse bei Extraktionen im L- und X-Band

Vergleich der Extraktionsergebnisse mit manuellen und ATKIS-Referenzdaten

Die bisherigen Bewertungen basieren auf dem Vergleich zu den manuell erfassten Referenzdaten, die auf den SAR-Bilddaten digitalisiert worden sind. Parallel dazu wurden die Ergebnisse auch mit ATKIS-Daten verglichen, die aus optischen Luftbildern erfasst worden sind. Tabelle 4.4 zeigt in der letzten Spalte die Bewertung bezüglich der ATKIS-Referenzdaten. Bei einem Vergleich mit der ATKIS-Referenz sinkt die Vollständigkeit, was daran liegt, dass gut 20% der Nebenstraßen in ATKIS nicht in der manuellen Referenz enthalten sind. Diese Straßen liegen überwiegend in oder in der Nähe von Ortschaften und konnten aufgrund ihrer mangelnden Sichtbarkeit, sowohl bei der Extraktion als auch bei der Digitalisierung der Referenzdaten, nicht als Straßen in den SAR-Daten identifiziert werden. Bei den Bundesstraßen gibt es nur an einer Stelle eine kleine Lagedifferenz, bei der die Straße aufgrund eines Fahrzeugs in den SAR-Daten leicht verschoben digitalisiert wurde. Deswegen sowie aufgrund der unterschiedlichen Geometrien der Daten sinkt die geometrische Genauigkeit der extrahierten Straßen von 2.2 m (manuelle Referenz) auf 2.8 m (ATKIS-Referenz).

Datensatz *Stadtrand-2m*

Mit dem Datensatz „*Stadtrand-2m*“ von Erfurt stand ein weiteres Gebiet des E-SAR-Sensors zur Verfügung. Im Gegensatz zum Testgebiet *Ländlich-2m* beinhaltet der ausgewählte Bereich eine industriell geprägte Szene mit einem Industriegebiet, einer Autobahn und ansonsten eher kleineren Straßen. Das Gebiet ist 3 km × 3 km groß. Die Extraktion erfolgt ebenfalls auf geokodierten Multilook-Amplitudendaten. Für dieses Testgebiet wurden die Parameter nicht speziell angepasst, sondern direkt von den Tests des E-SAR-Datensatzes *Ländlich-2m* übernommen.

Für einen Vergleich mit Datensatz *Ländlich-2m* wurden dieselben Tests durchgeführt. Die Bewertungen für die Extraktionen sind in Tabelle 4.6 zusammengestellt. Sie bewegen sich in der gleichen Größenordnung wie die Ergebnisse für das Testgebiet *Ländlich-2m*, obwohl die Parameter nicht speziell angepasst worden sind und sich die Bildinhalte voneinander unterscheiden (industriell vs. ländlich). Dies liegt daran, dass bei SAR-Aufnahmen die Rückstreuungen für Straßen relativ deterministisch sind. Somit sind die radiometrischen Verhältnisse auf andere Testgebiete übertragbar. In Bezug auf die Extraktionen im L-Band lässt sich auch bei dem Datensatz *Stadtrand-2m* beobachten, dass mit einer zusätzlichen Einbeziehung des L-Bandes die Extraktion gegenüber der Extraktion im X-Band mit zwei Linienbreiten nicht verbessert werden können. Zwar wurden bei der Fusion von dem X- und L-Band sehr hohe Werte für die Vollständigkeit erreicht, die Zuverlässigkeit der Ergebnisse ist dafür aber wesentlich geringer. Dies ist auch hier auf eine vermehrte Extraktion von Feldstrukturen zurückzuführen, da der Schwellwert für das Bewertungsmaß mittlerer Grauwert im L-Band aufgrund von Mischpixeln nicht so hart eingestellt wurde.

Das insgesamt beste Ergebnis konnte bei dem Datensatz *Stadtrand-2m* durch die gleichzeitige Extraktion mit zwei verschiedenen Linienbreiten auf dem X-HH Kanal erzielt werden. Abbildung 4.21 zeigt dieses extrahierte Straßennetz im Vergleich zu den manuellen Referenzdaten.

Datensatz <i>Stadtrand-2m</i>	Manuelle Referenz			
	X-HH (8 m) X-HH (13 m)	L-VV (13m)	X-HH (8m) L-VV (13m)	X-HH (8m) X-HH (13m) L-VV (13m)
Vollständigkeit Gesamt [%]	74	63	78	80
Autobahnen [%]	93	63	89	92
Bundesstraßen [%]	89	82	92	100
Nebenstraßen [%]	62	59	70	70
Zuverlässigkeit Gesamt [%]	84	61	58	67
RMS [m]	1.8	2.2	2.1	1.9

Tabelle 4.6. Datensatz *Stadtrand-2m*: Bewertung der Ergebnisse der Extraktionen



(a) Extraktion



(b) Manuell erfasste Referenz

Abbildung 4.21. Datensatz *Stadtrand-2m*: Gegenüberstellung von Extraktionsergebnis und Referenz

Datensatz *Ländlich-1m*

Der Datensatz *Ländlich-1m* beinhaltet eine ländliche Szene in der Umgebung der Stadt Adendorf in der Nähe von Bonn. Die Befliegung fand am 1. Juli 1997 mit dem AER-II-Sensor statt. Es handelt sich um einen vollpolarimetrischen Datensatz im X-Band. Die Auflösung der Singlelook-Bilder ist in Entfernungs- und Azimutrichtung unterschiedlich (94 cm bzw. 33 cm). Zusätzlich liegt Schrägsichtgeometrie vor, weswegen das Gelände in Entfernungsrichtung verzerrt erscheint (Abbildung 4.22). Zur Speckle-Reduzierung der Singlelookbilder wurde die Summe der vier Polarisierungen im X-Band gebildet.

Die Szene enthält kleinere Ortschaften, ein Waldgebiet, durch das eine Autobahn verläuft, sowie kleinere Straßen. Die Wald- und Stadtgebiete wurden vor der Extraktion manuell erfasst und ausmaskiert.

Nachdem dieser Datensatz ausschließlich im X-Band vorliegt, erfolgte die Extraktion mit verschiedenen Linienbreiten im X-Band (Tabelle 4.7). Bei einer Extraktion mit zwei verschiedenen Linienbreiten ist die Vollständigkeit mit 51 % vergleichsweise gering. Daher wurden zwei weitere Linienbreiten eingeführt, durch die ergänzende Straßenabschnitte hinzugefügt und die Vollständigkeit auf 62 % gesteigert werden konnte. Allerdings beträgt die Vollständigkeit der Autobahn auch bei vier verschiedenen Linienbreiten nur 48 %. Dies lässt sich durch die umgebenden Bäume erklären. Abschnittsweise ist dadurch die Mittelteilplanke als Unterteilung der beiden Fahrbahnrichtungen nicht erkennbar oder die Bäume und ihr Schatten lassen die Breite der Fahrbahnen zu stark variieren, so dass extrahierte Linien wieder verworfen werden. Die Vollständigkeit der Nebenstraßen liegt mit 69 % in etwa in der Größenordnung der Vollständigkeit der Nebenstraßen der vorherigen Datensätze. Das Fehlen von Straßenstücken bei den Nebenstraßen hat seine Ursache in mangelnden Startstücken in der Nähe von Städten, mangelnder Sichtbarkeit aufgrund von angrenzenden Baumreihen und einem zu geringen Kontrast gegenüber dunkel reflektierenden Feldern, wie z. B. bei der Straße in der oberen linken Bildhälfte (Abbildung 4.22).

Datensatz <i>Ländlich-1m</i>	Manuelle Referenz		
		\bar{X} (13m)	\bar{X} (10m)
		\bar{X} (16m)	\bar{X} (13m)
	\bar{X} (10m)	\bar{X} (16m)	\bar{X} (16m)
	\bar{X} (27m)	\bar{X} (27m)	\bar{X} (27m)
Vollständigkeit Gesamt [%]	51	56	62
Autobahnen [%]	42	44	48
Nebenstraßen [%]	55	63	69
Zuverlässigkeit Gesamt [%]	75	75	81
RMS [m]	2.0	2.0	2.0

Tabelle 4.7. Datensatz *Ländlich-1m*: Bewertung der Ergebnisse für mehrere Linienbreiten (\bar{X} steht für den Mittelwert aus den vier Polarisierungen des X-Bandes)

Zudem handelt es sich gerade im unteren Bildbereich eher um sehr kleine Straßen. Zu einigen Fehlextraktionen kommt es vor allem durch Schattenflächen am Waldrand. Die Zuverlässigkeit der Ergebnisse ist mit 81 Prozent durchaus mit den anderen Testgebieten vergleichbar.

Datensatz *Stadtrand-1m*

Der Datensatz *Stadtrand-1m* stellt einen Teil des Messegeländes von München dar (Abbildung 4.25(a)). Er wurde 1999 vom AeS-1-Sensor aufgenommen. Die ausgewertete Szene umfasst eine Fläche von 12 km². Die Originaldaten zu dieser Szene lagen nicht vor, so dass auf dem gelieferten Mosaik gearbeitet wurde. Das Mosaik besteht aus zwei Multilook-X-Band-Aufnahmen, die aus zwei verschiedenen Richtungen aufgenommen worden sind. Die Bilddaten haben eine Bodenauflösung von 0.5 m, welche für die Straßenextraktion auf 1 m reduziert wurde. Die Szene ist industriell geprägt mit Siedlungsbereichen,



(a) Extraktion



(b) Manuell erfasste Referenz

Abbildung 4.22. Datensatz *Ländlich-1m*: Gegenüberstellung von Extraktionsergebnis und Referenz

einer größeren Parkplatzfläche, verschiedenen Straßenklassen inklusive einer Autobahn mit Auffahrten und Brücken. Aufgrund dieser speziellen Straßenobjekte handelt es sich für die Straßenextraktion um ein komplexes Gebiet. Für die Bestimmung der Bewertungen wurden die Referenzdaten in drei Klassen aufgeteilt: Autobahnen, Bundesstraßen und Nebenstraßen. Die Parkplätze sind kein Bestandteil des Straßennetzes. Dies entspricht der Einteilung, die im ATKIS vorgenommen wird. Für diesen Datensatz standen ebenfalls ATKIS-Daten zur Verfügung. Sie entsprechen in ihrer Aktualität den SAR-Daten. Die Bewertungen der Extraktionsergebnisse im Vergleich zu den manuellen und den ATKIS-Referenzdaten sind in Tabelle 4.8 zusammengefasst.

Gegenüber der Extraktion mit lediglich einer Linienbreite von 16 m konnte durch die Verwendung der zusätzlichen Linienbreite von 10 m die Vollständigkeit der Bundesstraßen um 21 % und die der Nebenstraßen um 14 % erhöht werden (Tabelle 4.8, manuelle Referenz). Der Grund für die Verbesserung der Vollständigkeit der Bundesstraßen liegt vor allem an der Überbrückung eines durch ein Fahrzeug verschmierten Straßenabschnittes. Obwohl die Linienbreite von 16 m einer Fahrbahnbreite der Autobahn entspricht, hat sie nicht ausgereicht, die Autobahn vollständig zu extrahieren. Dies liegt an der Vielzahl der Störungen der Fahrbahnen durch Brücken und Verkehrsschilder. Auch Autobahnauffahrten gehören mit zu der Klasse „Autobahn“, die aufgrund ihrer Krümmung weniger gut detektiert werden konnten, wenn sie nicht bereits als ganze Linien extrahiert worden sind. Abbildung 4.23 zeigt die mit zwei Linienbreiten extrahierten Straßen überlagert auf die Bilddaten. Die Zuverlässigkeit der Extraktion (X-HH 10m, X-HH 16 m) ist mit 57 % eher gering. Dies liegt allerdings zu einem guten Teil an der Parkplatzfläche in der linken, oberen Bildhälfte, in der durch die schmalere Linienbreite viele Straßen detektiert wurden. Nimmt man dieses spezielle Gebiet von der Bewertung der Zuverlässigkeit aus, ergibt sich eine Zuverlässigkeit von 73 %.

Vergleicht man die Bewertungen für die manuell erfassten Referenzdaten mit denen der ATKIS-Referenzdaten ist eine deutliche Reduzierung der Vollständigkeit und der Zuverlässigkeit zu beobachten. Die unterschiedlichen Bewertungen sind auf Unterschiede in den Referenzdaten zurückzuführen,

Datensatz <i>Stadtrand-1m</i>	Manuelle Referenz		ATKIS-Referenz	
	X-HH (16m)	X-HH (10m) X-HH (16m)	X-HH (16m)	X-HH (10m) X-HH (16m)
Vollständigkeit				
Gesamt [%]	59	67	47	52
Autobahnen [%]	63	64	50	50
Bundesstraßen [%]	74	95	69	92
Nebenstraßen [%]	52	66	41	48
Zuverlässigkeit				
Gesamt [%]	65	57	52	47
RMS [m]	2.0	2.2	3.6	3.6

Tabelle 4.8. Datensatz *Stadtrand-1m*: Bewertung der Ergebnisse für eine Linienbreite (16 m) und mit zwei verschiedenen Linienbreiten (10 m und 16 m). Bewertet gegenüber manuell erfassten Referenzdaten und ATKIS-Daten

die in Abbildung 4.24 und 4.25 verdeutlicht sind. Im Detail lässt sich die Abnahme der Vollständigkeit dadurch erklären, dass die ATKIS-Referenz vor allem eine größere Anzahl von Nebenstraßen beinhaltet als die manuell erfasste Referenz. In der manuellen Referenz fehlt das noch in der Entstehung befindliche Industriegebiet in der rechten, oberen Bildhälfte und eine durch angrenzende Vegetation nicht sichtbare Straße in der linken, unteren Bildhälfte. Auch kommt es in der rechten, unteren Bildhälfte durch ein Waldgebiet in den SAR-Daten zu einer Lageabweichung. Hier wurde offensichtlich der Schatten der Bäume als Straße detektiert und zwar sowohl bei der automatischen Extraktion als auch bei der manuellen Erfassung der Referenz, so dass die Extraktion in diesem Bereich im Vergleich mit der ATKIS-Referenz als fehlend eingestuft wird. Die Bundesstraßen sind nahezu identisch in beiden Referenzen. Lediglich durch ein Fahrzeug und in dem Bereich einer Einmündung kommt es zu weiteren Lage verschobenen Extraktionen der Straße, die nur bei der manuellen Referenz korrekt zugeordnet werden. Die Abnahme der Zuverlässigkeit bei dem Vergleich mit der ATKIS-Referenz wird größtenteils durch die ATKIS-Referenz selbst verursacht, denn in dem Bereich der Autobahnen beinhaltet sie größere Lagefehler. Die Achsen der Autobahnen und Autobahnauffahrten weichen in den ATKIS-Daten teilweise um bis zu 15 m von den Achsen der manuellen Referenz ab. Hier sind augenscheinlich Fehler bei der Herstellung der ATKIS-Daten erfolgt. Dies erklärt die schlechte geometrische Genauigkeit von 3.6 m bei einem Vergleich mit ATKIS.



Abbildung 4.23. Datensatz *Stadtrand-1m*: Extraktionsergebnis mit 10 und 16 m Linienbreite

Der Vergleich der beiden Referenzen gibt einen Eindruck davon, inwieweit sich SAR-Daten und höher aufgelöste, optische Bilder inhaltlich unterscheiden und welche Probleme bei der Kartierung von Straßen entstehen.

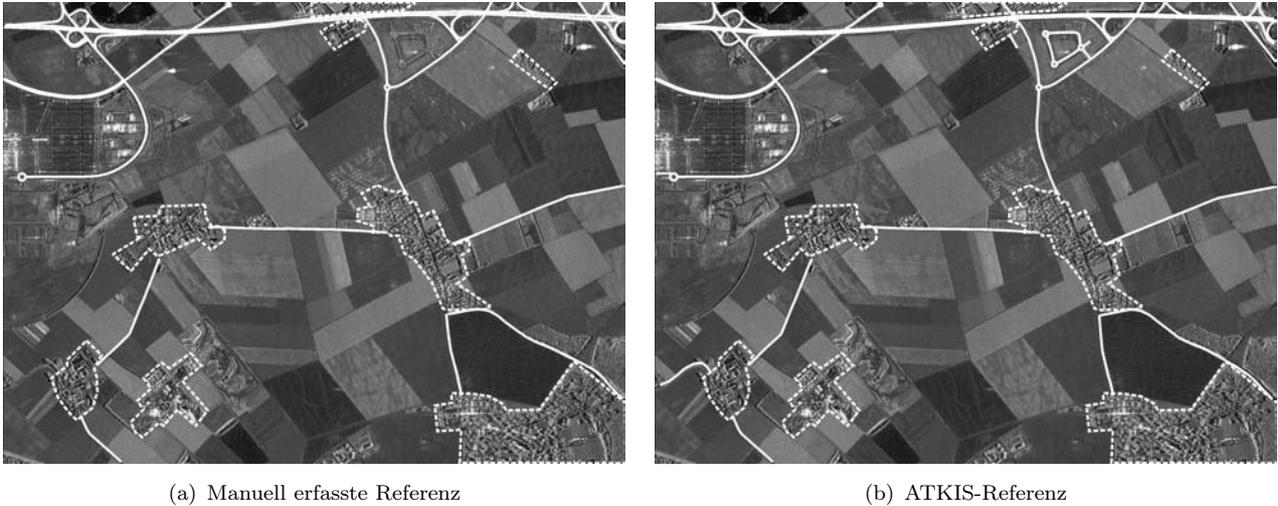


Abbildung 4.24. Datensatz *Stadtrand-1m*: Gegenüberstellung der manuell erfassten Referenz und der ATKIS-Referenz

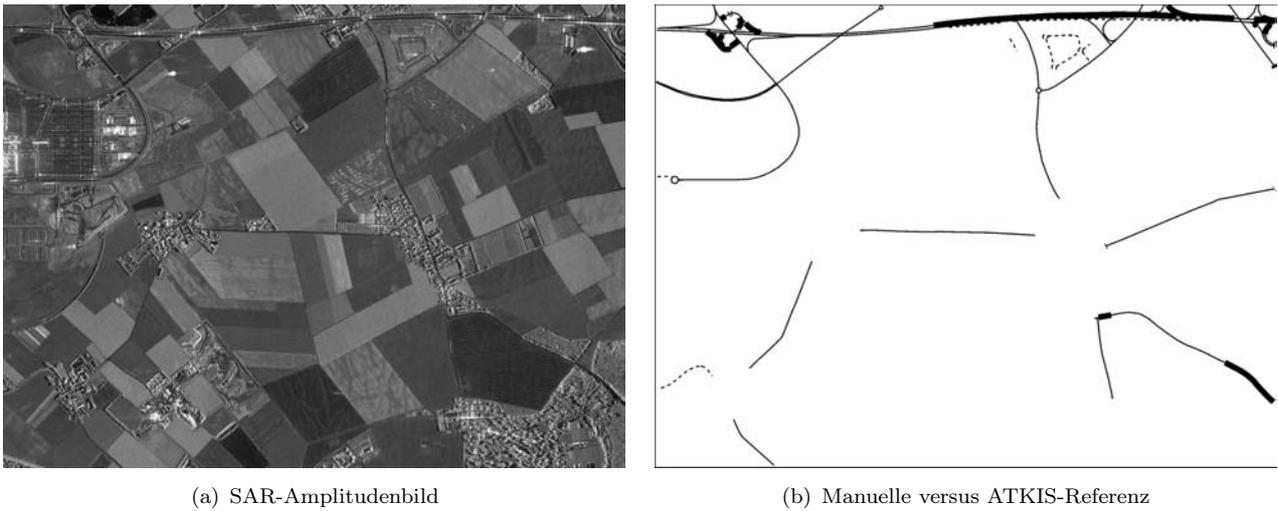


Abbildung 4.25. Datensatz *Stadtrand-1m*: Vergleich der manuellen Referenz gegenüber ATKIS-Daten (schwarze, dünne Linie: Übereinstimmung; schwarze, dicke Linie: keine Übereinstimmung bedingt durch Lagefehler; schwarze, gestrichelte Linie: nur in ATKIS-Daten vorhanden)

5. Analyse der Straßenextraktion für SAR-Bilddaten

Gegenstand dieses Kapitels ist eine Analyse der erzielten Ergebnisse des bisher vorgestellten Verfahrens zur Extraktion von Straßen aus SAR-Bilddaten. Ausgehend von den in Abschnitt 4.5 erzielten Ergebnissen gibt Abschnitt 5.1 detailliert Aufschluss über die einzelnen Gründe für korrekte, fehlende und unkorrekte Extraktionen. Gebiete mit fehlenden oder unkorrekten Extraktionen werden im Folgenden als Problembereiche bezeichnet. Problembereiche, die auf SAR-spezifische Phänomene zurückzuführen sind, werden im darauf folgenden Abschnitt 5.2 detailliert erläutert. Anschließend werden die resultierenden Erkenntnisse zusammengefasst, um sie im nächsten Kapitel für eine Verbesserung des Systems heranzuziehen (Abschnitt 5.3).

5.1 Analyse der Stärken und Schwächen

Anhand der evaluierten Extraktionsergebnisse aus Abschnitt 4.5.2 wird in diesem Abschnitt untersucht, warum die Extraktion von Straßen an einigen Stellen erfolgreich ist und an anderen nicht. Im Rahmen dieser Analyse wird für jedes extrahierte oder fehlende Straßenstück der Grund für die Extraktion bzw. für das Fehlen eines Straßenstücks ermittelt. In den folgenden drei Abschnitten sind jeweils die Gründe für korrekte, fehlende und unkorrekte Extraktionen in generalisierter Form zusammengestellt.

5.1.1 Korrekte Extraktionen

Anhand der untersuchten Datensätze lassen sich folgende Eigenschaften von SAR-Bilddaten ableiten, die für eine erfolgreiche Extraktion förderlich sind.

- **Sichtbarkeit von Straßen in SAR-Bilddaten:** Straßen und Straßenränder sind in der offenen Landschaft und in Industriegebieten in den verwendeten Amplitudenbilddaten deutlich erkennbar. Das allgemeine Straßenmodell und die vorgeschlagene Extraktionsstrategie haben sich für die Extraktion von Straßen in diesen Gebieten generell als geeignet erwiesen.
- **Geometrische Auflösung:** Die Breite der Straßen in den Bilddaten spielt neben der Sichtbarkeit eine wichtige Rolle für eine erfolgreiche Extraktion. Ab einer Breite von ca. drei Pixel werden Linien sicher erkannt. Dies erklärt u.a. den hohen Grad der Vollständigkeit für die Bundesstraßen, aber auch den begrenzenden Faktor für die Extraktion von Nebenstraßen und Wirtschaftswegen.
- **Stabile radiometrische Verhältnisse:** Die Radiometrie ändert sich bei SAR-Bilddaten nur unwesentlich für verschiedene Aufnahmen, da das SAR-Signal fast ausschließlich von physikalischen Objekteigenschaften abhängt und nicht wie bei optischen Bilddaten zusätzlich von dem Sonnenstand, der Wolkenbedeckung und den Einflüssen der Atmosphäre. Dadurch ist es möglich, die einzustellenden Parameter von einem Testgebiet auf andere Testgebiete zu übertragen.
- **Abwesenheit von bewegten Fahrzeugen:** Fahrzeuge, die sich auf der Straße bewegen, stören die Straßenextraktion aus SAR-Bilddaten nicht, da sie abgesehen von Fahrzeugen, die direkt in Azimut fahren, nicht auf der Straße abgebildet werden. Sie erfahren einen Versatz in Azimut, wenn sie eine Bewegungskomponente in Entfernung aufweisen.

5.1.2 Fehlende Extraktionen

Im Folgenden werden die typischen Gründe für fehlende Extraktionen zusammengestellt. Als fehlende Extraktion wird ein Straßenabschnitt bezeichnet, der in den Referenzdaten enthalten ist, aber nicht extrahiert wurde.

- **Layover von Gebäuden:** An den Sensor zugewandten Gebäudeseiten tritt grundsätzlich Layover auf. Hierbei überlagern sich die Rückstreuungen vom Boden, von der Wand und vom Dach. Die Abbildung von Straßen, die neben diesen Gebäudeseiten verlaufen, sind durch den Layover der Gebäude beeinträchtigt. Abhängig von der Länge des Layovers und der Nähe der Straße zum Gebäude können Straßen ganz oder teilweise verdeckt werden. Dies kann in den verwendeten Bilddaten in der Nähe von Industriegebäuden zu fehlenden Extraktionen führen.
- **Layover von Bäumen:** Wie bei Gebäuden kommt es auch bei Bäumen auf der dem Sensor zugewandten Seite zu Layover. Die Überlagerung der Straße mit Layover ist abhängig von der Höhe der Bäume, der Orientierung der Straße zum Sensor und der Breite der Straße. Der Layover erreicht in Entfernungsrichtung seine maximale Länge. Dies führt dazu, dass Straßen, die direkt in Azimut verlaufen, teilweise oder sogar vollständig von benachbarten Bäumen überlagert werden (Abbildung 5.1(a), 5.1(b)). Die Extraktion wird unterbrochen oder bei einzelnen Bäumen unkorrekt fortgeführt. Aufgrund der Lageverschiebung wird das zugehörige Straßenstück als fehlend eingestuft. Zu einer leichten Lageverschiebung der Extraktion kann es auch durch Bäume kommen, die auf der Sensor zugewandten Straßenseite stehen (Abbildung 5.1(c)). Denn die Mehrfachreflexionen bei Bäumen führen zu einer Abbildung hinter dem tatsächlichen Ort, weil das Signal von einem scheinbar längeren Weg stammt. Die Abbildung der Mehrfachreflexionen verkleinert die Straßenbreite. Somit wird die Straße abweichend von ihrer eigentlichen Position leicht in der Lage verschoben extrahiert.
- **Kontrast:** In Bereichen mit geringem Kontrast zwischen Straße und Umgebung können keine Linien extrahiert werden, da die Objektgrenzen teilweise nicht sichtbar sind. Insbesondere niedrige Felder haben in SAR-Daten eine ähnlich geringe Rückstreuung wie Straßen, da sie eine ähnlich geringe Oberflächenrauigkeit aufweisen (Abbildung 5.2(a)). Aufgrund der längeren Wellenlänge tritt im L-Band solch ein geringer Kontrast noch häufiger auf (Abbildung 5.2(b)).
- **Bewegte Fahrzeuge:** Fahrzeuge, die sich auf der Fahrbahn in Azimutrichtung bewegen, können nicht richtig fokussiert werden und erscheinen in den Bilddaten als helle, längliche Streifen. Sie verdecken damit die Fahrbahn über einen größeren Bereich. An diesen Stellen kommt es zu einer Unterbrechung der Linienextraktion (Abbildung 5.3(a)). Für eine Überbrückung sind diese Bereiche oft zu groß, so dass es zu Lücken in der Extraktion kommt. Manchmal kann mit einer geringeren Linienbreite neben dem Fahrzeug noch eine schmale Linie detektiert werden. Die Position dieser Linie weist jedoch gegenüber der Referenz eine Lageabweichung auf, so dass dieser Abschnitt dennoch als „fehlend“ eingestuft werden kann (Abbildung 5.3(b), 5.3(c)).
- **Brücken:** Straßen, die unterhalb von Brücken verlaufen, werden durch die helle Signatur der Brücke unterbrochen. Aufgrund von Einfach- und Mehrfach-Reflexionen dehnt sich die SAR-Signatur von Brücken über einen größeren Bereich aus, der oft nicht korrekt überbrückt werden kann (Abbildung 5.4(a), 5.4(b)). Auch Straßen, die auf einer Brücke verlaufen, werden durch die Mehrfachreflexionen beeinträchtigt und fehlen meistens im Extraktionsergebnis.
- **Größere Verkehrsschilder:** Verkehrsschilder, die über die gesamte Fahrbahnbreite verlaufen, erzeugen ebenso wie Brücken starke Rückstreuungen und Mehrfachreflexionen. Sie verdecken dadurch mit ihrer Signatur die Fahrbahn über einen größeren Bereich. Dies kann zu einer Unterbrechung der Linien- und Straßenextraktion führen (Abbildung 5.4(c)).
- **Kreuzungen:** Kreuzungen werden nur mangelhaft extrahiert, was darauf zurückzuführen ist, dass in dem verwendeten Straßenmodell Kreuzungen nicht ausreichend modelliert sind. Bis zu einem gewissen Grad können Kreuzungen zwar extrahiert werden, da Linien, die aufeinander treffen, alleine aufgrund der geometrischen Verhältnisse eine Kreuzung bilden können. Wenn es sich allerdings um kompliziertere Kreuzungsbereiche mit sehr vielen Abzweigungen, Kreiseln oder auch um eine Verbreiterung der Straße im Kreuzungsbereich handelt, können diese Bereiche entweder nicht mehr durch Linien repräsentiert werden oder sie werden geometrisch unkorrekt extrahiert

(Abbildung 5.5). Zudem kommt es im Kreuzungsbereich oft zu zusätzlichen Störungen durch Verkehrsschilder und Ampeln, die durch starke Reflexionen die Extraktion behindern können.

- **Straßenbautechnische Besonderheiten:** Einige straßenbautechnische Besonderheiten wie Rastplätze, Radwege, glatte Randbereiche aus Sand oder Verbreiterungen der Straße im Bereich von Abzweigungen führen zu einer *lokalen Verbreiterung der Straße* (z. B. Abbildung 5.5(a)). Die für eine bestimmte Straßenbreite eingestellte Linienbreite kann verbreiterte Passagen nicht erfassen. Weiterhin entstehen durch *Verkehrsanlagen* wie Verkehrsschilder oder Ampeln helle Punkte (*Spots*), die die Extraktion behindern und zu einer Linienunterbrechung oder einer schlechten Bewertung des Grauwertes führen können (Abbildung 5.5(b), 5.5(c) und 5.5(d)). Ferner existieren bei größeren Straßen oder Autobahnen *Fahrbahntrennungen*. Besteht die Trennung aus Vegetation, werden unter Umständen die beiden Fahrbahnen durch die Glättung bei der Linienextraktion zu einer breiten Linie verschmolzen und nicht mehr detektiert (Abbildung 5.6(a)). Bei Fahrbahntrennungen aus Metall kommt es bei exakt in Azimut verlaufenden Anlagen zu starken Rückstreuungen und Überstrahlungen der Fahrbahn (Abbildung 5.6(b)).
- **Bildrand und Stichstraßen:** Fehlende Straßenabschnitte entstehen häufig am Bildrand bzw. an der Grenze zu den ausmaskierten Stadt- und Waldgebieten. Diese Straßenstücke sind nur an einem Ende mit dem Straßennetzwerk verbunden. Selbst wenn sie relativ gut bewertet worden sind, sind sie nicht zwangsweise Bestandteil des extrahierten Straßennetzes, da der Suchalgorithmus immer zwei Startpunkte benötigt zwischen denen er Straßen miteinander verbindet. Deshalb müssen diese Stücke gut genug für ein Startstück bewertet worden sein, damit sie bei der Netzbildung berücksichtigt werden. Die Problematik mangelnder Startstücke ist ein generelles Problem bei der automatischen Straßenextraktion.

5.1.3 Unkorrekte Extraktionen

Im Folgenden werden die typischen Gründe für unkorrekte Extraktionen zusammengestellt. Unkorrekte Extraktionen sind Extraktionen, die keine Entsprechung in den Referenzdaten haben.

- **Schatten von Gebäuden:** Aufgrund des Radarschattens an Sensor abgewandten Gebäudeseiten, kann es zu unkorrekten Extraktionen kommen, da der Schatten in seiner Breite oft der von Straßen entspricht. Dies kann vor allem bei Industriegebäuden und in Siedlungsgebieten vorkommen.
- **Schatten von Bäumen:** Wie bei Gebäuden kommt es auch bei einzelnen Bäumen, Baumreihen oder am Waldrand zu unkorrekten Extraktionen im Schatten (Abbildung 5.1(d), untere Extraktion). Teilweise können die Extraktionen im Schatten aber auch korrekt sein, da Straßen häufig an Waldrändern entlang laufen oder durch Baumreihen begrenzt sind. Dennoch ist die Extraktion von „Schattenstraßen“ nicht zuverlässig, da lediglich der Baumschatten und nicht die Straße selbst extrahiert wird. Eine unregelmäßige Struktur des Schattens kann aber auch dazu führen, dass keine Extraktion erfolgt, obwohl eine Straße verdeckt wird. (Abbildung 5.1(e)).
- **Niedriger Kontrast:** Bei dunklen Feldstrukturen, wie länglichen Ackerspuren oder Wegen, kommt es teilweise zu unkorrekt extrahierten Straßen, wenn die Strukturen in Breite und Kontrast den Straßen entsprechen (Abbildung 5.2(c), 5.2(d)). Viele unkorrekte Extraktionen in Feldern konnten jedoch bereits durch die Einführung des mittleren Grauwertes eliminiert werden.
- **Fehlerhafte Referenz:** Sehr kleine Straßen, die nicht in die Kategorie Nebenstraßen fallen wie Wirtschaftswege, private Zufahrtswege, Parkplätze etc., sind nicht Bestandteil der Referenz. Sie werden aber teilweise je nach Sichtbarkeit extrahiert (Abbildung 5.7(a) und 5.7(b)). Dadurch verschlechtert sich das Maß für die Zuverlässigkeit, obwohl es sich nicht um Fehlextraktionen im eigentlichen Sinne handelt, sondern um Straßen, die nicht in der Referenz enthalten sind. Besonders in Entfernungsrichtung sind Wirtschaftswege oftmals noch gut zu erkennen (Abbildung 5.7(a)).

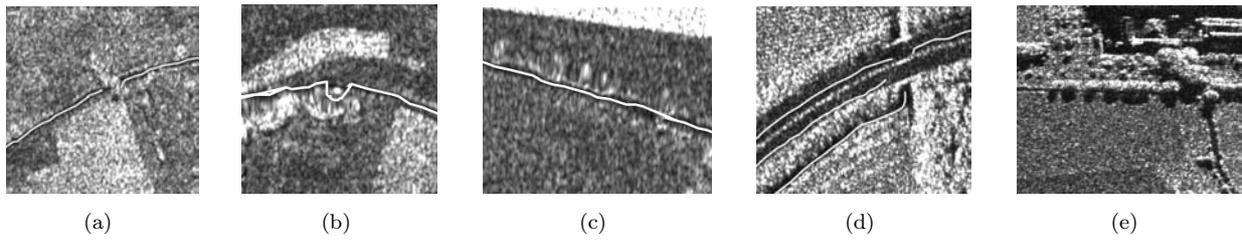


Abbildung 5.1. Problembereich Bäume: (a),(b) fehlende Extraktion (c) verschobene Extraktion durch Layover (d),(e) unkorrekte und fehlende Extraktion durch Schatten

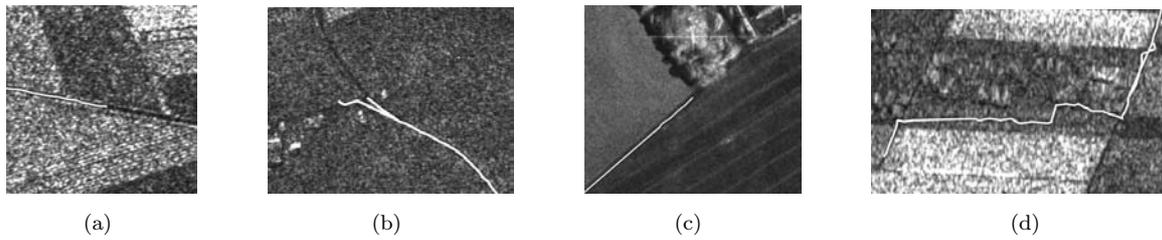


Abbildung 5.2. Problembereich Kontrast: (a),(b) fehlende Extraktion durch geringen Kontrast (c),(d) unkorrekte Extraktion

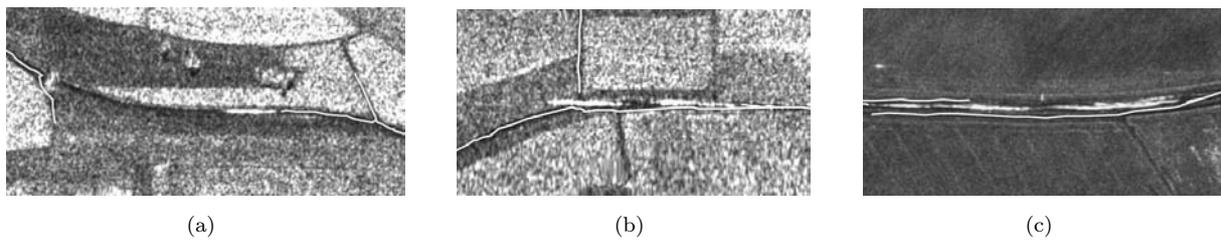


Abbildung 5.3. Problembereich verschmierte Fahrzeuge in Azimut

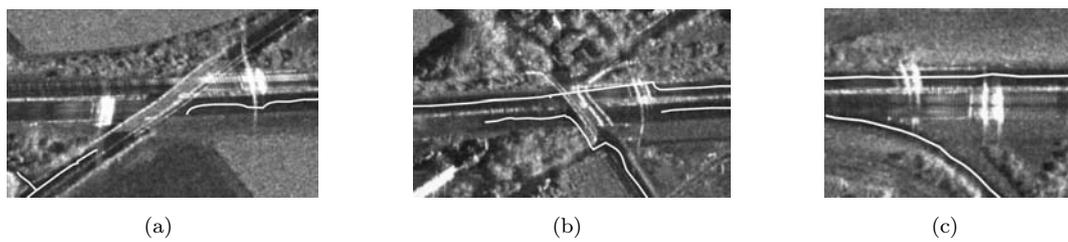


Abbildung 5.4. Problembereich Brücken und Verkehrsschilder

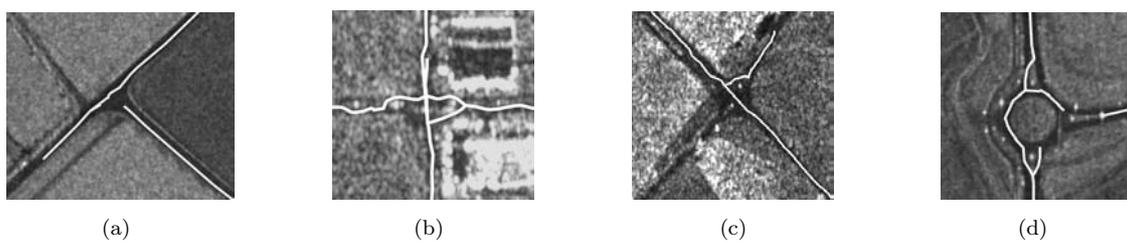


Abbildung 5.5. Problembereich Kreuzungen

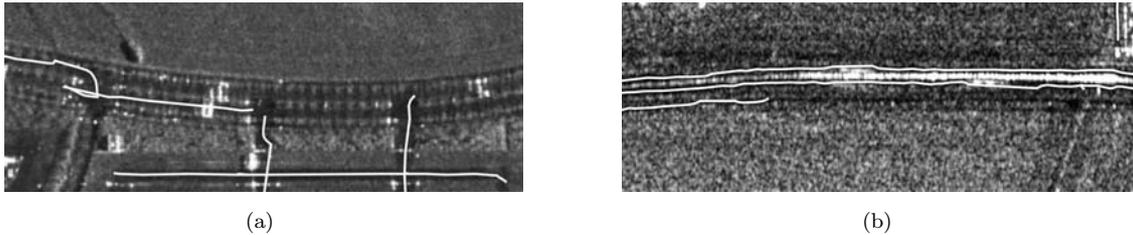


Abbildung 5.6. Problemereiche: Fahrbahntrennungen durch (a) Vegetation und (b) metallische Leitplanke

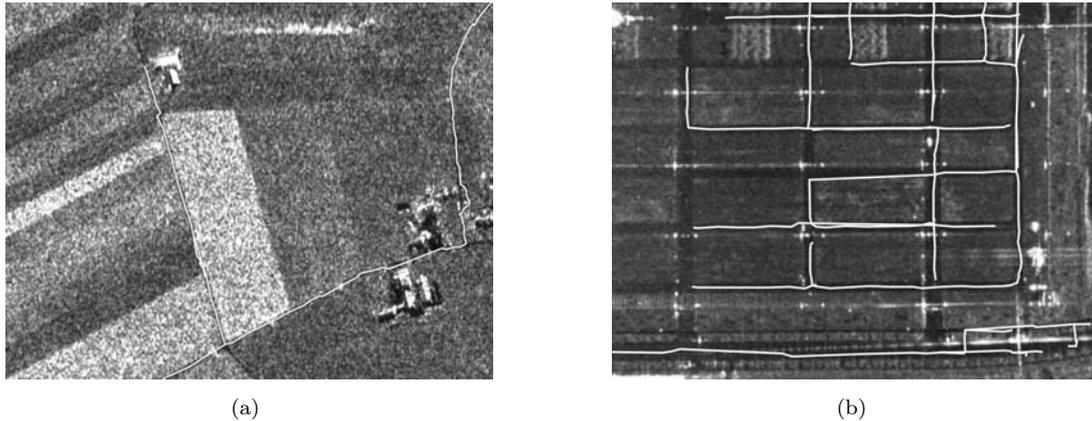


Abbildung 5.7. Problemereiche Referenz: unkorrekte Extraktionen aufgrund von (a) Wirtschaftswegen und (b) Parkplatzflächen, die nicht Bestandteil der Referenz sind.

- **Bewegte Fahrzeuge:** Verschmierte Autos in Azimutrichtung führen nicht nur zu Lücken, sondern manchmal auch zu einer Extraktion parallel zum Fahrzeug, die aufgrund ihrer Lageabweichung als unkorrekt eingestuft wird (Abbildung 5.3(b), 5.3(c)).

5.2 Abbildungseigenschaften von SAR-spezifischen Problemereichen

Bei der Analyse der erzielten Ergebnisse im vorangegangenen Abschnitt hat sich gezeigt, dass es einige Problemereiche gibt, die auf SAR-spezifische Abbildungseigenschaften zurückzuführen sind und andere, die unabhängig von der verwendeten Datenquelle auftreten, wie Referenz, Kreuzungen und Bildrand. Zu den SAR-spezifischen Problemereichen zählen Bäume, bewegte Fahrzeuge, Brücken und größere Verkehrsschilder. Um die Besonderheiten der SAR-Bilddaten und den Einfluss der SAR-spezifischen Problemereiche auf die Straßenextraktion besser zu verstehen, werden ihre Abbildungseigenschaften in diesem Abschnitt detailliert erläutert. Die auftretenden Streumechanismen werden begründet und anhand der Strahlengänge bzw. der Prozessierung der Daten ihre SAR-Signaturen erklärt.

5.2.1 Bäume

Die Abbildung von Bäumen in SAR-Daten (Abbildung 5.8(a)) lässt sich anhand der verschiedenen Rückstreuungseigenschaften erklären. An den Bestandteilen der Bäume selbst und am Untergrund kommt es zu unterschiedlichen Rückstreuungseigenschaften. Abbildung 5.8(b) verdeutlicht die fünf wesentlichen Rückstreuungseigenschaften für Bäume: 1) direkte Rückstreuung von der Krone, 2) direkte Rückstreuung vom Untergrund, 3) direkte Rückstreuung vom Stamm, 4) Stamm-Grund-Doppelreflexionen und 5) Mehrfachreflexion zwischen der Baumkrone und dem Untergrund (SUN und RANSON, 1995). Die Abbildung eines einzelnen Baumes (Abbildung 5.8(a)) setzt sich aus den verschiedenen Rückstreuungen dieser Streumechanismen zusammen. Das Zustandekommen der SAR-Signatur wird im Folgenden schematisch beschrieben (Abbildung 5.8(b) und 5.8(c)).

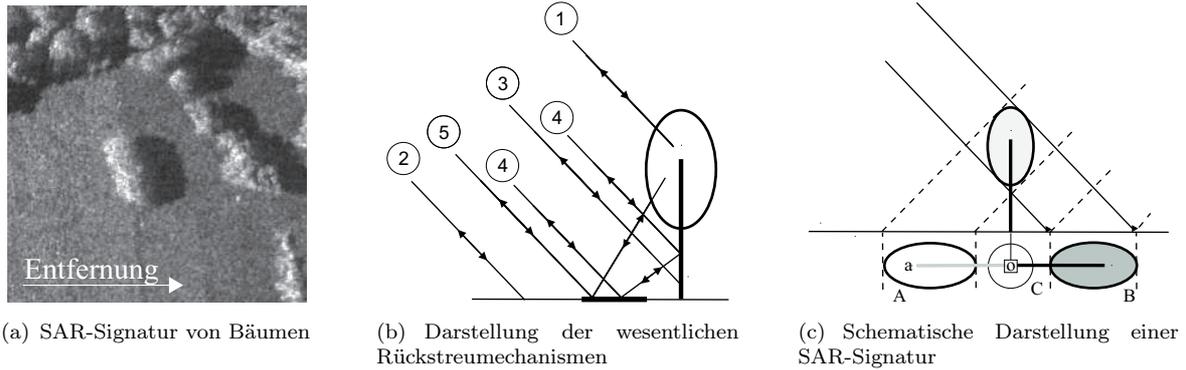


Abbildung 5.8. Abbildung von Bäumen

Sobald das Radarsignal die Baumkrone erreicht, kommt es zu Volumenreflexion in der Baumkrone (Rückstreuung 1), die eine diffuse Rückstreuung hervorruft und überwiegend in Region A abgebildet wird. Die Biomasse der Baumkrone verhindert weitgehend ein Durchdringen der Baumkrone, so dass hinter dem Baum ein Schattenbereich (Region B) entsteht. Wenn das Signal auf den Baumstamm trifft, kann es zu einer direkten Rückstreuung kommen (Strecke $\bar{a}o$, Rückstreuung 3). Der Anteil dieser Rückstreuung ist aber meistens relativ gering. Alle Doppelreflexionen (Rückstreuung 4) entsprechen in ihrer Entfernung der Entfernung zur Baumposition Punkt o und werden dort abgebildet. Die Region C repräsentiert die Baumkrone-Grund-Rückstreuung. Aufgrund des längeren Weges der Mehrfachreflexionen (Rückstreuung 5) kann dieser Bereich über den tatsächlichen Ort der Baumkrone hinausreichen. Dies kann dazu führen, dass Straßen, die in den Schattenbereich fallen, zusätzlich durch Mehrfachreflexionen verdeckt werden können und deshalb geometrisch falsch extrahiert werden. Die genannten Rückstreuteile in den Regionen A und C überlagern die direkte Rückstreuung des Untergrunds (Rückstreuung 2). Am stärksten ist die Region A von der Überlagerung betroffen. Die räumliche Ausdehnung der Layover- und Schattenflächen ist vom Einfallswinkel des Radars und von der Höhe des Baumes abhängig. Bei einem mittleren Einfallswinkel von 45° entspricht die Länge der Layover- bzw. Schattenfläche in Entfernungsrichtung der Höhe des Baumes, z. B. sind bei einer Baumhöhe von 15 m die Layover- und Schattenflächen in etwa gleich groß.

5.2.2 Fahrzeuge

Generell haben Fahrzeuge einen hohen Rückstreuquerschnitt aufgrund von metallischen und Corner-Reflexionen. Der Rückstreuquerschnitt kann jedoch je nach Aufnahmewinkel um bis zu 10 dB variieren. Im Zusammenhang mit der Straßenextraktion ist vor allem die Abbildung von Fahrzeugen, die sich auf der Straße bewegen, interessant. Denn bei bewegten Fahrzeugen kommen noch eine Reihe weiterer Abbildungseffekte hinzu, da normalerweise bei der Prozessierung der Rohdaten angenommen wird, dass Objekte auf der Erdoberfläche keine Eigenbewegung aufweisen. Aus dieser Annahme berechnet sich die relative Geschwindigkeit zwischen Sensor und ortsfestem Punktstreuer sowie die Frequenzmodulationsrate (FM-Rate) der Matched-Filter, die zur Fokussierung des Bildes in Azimut verwendet werden. Bewegen sich Objekte jedoch während des Aufnahmezeitraums relativ zur Erdoberfläche, wird diese Annahme verletzt. Dies führt bei sich beliebig bewegenden Objekten zu zwei wesentlichen Abbildungseffekten: einem Versatz in oder entgegen der Flugrichtung des Sensors und einer Verschmierung der Objekte im fokussierten Bild.

Für die weitere Betrachtung wird die Bewegung eines Objektes in zwei Komponenten zerlegt: eine Komponente, die parallel bzw. antiparallel zur Flugrichtung des Sensors verläuft und eine Komponente, die senkrecht dazu, also in Entfernungsrichtung verläuft. Die auftretenden Effekte sind in Abbildung 5.9 dargestellt und werden im Folgenden erläutert.

In Abbildung 5.9 ist der Frequenzverlauf eines Punktstreuers in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen. In Fall 1 stimmt der Frequenzverlauf des Punktstreuers mit dem des Matched-Filters überein. Im

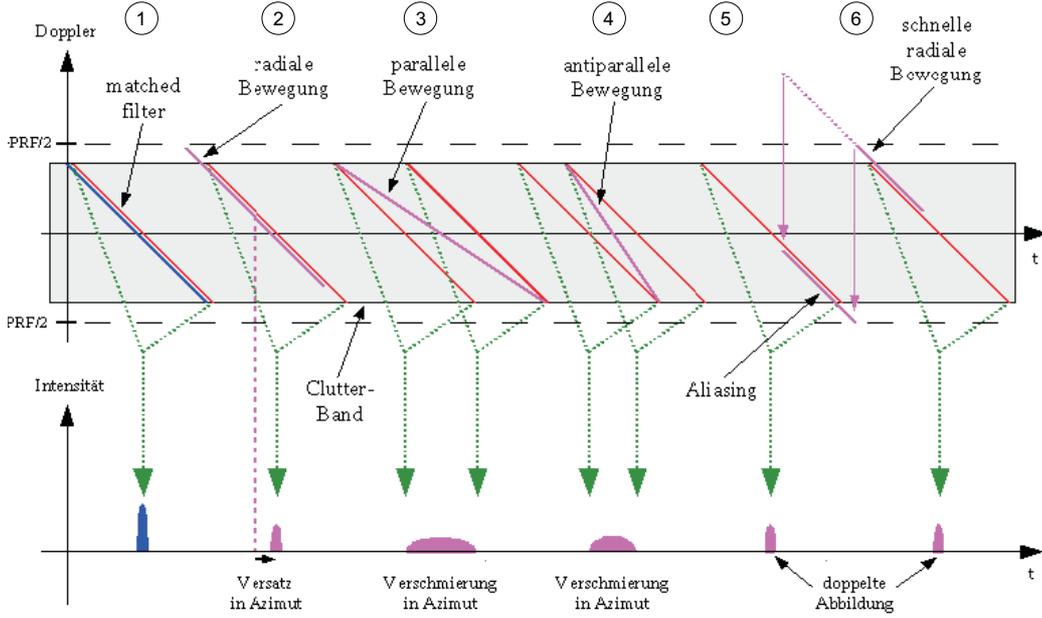


Abbildung 5.9. Abbildung bewegter Fahrzeuge in SAR-Bilddaten (nach ENDER (2003))

Ortsraum ergibt sich dadurch ein schmales, fokussiertes Bild. Der Prozess der Prozessierung eines unbewegten Punktstreuers in Azimut wird in Anhang A.4 ausführlicher beschrieben.

Die Bewegungskomponente in Entfernungsrichtung v_{y0} (Abbildung 5.9, Fall 2) verursacht eine Änderung des Entfernungsverlaufs. Bei einer konstanten Objektgeschwindigkeit v_{y0} wird zu dem Entfernungsverlauf eines stationären Ziels zusätzlich eine lineare Entfernungskomponente addiert, die proportional zu der Projektion des Geschwindigkeitsvektors in die Blickrichtung (*line-of-sight*) des Sensors $v_{los} = v_{y0} \cdot \sin \theta_{loc}$ ist, mit θ_{loc} als lokalem Einfallswinkel. Durch die Entfernungsänderung kommt es zu einem Versatz in Azimut im fokussierten Bild. Der Versatz in Azimut Δ_{az} eines sich in Entfernungsrichtung bewegenden Objektes ergibt sich aus der Geschwindigkeit des Objektes in Blickrichtung v_{los} gegenüber der angenommenen Geschwindigkeit zwischen dem Sensor und der Szene v_{rel} und der Entfernung zum Sensor R

$$\Delta_{az} = -R \cdot \frac{v_{los}}{v_{rel}} \quad (5.1)$$

Bei einer sehr schnellen radialen Bewegung können Frequenzen, die außerhalb des von der PRF definierten Frequenzbereichs liegen, durch Aliasing auf der anderen Seite des PRF-Bandes wieder auftauchen (Abbildung 5.9, Fall 5 und 6). Fahrzeuge werden dann an einer zusätzlichen Stelle mit geringerer Intensität abgebildet.

Bei einer Bewegungskomponente in Flugrichtung v_{x0} ändert sich die relative Geschwindigkeit zwischen dem SAR-Sensor und dem Objekt. Dies führt zu einer Änderung der Frequenzmodulationsrate eines bewegten Objektes in Flugrichtung FM_{bew} mit der Geschwindigkeit v_{x0} , die durch folgenden Zusammenhang gegeben ist

$$FM_{bew} = FM \left(1 - \frac{v_{x0}}{v_B} \right)^2, \quad (5.2)$$

wobei v_B die Geschwindigkeit des Radarstrahls am Boden ist. Bei einer parallelen Bewegung in Azimutrichtung (Fall 3) führt dies zu einem flacheren Frequenzverlauf in Azimut, während eine Komponente antiparallel zur Azimutrichtung zu einem Anstieg des Frequenzverlaufs führt (Fall 4). Bleibt die parallele Bewegung des Objektes im Matched-Filter unberücksichtigt, führt dies zu einer unvollständigen Fokussierung eines Punktstreuers und zu einer Verschmierung in Azimutrichtung. Ein Fahrzeug wird näherungsweise um das Zweifache der Distanz verschmiert, die es während des Beleuchtungszeitraums

t_{sa} zurückgelegt hat

$$D_{az} \approx 2 \cdot t_{sa} \frac{v_{SAR}}{v_B} v_{x0}. \quad (5.3)$$

Eine detailliertere Beschreibung des Zustandekommens dieser Effekte ist z. B. bei MEYER et al. (2005) zu finden.

5.2.3 Brücken

Die Abbildung von Brücken in SAR-Bildern ist durch eine Mehrfachabbildung von Brückenteilen gekennzeichnet. Dafür ist hauptsächlich der Entfernungsverzögerungseffekt (*Range-Delay-Effekt*) verantwortlich (SCHREIER, 1993). Denn Brücken weisen aufgrund ihrer Struktur und ihres Materials verschiedene Rückstreumechanismen (Einfach-, Zweifach- und Mehrfachreflexionen) auf, die zu Laufzeitunterschieden führen. Dies hat zur Folge, dass dieselben Brückenteile mehrfach abgebildet werden (Abbildung 5.10(a)). Betrachtet man die markanten Merkmale der SAR-Signatur einer Autobahnbrücke, so lassen sich einige, typische Reflexionen beobachten: Die kürzeste Entfernung zum Sensor entsteht durch eine direkte Reflexion (Abbildung 5.10(b), Reflexion 1). Diese Einfachreflexion beruht auf der Reflexion des meist metallischen Berückengeländers. Eine Doppelreflexion ist verantwortlich für eine weitere Reflexion an dieser Brückenseite (Abbildung 5.10(b), Reflexion 2). Die Abbildung dieser Reflexionen erfolgt am Fußpunkt der Brücke. Obwohl die Reflexionen 1 und 2 durch Interaktion mit derselben Brückenseite entstanden sind (Abbildung 5.10(b)), wird die Reflexion 2 deutlich nach Reflexion 1 abgebildet, da sie einen längeren Weg zum Sensor hat. Aus dem Abstand dieser Einfach- und Zweifachreflexionen kann mit Hilfe des Einfallswinkels und der Azimutrichtung direkt die Höhe der Brücke berechnet werden. Darüber hinaus können weitere Reflexionen an der Sensor zugewandten Brückenseite entstehen, z. B. kann eine Dreifachreflexion auftreten, indem das Signal auf der Straße spiegelnd unter die Brücke reflektiert wird und dort auf Metall oder einen Corner trifft, welche die gesamte Energie wieder in Richtung Straße und zum Sensor zurückwerfen. Für eine genaue Bestimmung der Rückstreumechanismen sind jedoch noch weitere Untersuchungen zum Rückstreuungverhalten von Brücken vonnöten. In Abbildung 5.10(a) bzw. 5.10(b) kommt es mit den Reflexionen 3 und 4 zu zwei weiteren typischen, starken Reflexionen. Diese resultieren aus direkten Einfachreflexionen an der metallischen Mittelleitplanke (Reflexion 3) bzw. dem metallischen Brückengeländer (Reflexion 4). Die SAR-Signatur ist auch abhängig von der Orientierung der Brücke zum Sensor. So weisen Brücken, die exakt in Entfernungsrichtung verlaufen, nur schwache oder gar keine Mehrfachreflexionen auf. Sie bilden sich unter Umständen nur durch die beiden stark reflektierenden, metallischen Begrenzungen ab. Sind die Begrenzungen nicht aus Metall, sondern z. B. aus Holz, ist eine Brücke in Entfernungsrichtung unter Umständen gar nicht sichtbar.

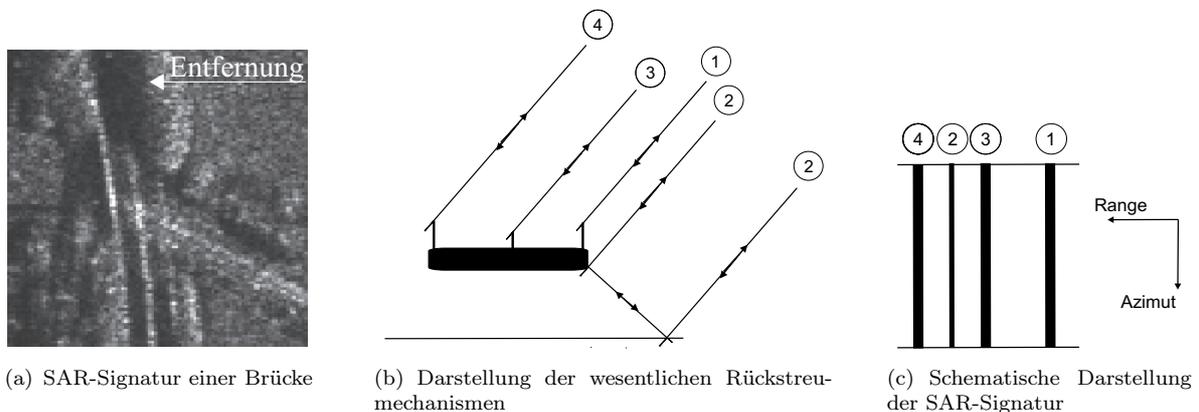


Abbildung 5.10. Rückstreuverhalten einer Brücke durch Einfach- (1,3,4) und Zweifachreflexion (2).

5.2.4 Verkehrsschilder

Die Rückstreuung von größeren Verkehrsschildern, d. h. Schildern, die über eine Fahrbahn reichen, bildet sich ebenfalls in SAR-Bilddaten zwei- bis dreifach ab (Abbildung 5.11). Zum einen erfolgt durch das Metall eine starke direkte Reflexion zum Sensor (Abbildung 5.11(b), Reflexion 1). Zum anderen entsteht ein Corner-Reflektor-Effekt zwischen der Straße und dem Schild (Abbildung 5.11(b), Reflexion 2). Darüber hinaus kommt es zu einer Dreifachreflexion zwischen der Fahrbahn, dem Schild und der Fahrbahn (Abbildung 5.11(b), Reflexion 3). Diese Reflexion fällt schwächer aus, da sie nur an der schmalen Unterseite stattfindet. Dies führt bei der SAR-Signatur zu zwei sehr hellen und einem etwas schwächeren Streifen (Abbildung 5.11(c)). Der Streifen, der durch die Doppelreflexion verursacht wird (Reflexion 2), befindet sich im eigentlichen Fußpunkt des Schildes. Die drei Streifen sind gleichabständig, da sich ihre Laufzeiten jeweils um das Einfache bis Zweifache der Strecke von der Fahrbahn bis zum Schild unterscheiden. Auch hier kann aus dem Abstand der Reflexionen mit Hilfe des Einfallswinkels und der Azimutrichtung die Höhe des Verkehrsschildes berechnet werden bzw. kann die Kenntnis über bestimmte, mögliche Abstände der Reflexionen zur Extraktion genutzt werden. Je nach Orientierung des Schildes zum Sensor kann es zu einer Überlagerung der Rückstreuungen kommen.

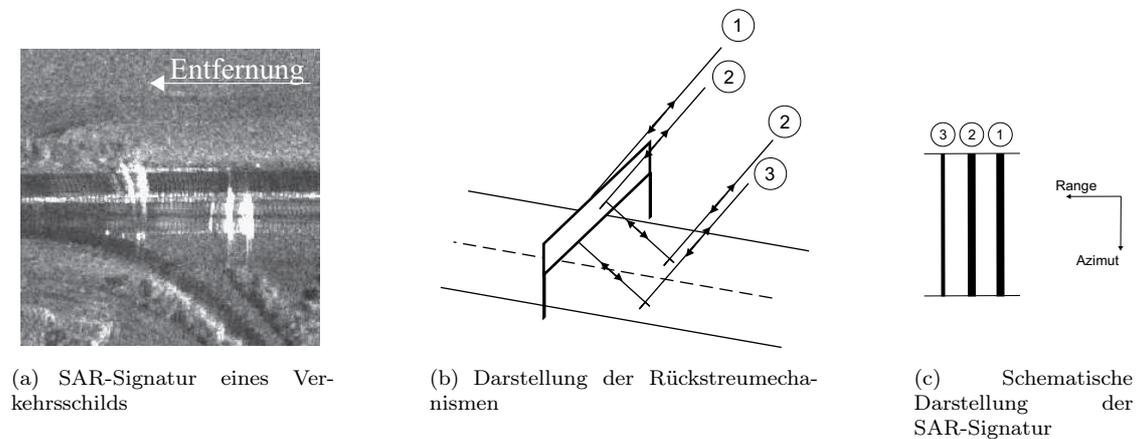


Abbildung 5.11. Rückstreuverhalten von metallischen Verkehrsschildern

5.3 Folgerungen für die Extraktion

Durch die Analyse der Ergebnisse in diesem Kapitel wurden die Stärken und Schwächen der Straßenextraktion aus SAR-Bilddaten aufgezeigt und analysiert. Die resultierenden Erkenntnisse beziehen sich auf die verwendeten, großflächigen Datensätze basierend auf landschaftlich unterschiedlichen Gebieten und unterschiedlichen SAR-Sensoren. Die gewonnenen Erkenntnisse werden in diesem Abschnitt noch einmal zusammengefasst und es werden Verbesserungsvorschläge gegeben.

Die Analyse der Stärken und Schwächen der Straßenextraktion (Abschnitt 5.1) hat gezeigt, dass die Erkennbarkeit von Straßen wesentlich von der angrenzenden Umgebung abhängt. Je nach Szeneninhalt variiert das Vorhandensein von Gebäuden, Bäumen, Kontrastverhältnissen, Fahrzeugen, Brücken, größeren Verkehrsschildern, usw. Dabei wird die Straßenextraktion in ländlichen Szenen in erster Linie von Bäumen beeinträchtigt, während in den industriellen Gebieten Brücken, größere Verkehrsschilder und Autos stärker die Extraktion stören. Auch die Detektion von Autobahnen bereitet generell Probleme. Als ein wichtiges Bewertungsmaß bei der Extraktion von Straßen aus SAR-Bilddaten hat sich die Bewertung der Straßen bezüglich des mittleren Grauwertes herausgestellt. Vor allem konnten dadurch Fehlextraktionen in landwirtschaftlichen Flächen erheblich reduziert werden.

Im Rahmen der Analyse konnte gezeigt werden, dass ein Teil der Störungen, die zu unvollständigen Ergebnissen führen, auf SAR-spezifische Abbildungseigenschaften zurückzuführen ist. Zu den Problembereichen, die speziell in SAR-Bilddaten auftreten, zählen Bäume, bewegte Fahrzeuge, größere

Verkehrsschilder und Brücken. Das Erscheinungsbild dieser Objekte wurde in Abschnitt 5.2 detailliert analysiert. Diese Objekte stören das Erscheinungsbild von Straßen zwar nur lokal, können aber zu größeren Lücken im Straßennetz führen. Sie lassen sich unter dem Begriff lokaler Kontext bzw. Kontextobjekte (vgl. Abschnitt 3.1.2) zusammenfassen. Durch ihren überwiegend funktionalen Zusammenhang ist es möglich, dass sie die Extraktion auch stützen können, wenn sie im Rahmen der Bildanalyse detektiert und für die Straßenextraktion ausgewertet werden.

Ferner hat die Analyse ergeben, dass das Maß für die Vollständigkeit von der zu extrahierenden Straßenklasse abhängig ist. Je nach Straßenklasse treten die einzelne Problembereiche häufiger bzw. weniger häufig auf. Bei den Nebenstraßen stören vor allem Bäume und Baumreihen das Erscheinungsbild von Straßen. Bei Bundesstraßen ist der Einfluss der Vegetation aufgrund der größeren Straßenbreite geringer. Dort verdecken Bäume mit ihren Layover- und Schattenflächen die Straße meist nur teilweise, so dass oft eine leicht in der Lage verschobene Extraktion möglich ist. So ist die Vollständigkeit bei Bundesstraßen mit durchweg über 90 % sehr hoch. Bei Autobahnen treten die Besonderheiten wie Mittelleitplanken, größere Verkehrsschilder, Auffahrten und bewegte Fahrzeuge stärker in den Vordergrund. Dies führt zu unvollständigen Extraktionen, da diese Objekte in dem herkömmlichen Straßenmodell nicht enthalten sind. Autobahnen zeigen insbesondere durch ihre Breite und die helle Mittelleitplanke ein markantes Erscheinungsbild, das in einer weitergehenden Modellierung stärker berücksichtigt werden sollte.

Bedingt durch die ausmaskierten Wald- und Stadtgebiete fehlen in der Nähe dieser Gebiete sichere Startstücke. Gerade Städte stehen in einem direkten Zusammenhang mit dem Straßennetz, da Straßen dazu dienen, verschiedene Orte miteinander zu verbinden. Diese Verbindungseigenschaft von Straßen sollte stärker in die Extraktion integriert werden, zumal durch die Klassifikation in dieser Arbeit die Information über Siedlungsgebiete bereits vorliegt.

6. Verbesserung der Straßenextraktion für SAR-Bilddaten

Im vorigen Kapitel wurde gezeigt, welche Schwierigkeiten bei der bisherigen Extraktion von Straßen noch bestehen. Insbesondere benachbarte Objekte stellen für die Straßenextraktion ein Problem dar. Dieses Problem tritt auch in optischen Bilddaten auf. Verschiedene Arbeiten, die sich mit der Extraktion von Straßen aus optischen Bilddaten beschäftigen, unterstützen durch die gezielte Einführung von Kontextwissen die Extraktion. Dieser Ansatz wird in dieser Arbeit auf SAR-Bilddaten übertragen, denn gerade für die schräg aufgenommenen SAR-Bilder ist die Integration von Kontextwissen besonders wichtig.

In diesem Kapitel werden für drei SAR-spezifische Problembereiche, die sich aus der Analyse der Ergebnisse (Kapitel 5) ergeben haben, (Kontext-)Modelle vorgestellt und in die Straßenextraktion integriert, um damit die Extraktion weiter zu verbessern.

Den ersten Problembereich bilden die Kontextobjekte. Der Einfluss von Kontextobjekten auf die Straße wird in Abschnitt 6.1 modelliert und entsprechend der funktionalen Zusammenhänge werden die Objekte Autos, Verkehrsschilder, Brücken und Bäume in die Extraktion integriert.

Der zweite Problembereich besteht in der Auswahl von Startsegmenten in der Nähe von Städten. In Abschnitt 6.2 wird hierfür globales Kontextwissen eingesetzt, um Startstücke in der Nähe von Städten zu generieren und zu integrieren.

Ein weiteres Problemfeld stellen die Autobahnen dar. Für das Erscheinungsbild von Autobahnen in SAR-Bilddaten wird in Abschnitt 6.3 ein explizites Modell aufgestellt. Darauf aufbauend wird ein Verfahren zur Extraktion von Autobahnen entwickelt, welches das Erscheinungsbild und das Maßstabsraumverhalten dieser Objektklasse berücksichtigt.

6.1 Nutzen von lokalem Kontext: Kontextobjekte

In diesem Abschnitt wird der Nutzen von lokalem Kontext für die Straßenextraktion untersucht. Wie Abbildung 6.1 zeigt, stören Kontextobjekte, wie z. B. Bäume oder verschmierte Fahrzeuge, die Extraktion. Einige der störenden Kontextobjekte beinhalten aber auch ein hohes Maß an Evidenz für eine Straße, wie z. B. Fahrzeuge, Brücken oder größere Verkehrsschilder. Andere Objekte, wie z. B. Bäume oder Baumreihen, können sich entweder direkt neben einer Straße oder in größerer Entfernung zu einer Straße befinden, so dass diese Objekte eher eine geringe Evidenz für Straßen beinhalten. Die Vorgehensweise zur Integration von Kontextobjekten in die Straßenextraktion wird in Abschnitt 6.1.1 erläutert und die erzielten Ergebnisse werden in Abschnitt 6.1.2 beschrieben (bzw. in WESSEL et al. (2003)).

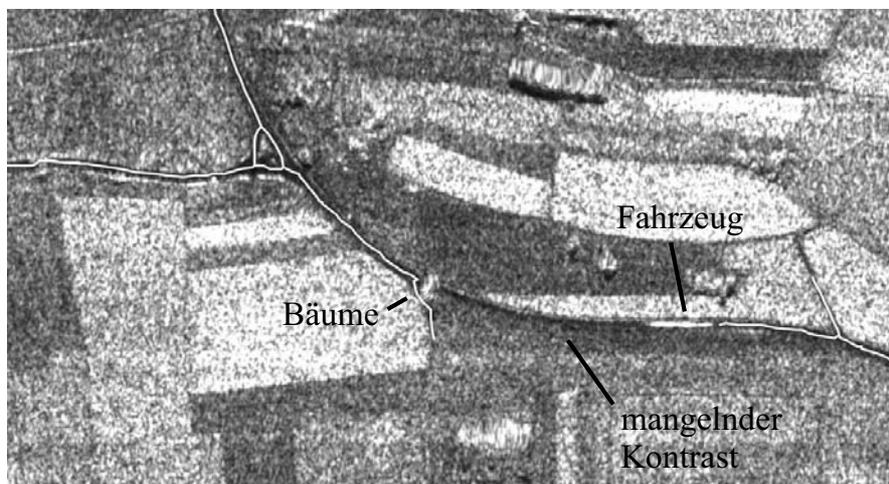


Abbildung 6.1. Fehlende Extraktion bedingt durch Bäume, mangelnden Kontrast und ein Fahrzeug

6.1.1 Integration der Kontextobjekte in die Straßenextraktion

Um Kontextobjekte in den Prozess der Straßenextraktion einzuführen, ist es notwendig, (1) dass sie zuverlässig zur Verfügung stehen, (2) dass ihre Evidenz in Bezug auf Straßen bekannt ist und (3) dass sie in einer angemessenen Repräsentationsform in die Straßenextraktion integriert werden können.

zu (1) Automatische Verfahren für die Extraktion von Kontextobjekten oder andere Informationen über Kontextobjekte standen im Rahmen dieser Untersuchung nicht zur Verfügung, deshalb wurden die Objekte manuell aus den Bilddaten digitalisiert. Prinzipiell wird davon ausgegangen, dass es möglich ist, diese Kontextobjekte automatisch zu extrahieren und damit auch ein Maß für die Zuverlässigkeit der Detektion zu erhalten. Um für diese Untersuchung abzuschätzen wie zuverlässig ein Kontextobjekt extrahiert werden kann, werden im Folgenden Vorschläge zur Extraktion für die eingeführten Kontextobjekte gegeben.

zu (2) Die Evidenz eines Kontextobjektes für Straßen ergibt sich daraus, inwieweit sein Auftreten in einem direkten Zusammenhang mit Straßen steht. Aus der Evidenz für Straßen wird ein Fuzzy-Gewicht zwischen 0 (kein Gewicht) und 1 (hohes Gewicht) abgeschätzt. Bei der Abschätzung des Evidenzmaßes kann auch die Zuverlässigkeit der Detektion aus (1) mitberücksichtigt werden.

zu (3) Es wird eine Repräsentationsform gewählt, die die Objekte repräsentiert. Die Wahl der Repräsentationsform ist eng mit der Möglichkeit des Systems zur Integration von zusätzlichen Objekten verknüpft. Das System zur Straßenextraktion erlaubt ein Hinzufügen von externen, vektoriellen Segmenten mit entsprechenden Zuverlässigkeitsmaßen im Rahmen des Fusionschrittes der Extraktion (beschrieben in Abschnitt 3.3, Abbildung 3.4). Mit der jeweiligen Repräsentationsform und dem abgeschätzten Evidenzmaß aus (2) werden die Kontextobjekte mit den übrigen, aus den Bilddaten extrahierten Linien fusioniert und somit in die Straßenextraktion integriert.

Bäume

In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass größere Waldgebiete mit Hilfe eines vollpolarimetrischen Datensatzes extrahiert werden können. Dieses Verfahren ist für die Generierung von Hypothesen für Bäume weiter zu verfeinern, da einzelne Bäume und Baumreihen zusammen mit ihrem Kronendurchmesser extrahiert werden müssen, um adäquat repräsentiert werden zu können. Für optische Bilddaten ist dies z. B. bei STRAUB und HEIPKE (2001) umgesetzt worden. Für die Integration in die Straßenextraktion werden als Repräsentationsform für einzelne Bäume Verknüpfungspunkte gewählt, deren Durchmesser in etwa dem Kronendurchmesser der Bäume entspricht. Im Rahmen der Straßenextraktion ist der Verknüpfungspunkt als Knoten mit abgehenden Kanten realisiert (Abbildung 6.2). Die Position des Knotens wird leicht in die Richtung des Layovers verschoben, damit der Knoten die wahrscheinliche Position der Straße besser markiert. Durch die Einführung des Knotens werden dem Suchalgorithmus bei der Netzwerkgenerierung zusätzliche Kanten angeboten, die zur Schließung von lokalen Lücken verwendet werden können. Bei passenden Richtungen zu angrenzenden Straßenstücken werden diese Verbindungen ausgewählt. Zusätzlich muss dem Verknüpfungspunkt bei der Integration in die Straßenextraktion ein Gewicht mitgegeben werden. Dieses Gewichte sollte die Auftrittswahrscheinlichkeit repräsentieren, mit der ein Baum, bzw. der Layover-Effekt des Baumes, eine Straße verdeckt. Diese Wahrscheinlichkeit ist für Bäume eher als niedrig einzustufen, denn wo ein Baum ist, muss nicht zwangsweise eine Straße verlaufen. Bei Baumreihen ist die Wahrscheinlichkeit zwar größer, jedoch besteht ebenfalls kein direkter kausaler Zusammenhang. Daher wird für den Verknüpfungspunkt eines einzeln stehenden Baumes ein niedriges Gewicht von beispielsweise 0.2 gewählt.

Bewegte Fahrzeuge

Bewegte Fahrzeuge in Azimutrichtung stehen in einem direkten, kausalen Zusammenhang zu Straßen und beinhalten ein hohes Maß an Evidenz für das Vorhandensein einer Straße, da sie auf der Fahrbahn verschmiert abgebildet werden. In allen anderen Richtungen werden sie neben der Straße abgebildet. Somit beschränken sich auch die Beeinträchtigungen der Straßenextraktion auf die länglichen Verschmierungslinien in Azimutrichtung. Analog zu den Verschmierungslinien können Fahrzeuge

Objekt:	Baum	Fahrzeug	Brücke	Verkehrsschild
Repräsentationsform:				
Gewicht:	niedrig	hoch	hoch / niedrig	mittel

Abbildung 6.2. Repräsentationsformen zur Einführung von lokalem Kontext

durch eine Linie in der Straßenextraktion repräsentiert werden. Die Extraktion von Fahrzeugen ist ein aktuelles Forschungsthema (z. B. ENDER, 1999; KIRSCHT, 1998; LIVINGSTONE et al., 2002). Mit den Verbindungslinien stehen sehr sichere Hypothesen für Straßen zur Verfügung. Sie werden mit einem Gewicht von 0.9 in die Straßenextraktion eingeführt. Damit dienen sie nicht nur zum Schließen von Lücken, sondern auch als Startstücke für die Extraktion.

Brücken

Brücken erscheinen fast ausschließlich im Zusammenhang mit Verkehrswegen. Hier geht es um Brücken auf denen eine Straße verläuft. Unter der Brücke kann sich auch eine Straße oder ein anderer Verkehrsweg befinden. Brücken sind somit Objekte mit einem hohen Maß an Evidenz für Straßen *auf* der Brücke und zu einer geringeren Wahrscheinlichkeit für Straßen *unter* der Brücke. Infolgedessen werden Brücken als Kreuz mit zwei unterschiedlichen Gewichten repräsentiert (Abbildung 6.2). ROBALO und LICHTENEGGER (1999) stellen ein Modell ähnlich wie in Abschnitt 5.2.3 von Brücken auf. Die jeweils beschriebenen Abbildungseigenschaften können zur Entwicklung eines Verfahrens zur Extraktion von Brücken herangezogen werden. Es kann angenommen werden, dass eine Extraktion aufgrund der speziellen geometrischen Anordnung der Einfach-, Zweifach- und Dreifachreflexion zu sicheren Kandidaten für Brücken führen wird. Die Einführung von Hypothesen für Brücken erfolgt daher mit einem hohen Gewicht, z. B. mit einem Gewicht von 0.9, in Richtung der Brücke (Abbildung 6.2). Mit der Einführung von sehr sicheren Hypothesen, können Straßen auf den Brücken extrahiert werden bzw. kann das Straßennetz ausgehend von den sicheren Hypothesen initialisiert werden. Die Linie quer zur Brücke bietet mit einem Gewicht von 0.2 eine mögliche Verbindung für Straßen unterhalb der Brücke. Insbesondere die Verbindung unterhalb der Brücke kann nicht ohne Zusatzwissen aus den Bilddaten extrahiert werden.

Größere Verkehrsschilder

Größere Verkehrsschilder, die über die Fahrbahn reichen, treten hauptsächlich bei Straßen höherer Ordnung auf und weisen somit ein hohes Maß an Evidenz für Straßen auf. Eine korrekte, automatische Extraktion dieser Objekte erscheint aber schwieriger als bei Brücken, so dass größere Verkehrsschilder nur mit einem mittleren Gewicht von 0.5 in den Extraktionsalgorithmus eingebracht werden. Mögliche Merkmale, die zur Extraktion von Verkehrsschildern verwendet werden können, sind in Abschnitt 5.2.4 beschrieben. Repräsentiert werden Verkehrsschilder bei der Integration in die Extraktion mit einer Linie orthogonal zu ihrer Ausrichtung. Dadurch kann dem Algorithmus zur Netzwerkgenerierung trotz der inhärenten Überstrahlungen von größeren Verkehrsschildern eine Linie zur Vervollständigung des Netzwerkes angeboten werden.

6.1.2 Ergebnisse und Bewertung

Anhand der Testdatensätze *Stadtrand_1m* und *Ländlich_2m* werden im Folgenden Ergebnisse vorgestellt, die durch die Einführung von manuell digitalisierten Kontextobjekten erzielt werden konnten. Damit wird der Nutzen der Einführung von Kontextobjekten für die Extraktion belegt.

Bei dem Testgebiet *Stadtrand_1m* wurden die Kontextobjekte Brücken, größere Verkehrsschilder und Autos in die Straßenextraktion eingeführt. Eine wesentliche Verbesserung brachte vor allem die Einführung von Brücken, da dadurch mehr Nebenstraßen gefunden werden konnten (vgl. Tabelle 6.1). Die Vollständigkeit bei den Straßenklassen Autobahn und Bundesstraße ist dagegen gleich geblieben, obwohl gerade für die Autobahnen viele Verkehrsschilder und Brücken in die Extraktion eingeführt wurden und dadurch zusätzliche Segmente für Verknüpfungen zur Verfügung standen. Daraus lässt sich schließen, dass die eingeführten Segmente nicht ausgereicht haben, um die starken Überstrahlungen im Bereich der Autobahn zu kompensieren.

Datensatz <i>Stadtrand-1m</i>	Manuelle Referenz		
	X-HH (10m und 16m)		
	ohne Kontext	mit Kontextobjekten (Autos, Brücken, Verkehrsschilder)	mit Kontextobjekten und zusätzlich der Stadtgrenze
Vollständigkeit Gesamt [%]	67	71	73
Autobahnen [%]	64	64	64
Bundesstraßen [%]	95	95	95
Nebenstraßen [%]	66	73	79
Zuverlässigkeit Gesamt [%]	57	59	58
RMS [m]	2.2	2.3	2.3

Tabelle 6.1. Datensatz *Stadtrand-1m*: Bewertung der Ergebnisse mit lokalem und globalem Kontext

Bei dem Datensatz *Ländlich_2m* wurde eine große Anzahl von Bäumen und ein in Flugrichtung verschmiertes Auto in die Extraktion integriert. Dies hat in den Ergebnissen vor allem zu einer Verbesserung der Vollständigkeit bei den Bundesstraßen geführt, deren Vollständigkeit von 82 % auf 87 % gestiegen ist (Tabelle 6.2). Die übrigen Bewertungen für die Vollständigkeit der Nebenstraßen, die Zuverlässigkeit und die geometrische Genauigkeit sind dagegen im Wesentlichen unverändert geblieben. Tabelle 6.2 zeigt des Weiteren die Ergebnisse für eine Extraktion auf demselben Testgebiet mit zwei verschiedenen Linienbreiten (8 m und 13 m). Auch hier konnte durch die Einführung von Bäumen und Autos die Vollständigkeit bei den Bundesstraßen unter Beibehaltung der übrigen Bewertungen erhöht werden. Abbildung 6.3(d) veranschaulicht die Vorgehensweise, wie durch die Einführung von Kontextobjekten Lücken in der Extraktion geschlossen werden konnten. Abbildung 6.3(a) zeigt den Bildausschnitt (ohne Extraktionsergebnisse), in dem es bei der Extraktion aufgrund des Layover einer Baumgruppe und eines verschmierten Autos zu einer Lücke im Straßennetz gekommen ist. Für die Betrachtung dieses Beispiels werden beide Konfigurationen aus Tabelle 6.2 herangezogen: die Extraktion basierend auf einer Linienbreite (Abbildung 6.3(b)) und die Extraktion basierend auf zwei verschiedenen Linienbreiten (Abbildung 6.3(c)). Durch die Einführung der Kontextobjekte (Abbildung 6.3(d)) konnte bei der Extraktion mit einer Linienbreite die Lücke geschlossen werden (Abbildung 6.3(e)). Bei der Extraktion mit zwei Linienbreiten (Abbildung 6.3(f)) ist eine kleine Lücke bestehen geblieben, da in diesem Straßenabschnitt ein niedriger Kontrast zur Umgebung herrscht, wodurch die beiden Linienenden so stark in ihrer Richtung divergieren, dass sie nicht miteinander verbunden werden konnten. Generell ist anzumerken, dass mit diesem Ansatz nur Lücken geschlossen werden können, die durch den lokalen Kontext begründet sind, wohingegen Lücken, die anderweitig begründet sind, bestehen bleiben.

Ein großer Vorteil der Modellierung von Kontext ist die gleich bleibend hohe Robustheit der Extraktion. Üblicherweise wird versucht, nicht modellierte Objekte durch eine Lockerung der Parameter zu überbrücken (z. B. bei den Parametern der Liniengruppierung). Auf der einen Seite führt dies zwar zu vollständigeren Ergebnissen, auf der anderen Seite sind diese Ergebnisse aber weniger korrekt, da weichere Parametereinstellungen mehr Fehldetektionen erzeugen. In den vorgestellten Testdatensätzen

Datensatz <i>Ländlich-2m</i>	Manuelle Referenz					
	Eine Linienbreite			Zwei Linienbreiten		
	X-HH (13 m)			X-HH (8 m und 13 m)		
	ohne Kontext	plus Bäume und Autos	zusätzl. Stadtgrenze	ohne Kontext	plus Bäume und Autos	zusätzl. Stadtgrenze
Vollständigkeit Gesamt [%]	71	72	74	79	80	82
Bundesstr. [%]	82	87	88	92	95	96
Nebenstr. [%]	67	66	69	74	74	77
Zuverlässigkeit Gesamt [%]	86	86	85	71	71	68
RMS [m]	2.3	2.2	2.3	2.2	2.2	2.3

Tabelle 6.2. Datensatz *Ländlich-2m*: Bewertung der Ergebnisse mit lokalem und globalem Kontext, erzielt durch die Extraktion mit einer Linienbreite und einer Fusion aus zwei Linienbreiten (8 m, 13 m)

konnten so mit einer konservativen Parametereinstellung und mit Hilfe von Kontextobjekten Lücken in der Straßenextraktion geschlossen werden, ohne dass dies zu einer niedrigeren Zuverlässigkeit führt.

6.2 Nutzen von globalem Kontext: Kontextgebiete

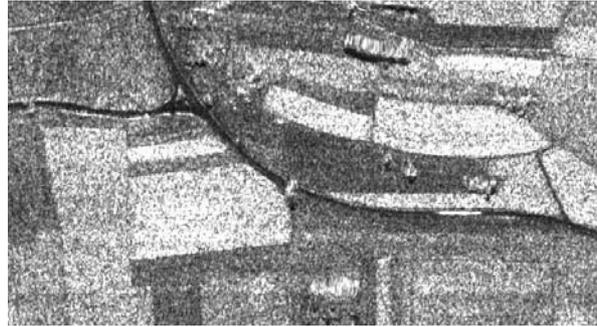
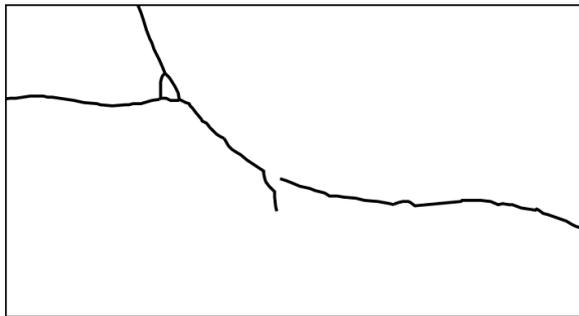
Als Schwachpunkt der bisherigen Extraktion hat sich gezeigt, dass Straßen in der Nähe von Städten oft nicht als Startstücke für eine Extraktion erkannt werden, da sie aufgrund von störenden Einflüssen wie Gebäuden oder Vegetation nicht gut genug bewertet worden sind. Bei herkömmlichen Extraktionen fehlen daher oft diese Straßenabschnitte. Bisher wurde globaler Kontext nur dadurch berücksichtigt, dass Stadt- und Waldgebiete von der Extraktion ausgeschlossen sind. Dies erfolgte mit Hilfe einer aus den SAR-Daten erstellten Klassifikation der Regionen Stadt, Wald und offene Landschaft (Abschnitt 4.4). Im Folgenden wird ein Verfahren beschrieben, wie das Wissen über die städtischen Gebiete in die Extraktion integriert werden kann, um die Extraktion von Straßen in der Nähe von Städten zu verbessern (vgl. auch WESSEL (2004)).

6.2.1 Integration der Stadtgrenze in die Straßenextraktion

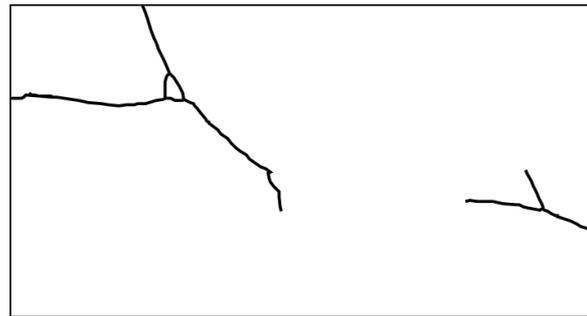
Städte stehen in einem direkten, funktionalen Zusammenhang zum Straßennetz und liefern somit eine hohe Evidenz für den Beginn einer Straße, da man anders als bei Waldgebieten davon ausgehen kann, dass von Städten so gut wie immer Straßen ausgehen. Für die Integration der Stadt in die Straßenextraktion werden die Umrisse der Stadtgebiete ausgewählt. Diese können aus der in Abschnitt 4.4 durchgeführten Klassifikation generiert werden. Für die Einführung der Städte in Form von Umrisslinien sprechen im Wesentlichen drei Gründe: (1) durch die Beschränkung auf Umrisslinien müssen keine weiteren Hypothesen generiert oder Extraktionen innerhalb der Stadtgebiete unternommen werden, (2) Umrisslinien als Straßenersatz erfüllen die Funktion von Straßen, Städte miteinander zu einem Netzwerk zu verbinden, (3) von jedem Punkt der Umrisslinie aus ist es möglich, eine Straße zu beginnen, wenn ausreichend Evidenz dafür vorliegt. Die Linien der Stadtumrisse werden mit einem sehr hohen Gewicht versehen, um als Startstücke fungieren zu können.

6.2.2 Ergebnisse und Bewertung

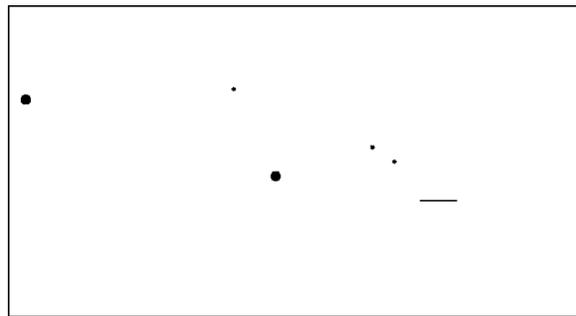
In die Datensätze *Stadtrand_1m* und *Ländlich_2m* wurden Stadtumrisse in die Straßenextraktion als mögliche Startstücke eingeführt. Im Fall von *Stadtrand_1m* wurden die Stadtumrisse manuell digitalisiert, während im Fall von *Ländlich_2m* die Stadtumrisse aus der Vorklassifikation verwendet werden konnten. Durch das Einführen der Stadtgrenze in die Straßenextraktion wird die Netzwerkgenerierung auch von den Stadtgebieten aus initialisiert und fehlende Straßenstücke werden somit extrahiert. Die

(a) Ausschnitt aus Datensatz *Ländlich_2m*

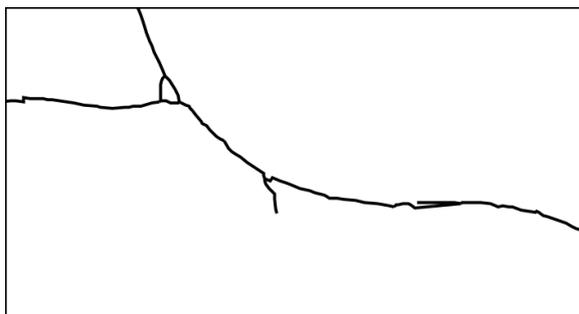
(b) Ergebnis mit einer Linienbreite



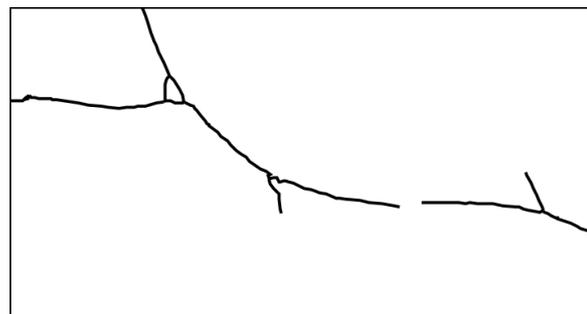
(c) Ergebnis mit zwei Linienbreiten



(d) Einführung lokaler Kontextobjekte



(e) Ergebnis mit lokalem Kontext für (b)



(f) Ergebnis mit lokalem Kontext für (c)

Abbildung 6.3. Extraktion mit lokalem Kontext (a) SAR-Bild (b),(c) Extraktionsergebnisse ohne lokalen Kontext (d) eingeführte lokale Kontextobjekte: Auto (Linie), Bäume (Verknüpfungspunkte) (e),(f) Ergebnisse unter Berücksichtigung der Kontextobjekte

Ergebnisse der Extraktionen sind in den Tabellen 6.1 und 6.2 veranschaulicht. So konnte in beiden Testgebieten die Vollständigkeit insgesamt um 2% verbessert werden.

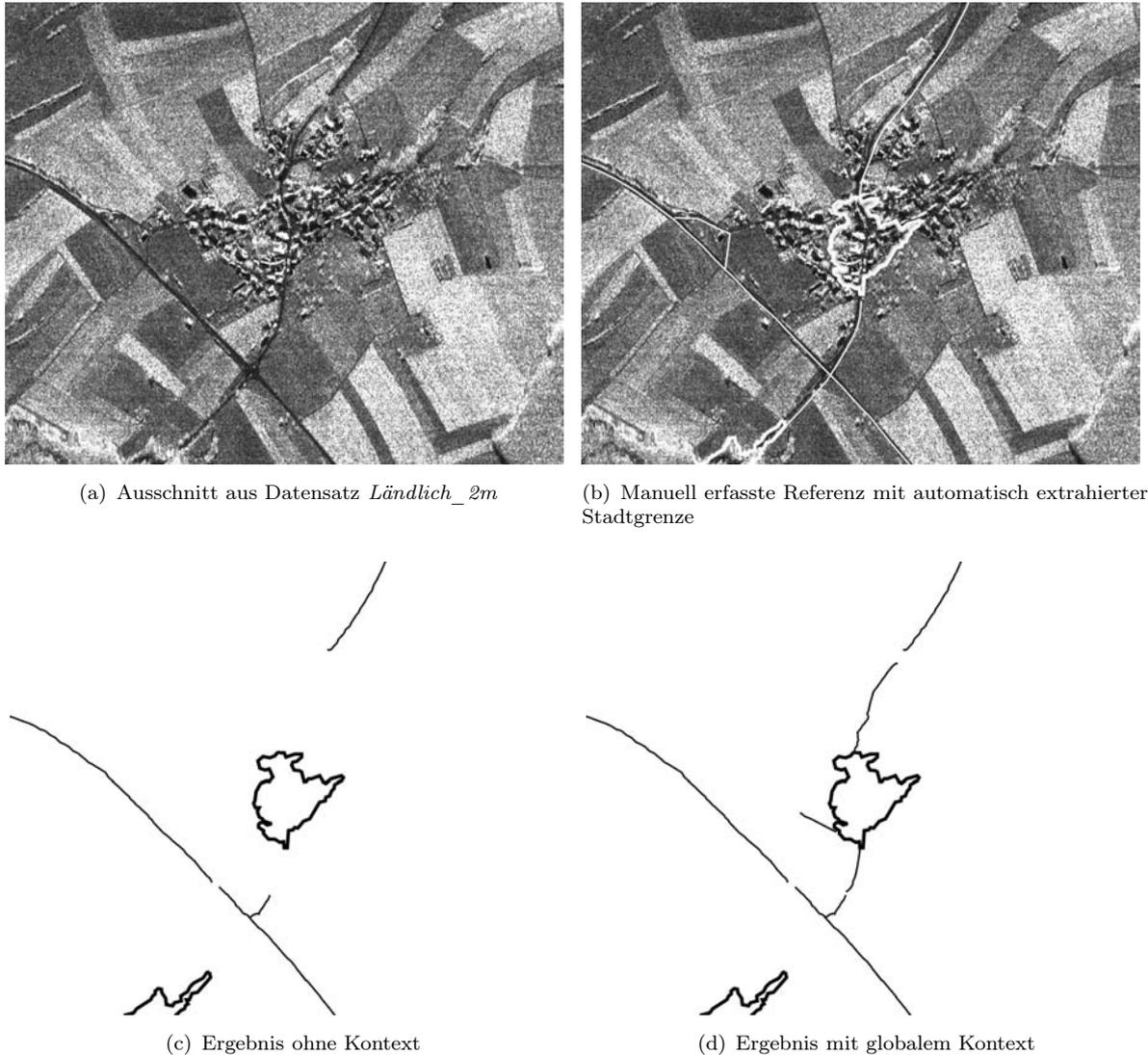
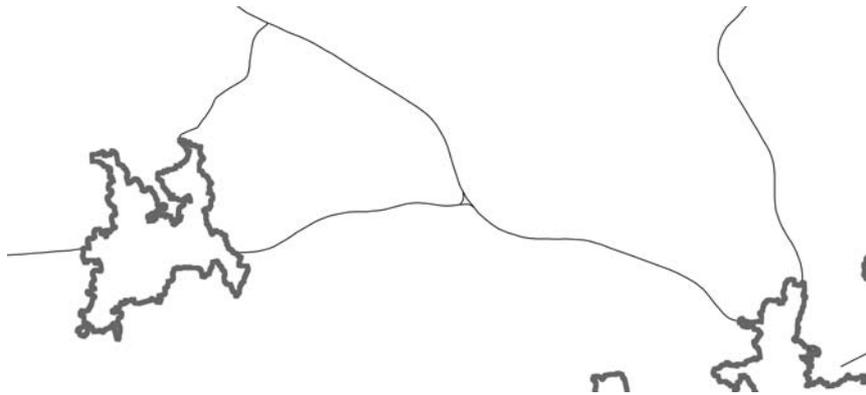


Abbildung 6.4. Extraktionsergebnis mit globalem Kontext (a) SAR-Bild (b) Referenz (c) Ergebnis ohne Kontext (d) Ergebnis mit globalem Kontext unter Berücksichtigung der Stadtgrenze

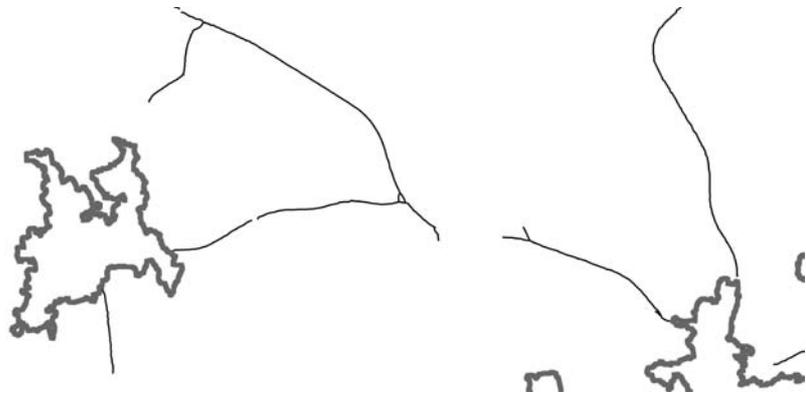
Bei dem Datensatz *Stadtrand_1m* (Tabelle 6.1) stieg die Vollständigkeit der Nebenstraßen um 6 % bei nahezu gleichbleibender Zuverlässigkeit. Der Wert für die Vollständigkeit ist hier jedoch etwas zu optimistisch, da es durch die Einführung der Stadtgrenze auch zu einigen doppelten Extraktionen gekommen ist. Dadurch werden bei der Bewertung doppelte Extraktionen demselben Referenzstück zugeordnet und als korrekt bewertet.

In dem Datensatz *Ländlich_2m* konnten durch die Einführung der Stadtumrisse in der Nähe von Städten mehr Neben- und Bundesstraßen detektiert werden (Tabelle 6.2). Abbildung 6.4 zeigt einen Ausschnitt, in dem die Verwendung des globalen Kontextes Stadt zu einer Verbesserung der Extraktion geführt hat. Es konnten drei zusätzliche abgehende Straßen gefunden werden. Bei der Straße links unten handelt es sich allerdings um eine Fehlextraktion aufgrund des unzureichend extrahierten Stadtumrisses. Durch diese Art von neuen Fehlextraktionen erklärt sich die leichte Abnahme der Zuverlässigkeit um 3 %.

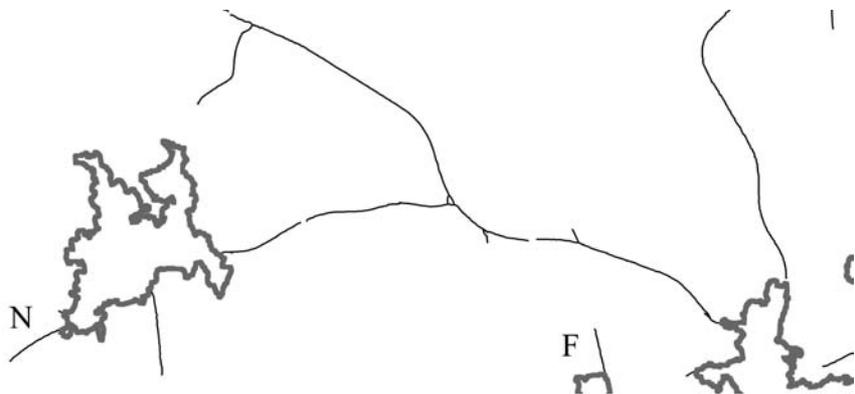
Ein weiterer Ausschnitt aus dem Datensatz *Ländlich_2m* (Abbildung 6.5) zeigt ähnliche Ergebnisse. Durch die Einführung der Stadtumrisse wurde ganz links in dem Ausschnitt eine weitere Straße extrahiert (Kennzeichnung N). Bei einer weiteren, abgehenden Straße (Kennzeichnung F) handelt es sich jedoch um einen Weg, der nicht in der Referenz enthalten ist und daher die Zuverlässigkeit der Extraktion verringert.

(a) Ausschnitt aus Datensatz *Ländlich_2m*

(b) Referenz



(c) Ergebnis ohne Kontext



(d) Ergebnis mit lokalem und globalem Kontext

Abbildung 6.5. Verbesserung der Extraktionsergebnisse durch Einführung von lokalen Kontextobjekten und der Stadtgrenze; durch globalen Kontext neu eingeführte Straßen: N und F, wobei die mit F gekennzeichnete Extraktion ein Feldweg ist, die nicht in der Referenz (Abb. 6.5(b)) enthalten ist. Dicke Linien kennzeichnen die Umrisse der extrahierten Städte.

6.3 Separate Behandlung von Autobahnen

Für die Extraktion von Autobahnen wird eine separate Behandlung vorgeschlagen (WESSEL und HINZ, 2004), da sich Autobahnen stark von den anderen Straßenklassen im ländlichen Raum unterscheiden. Es wird zunächst ein detailliertes Modell speziell für Autobahnen aufgestellt. Darauf aufbauend wird ein Verfahren zur Extraktion basierend auf einem multi-skalen Ansatz entwickelt. Die erzielten Ergebnisse werden vorgestellt und diskutiert.

6.3.1 Modell für Autobahnen

Autobahnen unterscheiden sich von anderen Straßen vor allem durch ihre Breite, da sie meist aus zwei antiparallelen Straßen bestehen, die räumlich voneinander getrennt sind. Im europäischen Raum besteht diese Trennung oft aus einer metallischen Leitplanke. Das Erscheinungsbild von Autobahnen in den SAR-Daten hängt stark von der verwendeten Auflösung ab. Bei einer hohen Auflösung (< 1 m) können die zwei getrennten Fahrbahnen deutlich unterschieden werden, da sie durch die im SAR hell reflektierende, schmale Mittelleitplanke voneinander getrennt sind (Abbildung 6.6). Bei einer künstlich reduzierten Auflösung (von < 6 m) (Abbildung 6.7) treten nur noch die grundlegenden Eigenschaften der Autobahn hervor. Die beiden Fahrbahnen verschmelzen, und die Autobahn erscheint dann nur noch als eine dunkle, geglättete Linie, bei der die Mittelleitplanke nicht mehr sichtbar ist.

Neben der Breite der Fahrbahn ist die Mittelleitplanke ein typisches Merkmal von Autobahnen in SAR-Daten. Abbildung 6.6 illustriert die typischen Merkmale des Rückstreuverhaltens der Mittelleitplanke und der Fahrbahn in Abhängigkeit von der Blickrichtung. Bei einer Orientierung der Autobahn exakt orthogonal zur Entfernungsrichtung tritt an der Mittelleitplanke eine starke Reflexion auf (A), die wahrscheinlich auf eine Dipolstreuung zurückzuführen ist, aufgrund der länglichen Ausdehnung der Leitplanke. Bei allen anderen Orientierungen ist die Reflexion etwas geringer (B), aber immer noch sehr hoch aufgrund der starken Rückstreuung von Metall. Neben diesem typischen Rückstreuverhalten kann es durch hohe, benachbarte Objekte zu einer Unterbrechung der hellen Linie der Mittelleitplanke kommen. Entweder kann sie aufgrund von Schatten verdeckt werden (C) oder aufgrund von Layover sowie hoher Rückstreuung überstrahlt werden (D). Neben diesen Effekten können zusätzlich auch andere Kontextobjekte wie Brücken oder Verkehrsschilder das Erscheinungsbild der Mittelleitplanke und der Fahrbahn beeinflussen.

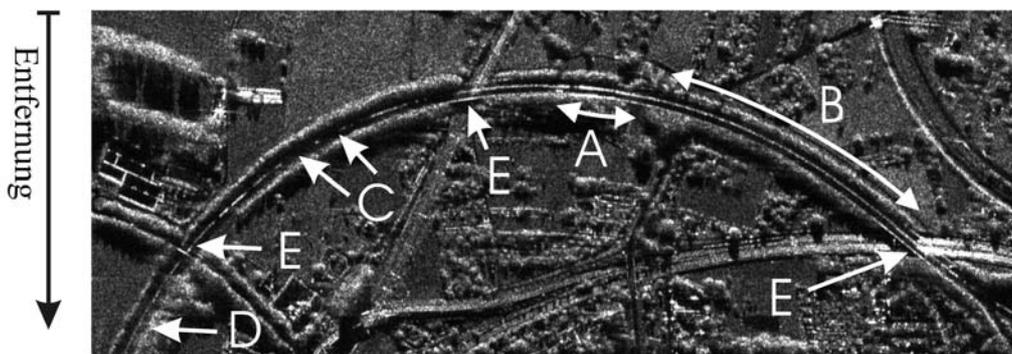


Abbildung 6.6. Orientierungsabhängige Effekte des Erscheinungsbildes einer Autobahn in hoher Auflösung (1 m)



Abbildung 6.7. Autobahn in reduzierter Auflösung (6 m)

6.3.2 Extraktion von Autobahnen

Für die Extraktion von Autobahnen wird das Maßstabsraumverhalten in den verschiedenen Auflösungsstufen verwendet (HINZ und BAUMGARTNER, 2003; PAKZAD und HELLER, 2004). Die Extraktionsstrategie besteht aus vier Schritten: (1) Hypothesengenerierung in einer hohen Auflösung, z. B. 1 m, (2) Hypothesengenerierung in einer reduzierten Auflösung, z. B. 6 m, (3) Fusion der Hypothesen der verschiedenen Auflösungen und (4) Netzwerkgenerierung.

Abbildung 6.8 zeigt an einem Beispiel die Zwischenergebnisse dieser Extraktion beginnend mit der hohen Auflösung. In der hohen Auflösung werden dunkle Linien extrahiert, aus denen eine Hypothese für eine Fahrbahn abgeleitet wird, falls es zwei dicht nebeneinander liegende parallele dunkle Linien gibt, die eine helle Linie einschließen (Hypothesen 1, Abbildung 6.8(a)). Alle schmalen, hellen Linien werden separat als Hypothese für eine Mittelleitplanke verwendet (Hypothesen 2, Abbildung 6.8(b)). Ziel der Hypothesengenerierung in der reduzierten Auflösung ist es, mit Hilfe des Linienalgorithmus nach STEGER (1998a), dunkle, breite Linien als Kandidaten für Autobahnen zu extrahieren (Abbildung 6.8(c)). Aus den extrahierten Linien werden entsprechend der Konstruktionsparameter für Autobahnen (Breite, Länge, Krümmung) Hypothesen für Autobahnen ausgewählt (Hypothesen 3). Ausschlusskriterien für Hypothesen sind z. B. zu starke Krümmungen ($>1/1000$) oder zu geringe Linienebreiten ($<30\text{m}$).

Anschließend werden alle Hypothesen aufgrund der Straßenattribute aus Abschnitt 3.3 bewertet. Zusätzlich erfolgt eine relative Gewichtung der Hypothesen aufgrund ihres Informationsgehalts, d. h. Hypothesen des Typs 1 wird der höchste Informationsgehalt zugewiesen, gefolgt von Hypothesen des Typs 2 und 3. Diese Gewichtung basiert auf empirischen Annahmen. In der nun folgenden Fusion werden die Hypothesen 1, 2 und 3 unter Verwendung einer „best-first“ Strategie miteinander fusioniert, d. h. die Hypothesen werden in der Reihenfolge ihres Gewichts in das Extraktionsergebnis eingefügt. Zuletzt erfolgt die Netzwerkgenerierung, bei der die einzelnen Hypothesen durch den graphen-basierten Gruppierungsalgorithmus (Anhang A.3) miteinander verbunden werden (Abbildung 6.8(d)).

6.3.3 Ergebnisse und Bewertung

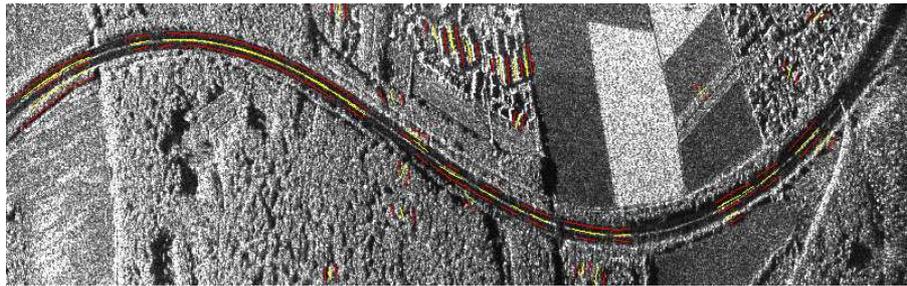
Die Extraktion der Autobahn wird beispielhaft für die Testgebiete *Ländlich_1m* und *Stadtrand_1m* durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.3 aufgelistet. Das Ergebnis für *Ländlich_1m* ist in Abbildung 6.8(d) dargestellt. In dem Gebiet *Ländlich_1m* können Autobahnen mit einer Vollständigkeit von 98 % extrahiert werden. Der linke Teil konnte korrekt extrahiert werden, während es im rechten Teil zu einigen doppelten Extraktionen gekommen ist. Problematisch im rechten Teil ist, dass die Mittelleitplanke teilweise durch Schatten verdeckt wird. Dadurch tragen vor allem die Hypothesen aus der niedrigeren Auflösung zur Extraktion bei und somit wird an Stellen an denen die einzelnen Hypothesen räumlich divergieren, die Autobahn mehrmals extrahiert, bzw. Lage verschoben extrahiert. Denn setzt man die Pufferbreite bei der Bewertung von 20 m auf 7.5 m herunter, liegt die Vollständigkeit der Autobahn nur noch bei 85 % und die Zuverlässigkeit verringert sich von 87 % auf 69 %. Dafür verbessert sich die geometrische Genauigkeit von 6.3 m auf 2.5 m. Die Vollständigkeit der Extraktion ohne spezielle Autobahnmodellierung lag bei 48 % (vgl. Tabelle 4.7).

Die Ergebnisse für das Testgebiet *Stadtrand_1m* (Tabelle 6.3 und Abbildung 6.9) zeigen, dass die Autobahn dort mit 89 % fast komplett extrahiert werden konnte, gegenüber 64 % ohne eine spezielle Extraktion der Autobahn (vgl. Tabelle 4.8). Die Mittelleitplanke ist in der hohen Auflösung durchgängig sichtbar und liefert damit gute Hypothesen für die Extraktion. In dem rechten Teil wird die Autobahn jedoch von einer Brücke großflächig überstrahlt, so dass dieser Bereich nicht extrahiert werden konnte. Das Segment ganz rechts ist eine Fehlextraktion, womit sich eine Zuverlässigkeit von 91 % ergibt.

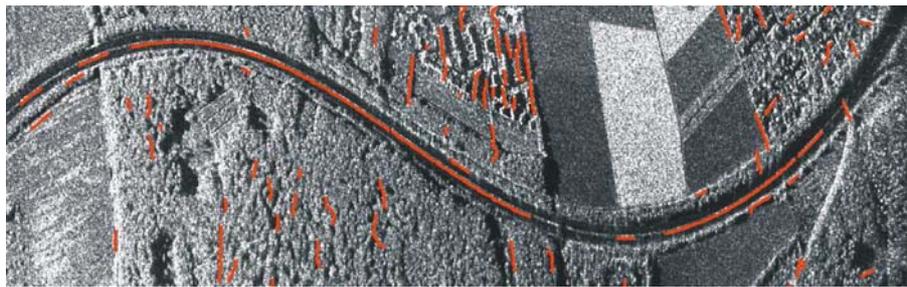
Die Stärke der multi-skalen Autobahnextraktion liegt darin, dass die Autobahn sowohl in Schattenbereichen, in denen die Mittelleitplanke verdeckt wird, als auch bei einer ungestörten Sichtbarkeit der Leitplanke extrahiert werden kann.

	Datensatz <i>Ländlich_1m</i> Pufferbreite 7.5m / 20m	Datensatz <i>Stadtrand_1m</i> Pufferbreite 7.5m / 20m
Vollständigkeit [%]	85 / 98	89 / 89
Zuverlässigkeit [%]	69 / 87	91 / 91
RMS [m]	2.5 / 6.3	1.3 / 1.3

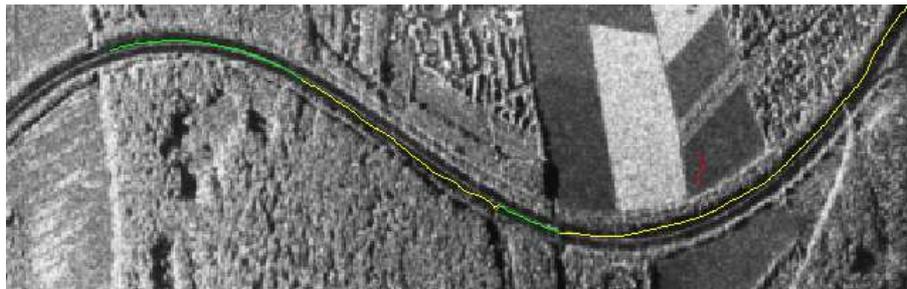
Tabelle 6.3. Ergebnisse der Extraktion von Autobahnen



(a) Gruppierung zweier dunkler Linien, die eine helle, schmale Linie einschließen



(b) Extraktion heller, schmaler Linien in hoher Auflösung



(c) Extraktion dunkler Linien in reduzierter Auflösung



(d) Ergebnis: Fusion von (a) - (c) mit anschließender Netzwerkgenerierung

Abbildung 6.8. Ablauf der Extraktion von Autobahnen aus SAR-Bilddaten mit einem multi-skalen Ansatz (*Ländlich_1m*)



Abbildung 6.9. Extraktion der Autobahn im Testgebiet *Stadtrand_1m*

7. Diskussion und Ausblick

7.1 Zusammenfassung des neuen Verfahrens

In dieser Arbeit wurde ein Ansatz zur automatischen Extraktion von Straßen aus SAR-Bilddaten vorgestellt. Der Ansatz basiert auf einem bestehenden Verfahren zur Extraktion von Straßen aus optischen Bilddaten (WIEDEMANN, 2002). Dieses wird durch Berücksichtigung SAR-spezifischer Abbildungseigenschaften und Modellierung von Kontextinformation an SAR-Bilddaten angepasst und verbessert. Das vorgestellte System ist vor allem für die automatische Straßenextraktion in ländlichen Gebieten geeignet.

Generell basiert das Verfahren zur Straßenextraktion auf der Extraktion von Linien aus Bilddaten. Für die Linienextraktion aus SAR-Bilddaten wurde eine SAR-spezifische Vorverarbeitung vorgestellt, deren wesentliche Elemente eine Specklerreduzierung, eine radiometrische Kalibrierung und eine Vorklassifikation von städtischen und ländlichen Gebieten sind. Durch die Gruppierung und Bewertung der Linien nach geometrischen und radiometrischen Kriterien entstehen Hypothesen für Straßen. Zusätzlich werden Verbindungshypothesen eingeführt, die unter Zuhilfenahme von weiteren, geometrischen Bewertungskriterien sowie verschiedener Kontext- und Straßennetzinformationen aufgestellt werden. Mit Hilfe einer kürzesten Pfadsuche erfolgt dann die Extraktion des Straßennetzes.

Dieses Verfahren wurde auf größeren SAR-Szenen flugzeuggetragener Sensoren (E-SAR, AER II, AeS 1) mit ländlichen und industriellen Inhalten angewendet und bezüglich der Vollständigkeit und Zuverlässigkeit des extrahierten Straßennetzes evaluiert. In einer Analyse dieser ersten Ergebnisse wurden die Stärken und Schwächen des Verfahrens untersucht. Darauf aufbauend konnte eine Einteilung in allgemeine und SAR-spezifische Problembereiche vorgenommen werden. Aufbauend auf dieser Analyse wurden Erweiterungen in der Modellierung von Straßen und ihren Kontextbeziehungen vorgenommen, um die Straßenextraktion zu verbessern.

Für einige der SAR-spezifischen Problembereiche, wie Bäume, Brücken, bewegte Fahrzeuge und Verkehrsschilder wurden die Abbildungseigenschaften modelliert. Die explizit modellierten Objekte werden als Kontextinformation in die Straßenextraktion eingebracht, um so kleinere Lücken im extrahierten Straßennetz zu schließen und die topologische Korrektheit der extrahierten Straßen zu erhöhen, z. B. an Stellen, die durch Layover und Schatten von Bäumen verdeckt sind.

Des Weiteren konnten durch die Einführung der Umrisse der Städte aus der Vorklassifikation neue, sichere Informationen über Startstücke für Straßen eingeführt werden, die die Vollständigkeit des extrahierten Straßennetzes verbessern.

Die letzte Verbesserung bildet die erstmalig explizite Modellierung von Autobahnen, in der die geometrischen, radiometrischen und multi-skalen Eigenschaften von Autobahnen einschließlich verschiedener Kontextobjekte mit einfließen. Die Vollständigkeit dieser Straßenklasse konnte dadurch auf über 90 % gesteigert werden.

7.2 Diskussion

Im Folgenden werden einige, wesentliche Komponenten des Verfahrens einschließlich der erzielten Ergebnisse diskutiert sowie Stärken und Schwächen des Ansatzes aufgezeigt.

Wahl der Datengrundlage: Als Datengrundlage für die Extraktion wurden größtenteils X-Band SAR-Daten mit HH-Polarisation verwendet. Aus dem vorhandenen Bildmaterial – vollpolarimetrisches L-Band (HH, HV, VH, VV) und zweifach polarisiertes X-Band (HH, VV) – hat sich das X-Band in HH-Polarisation als die am besten geeignete Datengrundlage für die Straßenextraktion herausgestellt. Im Gegensatz zum L-Band hat das X-Band eine kleinere Bodenpixelgröße und ist daher besser geeignet, schmale, lineare Objekte aufzulösen. Zudem reflektieren Straßen in der HH-Polarisation nur sehr gering in Richtung Sensor, so dass sich relativ niedrige Rückstreuwerte für Straßen und ein guter Kontrast zur Nachbarschaft ergeben. Das Potenzial eines vollpolarimetrischen Datensatzes konnte

aufgrund der geringen Auflösung des L-Bandes nicht vollständig ausgeschöpft werden. Jedoch konnte aufgrund der polarimetrischen Information eine Klassifikation in städtische, ländliche und bewaldete Gebiete durchgeführt werden.

Wahl der Specklereduktion und Liniensextraktion: In dieser Arbeit wurde mit dem Steger-Algorithmus ein differential-geometrischer Ansatz zur Liniensextraktion gewählt. Der Algorithmus liefert richtungsunabhängige, subpixelgenaue Linien. Er wurde mit dem Bewertungsschritt in der Straßenextraktion kombiniert, um Fehlextraktionen in höheren Grauwertbereichen zu reduzieren. In dem Bewertungsschritt der Straßenextraktion ist es möglich, über die Straßeneigenschaften, insbesondere durch die Höhe des Grauwertes und die Grauwertvarianz, Fehlextraktionen in höheren Grauwertbereichen niedrig zu bewerten und dadurch zu eliminieren. Durch diese Kombination der Verfahrensschritte gelingt es, die Vorteile der einzelnen Verfahren miteinander zu verbinden. Als Datengrundlage wurden bereits Speckle-reduzierte SAR-Bilddaten (Multilookdaten) verwendet. So konnten relativ vollständige und zuverlässige Ergebnisse erzielt werden. Diese Vorgehensweise zur Liniensextraktion wurde gewählt, da es nicht die Aufgabe dieser Arbeit war, ein neues, für SAR-Bilddaten angepasstes Verfahren zur Liniensextraktion zu entwickeln.

Steuerung der Extraktion: Die automatische Straßenextraktion wird über eine Reihe von Parametern gesteuert. Die korrekte Einstellung der Extraktionsparameter stellt eine grundlegende Schwierigkeit einer automatischen Extraktion dar. Nicht alle Parameter sind gleich relevant für die Extraktion, so dass die Einstellung einiger Erfahrung bedarf. Dies stellt einen wesentlichen Nachteil des automatischen Verfahrens für die praktische Anwendung dar. Allerdings können, aufgrund der relativ gleichbleibenden radiometrischen Eigenschaften verschiedener SAR-Aufnahmen, die „optimalen“ Parameter eines Testgebiets als erste Näherung für andere Testgebiete verwendet werden.

Nutzung von lokalem Kontext: Objekte, die sich in der Nähe oder auf Straßen befinden, werden in dieser Arbeit als lokale Kontextobjekte bezeichnet. Sie können die Erkennbarkeit und damit die Extraktion von Straßen teilweise erheblich stören. Zu den Kontextobjekten zählen beispielsweise Autos, Bäume, größere Verkehrsschilder und Brücken. In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass diese Objekte die Extraktion auch stützen können, da sie überwiegend in einem funktionalen Zusammenhang zu Straßen stehen. Durch die Modellierung und Einführung lokaler Kontextobjekte mit entsprechenden Gewichten konnte die Vollständigkeit der extrahierten Straßen erhöht werden, ohne dass dies zu einer Verringerung der Zuverlässigkeit geführt hat. Gerade bei SAR-Aufnahmen ist die Berücksichtigung von Kontextobjekten wichtig, da es bedingt durch die Schrägsicht verstärkt zu Verdeckungen von Straßen durch erhabene Objekte kommt. In bisherigen Arbeiten zur Straßenextraktion aus SAR-Bilddaten wurden Kontextobjekte kaum berücksichtigt. Die erzielten Verbesserungen zeigen, dass mit der Einführung lokaler Kontextobjekte, Lücken im Straßennetz „wissensbasiert“ geschlossen werden können. In einem nächsten Schritt könnte diese Vorgehensweise auf Straßenabschnitte übertragen werden, die durch Baumgruppen oder durch eine Kombination verschiedener Objekte über einen längeren Bereich verdeckt sind.

Nutzung von globalem Kontext: Die extrahierten globalen Kontextgebiete Stadt, Wald und offene Landschaft wurden in dieser Arbeit zum einen zur Fokussierung der Extraktion auf die offene Landschaft verwendet und haben dadurch die Rechenzeit sowie die Anzahl der Fehlextraktionen begrenzt. Zum anderen konnten durch die Einführung des Kontextgebietes *Stadt* zusätzliche, sichere Startinformationen für Straßen gewonnen werden. Denn gerade Städte stehen in einem direkten Zusammenhang mit dem Straßennetz, da sie durch Straßen miteinander verbunden sind. Durch die Einführung der aus SAR-Daten extrahierten Stadtgrenzen konnten in der Nähe der Städte weitere Straßen detektiert werden. Die globale Funktion von Straßen, Städte miteinander zu verbinden, könnte darüber hinaus in zukünftigen Modellierungen dazu verwendet werden, stärkere Zwänge für eine durchgehende Verbindung zwischen zwei Städten einzuführen.

Modellierung und Extraktion von Autobahnen: Eine Stärke des Verfahrens ist die speziell für Autobahnen entwickelte Extraktion. Die Extraktion basiert auf einer expliziten Modellierung der Eigenschaften von Autobahnen in SAR-Bilddaten, wie z. B. die helle Mittelleitplanke und die dunklen, breiten Fahrbahnen. Darauf abgestimmt wurde eine Extraktion entwickelt, die zusätzlich auch das Erscheinungsbild in verschiedenen Maßstäben berücksichtigt. Die Kombination der Eigenschaften in den verschiedenen Maßstäben macht die Extraktion sehr robust, was sich in den relativ hohen Werten für die Vollständigkeit und die Zuverlässigkeit von rund 90 % widerspiegelt. Verglichen mit der Extraktion ohne Autobahnmodell konnte die Vollständigkeit für die Straßenklasse Autobahn um 30 bis 40 % erhöht werden. Aufgrund des multi-skalen Ansatzes können sogar Abschnitte extrahiert werden, bei denen die markante Mittelleitplanke verdeckt ist. Allerdings kommt es in diesem Fall teilweise zu Lageungenauigkeiten bei der Extraktion.

Validierung des Ansatzes: Der Ansatz zur Straßenextraktion aus SAR-Bilddaten wurde auf verschiedenen Testgebieten evaluiert. Es hat sich gezeigt, dass unter Berücksichtigung von SAR-spezifischen Abbildungseigenschaften und durch Modellierung von Kontextinformation mit der automatischen Straßenextraktion aus SAR-Bilddaten zufriedenstellend vollständige Ergebnisse (74%–82%) in der offenen Landschaft erreicht werden konnten. Die Zuverlässigkeit der Ergebnisse (58%–85%) ist jedoch für einen praktischen Einsatz zu niedrig. Die geometrische Genauigkeit liegt mit rund zwei Metern bei ca. einem Pixel. Die Extraktionsergebnisse variieren jedoch je nach Komplexität der Szene und der Straßenklasse. Ländliche und industrielle Gebiete haben mit 73 % und 74 % eine nahezu gleich hohe Vollständigkeit. Aber ihre Zuverlässigkeiten variieren zwischen 58 % in industriellen und 85 % in ländlichen Gebieten. Die Ursache für den Unterschied in der Zuverlässigkeit lässt sich durch die unkorrekte Extraktion einer Parkplatzfläche in dem industriellen Gebiet erklären. In Bezug auf die Straßenklassen konnten Bundesstraßen mit Vollständigkeitswerten zwischen 88 % und 95 % extrahiert werden. Für Nebenstraßen ergaben sich Vollständigkeitswerten von 69 % bis 79 %. Dies ist auf die geringere Breite der Nebenstraßen zurückzuführen, die dazu führt, dass angrenzende Vegetation die Straßen stark verdeckt. Bei Hauptstraßen kommt es meist nur zu teilweisen Verdeckungen, die zwar zu Lageungenauigkeiten führen, die Extraktion aber nicht verhindern. Für die gemeinsame Extraktion der Bundesstraßen und Nebenstraßen gelten die obigen Zuverlässigkeitswerte (58%–85%). Für die Extraktion der Autobahnen konnten Vollständigkeitswerten zwischen 89 % und 98 % erreicht werden bei Zuverlässigkeiten von 87 % bis 91 %.

Zusammenfassend sind als Stärken des vorgestellten Ansatzes vor allem die SAR-spezifische Vorverarbeitung, die Nutzung von lokaler und globaler Kontextinformation und die explizite Modellierung der Autobahn für SAR-Bilddaten sowie die sich daraus insgesamt ergebende erhöhte Vollständigkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu sehen.

7.3 Ausblick

Trotz der zufriedenstellenden Ergebnisse bei der automatischen Straßenextraktion aus SAR-Bilddaten gibt es auf diesem Gebiet noch viel Forschungsbedarf. Ein wichtiges Thema ist die Integration von Kontextinformation in die automatische Straßenextraktion. Die in dieser Arbeit vorgestellte Integration basiert auf der Annahme, dass die Kontextinformation zuverlässig extrahiert werden kann. Wie sich gezeigt hat, besteht hier aber noch Forschungsbedarf bei der Entwicklung von Algorithmen zur automatischen Extraktion von Kontextobjekten, wie Verkehrsschildern, Brücken und bewegten Fahrzeugen. Ein weiterer, wichtiger Punkt ist eine Kombination von verschiedenen SAR-Szenen aus verschiedenen Einfallswinkel- und Aspektwinkeln oder auch die Kombination mit optischen Bilddaten, um durch die komplementäre Information die Zuverlässigkeit und Vollständigkeit der extrahierten Straßen zu erhöhen. Erste Arbeiten dazu wurden von HEDMAN et al. (2005a,b) vorgestellt. Ebenso könnte eine Kombination verschiedener Straßenextraktionsalgorithmen mit den jeweiligen Stärken und Schwächen das Ergebnis insgesamt noch weiter verbessern. Grundsätzlich sollte bei einer Fusion mehrerer Sichten oder Quellen die Fusion auf Merkmalebene gegenüber der Fusion auf Pixelebene bevorzugt werden. Nur so können die verschiedenen, objektabhängigen Geometrien in Einklang gebracht werden. Bei einer Fusion der

Merkmale können unterschiedliche Gewichte aufgrund der Merkmalsextraktion selbst und/oder der Datenqualität berücksichtigt werden.

Neue Möglichkeiten ergeben sich auch durch technische Fortschritte in der SAR-Sensorik. Die Entwicklung geht dabei immer mehr zu multiparametrischen Systemen, d. h. Systemen mit mehreren Frequenzen, Polarisationen, verschiedenen Aufnahmerichtungen, höheren Auflösungen und mehrfachen Aufnahmen zur Erfassung einer weiteren Information, z. B. der Höhe, des Volumens oder der Geschwindigkeit von Objekten. Mit dem Start des TerraSAR-X im Jahr 2006 steht beispielsweise ein hoch auflösender SAR-Satellit für weitere Forschungen zur Verfügung. In zukünftigen Forschungsarbeiten wird es daher um die Entwicklung geeigneter Verfahren zur Extraktion von Objekten, der Bewertung der Verfahren und der Datenfusion auf Basis der hoch aufgelösten Daten gehen.

Mit diesen neuen Daten wird auch die Straßenextraktion in Wald- und Stadtgebieten weiter fortschreiten können. Die Sichtbarkeit von Straßen in bebauten Gebieten oder im Wald ist grundsätzlich vom Einfallswinkel und Aspektwinkel des SAR-Sensors zur Straße abhängig. Eine Detektion ist schwierig, da es beim SAR in Straßen- oder Waldschneisen zu Artefakten wie Layover- und Schatten kommt, die zu Informationsverlusten führen. Für Untersuchungen im Bereich von Waldschneisen wären höherwertige Höhenmodelle wünschenswert, beispielsweise aus Laserscanning-Aufnahmen. Auch die SAR-Tomographie, die es ermöglicht das 3D-Volumen des Waldes aufzuzeichnen, könnte für die Extraktion von Straßen im Wald nützlich sein (REIGBER, 2002).

Für Straßen in städtischen Gebieten könnten die Erfahrungen aus optischen Bilddaten hilfreich sein. Dort werden zur Extraktion hoch aufgelöste Daten, Höhenmodelle und Kontextwissen miteinander kombiniert (HINZ, 2004a). Ein Algorithmus zur Extraktion von Straßen in städtischen Gebieten basierend auf SAR-Daten sollte auch eine Kombination von verschiedenen Einfallswinkeln und Einfallrichtungen beinhalten.

In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass durch die Modellierung von lokalem und globalem Kontextwissen die Extraktion vollständiger und zuverlässiger geworden ist. Daran anknüpfend stellt sich die Frage, inwieweit eine Interpretation der gesamten Szene hilfreich für die Extraktion einzelner Objekte sein kann. Bringt eine Kombination von Ansätzen zur Extraktion von einzelnen Objekten wie Gebäuden, Fahrzeugen, Straßen und Vegetation eine Unterstützung für die Extraktion eines einzelnen Objektes und wenn ja, wie sähe eine mögliche Kombination der Verfahren aus? In dieser Richtung zeigen beispielsweise STILLA et al. (2004) den Zusammenhang von Straßen zu Fahrzeugen und Gebäuden auf. Ein praktischer Einsatz vollautomatischer Verfahren kommt zur Zeit lediglich bei sehr niedrigen Qualitätsanforderungen in Betracht, beispielsweise bei der gegenseitigen Registrierung von Bildern. Ein automatisches System zur Extraktion von Straßen erscheint zur Zeit aber noch in weiter Ferne, denn eine ausreichend hohe Vollständigkeit und Zuverlässigkeit ist in nächster Zeit von keinem automatischen Verfahren zu erwarten.

A. Anhang

A.1 SAR-Systemparameter

	E-SAR	AeS-1	AER-II
Allgemeine Parameter			
Plattform	Flugzeug	Flugzeug	Flugzeug
Einfallswinkel	20° - 60°	30° - 70°	37° - 53°*
Typische Flughöhe	3000 m	500 - 9000 m	< 3000 m
Gesendete max. Leistung	2500 W	2500 W	80 W
Plattformgeschwindigkeit	70 - 95 m/s	50 - 200 m/s	90 - 100 m/s
Polarisation	HH oder VV	HH	quad pol.**
Streifenbreite	ca. 3 km	1 - 15 km	1,7 km*
Interferometrie:			
- Across-track	single-pass	single-pass	single-pass
- Along-track	ja	ja	split antenna mode
Entfernungsparameter			
Chirp-Impulsdauer	5 μ s	-	3.2 μ s
Frequenz (X-Band)	9.6 GHz	9.55 GHz	10 GHz
Chirp-Bandbreite	100 MHz	400 Mhz	160 MHz
Slant Range Auflösung	<2 m	0.38 m	ca. 1 m
Azimuthparameter			
PRF	2000 Hz	bis 16000 Hz	714 Hz, 1429 Hz
Antennenlänge $L_a \times L_r$	0.2m \times 0.1m	0.15m \times 0.13m	0.705m \times 0.1m
Azimuth Auflösung	< 0.7 m	< 0.5 m	ca. 1 m

*Der Einfallswinkelbereich beträgt 16° und ist mechanisch schwenkbar zwischen 0° (Horizontale) und 45°. Die angegebenen Werte beziehen sich auf einen mittleren Einfallswinkel von 45° und eine Flughöhe von 3 km.

**quad pol. (vollpolarimetrisch): HH,VV, HV und VH Aufnahmen sind gleichzeitig möglich.

Tabelle A.1. Systemparameter für X-Band SAR-Systeme (HORN, 1996; ENDER, 1998; SCHWÄBISCH und MOREIRA, 2000)

A.2 Der Steger-Linienoperator

In diesem Abschnitt wird der Steger-Operator zur Extraktion von Linien aus digitalen Bilddaten beschrieben (STEGER, 1998a,b).

Die Grundidee des Algorithmus basiert auf dem charakteristischen, eindimensionalen Grauwertprofil senkrecht zu einer Linie. Gerade bei Linien deren Breite nur wenige Pixel beträgt, lässt sich das Liniensprofil gut als Polynom zweiten Grades beschreiben (Abbildung A.1). Mit Hilfe des Nulldurchganges

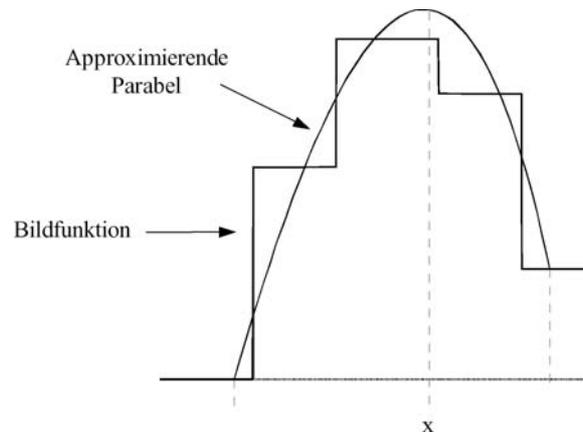


Abbildung A.1. Liniensprofil, das mittels einer Parabel approximiert wird (aus HINZ, 2004a)

der ersten Ableitung (Position x) kann die Position der Linie präzise ermittelt werden. Je stärker die Krümmung, also je größer die zweite Ableitung betragsmäßig ist, desto sicherer ist die Linie.

Beim Übergang auf zweidimensionale Bilder werden Linien als Kurven $s(t)$ modelliert. Für die Profilbildung ist zunächst die Senkrechte zur Linie $n(t)$ zu ermitteln. Für die Senkrechte gilt, dass die

erste gerichtete Ableitung gegen Null geht und die zweite gerichtete Ableitung am stärksten sein soll. Bei realen Bildern werden die Ableitungen üblicherweise durch die Faltung des Bildes $z(x,y)$ mit den jeweiligen Ableitungen des Gauß-Filters erzeugt. In jedem Bildpunkt werden für die Ermittlung der Linienrichtung und -stärke die partiellen Richtungsableitungen r_x, r_y, r_{xx}, r_{xy} und r_{yy} berechnet. Die Richtung der stärksten, zweiten Richtungsableitung also der größten Hauptkrümmung kann aus der Hesse-Matrix (Gleichung A.1) über eine Eigenwertzerlegung berechnet werden.

$$H(x, y) = \begin{bmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{xy} & r_{yy} \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

Die größte Hauptkrümmung ist durch den Eigenvektor mit dem größten Eigenwert definiert. Sie gibt für jeden Bildpunkt die Richtung des Grauwertprofils an. Die Subpixel-Position einer potentiellen Linie ergibt sich aus dem Nulldurchgang der ersten Ableitung dieses Grauwertprofils. Jede Subpixel-Position liefert eine Linienrichtung und eine Breite der Linie. Das Zusammenfügen zu Pixelketten erfolgt durch Verfolgung. Startpunkte bilden diejenigen Linienpixel deren stärkste Krümmung betragsmäßig oberhalb eines vorgegebenen Schwellwertes liegen. Die benachbarten Pixel werden angefügt, solange sie richtungsmäßig kompatibel sind und ihre stärkste Krümmung oberhalb der unteren Schwelle für Linienpixel liegt (Hysterese-Schwellwertbildung). Es können nur Linien innerhalb einer gewissen Breite extrahiert werden. Die Schwellwerte zur Detektion müssen vorweg eingestellt werden.

A.3 Algorithmus von Dijkstra

Der Algorithmus von Dijkstra beginnt von einem Startknoten v_S aus den gesamten Graph G zu erforschen und den kürzesten Weg zu einem Zielknoten v_Z in einer vollständigen Suche zu ermitteln (DIJKSTRA, 1959). Das Ergebnis ist garantiert der kürzeste Weg und wird immer gefunden. Der Ablauf sieht wie folgt aus:

1. Zuerst erhalten alle Knoten v_i eine ihnen zugehörige Variable $Distanz(v_i)$, die im späteren Verlauf mit ihrer Distanz zum Startknoten belegt wird. Alle Variablen $Distanz(v_i)$ werden mit ∞ initialisiert. Für den Startknoten v_S wird die $Distanz(v_S)$ auf null gesetzt.
2. Im nächsten Schritt werden alle zu v_S adjazenten Knoten $v_{S,adj}$ gesucht. In ihre Variablen $Distanz(v_{S,adj})$ werden die Kosten der dazwischenliegenden Kante eingetragen. An dem Knoten v_j , an dem die $Distanz(v_{S,adj}) = minimal$ ist, wird die Suche weitergeführt.
3. Für den Knoten v_j werden wiederum alle adjazenten Knoten $v_{j,adj}$ gesucht. Ihre Variablen $Distanz(v_{j,adj})$ werden mit der Summe der bisher benötigten Kosten auf $Distanz(v_{j,adj}) = Distanz(v_j) + w_{ji}$ gesetzt, wobei w_{ji} die Bewertung der Kante von v_j nach $v_{j,adj}$ ist. Wenn $Distanz(v_{j,adj})$ schon belegt ist, wird der kleinere der Einträge gewählt.
4. Schritt 3 wird so lange wiederholt bis der Zielknoten v_Z erreicht ist. $Distanz(v_Z)$ beinhaltet dann die Kosten für den kürzesten Pfad von v_S nach v_Z . Durch die Verfolgung der Vorgängerknoten kann der Pfad rekonstruiert werden.

A.4 Prozessierung der Rohdaten in Azimut

In diesem Abschnitt wird die Prozessierung der Rohdaten (*Fokussierung*) in Azimut erläutert. Sie dient als Hintergrundinformation für die Abbildung von bewegten Objekten in SAR-Bilddaten (Abschnitt 5.2.2). Die Prozessierung wird anhand der Aufnahme und Fokussierung eines Punktstreuers betrachtet.

Während der gesamten Beleuchtungszeit, in der sich ein Punktstreuer in dem Beleuchtungskegel der Antenne befindet, liefert er Antwortsignale. Die Echos des Punktstreuers werden als Amplitude und Phase in der jeweiligen Spalte (Azimutposition des Sensors) und Zeile (Entfernung entsprechend der

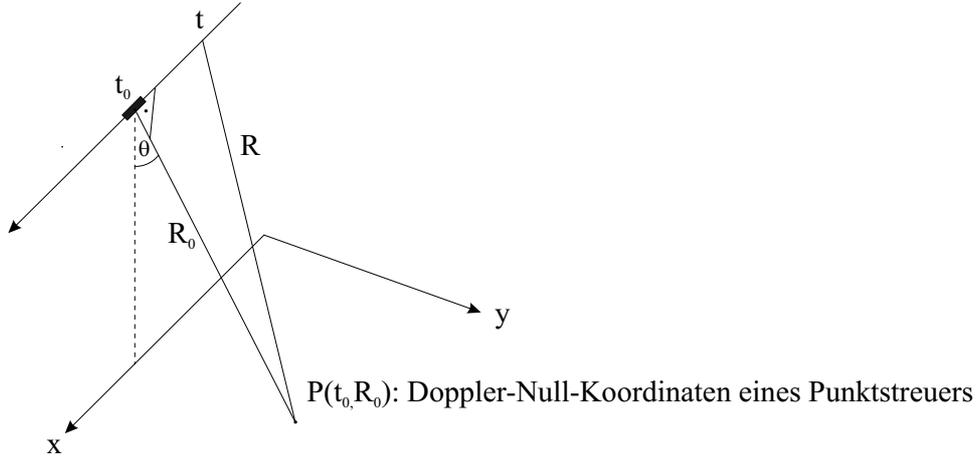


Abbildung A.2. Zylindrische Koordinaten eines Punktstreuers

Laufzeit) in einer Rohdatenmatrix abgespeichert. Der Verlauf der Abbildung des Punktstreuers in der Rohdatenmatrix wird als *Range-Historie* bezeichnet. Aufgrund der mehrfachen Abbildung ist noch kein gewohntes (optisches) Abbild zu erkennen. Hierfür erfolgt bei der weiteren Prozessierung eine Fokussierung der Rohdaten in Azimut, indem eine Korrelation mit einem sogenannten Matched-Filter durchgeführt wird (vgl. Abschnitt 2.1.2), der dem idealen Phasen- und Amplitudenverlauf eines Punktstreuers in Azimutrichtung in den Rohdaten entspricht (BAMLER und SCHÄTTLER, 1993). Dieser ideale Phasen- und Amplitudenverlauf beinhaltet Annahmen über die relative Geschwindigkeit zwischen Sensor und Punktstreuer.

Die Position der geringsten Entfernung zum Sensor R_0 zur Zeit t_0 sei als *Doppler-Null-Position* (t_0, R_0) bezeichnet (Abbildung A.2). Für eine beliebige Entfernung R vom Sensor zum Punktstreuer ergibt sich mittels der Doppler-Null-Koordinaten die Gleichung

$$R(t - t_0, R_0) = \sqrt{R_0^2 + v_{rel}^2 (t - t_0)^2}, \quad (\text{A.2})$$

wobei v_{rel} die relative Geschwindigkeit zwischen dem SAR-Sensor v_{SAR} und dem Punktstreuer v_P ($v_{rel} = v_{SAR} - v_P$) darstellt. Die Wurzel kann durch eine Taylor Reihe approximiert werden:

$$R(t - t_0, R_0) \cong R_0 + \frac{v_{rel}^2}{2R_0} (t - t_0)^2. \quad (\text{A.3})$$

Die Phase der Antwortsignale ist ebenfalls durch den Entfernungsverlauf bestimmt. Sie lässt sich für den Regelfall $t_0 = 0$ beschreiben durch

$$\phi(t, R_0) = -\frac{4\pi}{\lambda} R(t, R_0) \quad (\text{A.4})$$

Durch Einsetzen von Gleichung A.3 in Gleichung A.4 erhält man

$$\phi(t, R_0) = -\frac{4\pi}{\lambda} R_0 - \frac{4\pi}{\lambda} \frac{v_{rel}^2}{2R_0} t^2 \cong -\frac{4\pi}{\lambda} R_0 + \pi FM t^2 \quad (\text{A.5})$$

$$\text{mit } FM \cong -\frac{2 v_{rel}^2}{\lambda R_0} \quad (\text{A.6})$$

Die Phasen-Historie wird zur Fokussierung eines Ziels verwendet. Die Ableitung der Phasenfunktion nach der Zeit ergibt den linearen Frequenzverlauf des Signals in Azimut.

$$f_D = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \phi(t, R_0) \cong FM \cdot t \quad (\text{A.7})$$

Die Frequenzmodulationsrate (FM) entspricht dabei der Steigung der linearen Augenblicksfrequenz (Dopplerfrequenz, f_D), die aus der relativen Bewegung zwischen dem Sensor und dem Punktstreuer (Doppler-Effekt) resultiert.

Das Echo eines Punktstreuers am Empfänger $u(t) = A \exp \phi(t, R_0)$ ergibt sich mit Gleichung A.4 zu

$$u(t) = A \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \cdot R(t, R_0) \right\} \quad (\text{A.8})$$

Das Argument in Gleichung A.8 kann durch Gleichung A.5 ersetzt werden. Zum einfacheren Verständnis wird der konstante Term $-j \frac{4\pi}{\lambda} \cdot R_0$ weggelassen und die Amplitude A mit 1 angenommen. Das Echo eines Punktstreuers ergibt sich damit näherungsweise zu

$$u(t) = \exp \left\{ j\pi F M t^2 \right\} \quad (\text{A.9})$$

Der zur Erzeugung des fokussierten Bildes verwendete Matched-Filter entspricht dann einer zeitinvertierten, konjugiert komplexen Kopie des Echosignals

$$s(t) = \exp(-j\pi F M t^2) \quad (\text{A.10})$$

Durch Korrelation der Rohdatenmatrix mit dem idealen Signal des Matched-Filters wird das über mehrere Zeilen verteilte Signal eines Punktstreuers an der Doppler-Null-Position fokussiert.

Verzeichnis der Abkürzungen und Variablen

AER-II	Airborne Experimental Radar II
ATKIS	Amtliches Topographisches und Kartographisches Informationssystem
CFAR	Constant False Alarm Rate
CMU	Carnegie Mellon University Pittsburgh
DGM	Digitales Geländemodell
DOM	Digitales Oberflächenmodell
E-SAR	Experimental Synthetic Aperture Radar
ENST	École Nationale Supérieure des Télécommunications
ETRO	Department of Electronics and Informatics
FGAN	Forschungsgesellschaft für angewandte Naturwissenschaften
FHR	Forschungsinstitut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik
GPS	Global Positioning System
HH	horizontal polarisiert gesendetes und horizontal polarisiert empfangenes Signal
HV	horizontal polarisiert gesendetes und vertikal polarisiert empfangenes Signal
IGN	Institut Géographique National
INRIA	Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique
INS	Inertial Navigation System
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
LOREX	Low Resolution Road Extraction
MAP	Maximum A posteriori Probability
MRF	Markov Random Field, Markoff-Zufallsfeld
MST	Minimum Spanning Tree
PRF	Pulse Repetition Frequency, Impulswiederholfrequenz
RADAR	Radio Detection and Ranging
RAR	Real Aperture Radar
RMS	Root Mean Square
SAR	Synthetic Aperture Radar, Radar mit synthetischer Apertur
SLAR	Side Looking Aperture Radar
SNR	Signal to Noise Ratio, Signal-Rausch-Verhältnis
VH	vertikal polarisiert gesendetes und horizontal polarisiert empfangenes Signal
VV	vertikal polarisiert gesendetes und vertikal polarisiert empfangenes Signal
TUM	Technische Universität München

A	Amplitude des Signals
B	Bandbreite
B_c	Bandbreite des Chirps
c	Lichtgeschwindigkeit
C_v	Variationskoeffizient
D	Log-Intensität des Signals
D_{az}	Verschmierung in Azimut
dA	Flächeneinheit
d_{ij}	Geradliniger Abstand zwischen den Knoten i und j
$Distanz(v)$	Distanz eines Knotens zum Startknoten
DN	Digital Number
f	Frequenz
f_D	Dopplerfrequenz
F_n	Rauschzahl des Sensors

FM	Frequenzmodulationsrate
G	Antennengewinn, Graph
$g_{\sigma}(x, y)$	Gauß'scher Faltungskern
h	Höhe der Plattform über Grund
$H(x, y)$	Hesse-Matrix
I	Intensität des Signals
k	Boltzmann Konstante
K	Kalibrierungskonstante
k_P	Pauli-Zielvektor
L	Anzahl der Looks
L_a, L_r	Antennenlänge, Antennenhöhe
l_{ij}	Länge eines potentiellen Straßenstücks zwischen den Knoten i und j
L_{sa}	Länge der synthetischen Apertur
P_r	empfangende Leistung
P_t	ausgesendete Leistung
R	Abstand des Radars zum Ziel
R_0	geringste Entfernung eines Punktes zum Sensor zur Zeit t_0
r_{ij}	Fuzzy-Wert einer Kante zwischen den Knoten i und j
r_x, r_{xx}, r_{xy}	partielle Richtungsableitungen in x-Richtung
r_y, r_{yy}, r_{yx}	partielle Richtungsableitungen in y-Richtung
s	Matched-Filter
S	komplexe Streumatrix
S_Z	zufällige Störkomponente
t	Impulslaufzeit
t_0	Zeitpunkt der Doppler-Null-Position
t_{sa}	Beleuchtungszeitraum
T_{eff}	effektive Rauschtemperatur am Sensor
u, U	empfangenes Signal
u_i, u_q	Real- und Imaginärteil des empfangenen Signals
v_{los}	Geschwindigkeit des Objektes in Blickrichtung (<i>line of sight</i>)
v_{Obj}	Geschwindigkeit des Objektes
v_{rel}	relative Geschwindigkeit zwischen Radarsensor und Objekt
v_{SAR}	Geschwindigkeit des Radarsensors
v_{x0}, v_{y0}	Geschwindigkeitskomponente in Flugrichtung bzw. in Entfernungsrichtung
v, v_{adj}	Knoten, adjazenter Knoten
v_S, v_Z	Startknoten, Zielknoten
w_{ij}	Kosten einer Kante zwischen den Knoten i und j
β	Depressionswinkel
β^0	Beta-Null (Rückstreuwert)
β_{lin}^0	linearisierter Beta-Null (Rückstreuwert)
χ, χ^2	Chi-Verteilung, Chiquadrat-Verteilung
Δ_{az}	Versatz in Azimut
δ_{az}	Auflösung in Azimut
δ_{gr}	Auflösung in Ground Range
δ_{sr}	Auflösung in Schrägentfernung
$\epsilon_r, \epsilon'_r, \epsilon''_r$	komplexe Dielektrizitätskonstante, Real- und Imaginärteil
γ	radiometrische Auflösung
$\Gamma(\cdot)$	Gammafunktion
γ_e	Eulersche Konstante

λ	Wellenlänge
μ, σ, σ^2	Mittelwert, Standardabweichung, Varianz
ϕ	Phase des SAR-Signals
ψ_P	Basismatrizenet von Pauli
σ	Radarrückstreuquerschnitt
σ^0	Rückstreukoeffizient, normalisierter Radarrückstreuquerschnitt, Sigma-Null
σ_{lin}^0	linearisierter Sigma-Null (Rückstreuwert)
σ_h	Höhenvariation der Oberfläche
σ_u, σ_u^2	Standardabweichung und Varianz des empfangenen Signals
τ	Impulsdauer
τ_{eff}	effektive Impulsdauer
θ, θ_{loc}	Einfallswinkel, lokaler Einfallswinkel
θ_a	Öffnungswinkel der Antenne in Azimut
θ_{sa}	Öffnungswinkel der synthetischen Apertur in Azimut

Literaturverzeichnis

- ARSENAULT, H. H. und APRIL, G. (1976): Properties of speckle integrated with a finite aperture and logarithmically transformed, *J. Opt. Soc. Amer.* 66: 1160–1163.
- ATKIS-OK (2003): ATKIS-Objektartenkatalog, im Internet unter: <<http://www.atkis.de>>: Recherche am 01.03.2006.
- AVIAD, Z. und CARNINE, P. D. (1988): Road finding for road-network extraction, *Computer Vision and Pattern Recognition*, 814–819.
- BACHER, U. und MAYER, H. (2003): Fuzzy-classification and ziplock snakes for road extraction from IKONOS images, *Proceedings of Joint ISPRS/ERSel Workshop: High Resolution Mapping from Space 2003*, Hannover.
- BACHER, U. und MAYER, H. (2004): Automatic road extraction from IRS satellite images in agricultural and desert areas, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 35, Part B3, Istanbul, 1055–1060.
- BAJCSY, R. und TAVAKOLI, M. (1976): Computer recognition of roads from satellite pictures, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 6(9): 623–637.
- BAMLER, R. und SCHÄTTLER, B. (1993): SAR data acquisition and image formation, in G. SCHREIER (Herausgeber), *SAR Geocoding: Data and Systems*, Wichmann, Karlsruhe, 53–102.
- BARZO HAR, M., COHEN, M., ZISKIND, I. und COOPER, D. (1997): Fast robust tracking of curvy partially occluded roads in clutter in aerial images, in A. GRUEN, E. BALTSAVIAS und O. HENRICSSON (Herausgeber), *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II)*, Birkhäuser Verlag, Basel, 277–286.
- BARZO HAR, M. und COOPER, D. (1996): Automatic finding of main roads in aerial images by using geometric-stochastic models and estimation, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 18(7): 707–721.
- 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, Part B3/1, 58–65.
- BAUMGARTNER, A. (2003): Automatische Extraktion von Straßen aus digitalen Luftbildern, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 564.
- BAUMGARTNER, A., STEGER, C., MAYER, H., ECKSTEIN, W. und EBNER, H. (1999): Automatic road extraction based on multi-scale, grouping, and context, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 65(7): 777–785.
- BAUMGARTNER, A., STEGER, C., MAYER, H. und ECKSTEIN, W. (1997): Multi-resolution, semantic objects, and context for road extraction, *Workshop on Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps*, Birkhäuser Verlag, Basel, Switzerland, 140–156.
- BAYER, T. (1990): *Korrektur reliefbedingter radiometrischer Verzerrungen in geokodierten SEASAT-A SAR-Bildern am Beispiel des Szenenausschnittes Bonn und Umgebung*, DLR-Forschungsbericht 90-54, Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen.
- BHATTACHARYA, U. und PARUI, S. K. (1997): An improved backpropagation neural network for detection of road-like features in satellite imagery, *International Journal of Remote Sensing* 18(16): 3379–3394.
- BOLTER, R., GELAUTZ, M. und LEBERL, F. (1998): Geocoding in SAR layover areas, *European Conference on Synthetic Aperture Radar*, Friedrichshafen, 481–484.
- BORDES, G., GIRAUDON, G. und JAMET, O. (1995): Road extraction guided by a cartographic Database: Creating a Strategy, *IEEE Workshop on Context-Based Vision*, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, California, 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 Acquisition of Topographic Information from Images and Maps, SMAT'97*, Birkhäuser Verlag, 123–139.
- BORGHYS, D., LACROIX, V. und PERNEEL, N. (2002): Edge and line detection in polarimetric SAR images, *International Conference on Pattern Recognition*, Band 2, Quebec, 921–924.
- BORGHYS, D., PERNEEL, C., PIZURICA, A. und PHILIPS, W. (2004): Combining multi-variate statistics and speckle reduction for line detection in multi-channel SAR images, in F. POSA (Herausgeber), *Proceedings of the SPIE Conference on SAR Image Analysis, Modelling and Techniques IV*, Band 5236, Barcelona, 93–104.

- BORGHYS, D., PERNEEL, C. und ACHEROY, M. (2000): Contour detection in high-resolution polarimetric SAR images, in F. POSA und L. GUERRIERO (Herausgeber), *Proceedings of the SPIE Conference on SAR Image Analysis, Modelling and Techniques III*, Band 4173, Barcelona, 99–110.
- BOVIK, A. C. (1988): On detecting edges in speckle imagery, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing* 36(10): 1618–1627.
- BRENNER, A. R. und ENDER, J. H. G. (2002): First experimental results achieved with the new very wideband SAR system PAMIR, *European Conference on Synthetic Aperture Radar*, Köln, Germany, 81–86.
- BRONSTEIN, I. N. und SEMENDJAJEW, K. A. (1991): *Taschenbuch der Mathematik*, 25 edn, B. G. Teubner Verlagsgesellschaft.
- BURLINA, P., CHELLAPPA, R., LIN, C. und ZHANG, X. (1995): Context-based exploitation of aerial imagery, *IEEE Workshop on Context-Based Vision*, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, California, 38–49.
- BUSCH, A., GERKE, M., GRÜNREICH, D., HEIPKE, C., LIEDTKE, C.-E. und MÜLLER, S. (2005): Automatisierte Verifikation topographischer Geoinformation unter Nutzung optischer Fernerkundungsdaten: Systemdesign und praktische Ergebnisse, *Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation 2*: 111–122.
- CHANUSSOT, J., MAURIS, G. und LAMBERT, P. (1999): Fuzzy fusion techniques for linear features detection in multitemporal SAR images, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 37(3): 1292–1305.
- CHANUSSOT, J. und LAMBERT, P. (1998): An application of mathematical morphology to road network extraction on SAR images, *Proc. Int. Symp. Mathematical Morphology*, Amsterdam, 399–406.
- CLÉMENT, G., 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.
- CLOUDE, R. S. und POTTIER, E. (1995): Concept of polarization entropy in optical scattering, *Optical Engineering* 34(6): 1599–1610.
- CLOUDE, R. S. und POTTIER, E. (1996): A review of target decomposition theorems in radar polarimetry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 34(2): 498–518.
- CLOUDE, R. S. und POTTIER, E. (1997): An entropy based classification scheme for land applications for polarimetric SAR, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 35(1): 68–78.
- COULOIGNER, I. und RANCHIN, T. (2000): Mapping of urban areas: A multiresolution modeling approach for semi-automatic extraction of streets, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 66(7): 867–874.
- CURLANDER, J. C. und McDONOUGH, R. N. (1991): *Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing*, John Wiley & Sons Inc., New York u.a.
- DE GUNST, M. und VOSSELMAN, G. (1997): A semantic road model for aerial image interpretation, in W. FÖRSTNER und L. PLÜMER (Herausgeber), *Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps*, Birkhäuser Verlag, Basel, Schweiz, 108–122.
- DEFINIENS (2005): eCognition user guide 4, im Internet unter: <<http://www.definiens-imaging.com>>: Recherche am 10.08.2005.
- DELL'ACQUA, F. und GAMBA, P. (2001): Detection of urban structures in SAR images by robust fuzzy clustering algorithms: The example of street tracking, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39(10): 2287–2297.
- DELL'ACQUA, F., GAMBA, P. und LISINI, G. (2003): Road map extraction by multiple detectors in fine spatial resolution SAR data, *Can. J. Remote Sensing* 29(4): 481–490.
- DIJKSTRA, E. W. (1959): A note on two problems in connexion with graphs, *Numerische Mathematik*.
- ENDER, J. H. G. (1998): Multi-channel SAR system AER-II, *European Conference on Synthetic Aperture Radar*, 315–318.
- ENDER, J. H. G. (1999): Space-time processing for multichannel synthetic aperture radar, *IEE Electr. and Comm. Engineering Journal* 11(1): 29–38.
- ENDER, J. H. G. (2003): SAR and moving targets, Vortrag im Rahmen des CCG-Seminars: SAR and Applications, 10.-14. November 2003, Oberpfaffenhofen.
- ENGLISCH, A. und HEIPKE, C. (1998): Erfassung und Aktualisierung topographischer Geodaten mit Hilfe analoger und digitaler Luftbilder, *Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation 3*: 133–149.

- FISCHLER, M. A. (1994): The perception of linear structure: A generic linker, *Image Understanding Workshop*, 1565–1579.
- 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(3): 201–223.
- FISCHLER, M. A. und HELLER, A. J. (1998): Automated techniques for road network modeling, *Proceedings of the 1998 DARPA Image Understanding Workshop*, Morgan Kaufmann, Monterey, CA, 501–516.
- FISCHLER, M. A. und WOLF, H. C. (1983): Linear delineation, *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 351–356.
- FÖRSTNER, W. (1993): A future of photogrammetric research, *NGT Geodesia* 93(8): 372–383.
- FÖRSTNER, W. (1996): 10 pros and cons against performance characterization of vision algorithms, *European Conference on Computer Vision, Workshop on Performance Characteristics of Vision Algorithms*, 13–29.
- FROST, V., STILES, J., SHANMUGAN, K. und HOLTZMAN, J. (1982): A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 4(2): 157–166.
- FUNG, A. K. und CHENG, K. S. (2004): An update on the IEM surface backscattering model, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 1(2): 75–77.
- GEMAN, S. und GEMAN, D. (1984): Stochastic relaxation, Gibbs distributions, and the Bayesian restoration of images, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 6(6): 721–741.
- GERKE, M., BUTENUTH, M., HEIPKE, C. und WILLRICH, F. (2004): Graph-supported verification of road databases, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 58(3-4): 152–165.
- GOODMAN, J. W. (1975): Statistical properties of laser speckle patterns, in J. DAINTY (Herausgeber), *Laser Speckle and Related Phenomena*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 9–75.
- GRUEN, A. und LI, H. (1997): Linear feature extraction with 3-D LSB-snakes, in A. GRUEN, E. BALTSAVIAS und O. HENRICSSON (Herausgeber), *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II)*, Birkhäuser Verlag, Basel, 287–298.
- HAGG, W. (1998): Merkmalsbasierte Klassifikation von SAR-Satellitenbilddaten, *Dissertation 568*, Fortschrittsberichte VDI, Düsseldorf.
- HARALICK, R. M. und SHAPIRO, L. G. (1992): *Computer and Robot Vision*, Band I, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, MA, chapter : The Facet Model, 371–452.
- HARVEY, W. A. (1999): Performance evaluation for road extraction, *International Workshop on 3D Geospatial Data Production: Meeting Application Requirement*, Paris, France, 175–184.
- HARVEY, W., MCGLONE, J. C., MCKEOWN, D. M. und IRVINE, J. M. (2004): User-centric evaluation of semi-automatic road network extraction, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 70(12): 1353–1364.
- HEDMAN, K., WESSEL, B., SÖRGEL, U. und STILLA, U. (2005a): Automatic road extraction by fusion of multiple SAR views, in M. MÖLLER und E. WENTZ (Herausgeber), *3th International Symposium: Remote sensing and data fusion on urban areas, URBAN 2005. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 36, Part 8/ W27 (on CD), Tempe, Arizona.
- HEDMAN, K., WESSEL, B. und STILLA, U. (2005b): A fusion strategy for extracted road networks from multi-aspect SAR images, in U. STILLA, F. ROTTENSTEINER und S. HINZ (Herausgeber), *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, CMRT05*, Band 36, Part 3/W24, Wien, 185–190.
- HEIPKE, C., MAYER, H., WIEDEMANN, C. und JAMET, O. (1998): External evaluation of automatically extracted roads, *Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation* 2: 81–94.
- HELLER, A., FISCHLER, M., BOLLES, R., CONNOLLY, C., WILSON, R. und PEARSON, J. (1998): An integrated feasibility demonstration for automatic population of geospatial databases, *Principal investigator report*, SRI International.
- HELLWICH, O. (1997): Liniextraktion aus SAR-Daten mit einem Markoff-Zufallsfeld-Modell, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 487.
- HELLWICH, O., MAYER, H. und WINKLER, G. (1996): Detection of lines SAR scenes, *Proc. of ISPRS conference*, Band 31, Wien, Austria, 312–320.

- HELLWICH, O. und STRECK, C. (1996): Linear structures in SAR coherence data, *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Band I, Lincoln, 330–332.
- HEROLD, M., HOCHSCHILD, V. und SCHMULLIUS, C. (2000a): Multifrequente und multipolarimetrische Radarfotogrammetrie hydrologisch relevanter Parameter der Landoberfläche, *Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation* 5: 355–360.
- HEROLD, M., MÜSCHEN, B., MÜLLER, A., KLENKE, M. und STEINNOCHER, K. (2000b): Zur radiometrischen Reliefkorrektur von Fernerkundungsdaten, *Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation* 5: 347–354.
- HINZ, S. (2001): Using context as guide for automatic object extraction in urban areas, in C. JUERGENS (Herausgeber), *Regensburger Geographische Schriften (35)*, Institut für Geographie, Universität Regensburg (ISBN 3-88246-222-1).
- HINZ, S. (2004a): *Automatische Extraktion urbaner Straßennetze aus Luftbildern*, Dissertation, Technische Universität München.
- HINZ, S. (2004b): Detection of vehicles and vehicle queues in high resolution aerial images, *Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation* 3: 201–213.
- HINZ, S. und BAUMGARTNER, A. (2003): Automatic extraction of urban road networks from multi-view aerial imagery, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 58(1-2): 83–98.
- HINZ, S. und WIEDEMANN, C. (2004): Increasing efficiency of road extraction by self-diagnosis, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 70(12): 1457–1466.
- HOHEISEL, S. (2003): *Automated Road Extraction from Radar and Optical Imagery*, Diplomarbeit, Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und Geoinformation.
- HORN, R. (1996): The DLR airborne SAR project E-SAR, *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Lincoln, Nebraska, 1624–1628.
- HUBER, R. und LANG, K. (2001): Road extraction from high-resolution airborne SAR using operator fusion, *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Sydney, Australien, 2813–2815.
- JEON, B., JANG, J. und HONG, K. (1999): Road detection in spaceborne SAR images based on ridge extraction, *International Conference on Image Processing*, Band 2, Kobe, Japan, 735–739.
- JEON, B., JANG, J. und HONG, K. (2000): Map-based road detection in spaceborne synthetic aperture radar images based on curvilinear structure extraction, *Opt. Eng.* 39(9): 2413–2421.
- JEON, B., JANG, J. und HONG, K. (2002): Road detection in spaceborne SAR images using a generic algorithm, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40(1): 22–29.
- KATARTZIS, A., SAHLI, H., PIZURICA, V. und CORNELIS, J. (2001): A model-based approach to the automatic extraction of linear features from airborne images, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39(9): 2073–2079.
- KIRSCHT, M. (1998): Detection, velocity estimation, and imaging of moving targets with single-channel SAR, *Proc. of European Conference on Synthetic Aperture Radar, EUSAR '98*, Friedrichshafen, Germany, 587–590.
- KLAUSING, H. und HOLPP, W. (2000): *Radar mit realer und synthetischer Apertur : Konzeption und Realisierung*, Oldenbourg, München Wien.
- KLAUSMANN, P., FRIES, S., WILLERSINN, D., STILLA, U. und THÖNNESSEN, U. (1999): Application-oriented assessment of computer vision algorithms, *Handbook of computer vision and applications*, Band 3, Jähne, B. and Haußecker, H. and Geißler, P., 133–152.
- KOCH, W. (2005): On tracking-driven road map extraction from GMTI radar data, in U. STILLA, F. ROTTENSTEINER und S. HINZ (Herausgeber), *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, CMRT05*, Band 36, Part 3/W24, Wien, 191–196.
- KRAUS, K. (1990): *Fernerkundung Band 2: Auswertung photographischer und digitaler Bilder*, F. Dümmler Verlag, Bonn.
- KRAUS, K. und SCHNEIDER, W. (1988): *Fernerkundung Band 1: Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken*, F. Dümmler Verlag, Bonn.
- KRIEGER, G., FIEDLER, H. und MOREIRA, A. (2004): Bi- and multi-static SAR: Potentials and challenges, *European Conference on Synthetic Aperture Radar*, Ulm, 365–369.
- KUAN, D., SAWCHUK, A., STRAND, T. und CHAVEL, P. (1985): Adaptive noise smoothing filter for images with signal-dependent noise, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 7(2): 165–177.

- KUAN, D., SAWCHUK, A., STRAND, T. und CHAVEL, P. (1987): Adaptive restoration of images with speckle, *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing* 35(3): 373–383.
- KÜHN, S. (2001): *Klassifizierung von E-SAR-Daten mit eCognition zur Herstellung von Masken für die Straßenextraktion im ländlichen Bereich*, Studienarbeit, Technische Universität Dresden, Institut für Kartographie.
- LACOSTE, C., DESCOMBES, X. und ZERUBIA, J. (2002): A comparative study of point processes for line network extraction in remote sensing, *Technical Report 4516*, Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique, Sophia Antipolis Cedex, France.
- LEE, J. S. (1980): Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 1-2(2): 165–168.
- LEE, J. S. (1981a): Refined filtering of image noise using local statistics, *Computer Graphics and Image Processing* 15: 380–389.
- LEE, J. S. (1981b): Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar images, *Computer Vision and Image Processing* 17: 24–32.
- LEE, J. S. (1983): A simple speckle smoothing algorithm for synthetic aperture radar images, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 13(1): 85–89.
- LEE, J. S. (1986): Speckle suppression and analysis for synthetic aperture radar images, *Optical Engineering* 25(5): 636–643.
- LILLESAND, T. M. und KIEFER, R. W. (1994): *Remote Sensing and Image Interpretation*, 3 edn, John Wiley & Sons, New York, chapter : Microwave Sensing.
- LINDBERG, T. (1998): Edge detection and ridge detection with automatic scale selection, *International Journal of Computer Vision* 30(2): 117–156.
- LISINI, G., TISON, C., TUPIN, F. und GAMBA, P. (2006): Feature fusion to improve road network extraction in high resolution SAR images, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 3(2): 217–221.
- LIVINGSTONE, C. E., SIKANETA, I., GIERULL, C. H., CHIU, S., BEAUDOIN, A., CAMPBELL, J., BEAUDOIN, J., GONG, S. und KNIGHT, T. A. (2002): An airborne synthetic aperture radar (SAR) experiment to support RADARSAT-2 ground moving target indication (GMTI), *Can. J. Remote Sensing* 28(6): 794–813.
- LOPES, A., NEZRY, E., TOUZI, R. und LAUR, H. (1990a): Maximum a posteriori filtering and first order texture models in SAR images, *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2409–2412.
- LOPES, A., TOUZI, R. und NEZRY, E. (1990b): Adaptive speckle filters and scene heterogeneity, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 28(6): 992–1000.
- MAYER, H. (1998a): Automatische Objektextraktion aus digitalen Luftbildern, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 494.
- MAYER, H. (1998b): Maßstabsräume: Theorie und Anwendungen, *Photogrammetrie, Fernerkundung und Geo-information* 4: 197–208.
- 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., WILSON, A. und MCDERMOTT, J. (1985): Rule-based interpretation of aerial imagery, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 7(5): 570–585.
- MCKEOWN, D. M. und DENLINGER, J. L. (1988): Cooperative methods for road tracking in aerial imagery, *Computer Vision and Pattern Recognition*, 662–672.
- MEIER, E., FREI, U. und NÜESCH, D. (1993): Precise terrain corrected geocoded images, in G. SCHREIER (Herausgeber), *SAR Geocoding: Data and Systems*, Wichmann, Karlsruhe, 173–185.
- MENA, J. B. (2003): State of the art on automatic road extraction for GIS update: a novel classification, *Pattern Recognition Letters* 24(16): 3037–3058.
- MERLET, N. und ZERUBIA, J. (1994): New prospects in line detection for remote sensing images, *Proceedings of ICASSP*, Adelaide.
- 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.

- MEYER, F., HINZ, S., LAIKA, A. und BAMLER, R. (2005): A-priori information driven detection of moving objects for traffic monitoring by spaceborne SAR, in U. STILLA, F. ROTTENSTEINER und S. HINZ (Herausgeber), *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, CMRT05*, Band 36, Part 3/W24, Wien, 89–94.
- MOREIRA, A. (2001): Radar mit synthetischer Apertur: Grundlagen und Signalverarbeitung, *Forschungsbericht*, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen.
- MÜLLENHOFF, O. und PRINZ, T. (2004): Ausweisung ehemaliger Flussläufe anhand von multifrequenten, multipolarimetrischen SAR- und multispektralen ASTER-Daten am Beispiel des Oderbruch bei Goltzow, *Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation 2*: 89–99.
- OLIVER, C. J. und QUEGAN, S. (1998): *Understanding Synthetic Aperture Radar Images*, Artech House, Norwood, MA.
- OLMSTED, C. (1993): Scientific SAR user's guide, *Technical Report ASF-SD-003*, Alaska SAR Facility, Fairbanks.
- PAKZAD, K. und HELLER, J. (2004): Automatic scale adaptation of semantic nets, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 35, Part B3, Istanbul, 325–330.
- RAMER, U. (1972): An iterative procedure for the polygonal approximation of plane curves, *Computer Graphics and Image Processing 1*: 244–256.
- REIGBER, A. (2002): *Airborne Polarimetric SAR Tomography*, Dissertation, Universität Stuttgart.
- ROBALO, J. und LICHTENEGGER, J. (1999): ERS-SAR images a bridge, *ESA – Earth Observation Quarterly 64*: 7–10.
- ROTH, A., CRAUBNER, A. und HÜGEL, T. (1993): Standard geocoded ellipsoid corrected images, in G. SCHREIER (Herausgeber), *SAR Geocoding: Data and Systems*, Wichmann, Karlsruhe, 159–172.
- RUSKONÉ, R. (1996): *Road Network Automatic Extraction by Local Context Interpretation: Application to the Production of Cartographic Data*, Dissertation, Université Marne-La-Vallée, France.
- RUSKONÉ, R., AIRAULT, S. und JAMET, O. (1994): Road network interpretation: A topological hypothesis driven system, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 30, Part 3/2, 711–717.
- SCHEIBER, R. (1998): Along- and across-track single-pass interferometry using the E-SAR system, *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Seattle, USA, 1097–1099.
- SCHREIER, G. (1993): Geometrical properties of SAR images, in G. SCHREIER (Herausgeber), *SAR Geocoding: Data and Systems*, Wichmann, Karlsruhe, 103–134.
- SCHWÄBISCH, M. und MOREIRA, J. (2000): Das hochauflösende interferometrische SAR-System AeS-1 – Konzeption, Datenaufbereitung und Anwendungsspektrum, *Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation 5*: 237–246.
- SHAFFER, G. und PEARL, J. (1990): *Readings in Uncertain Reasoning*, Morgan Kaufmann Publishers.
- STEGER, C. (1998a): An unbiased detector of curvilinear structures, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 20*(2): 113–125.
- STEGER, C. (1998b): *Unbiased Extraction of Curvilinear Structures from 2D and 3D images*, Dissertation, Technische Universität München.
- STEGER, C., MAYER, H. und RADIG, B. (1997): The role of grouping for road extraction, in A. GRUEN, E. BALTSAVIAS und O. HENRICSSON (Herausgeber), *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II)*, Birkhäuser Verlag, Basel, Switzerland, 245–256.
- STILLA, U., MICHAELSEN, E., SÖRGEL, U., HINZ, S. und ENDER, J. (2004): Airborne monitoring of vehicle activity in urban areas, *XXth ISPRS Congress, 12-23 July 2004 Istanbul, Turkey, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 35, Part B, Istanbul, 973–980.
- STILLA, U., ROTTENSTEINER, F. und HINZ, S. (Herausgeber) (2005): *Object Extraction for 3D City Models, Road Databases, and Traffic Monitoring - Concepts, Algorithms, and Evaluation (CMRT05)*, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Band 36, Part 3/W24, Wien.
- STILLA, U., SÖRGEL, U. und THÖNNESSEN, U. (2003): Potential and limits of InSAR data for building reconstruction in built up-areas, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 58*(1-2): 113–123.
- STILLA, U. und JURKIEWICZ, K. (1991): Objektklassifikation mit einem blackboardorientierten Inferenzmechanismus, *FIM-Bericht Nr. 230*, Forschungsinstitut für Informationsverarbeitung und Mustererkennung (FIM), FGAN, Ettlingen.

- STILLA, U. und MICHAELSEN, E. (2002): Estimating vehicle activity using thermal image sequences and maps, *Symposium on geospatial theory, processing and applications, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 34, Part 4, Ottawa, 401–405.
- STOICA, R., DESCOMBES, X. und ZERUBIA, J. (2000): Road extraction in remote sensed images using a stochastic geometry framework, *Proceedings MaxEnt*, Gig Sur Yvette, France.
- STOICA, R., DESCOMBES, X. und ZERUBIA, J. (2004): A gibbs point process for road extraction from remotely sensed images, *International Journal of Computer Vision* 57(2): 121–136.
- STRAT, T. und FISCHLER, M. A. (1995): The role of context in computer vision, *Proc. of the Workshop on Context-Based Vision*, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, California, 2–12.
- STRAUB, B.-M. und HEIPKE, C. (2001): Automatic extraction of trees for 3D city models from images and height data, in E. BALTSAVIAS, A. GRÜN und A. VAN GOOL (Herausgeber), *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (III)*, A.A.Balkema Publishers, Lisse u.a., 267–277.
- SUN, G. und RANSON, K. J. (1995): A three-dimensional radar backscatter model of forest canopies, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33(2): 372–382.
- THIEL, C. (2005): Zusammenstellung und Interpretation relevanter SAR-immanenter Spezialfälle der Radarrückstreuung am Beispiel einer hoch aufgelösten polarimetrischen L-Band Szene, *Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation* 1: 79–84.
- TÖNJES, R., GROWE, S., BÜCKNER, J. und LIEDKE, C.-E. (1999): Knowledge-based interpretation of remote sensing images using semantic nets, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 65(7): 811–821.
- TOUZI, R., LOPEZ, A. und BOUSQUET, P. (1988): A statistical and geometrical edge detector for SAR images, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 26(11): 764–773.
- TUPIN, F. (1997): *Reconnaissance de Formes et Analyse des Scènes en Imagerie Radar à Ouverture synthétique*, Dissertation, Département Traitement du Signal et des Images, Paris, France.
- TUPIN, F. (2000): Radar cross-views for road detection in dense urban areas, *European Conference on Synthetic Aperture Radar*, München, 617–620.
- TUPIN, F., HOUSHMAND, B. und DATCU, M. (2002): Road detection in dense urban areas using SAR imagery and the usefulness of multiple views, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40(11): 2405–2414.
- TUPIN, F., MAÎTRE, H., MANGIN, J.-F., NICOLAS, J.-M. und PECHERSKY, E. (1998): Detection of linear structures in SAR images: Application to road network extraction, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 36(2): 434–453.
- ULABY, F. T., MOORE, R. K. und FUNG, A. K. (1981): *Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry*, Band I of *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, MA.
- ULABY, F. T., MOORE, R. K. und FUNG, A. K. (1982): *Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory*, Band II of *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*, Addison-Wesley Publishing Company, Reading, MA.
- ULABY, F. T., MOORE, R. K. und FUNG, A. K. (1986): *From Theory to Applications*, Band III of *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*, Artech House, Dedham, MA.
- ULABY, F. T. und DOBSON, M. C. (1989): *Handbook of radar scattering statistics for terrain*, Artech House, Norwood, MA.
- ULABY, F. T. und ELACHI, C. (1990): *Radar Polarimetry for Geoscience Applications*, Artech House, Norwood, M.A.
- VASUDEVAN, S., CANNON, R. und BEZDEK, J. (1988): Heuristics for intermediate level road finding algorithms, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 44: 175–190.
- VOSSelman, G. (1992): *Relational matching*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York u.a.
- VOSSelman, G. und DE KNECHT, J. (1995): Road tracking by profile matching and kalman filtering, in A. GRUEN, O. KUEBLER und P. AGOURIS (Herausgeber), *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images*, Birkhäuser Verlag, Basel, 265–274.
- WALESSA, M. und DATCU, M. (2000): Model-based despeckling and information extraction from SAR images, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 38(5): 2258–2269.

- WANG, Y. und ZHENG, Q. (1998): Recognition of roads and bridges in SAR images, *Pattern Recognition* 31(7): 953–962.
- WESSEL, B. (2004): Road network extraction from SAR imagery supported by context information, *XXth ISPRS Congress, 12-23 July 2004 Istanbul, Turkey, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 35, Part 3B, Istanbul, 360–365.
- WESSEL, B., WIEDEMANN, C., HELWICH, O. und ARNDT, W.-C. (2002): Evaluation of automatic road extraction results from SAR imagery, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Band 34, Part 4/IV, Ottawa, 786–791.
- WESSEL, B., WIEDEMANN, C. und EBNER, H. (2003): The role of context for road extraction from SAR imagery, *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Band VI, Toulouse, 4025–4027.
- WESSEL, B. und HINZ, S. (2004): Context-supported road extraction from SAR imagery: Transition from rural to built-up areas, *Proceedings of EUSAR '04*, Ulm, 399–403.
- WESSEL, B. und WIEDEMANN, C. (2003): Analysis of automatic road extraction results from airborne SAR imagery, *Proceedings of the ISPRS Conference Photogrammetric Image Analysis (PIA'03), International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 34, Part 3/W8, München, 105–110.
- WIEDEMANN, C. (2002): Extraktion von Straßennetzen aus optischen Satellitenbilddaten, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 551.
- WIEDEMANN, C. und EBNER, H. (2000): Automatic completion and evaluation of road networks, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 33 (B3), 979–986.
- WIEDEMANN, C. und HINZ, S. (1999): Automatic extraction and evaluation of road networks from satellite imagery, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Band 32 (3-2W5), 95–100.
- XIE, H., PIERCE, L. E. und ULABY, F. T. (2002): Statistical properties of logarithmically transformed speckle, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40(3): 721–727.
- ZADEH, L. (1989): Knowledge representation in fuzzy logic, *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* 1(1): 89–100.
- ZLOTNICK, A. und CARNINE, P. D. J. (1993): Finding road seeds in aerial images, *Computer Vision, Graphics, and Image Processing: Image Understanding* 57(2): 243–260.

Dank

An erster Stelle danke ich meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Heinrich Ebner, dem ehemaligen Leiter des Lehrstuhls für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU München. Er verstand es am Lehrstuhl ein freies und motivierendes Umfeld zu schaffen und gab mir durch das Führen „an der langen Leine“ die für wissenschaftliches Arbeiten nötige Freiheit. Von seinem tiefen Fachwissen, den zahlreichen Diskussionen und seiner Person habe ich viel gelernt. Dafür möchte ich ihm von ganzem Herzen danken.

Den Impuls zu dieser Arbeit gab Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Olaf Hellwich, Leiter des Instituts für Computer Vision & Remote Sensing an der TU Berlin. Durch sein Engagement und seine Erfahrung in der Radarfernerkundung konnte ich auf dem PROSMART II Projekt meine Arbeiten beginnen. Für seine Betreuung und die Diskussionen zur Radarthematik danke ich ihm recht herzlich.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Stilla, dem Leiter des Fachgebiets Photogrammetrie und Fernerkundung, danke ich für die notwendigen Freiheiten zur Fertigstellung dieser Arbeit und für die Übernahme des dritten Koreferats, zu dem er sich trotz hoher Arbeitsbelastung bereit erklärt hat.

Für meine Arbeit stand mir die langjährige Erfahrung am Lehrstuhl auf dem Gebiet der Straßenextraktion zur Verfügung. Ein besonderer Dank gilt an dieser Stelle Herrn Dr.-Ing. Christian Wiedemann. Seine Betreuung während der gesamten Zeit und sein Fachwissen verhalfen mir zu einem vertieften Verständnis der Straßenextraktion. Auch für die wertvollen Diskussionen und Unterstützungen von Herrn Dr.-Ing. Albert Baumgartner und Herrn Dr.-Ing. Stefan Hinz zum Thema Straßenextraktion bin ich sehr dankbar.

Die vorliegende Arbeit konnte nur im Rahmen einer offenen und freundschaftlichen Atmosphäre entstehen. Dafür möchte ich allen aktuellen und ehemaligen Kollegen des Fachgebiets bzw. des Lehrstuhls für Photogrammetrie und Fernerkundung sowie des Lehrstuhls für Methodik der Fernerkundung danken. Ohne Euch hätte ich mich in Bayern nicht so wohl gefühlt.

Ebenfalls für die gute Stimmung und die mentale Unterstützung möchte ich der Frauenrunde der Geodäsie danken.

Das Korrekturlesen der Arbeit übernahmen freundlicherweise Herr Dr.-Ing. Franz Kurz, Herr Dr.-Ing. Franz Meyer und Herr Dr.-Ing. Christian Wiedemann. Dafür danke ich ihnen sehr herzlich.

Mein ganz besonderer Dank gilt schließlich meinem Freund Franz Kurz, der mich immer wieder aufs Neue motiviert hat. Für seine Unterstützung und seine Geduld, mich mit meiner Dissertation zu teilen, danke ich ihm von ganzem Herzen.

Lebenslauf

Name: Birgit Wessel
Geburtsort: Elmshorn
Geburtsdatum: 15. September 1971

1978 – 1982 Grundschole, Elmshorn
1982 – 1988 Realschole, Elmshorn
1988 – 1991 Fachgymnasium, wirtschaftlicher Zweig, Elmshorn
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

1991 – 1992 Auslandsaufenthalt, Au-pair in Madrid, Spanien
1992 – 1994 Studium der Politikwissenschaft an der Universität Trier
1994 – 2000 Studium des Vermessungswesens an der Universität Hannover
Abschluss: Diplom-Ingenieurin

2000 – 2004 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für
Photogrammetrie und Fernerkundung der TU München
Stipendium der TU München

2004 – 2005 Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Photogrammetrie
und Fernerkundung der TU München

seit 2005 Mitarbeiterin im wissenschaftlichen Dienst am Deutschen
Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) des Deutschen Zentrums
für Luft- und Raumfahrt (DLR), Oberpfaffenhofen