

Iterative Verfahren zur Detektion und Rekonstruktion von Gebäuden in SAR- und InSAR-Daten

Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation

von Dipl.-Ing. Uwe Sörgel
geboren am 13. März 1969 in Zell/Mosel

2003

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. C.-E. Liedtke
2. Referent: Prof. Dr.-Ing. C. Heipke
Tag der Promotion: 26. März 2003

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Forschungsgesellschaft für angewandte Naturwissenschaften am Forschungsinstitut für Optoelektronik und Mustererkennung (FGAN-FOM) in Ettlingen. Den Herren Prof. Dr.-Ing. C.-E. Liedtke und Prof. Dr.-Ing. C. Heipke von der Universität Hannover möchte ich für die fachliche Betreuung der Arbeit und die Ausfertigung der Referate danken. Herr Prof. Dr.-Ing. K. Jobmann übernahm freundlicherweise den Vorsitz bei der Prüfung.

Allen meinen Kollegen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, möchte ich herzlich für ihre Hilfsbereitschaft danken. Herr Prof. Dr. M. Tacke, Herr Dr. K. Lütjen und insbesondere Herr Dipl.-Inform. U. Thönnessen machten durch Ihre Unterstützung die Promotion erst möglich. Mein besonderer Dank gilt den Herren Dr. E. Michaelsen, Dr. K. Schulz und Dr. U. Stilla für die Durchsicht der Arbeit und die wertvollen Diskussionen und Anregungen.

Den Kollegen Prof. Dr. J. Ender, Dr. A. Brenner, Dr. L. Rößing und Dipl. Phys. U. Skupin vom Schwesterinstitut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik (FGAN-FHR) in Wachtberg-Werthhoven bin ich für die Überlassung von SAR-Daten und die angenehme Zusammenarbeit sehr verbunden. Weitere Radar- und LIDAR-Daten überließen freundlicherweise die Herren Dr. K. Schmid von der Gruppe Rüstung des Verteidigungsministeriums der Schweiz und Dr. E. Meier von der Universität Zürich.

Zum Schluß möchte ich ganz besonders meiner Frau Heike danken, ohne deren Verständnis und Unterstützung die Promotion kaum möglich gewesen wäre.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	VII
Abstract	IX
Liste der Abkürzungen und Symbole	XI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Stand der Technik	2
1.3 Thema und Aufbau der Arbeit	9
2 Grundlagen	11
2.1 Das Radar-Prinzip	11
2.1.1 Die Radargleichung	12
2.1.2 Auflösungsvermögen in Entfernung und Azimut	13
2.2 Das SAR-Prinzip	15
2.3 Eigenschaften der SAR-Abbildung	17
2.3.1 Geometrische Verhältnisse bei der SAR-Abbildung	17
2.3.2 Rückstreuung von der Erdoberfläche	18
2.3.3 Spezialfälle der SAR-Rückstreuung	20
2.3.4 Rückstreuung und Polarisierung	21
2.3.5 Modellierung der Rückstreuung	22
2.3.6 Radiometrische Auflösung	22
2.3.7 Transformation des SAR-Signals in Grauwerte	24
2.4 Georeferenzierung	25
2.4.1 Abbildung auf die Bodenebene	25
2.4.2 Abbildung auf ein Ellipsoid	25

2.4.3	Abbildung auf ein digitales Geländemodell	25
2.4.4	Radiometrische Korrektur	27
2.5	SAR-Interferometrie	28
2.5.1	Erzeugung eines DOM mit InSAR	29
2.5.2	Kohärenz	32
2.5.3	Genauigkeit der InSAR-Höhenmessung	33
2.5.4	Restaurierung gestörter InSAR-Daten bei natürlicher Szene	34
2.6	SAR-Sensorsysteme	35
2.6.1	Neueste Entwicklungen von Sensorik und Analyse	36
2.7	Zusammenfassung	37
3	Gebäude in SAR- und InSAR-Daten	39
3.1	Ausprägung urbaner Objekte in InSAR-Daten	39
3.2	Geometrische Analyse der Abbildung von Gebäuden	43
3.2.1	Auswirkungen auf die Höhenmessung	48
3.3	Schlußfolgerungen	49
4	Simulation urbaner Szenen	51
4.1	Referenzdaten für die Simulation	51
4.1.1	Höhenmodelle	51
4.1.2	Thematische Vektordaten	52
4.2	Bestimmung von Layover und Verdeckungen	53
4.2.1	Gewinn durch Auswertung von Multiaspekt-Daten	54
4.3	Simulation eines SAR-Betragsbildes	57
4.3.1	Detektion von Orten starker Rückstreuung	59
4.4	Simulation von InSAR	60
4.5	Zusammenfassung	61
5	Rekonstruktion von Gebäuden aus SAR- und InSAR-Daten	63
5.1	Modellierung	63
5.1.1	Objektmodellierung	63
5.1.2	Anforderungen an Sensor und Daten	65
5.2	Auswertekonzept	66
5.2.1	Modellrepräsentation	67

5.2.2	Fokussierung auf relevante Bildbereiche	69
5.2.3	Auswahl der Daten für die Analyse	70
5.3	Vorverarbeitung	70
5.4	Segmentierung von Primitivobjekten	71
5.4.1	Primitivobjekte für die Erkennung von Gebäuden und Straßen	71
5.4.2	Zusätzliche Primitivobjekte bei großen Gebäuden	75
5.5	Gebäudedetektion	77
5.5.1	Detektion von Wohngebäuden	77
5.5.2	Detektion von Gebäuden in Industriekomplexen	80
5.6	Gebäuderekonstruktion	82
5.6.1	Rekonstruktion der Grundrisse	82
5.6.2	Rekonstruktion der Dächer	86
5.6.3	Iterative Verbesserung	88
5.6.4	Auswertung von Multiaspekt-Daten	91
5.6.5	Rekonstruktion von Industriekomplexen	93
6	Ergebnisse	95
6.1	Bewertekonzept	95
6.2	Bewertung der Ergebnisse	98
7	Diskussion und Ausblick	113
A	Statistische Modelle der SAR- und InSAR-Signale	117
A.1	SAR-Signale verteilter Ziele	117
A.1.1	Der Speckle-Effekt	120
A.2	Statistik der InSAR-Phase	123
	Literatur	125
	Lebenslauf	134

Kurzfassung

Der Gegenstand dieser Arbeit ist es zu klären, inwieweit Gebäude alleine aus SAR- und InSAR-Daten detektiert und rekonstruiert werden können. Über die Betrachtung einzelner Gebäude für sich alleine hinausgehend soll auch Modellwissen über die Szene genutzt werden, zum Beispiel die Nachbarschaftsbeziehungen von Gebäuden zu anderen Gebäuden und zu Straßen.

Die schräge Beleuchtungsgeometrie bei SAR hat Abbildungsphänomene wie Layover, Radarschatten, spiegelnde Reflexion und Mehrfachreflexionen zur Folge. In der Umgebung von Gebäuden ist mit deren vermehrtem Auftreten zu rechnen, was an den senkrechten Wänden und der vorzugsweise rechtwinkligen oder parallelen Gebäudeanordnung liegt. Die genannten Effekte können einerseits als typische Gebäudemerkmale bei der Analyse dienen, aber andererseits auch die Aufgabe erschweren oder unmöglich machen.

Zunächst werden daher geometrische Bedingungen für das Auftreten und Ausmaß der Phänomene an Gebäuden hergeleitet. Dabei sind insbesondere die Auswirkungen zu berücksichtigen, die sich aus der räumlichen Nähe benachbarter Gebäude ergeben. Das Ziel ist es festzustellen, für welche Dachbereiche aus einer bestimmten Richtung brauchbare SAR-Messungen vorliegen können. Auf der Grundlage eines hochaufgelösten DOM einer Szene werden durch Simulationen Layover- und Schattenbereiche bestimmt. Damit läßt sich abschätzen, wo die Grenzen einer Gebäuderekonstruktion aus den vorliegenden SAR-Daten liegen. Weiterhin ist von Interesse, was bei freier Wahl der Parameter einer oder mehrerer SAR-Messungen im besten Fall zu erwarten ist.

Die Analyse von SAR-Betragsbildern und InSAR-Datensätzen erfolgt mit Methoden der strukturellen Bildverarbeitung. Dabei ist pro Szene mindestens ein InSAR-Datensatz erforderlich. Die Gebäudedetektion beschränkt sich grundsätzlich auf Daten, die in der SAR-Entfernungsgeometrie vorliegen, um Abbildungsartefakte aufgrund der Georeferenzierung zu vermeiden. Die Rekonstruktion erfolgt anschließend im Weltkoordinatensystem. Es handelt sich um iterative Verfahren, wobei Zwischenergebnisse als Grundlage für Simulationen dienen. Durch Abgleich mit den realen Daten ist eine schrittweise Verbesserung der Resultate möglich.

Die kombinierte Auswertung von SAR-Daten aus unterschiedlichen Aufnahmerichtungen ermöglicht weitere Ergebnisverbesserungen. Durch eine mehrfache Bestätigung aus den verschiedenen Aspekttrichtungen erhöht sich die Evidenz von Objekthinweisen. Darüber hinaus können verdeckte Bereiche ergänzt und Layovereffekte korrigiert werden. Die Fusion der Daten findet auf symbolischer Ebene im Weltkoordinatensystem statt. Analog zur oben beschriebenen Vorgehensweise erfolgt eine weitere Verfeinerung der Resultate durch Simulationen, Abgleich und Ergebnisfusionierung in jedem Iterationsschritt.

Stichworte: SAR, InSAR, Gebäudedetektion, Gebäuderekonstruktion.

Abstract

The topic of this thesis is to investigate to what extent buildings can be detected and reconstructed from SAR and InSAR data. In addition to an analysis of individual buildings alone, scene knowledge is exploited for this task, e.g. neighbourhood relations between buildings and the proximity of roads and buildings.

The side-looking illumination of SAR gives rise to phenomena like layover, shadow, specular reflections and multiple reflections. Due to the vertical walls and the preferred rectangular or parallel alignment of buildings, they often occur at building locations. On the one hand the mentioned effects provide features for the analysis of buildings. On the other hand they can hinder or even make the task impossible, e.g. by obscuring objects or corrupting the data.

The geometric constraints for the presence and size of the illumination phenomena are shown. The emphasis is to determine which roof areas can be sensed by a SAR measurement from a given aspect. For this task the interdependence caused by spatial proximity of buildings has to be considered. Based on a high-resolution DEM of an urban scene layover and shadow areas are simulated. The aim is to estimate the utmost possible effort result of a building reconstruction from the given SAR data. Furthermore, the optimal single and multi-aspect SAR measurements are determined, assuming free choice of illumination directions.

The buildings are detected and reconstructed with structural image analysis methods from the given SAR amplitude images and InSAR data sets. The approach requires at least one InSAR data set for each scene. The building detection is restricted to the slant range imagery to circumvent artefacts caused by geocoding. The reconstruction is carried out afterwards in the world coordinate system. The results are refined iteratively by comparing simulated SAR data based on intermediate reconstruction results with the real data.

The integration of additional SAR data of different aspects offers the opportunity of a further improvement of the results. By mutual confirmation the evidence of object hints is enhanced. Furthermore, occluded areas can be filled and layover effects can be corrected. The fusion of the data is carried out on the symbolic object level in the world coordinate system. Analogous to the manner described above the results are improved iteratively by simulation, comparison and fusion in each step.

Keywords: SAR, InSAR, building detection, building reconstruction.

Liste der Abkürzungen und Symbole

Allgemeines

<i>AER-II</i>	Airborne Experimental Radar II
<i>DGM</i>	Digitales Geländemodell
<i>DOM</i>	Digitales Oberflächenmodell
<i>FGAN</i>	Forschungsgesellschaft für angewandte Naturwissenschaften
<i>FOM</i>	Forschungsinstitut für Optronik und Mustererkennung
<i>FHR</i>	Forschungsinstitut für Hochfrequenzphysik und Radartechnik
<i>GRF</i>	Gibbs Random Field
<i>GMRF</i>	Gauß Markov Random Field
<i>InSAR</i>	Interferometric Synthetic Aperture Radar
<i>LIDAR</i>	Light Detection and Ranging
<i>MAP</i>	Maximum Aposteriory Probability
<i>MLE</i>	Maximum Likelihood Estimate
<i>MOUT</i>	Military Operations on Urbanized Terrain
<i>MRF</i>	Markov Random Field
<i>PRF</i>	Pulse Repetition Frequency, Pulswiederholrate
<i>RADAR</i>	Radiofrequency Detection and Ranging
<i>RAR</i>	Real Aperture Radar
<i>RMS</i>	Root Mean Square
<i>SAR</i>	Synthetic Aperture Radar
<i>SNR</i>	Signal to Noise Ratio, Signal-Rausch-Verhältnis
<i>SRTM</i>	Shuttle Radar Topography Mission
$c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s	Lichtgeschwindigkeit
$k \approx 1,38 \cdot 10^{-23}$ Ws/K	Boltzmann-Konstante
P_S	Sendeleistung
P_R	Vom Ziel zurückgestreute Leistung
S_Z	Sendeleistungsdichte am Ziel
E_Z	Signalenergie am Ziel insgesamt
τ_p	Pulslänge
B	Systembandbreite, Basislinie bei Interferometrie
λ	Radarwellenlänge
T_{eff}	Effektive Rauschtemperatur des Sensors

L_v	Systemverluste des SAR-Sensors
L_s	Länge der synthetischen Apertur
v	Geschwindigkeit des Sensorträgers
d, D	Antennenhöhe und -länge
A_{eff}	Effektive Antennenfläche
G	Antennengewinn
θ	Ausrichtungswinkel der Antenne bezogen auf den Nadirpunkt
α	Inzidenzwinkel zwischen dem Signal und der Flächennormalen
r	Entfernung zwischen Sensor und Ziel
Δt_S	Laufzeit des Signals vom Sensor zum Ziel und zurück
L, L_{eff}	Anzahl der Looks beim SAR-Bild, effektive Anzahl der Looks
δ_r	Auflösung in Entfernungsrichtung
δ_{ra}, δ_{sa}	Auflösung in Azimutrichtung bei RAR und bei SAR
δ_R	Radiometrische Auflösung
ε	Dielektrizitätskonstante
$\gamma^0(r, t)$	Komplexe Reflektivität eines einzelnen Objektes
σ	Radarrückstreuquerschnitt, Standardabweichung
σ_0	Radarrückstreuoeffizient
σ_n	normalisierte Radarrückstreuung
$s(r, t)$	SAR-Systemimpulsantwort
$u(r, t)$	SAR-Empfangssignal
u_i, u_q	In-Phase- und Quadraturanteil von $u(r, t)$
a, A	Amplitude des SAR-Signals
i, I	Intensität des SAR-Signals
\bar{I}	Mittelwert der Intensität
φ	Phase des SAR-Signals
μ, σ, σ^2	Erwartungswert, Standardabweichung und Varianz
σ_v	Variationskoeffizient
R_σ	Dynamikbereich der Radarrückstreuung
$[\mathbf{S}_0]$	Streumatrix
HH, HV, VH, VV	Horizontale und vertikale Polarisation, jeweils Sender und Empfänger
Δr	Weglängenunterschied des Signals bei InSAR
$\Delta\varphi$	Differenzphase der beiden SAR-Messungen
ξ	Winkel der Basis zur Waagerechten
γ	Kohärenz
Γ	Gammafunktion
χ, χ^2	Chi-Verteilung, Chiquadrat-Verteilung
${}_2F_1$	Gaußsche Hypergeometrische Funktion
F_D, F_R	Doppler- und Ranggleichung
f_{DC}	Zero-Doppler, Dopplerzentroid
Δf_D	Dopplerbandbreite
$p(X, Y, Z), s(X, Y, Z)$	Objekt- und Sensorposition im Weltkoordinatensystem

Abkürzungen der Objektkonzepte

<i>K</i>	KANTE
<i>SK</i>	SCHATTENKANTE
<i>SL</i>	STREUERLINIE
<i>ER</i>	ERHABENEREGION
<i>BS</i>	BETRAGSGEGENSTÄNDE
<i>LSL</i>	LANGESTREUERLINIE
<i>LSK</i>	LANGESCHATTENKANTE
V_{min}, V_{max}, V	VIERECK_MIN, VIERECK_MAX, VIERECK
<i>KV</i>	KANTENVIERECK
<i>S</i>	STRASSE
<i>GH</i>	GEBÄUDEHINWEIS
<i>SGH</i>	STRASSEN- GEBÄUDEHINWEIS
<i>RG</i>	RECHTECKGRUNDRISS
<i>RWG</i>	RECHTWINKLIGERGRUNDRISS
<i>PG</i>	POLYGONGRUNDRISS

Schwellwerte und Gütemaße

th_b	Maximalwert zur Beschneidung des Betragshistogramms
th_{dunkel}, th_{hell}	Schwellwerte für dunkle und helle Betragsbereiche
$th_{\Delta b}$	Maximale Betragsdifferenz beim Flächenwachstumsverfahren
th_{koh}	Untere Schwelle für Kohärenzwerte
$th_{\Delta h}$	Schwellwert zur Trennung erhabener Objekte vom Boden
$\gamma_{\text{überl}}, \gamma_{\text{para}}$	Bewertung von Überlappung und Parallelität der beiden Instanzen der Primitive einer Instanz VIERECK
$\gamma_{\text{überl_K}}$	Überlappung einer weiteren seitlichen Instanz KANTE
γ_{hoch}	Maß für die Erhabenheit einer Instanz GEBÄUDEHINWEIS
γ_{strasse}	Abstand und Orientierung von Instanzen <i>SGH</i> und <i>STRASSE</i>
γ_{gh}	Gesamtbewertung einer Instanz <i>GH</i> oder <i>SGH</i>
h_{sch}, γ_{sch}	Höhe des Gebäuderandes aus der Schattenanalyse, Bewertung
h_{ebene}, σ_E	Ebenenapproximation in InSAR-DOM, RMS davon
Δ_{R_E}	Differenzbetrag von h_{sch} und h_{ebene}
Δ_{Dach}	Gütemaß für Dachrekonstruktion

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Erkenntnisse aus der Beobachtung unseres Planeten durch Fernerkundung sind zur unverzichtbaren Grundlage für gesellschaftspolitische Entscheidungen geworden. Dabei geht es um sehr unterschiedliche Fragestellungen, wie etwa die Abschätzung des kommenden Ernteertrages, die Standort- und Verkehrsplanung sowie die Überwachung von Veränderungen des Ökosystems.

In der Fernerkundung kommen zunehmend luft- oder satellitengetragene Radarsysteme zum Einsatz, die das Spektrum der Millimeter- und Zentimeterwellen abdecken. Die Radarinformation stellt eine wertvolle Ergänzung zu passiven Sensoren dar, die den sichtbaren oder infraroten Spektralbereich nutzen. Da der Sensor die Szene aktiv beleuchtet, ist er unabhängig von der Tageszeit. In einigen Radarfrequenzbändern ist die Signaldämpfung durch Witterungseinflüsse gering. Zur Aufbereitung des zurückgestreuten Signals in eine bildhafte Form verwendet man üblicherweise das SAR-Verfahren (*Synthetic Aperture Radar*). Das Auflösungsvermögen eines SAR-Systems ist im Prinzip unabhängig von der Entfernung zur Szene. Daher sind Messungen auch aus großer Entfernung möglich. Zudem können in sehr kurzer Zeit große Flächen erfaßt werden. So wurden in den 70er Jahren weite Teile Südamerikas mittels SAR kartiert [118].

Neben der thematischen Kartierung der Erdoberfläche ist die Bestimmung der Geländehöhe ein weiterer Schwerpunkt der Fernerkundung. Die Topographie des Geländes wird durch ein digitales Geländemodell (DGM) wiedergegeben [65], während ein digitales Oberflächenmodell (DOM) darüber hinaus erhabene Objekte repräsentiert [129]. Die klassische Methode zur Erzeugung von Höhenmodellen ist die photogrammetrische Stereoauswertung von Luftbildern durch Zuordnung korrespondierender Bildstellen. Daneben kommen zunehmend Sensoren zum Einsatz, die mittels Entfernungsmessung die Geländehöhe direkt bestimmen: Laserentfernungssensoren (LIDAR) und *interferometrisches SAR (InSAR)*.

Bisher wurde InSAR vorwiegend verwendet, um großflächige Oberflächenmodelle ländlicher Gebiete zu gewinnen. In einigen Entwicklungsländern wurde die gesamte Fläche derart erfaßt [121]. Heutige SAR-Systeme erreichen Ortsauflösungen von unter einem Meter, die Höhengenaugigkeit von InSAR-DOM liegt im Meterbereich.

Die Analyse urbaner Gebiete mit SAR- und InSAR-Sensoren bietet sich insbesondere dann an, wenn in kurzer Zeit große Flächen zu erfassen sind, etwa bei Erdbeben [120], [136] oder Überschwemmungen [110], wie z. B. der Oderflut vor einigen Jahren oder jüngst dem Elbehochwasser. Dies gilt umso mehr nachts und bei widrigen Wetterbedingungen. Wegen dieser Eigenschaften sind Radarsensoren auch in militärischen Szenarien von Bedeutung.

In urbanen Gebieten ist man an Aussagen über die in der Szene enthaltenen 3D-Objekte und deren Bedeutungen und Zusammenhänge, wie etwa Nachbarschaftsbeziehungen, interessiert. Zur Erlangung einer Szenenbeschreibung ist die Rekonstruktion der Szene aus den Daten notwendig, wobei Vorwissen über urbane Szenen einfließt. Es wurden Verfahren der strukturellen Mustererkennung vorgeschlagen, um dreidimensionale Stadtmodelle aus digitalen Höhenmodellen ([13], [113], [129]), Luftbildern ([41], [48], [111], [114]) oder beidem [42] zu erzeugen, wobei zum Teil auch Karteninformation einfließt.

Ein wesentlicher Bestandteil eines 3D-Stadtmodells sind die Gebäude. Die verbesserte Qualität der SAR- und InSAR-Daten legt es nahe, ihre Eignung für die anspruchsvolle Aufgabe einer Detektion und Rekonstruktion von Gebäuden zu untersuchen. Dabei ist zum einen von Interesse, inwiefern sich die Art der städtischen Szene – etwa, ob es sich um einen Vorort mit Einfamilienhäusern handelt oder um eine Innenstadt mit Hochhäusern – auf das erzielbare Ergebnis auswirkt. Zum anderen ist zu prüfen, welcher Nutzen aus der kombinierten Auswertung mehrerer SAR-Messungen einer Szene aus unterschiedlichen Ansichten gezogen werden kann.

1.2 Stand der Technik

Bei der Analyse von SAR-Bildern sind die speziellen Auswirkungen des Sensorprinzips auf die Abbildung der Szene zu berücksichtigen. Darauf soll an dieser Stelle kurz eingegangen werden, damit die Vorgehensweisen der im Anschluß diskutierten Verfahren aus der Literatur nachvollziehbar sind. Eine detailliertere Beschreibung des Sensorprinzips erfolgt in Kapitel 2.

Besonderheiten der Fernerkundung mit SAR

Im Gegensatz zu optischen Sensoren, die in der Regel in Nadirsicht betrieben werden, beleuchtet ein SAR-Sensor die Szene prinzipiell *schräg*, im Normalfall seitlich senkrecht zur Flugrichtung. Vereinfachend kann man die SAR-Messung als Abbildung des zurückgestreuten Signals in die Entfernungsebene (*Slant Range*) auffassen. Die Georeferenzierung kann entweder durch eine einfache Vorwärtsprojektion auf die als eben gedachte Erde erfolgen (Bodengeometrie) oder, mit höherer Genauigkeit, unter Verwendung eines DOM. Die Aufnahmegeometrie verursacht Abbildungsphänomene, zum Beispiel *Layover* und *Radarschatten*. Als *Layover* bezeichnet man die Signalmischung von erhabenen Objekten mit dem davorliegenden niedrigeren Gelände. Hinter erhabenen Objekten wird Gelände verdeckt. Aus diesen Schattenbereichen liegt kein Signal vor. In urbanen Gebieten treten häufig spiegelnde Reflexionen des Signals an Gebäudedächern sowie Mehrfachreflexionen an Gebäudewänden und Ecken auf. Die Folge sind punkt- oder linienförmige Signalspitzen, die weite Teile der Umgebung überstrahlen können.

Beim InSAR-Verfahren kombiniert man in der Regel zwei SAR-Bilder, die um einen Basisabstand B senkrecht zur Flugrichtung versetzt aufgenommen wurden. Der Versatz hat eine Phasendifferenz der Signale zur Folge, aus der die Geländehöhe bestimmbar ist. Ein vollständiger InSAR-Datensatz besteht aus dem Phasendifferenzbild, dem Intensitätsbild und dem sogenannten Kohärenzbild, das die Schätzwerte der lokalen Korrelation der beiden ursprünglichen SAR-Bilder wiedergibt. Die angesprochenen SAR-Abbildungsphänomene beeinflussen die Zuverlässigkeit des erzeugten InSAR-DOM, dessen Genauigkeit lokal stark variieren kann.

Verfahren zur Detektion und Rekonstruktion von Gebäuden

In jüngster Zeit wurden verschiedene Verfahren zur Detektion und Rekonstruktion von Gebäuden aus SAR- und InSAR-Daten vorgeschlagen. Im Folgenden werden die wesentlichen Merkmale der Verfahren beschrieben, die sich z. B. anhand der Art der analysierten Daten gruppieren lassen. Darüber hinaus werden Verfahren vorgestellt, die sich auf die Segmentierung erhabener Bereiche beschränken, was die Grundlage für eine Gebäudedetektion darstellt. Im Anschluß erfolgt eine Diskussion der angewandten Methoden sowie der diesen zugrundeliegenden Modellvorstellungen. Eine Übersicht der vorgestellten Ansätze ist in Tabelle 1.1 aufgeführt.

Auswertung von SAR-Betragsbildern

Kirscht und Rinke [62] entwickelten ein Verfahren zur 3D-Rekonstruktion von Gebäuden und Vegetation in SAR-Betragsbildern, die in der Bodengeometrie vorliegen. Durch ein statistisches Klassifikationsverfahren erfolgt zunächst eine Trennung der als statistisch homogen modellierten Klassen erhabene Objekte, Boden und Radarschatten. Falls vom Stamm keine Reflexion empfangen wird, tritt in SAR-Betragsbildern an Bäumen eine Lücke zwischen der Krone und dem Schatten auf, in der der Boden sichtbar ist. Anhand dieses Merkmals unterscheidet man Gebäude von Bäumen. Entlang der Entfernungsrichtung werden erhabene Objekte segmentiert, deren Höhe man aus der Schattenlänge ableitet. Gebäuden wird eine mittlere Höhe zugewiesen. Hinsichtlich der Gestalt der Grundrisse liegen keine Einschränkungen vor.

Mit der Segmentierung erhabener Bereiche befaßt sich das Verfahren nach *Dobler* [21]. Neben Schattenbereichen werden sogenannte Höheneffekte segmentiert, also Layover und Mehrfachreflexion am sensornahen Ende erhabener Objekte. Mittels struktureller Bildanalyse faßt man Höheneffekte und dahinterliegende Schattenbereiche zusammen. Der dazwischenliegende Bereich stellt eine erhabene Struktur dar.

Auswertung von InSAR-DOM

Gamba et al. [29], [30], [31], [32] schlugen vor, ein aus der Literatur bekanntes Verfahren zur Flächensegmentierung in Tiefenbildern und DOM [61] auf InSAR-DOM zu adaptieren. Dabei handelt es sich um eine Approximation des DOM durch Linienstücke entlang der Bildzeilen. Anschließend erfolgt eine Zusammenfassung benachbarter Linienstücke ähnlicher Steigung zu ebenen Flächen. Es werden Daten mit der geringen Bodenauflösung von 5 m und einer Höhenmeßgenauigkeit von 2.5 m verarbeitet. Die Szene enthält einige Hochhausblöcke. Die geringe

Eingangsdaten	Verfahren	Besonderheiten
Daten in Bodengeometrie		
SAR-Betragsbilder	Kirscht und Rinke	Klassifikation erhabener Objekte, Höhe anhand Schattenwurf
	Dobler	Segmentierung von Schatten und Höheneffekten, strukturelle Analyse
DOM	Gamba et al.	Zeilenweise Approximation durch Linien, anschließend Flächensegmentierung
	Piater et al.	Iterative Flächensegmentierung
	Hoepfner	Flächenwachstum zur Detektion erhabener Objekte, beginnend bei Schattenregionen
DOM & Luftbild/IR	Jaynes et al.	Gebäudehinweise aus Luftbildern, Höhenbestimmung im DOM
	Hepner et al.	Ausschluß falscher Gebäudehinweise durch Hyperspektral-Klassifikation
InSAR	Burkhart et al.	Diffusion im DOM, Layoverdetektion in Intensitäts- und Histogrammbild
	Quartulli und Datcu	Bayes-Klassifikation
InSAR & Luftbild	Huertas et al.	LoG in Höhe und Intensität, Bereiche geringer Kohärenz maskiert, Gebäudehinweise aus InSAR dienen der Auswahl von Kanten in Luftbildern
Multiaspekt-InSAR & Multispektral-Daten	Xiao et al.	Erwartungsbereiche aus kombinierter Klassifikation InSAR/Multispektral, Fusion aller DOM
Daten in Boden-/Entfernungsgeometrie		
Multiaspekt-InSAR in Bodengeometrie & Intensitätsbilder in Entfernungsgeometrie	Bolter	Kombination zweier Verfahren: 1. Bodengeometrie: Normalisierung der DOM, Fusion aller DOM 2. Entfernungsgeometrie: Detektion der Schattenkanten Verbesserung durch Auswertung von Layover/Schatten-Simulation

Tabelle 1.1: Einteilung der Verfahren anhand der verwendeten InSAR-Daten: “DOM” steht für die InSAR-Höhe, “InSAR” für den gesamten InSAR-Datensatz, “Multiaspekt” für mehrere Datensätze aus verschiedenen Richtungen

Ortsauflösung ist für die Rekonstruktionsaufgabe an sich nachteilig, hat aber, wegen der Signalintegration über die Fläche der Auflösungszelle, ein hohes SNR und damit eine geringe Streuung der Höhenwerte zur Folge. Für Höhendaten mit stärkerer Streuung, wie es zum Beispiel oft bei hochaufgelösten InSAR-DOM oder bei geringer Rückstreuung der Fall ist, ist dieses Verfahren weniger geeignet. Layover- und Schattenbereiche werden nicht gesondert behandelt. Daher kam es dort zu fehlerhaften Ergebnissen. Als Bodenniveau wählt man das Maximum des Histogramms der Höhenwerte. Zusammenhängende erhabene Segmente werden als Gebäude betrachtet. Die Rekonstruktion erfolgt als prismatisches Objekt mit beliebigem Grundriß.

Piater et al. [87] entwickelten ein Verfahren zur Segmentierung planarer Regionen in DOM und Tiefenbildern. Das Ziel ist die Bereitstellung flächendeckender Primitivobjekte, zum Beispiel für eine anschließende Gebäuderekonstruktion. In einem ersten Schritt werden flächendeckend in kleinen Bereichen Ebenen an die Daten angepaßt. Anschließend erfolgt eine schrittweise Verschmelzung benachbarter Flächenstücke mit ähnlicher Lage im Raum sowie eine Aufspaltung inkonsistenter Flächenstücke. Verglichen mit konventionellen DOM und Tiefenbildern stellt die Verarbeitung von InSAR-DOM nach Ansicht der Autoren wegen der starken Streuung und der Datenlöcher durch Schatten eine besondere Herausforderung dar. Die Trennung erhabener Objekte vom Boden erfolgt anhand der Ebenengleichungen der segmentierten Flächen.

Ein typisches SAR-Phänomen, nämlich Abschattung, steht im Zentrum des Verfahrens zur Extraktion von Gebäudestrukturen nach *Hoepfner* [51]. Aufgrund der Verdeckungen liegen keine Höhenwerte vom Gelände hinter Gebäuden vor. In der üblichen Grauwertkodierung des InSAR-DOM erscheinen diese Flächen schwarz und sind zumindest bei ausgedehnten, hohen Objekten meist deutlich erkennbar. Es werden schwarze Regionen segmentiert, neben denen auf einer oder zwei Seiten die durchschnittliche Höhe signifikant größer ist als an den anderen Seiten. Die Schattensegmentierung erfolgt anhand einer Korrelation der Daten mit einem Satz kreisförmiger Masken. Beginnend an den so extrahierten hinteren Gebäuderändern wird nun mit einem Flächenwachstumsverfahren das Dach von hinten nach vorne segmentiert. Da die Gebäude erhaben sind, erscheinen sie hell im InSAR-DOM. Den Schwellwert zur Trennung von Gebäuden und benachbartem Grund gewinnt man lokal aus einer Histogrammanalyse. Schließlich erfolgt eine Approximation der Dachkonturen als Rechteck. Dem Autor stand unter anderem ein DOM von einem der InSAR-Datensätze der sogenannten MOUT-Szene (Military Operations on Urbanized Terrain) zur Verfügung. Dabei handelt es sich um ein in der amerikanischen Kaserne Fort Benning zu militärischen Übungszwecken errichtetes künstliches Dörfchen im mitteleuropäischen Stil. Dort sind niedrige Gebäude verschiedener Größe und Dachformen vorhanden. Bäume und Gebüsch zwischen den Gebäuden treten nicht auf. Die Ortsauflösung wird mit 30 cm und die Genauigkeit der Höhenwerte mit 50 cm RMS (*Root Mean Square*) angegeben. Die Daten wurden offenbar anhand der ungeglätteten InSAR-Höheninformation durch Vorwärtstransformation von der Entfernungsgeometrie auf den Boden abgebildet. Dadurch wirken die Bilder sehr verrauscht, insbesondere die Gebäudewände sind verzerrt. Dennoch gelingt es immerhin, 12 von 15 Gebäuden zu detektieren, allerdings mit zum Teil größeren Abweichungen hinsichtlich Fläche und Orientierung. Probleme traten vor allem dort auf, wo durch enge Bebauung die Schattenbereiche mit dahinterliegenden Gebäuden zusammenfallen.

Zusätzlich zu den DOM analysieren *Jaynes et al.* [60] koregistrierte optische Luftbilder. Durch eine strukturelle Analyse der Luftbilder werden rechtwinklige Polygone als Hinweise auf Gebäudkonturen gewonnen. Die Rekonstruktion erfolgt anschließend in Höhendaten unterschiedlicher

Sensoren. Wegen der starken Streuung der Höhenwerte beschränken sich die Autoren im Falle von InSAR-DOM zunächst auf die Bestimmung einer einheitlichen Gebäudehöhe. Hinweise werden als Gebäude akzeptiert, wenn ihre Höhe signifikant über dem Umgebungsniveau liegt. Die Zuweisung der Dachform basiert auf einer Analyse der Luftbilder, etwa des Schattenwurfs. Nach der Festlegung des Gebäudemodells wird per Minimierung des quadratischen Fehlers dessen beste Approximation aus den Höhendaten berechnet. Eine gesonderte Berücksichtigung der SAR-Phänomene ist in diesem Verfahren nicht vorgesehen. Kleine oder ungünstig ausgerichtete Gebäude können nicht erfaßt werden.

Hepner et al. [49] werten zur Unterstützung der Analyse des InSAR-DOM ebenfalls weitere Sensordaten eines anderen Spektralbereichs aus. In diesem Fall handelt es sich um einen Satz Bilder eines Hyperspektralsensors mit etwa 20 m Ortsauflösung. Zunächst werden durch Schwellwertoperationen in den InSAR-Höhendaten potentielle Gebäude segmentiert. In den Datensätzen vom Hyperspektralsensor erfolgt eine Klassifikation in die Geländeklassen Grasflächen, Bäume, Straßen und Gebäude. Durch Verschneidung der beiden Resultate lassen sich die Gebäudeumrisse verbessern. Über die endgültige Form der Grundrisse der rekonstruierten Gebäude machen die Autoren keine Angaben. Den häufigsten Höhenwert innerhalb des Umrisses wählt man als Gebäudehöhe.

Auswertung vollständiger InSAR-Daten

Die Ziele der Arbeit von *Burkhardt et al.* [15] sind die Glättung der Höhendaten, die Detektion von Gebäuden und die Korrektur fehlerhafter Höhenwerte innerhalb von Gebäuden. Neben den Höhendaten stehen die Kohärenz, die Intensität und ein Histogrammbild der Treffer pro Bodenrasterzelle bei der Vorwärtstransformation der Höhendaten zur Verfügung. Der Ansatz basiert auf der Voraussetzung, daß die wesentlichen Gebäudestrukturen in den Daten großflächiger sind als die Größenordnung der Rauscheffekte. Das Rauschen soll durch eine vom lokalen Gradienten gesteuerte Diffusion in den Höhendaten beseitigt werden. Diese Glättung verschleift allerdings auch Detailstrukturen. Eine Detektion von Layoverbereichen erfolgt durch Segmentierung sehr heller Intensitätsregionen und Maxima im Histogrammbild. In dieser Arbeit wurde erstmals der sogenannte Front-Porch-Effekt beschrieben. Darunter versteht man einen Bereich am sensorzugewandten Gebäudeteil, dessen Höhenwerte aufgrund der Signalmischung durch Layover zwischen Bodenniveau und Dachhöhe liegen und der wie eine dem Gebäude vorgelagerte Veranda wirkt. Da die entsprechenden Höhenwerte unzuverlässig sind, ersetzt man sie durch den Mittelwert des übrigen Gebäudes. Dies birgt allerdings die Gefahr, daß die Gebäude zu groß werden. Das Verfahren wird anhand der Verarbeitung eines InSAR-DOM mit einer Ortsauflösung von 2 m demonstriert. In der Szene befinden sich ausgedehnte Flachbauten.

Das Verfahren von *Quartulli und Datcu* [89] basiert auf einer hierarchischen wahrscheinlichkeitstheoretischen Analyse der InSAR-Daten, unter Verwendung der bayesschen Regel. Gebäudekandidaten werden als Rechtecke rekonstruiert. Die Details der Vorgehensweise bleiben unklar.

Im Gegensatz zu *Jaynes et al.* dienen bei *Huertas et al.* [58] die InSAR-Daten zur Gewinnung von Gebäudehinweisen, um die Rekonstruktion später in Luftbilddaten durchzuführen. Man geht davon aus, daß Gebäude im Betragsbild heller erscheinen als ihre Umgebung. Zunächst werden Pixel mit geringer Kohärenz maskiert. In den Höhen- und Intensitätsdaten erfolgt dann

eine Filterung mit dem Laplacian-of-Gaussian-Filter (LoG). Die Nulldurchgänge des Filterergebnisses fallen mit Höhen- beziehungsweise Intensitätssprüngen zusammen. Positive Werte in beiden Ergebnissen entsprechen erhabenen, hellen Objekten. Zusammenhängende positive Bereiche, mit einer Mindestfläche und -höhe über Grund, stellen die Menge der Gebäudehinweise dar. Diese Hinweise dienen dazu, die Zahl möglicher Gebäuderänder zu reduzieren, die man aus in koregistrierten Luftbildern segmentierten Kanten ableitet. Es werden nur Kanten in der Nähe von Gebäudehinweisen für die Gebäuderekonstruktion berücksichtigt.

Auswertung von Multiaspekt-InSAR-Daten

Verfahren nach Xiao. Der Schwerpunkt der Arbeit von *Xiao et al.* [135] liegt in der Bestimmung von Gebäudeerwartungsbereichen in koregistrierten Multispektralsensor-Daten und einem vollständigen InSAR-Datensatz. Mittels neuronaler Netze erfolgt in beiden Datensätzen eine Klassifikation mit anschließender Fusion der Gebäudeklassen der Resultate. Die Detektion und Rekonstruktion von Gebäuden beschränkt sich auf die so gewonnenen Erwartungsbereiche. Die Vorgehensweise legt man anhand des MOUT-Datensatzes dar. Es standen nun vier InSAR-DOM zur Verfügung, die aus um jeweils 90 Grad versetzten Richtungen gemessen worden waren. Datenlücken in Abschattungsbereichen sind aus anderen Aspekten ergänzbar. Da an einem Ort häufig mehrere konkurrierende Höhenwerte vorhanden sind, stellt sich die Frage nach der Fusionsstrategie. Man wählte den Wert mit der höchsten Kohärenz für das fusionierte DOM. Durch Subtraktion eines DGM vom InSAR-DOM wird ein normalisiertes DOM erzeugt, wobei das DGM durch eine Minimumfilterung aus dem DOM abgeleitet wurde. Die zu erwartende maximale Ausdehnung der Gebäude stellt die untere Schranke für die Wahl der Fenstergröße des Minimumfilters dar. Die Trennung erhabener Objekte vom Boden erfolgt im normalisierten DOM anhand eines Schwellwertes. Größere zusammenhängende Regionen stellen Hinweise auf Gebäude dar. Aus den Umrissen der Gebäudehinweise werden rechteckige Grundrisse abgeleitet. Falls die Mehrzahl der Pixel innerhalb einer dieser Rechtecke als Gebäude klassifiziert wurde, wird das Objekt als Gebäude akzeptiert. Durch die Kombination der Daten aus verschiedenen Aspekten gelang es nun, 14 der 15 Gebäude zu detektieren. Die Dachstruktur war nicht Gegenstand der Untersuchungen.

Verfahren nach Bolter. Für ihre Dissertation [8] und Vorveröffentlichungen [7], [10], [11] konnte *Bolter* ebenfalls auf die MOUT-Szene zurückgreifen. Neben den bereits erwähnten vier InSAR-DOM standen nun der Kohärenz- und der Betragskanal zu Verfügung. Allerdings war die radiometrische Auflösung der Betragsbilder auf wenige Grauwerte reduziert. Die Betragsbilder lagen zusätzlich in der *Entfernungsgeometrie* vor.

Ein Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Simulation von SAR- und InSAR-Messungen und dem Vergleich mit realen Daten [9], [12]. Dabei beschränkt man sich auf die Auswertung des Einflusses der Geländeneigung auf die Rückstreuung. Der von der Rauigkeit der Oberfläche verursachte Anteil der Radarrückstreuung wird nicht betrachtet, ebenso wenig mögliche spiegelnde Reflexion oder Mehrfachreflexionen an den Gebäuden. Die Simulation eines SAR-Betragsbildes basiert auf der Abtastung eines gegebenen Höhenmodells. Als Höhenreferenz dienen CAD-Gebäudemodelle. Das simulierte SAR-Signal einer Entfernungszelle ergibt sich aus der mit der Hangneigung gewichteten Summe der Beiträge von DOM-Flächen in der entsprechenden Ent-

fernung. Im Zuge der Simulation ist die Detektion von Layover- und Schattenbereichen möglich. Die Simulation der InSAR-Phasendifferenz basiert auf der Bestimmung der unterschiedlichen Entfernungen der beiden Sensoren zur Szene. Aus dieser Entfernungsabweichung kann direkt die Phasendifferenz berechnet werden.

Es werden zwei Gebäuderekonstruktionsverfahren vorgestellt. Das erste basiert auf der Analyse der Schatten hinter Gebäuden in den Betragsbildern in der Entfernungsgeometrie. Es ist zweckmäßig, eine Segmentierung dort durchzuführen, da z. B. Objektkanten noch unverzerrt sind. Nach der Detektion von Schattenrändern in allen vier Ansichten kann nach der Projektion auf den Boden im Idealfall der gesamte Gebäudeumriß lückenlos rekonstruiert werden. Aus der Länge der Schatten wird auf die Höhe der Seitenwände zurückgeschlossen. Man erhält allerdings keine Information über die Dachstruktur innerhalb des Gebäudes.

Das zweite Verfahren wertet die Höhendaten aus. Analog zu *Xiao* werden die vier InSAR-DOM fusioniert und daraus ein normalisiertes DOM abgeleitet. Allerdings übernimmt man hier den höchsten Wert in das fusionierte DOM. Das gründet sich auf die Annahme, daß die Höhenwerte im Gebäudebereich zwischen dem Bodenniveau und der tatsächlichen Gebäudehöhe liegen¹. Durch eine Klassifikation im Kohärenzkanal lassen sich Wälder vom Siedlungsbereich trennen.

Die als Gebäude klassifizierten Segmente werden in beiden Fällen durch Rechtecke approximiert und mit Referenzdaten verglichen. Kompliziertere Gebäudegrundrisse betrachtet man nicht, sie kommen in dieser Szene auch nicht vor. Die Resultate beider Verfahren sind vergleichbar, eine Kombination der Resultate führt zu den besten Ergebnissen. Es wurden alle 15 Gebäude detektiert. Bei den Gebäudemodellen unterscheidet die Autorin zwischen Flach- und Giebedachhäusern. Im besten Resultat können 12 der Dachformen richtig abgeleitet werden. Schließlich wird vorgeschlagen, das Resultat als Basis für eine Simulation zu verwenden, um Abschattungs- und Layovereffekte zwischen benachbarten Gebäuden zu detektieren und zu korrigieren.

Diskussion der Verfahren aus der Literatur

Allen beschriebenen Verfahren gemein ist die Analyse von georeferenzierten SAR-Daten in der Bodengeometrie. Allein *Bolter* verwendet darüber hinaus Betragsbilder, die in der Entfernungsgeometrie vorliegen. Durch eine punktweise Transformation der Daten in das Weltkoordinatensystem können störende Artefakte auftreten, zum Beispiel die Verzerrung von Gebäudekanten. Dies gilt insbesondere für InSAR-DOM. Eine Verarbeitung der Daten in der ursprünglichen SAR-Geometrie und eine spätere Georeferenzierung der Ergebnisse ist insofern günstiger.

Gamba et al. und *Hepner et al.* lassen beliebige Polygone als Grundrisse zu. Alle anderen Verfahren charakterisiert die Modellierung des Grundrisses als Rechteck. Komplexere rechtwinklige Strukturen, wie etwa Gebäude mit Teilen unterschiedlicher Orientierung oder Höhe, sind nirgends vorgesehen. Ebenso bleibt der Szenekontext unberücksichtigt, etwa was die Modellierung von Nachbarschaftsbeziehungen anbelangt. Abgesehen von *Bolter* und *Jaynes et al.* erfolgt die Rekonstruktion der Gebäude als prismatisches Objekt, wobei Letztgenannter auch Luftbilder

¹Diese Annahme kann vom Autor der vorliegenden Arbeit nicht bestätigt werden, da bei den hier bearbeiteten Datensätzen zu hohe Werte auch innerhalb von Gebäuden vorkommen. Zudem ist, wie noch gezeigt wird, eine Vorzugsrichtung des Meßfehlers aus der Theorie nicht ableitbar.

auswertet. Auch *Hepner et al.*, *Huertas et al.* und *Xiao et al.* verwenden weitere Sensordaten anderer Spektralbereiche bei der Analyse.

Einige Verfahren berücksichtigen und nutzen die SAR-Abbildungsphänomene Layover oder Schatten oder beide zusammen. Spiegelnde Reflexion sowie Mehrfachreflexionen bleiben dagegen außen vor. Die Fusion von SAR-Daten verschiedener Aspekte zur Verbesserung der Resultate wurde nur in zwei Arbeiten betrachtet. *Xiao et al.* und *Bolter* kombinieren verschiedene InSAR-DOM zu einem DOM. Die Fusion findet in beiden Fällen auf der Pixelebene statt, was häufig mit Artefakten einhergeht.

1.3 Thema und Aufbau der Arbeit

Die schräge Szenenbeleuchtung mit SAR hat zum Teil ungünstige Auswirkungen hinsichtlich einer Analyse urbaner Gebiete zur Folge. Der Gegenstand dieser Arbeit ist es zu klären, inwieweit dennoch eine Detektion und Rekonstruktion von Gebäuden durch Analyse von SAR- und InSAR-Daten möglich ist.

Die im Folgenden vorgestellten Verfahren zur Gebäudeerkennung basieren zum Teil auf den genannten Vorarbeiten aus der Literatur. Deren angesprochene methodische Einschränkungen sollen überwunden und darüber hinaus neue Wege beschritten werden.

Die Detektion und Rekonstruktion von Gebäuden wird ausschließlich anhand der Auswertung von Radardaten durchgeführt. Über die Betrachtung einzelner Gebäude für sich allein hinausgehend soll auch Modellwissen genutzt werden, zum Beispiel die Nachbarschaft von Gebäuden zu anderen Gebäuden und zu Straßen. Um möglichst alle Gebäudemerkmale zu detektieren, erfolgen alle Segmentierungen von Primitivobjekten grundsätzlich nur in SAR-Daten, die in der Entfernungsgeometrie vorliegen. Dabei werden auch Orte starker Rückstreuung an Gebäuden berücksichtigt.

Zwei selbstentwickelte Verfahren zur strukturellen Bildanalyse werden vorgestellt. Teilaspekte der Vorgehensweise sind bereits in Vorveröffentlichungen ([19], [82], [101], [102], [103], [104], [106], [116], [117]) beschrieben worden. Ein Verfahren ist für kleinere und mittelgroße Gebäude konzipiert, das zweite für ausgedehnte Industriebauten und -komplexe. Es handelt sich um iterative Verfahren, wobei Zwischenergebnisse als Grundlage für eine Simulation von SAR-Daten dienen. Durch Abgleich mit den realen Daten wird eine schrittweise Verbesserung der Ergebnisse durchgeführt.

Eine kombinierte Auswertung mehrerer SAR-Datensätze, die aus unterschiedlichen Beleuchtungsrichtungen aufgenommen wurden, ermöglicht eine zusätzliche Verbesserung der Erkennungsleistung. Die Fusion der verschiedenen Ergebnisse erfolgt auf der symbolischen Ebene. Dabei stehen zwei Aspekte im Vordergrund: Zum einen erhöht sich die Evidenz von Objekthinweisen durch eine mehrfache Bestätigung aus den verschiedenen Blickrichtungen. Zum anderen können verdeckte Bereiche ergänzt und Layovereffekte korrigiert werden.

Die Arbeit ist wie folgt gegliedert:

Kapitel 2 behandelt das Prinzip der Szenenerfassung mit SAR- und InSAR-Sensoren. Dabei sind insbesondere die Auswirkungen der schrägen Beleuchtungsgeometrie sowie der Signalwel-

lenlänge und -polarisation auf die Erfassung der Szene von Interesse. Erstere Auswirkung hat die erwähnten Abbildungsphänomene und ein lokal variierendes SNR zur Folge, die letztgenannten bestimmen die gemessenen Geländemerkmale. Die Analyse von SAR-Bildern erfordert zudem die Berücksichtigung der statistischen Signalmodellierung, etwa für die Wahl von Verfahrensparametern. Um den Lesefluß nicht unnötig zu hemmen, werden die statistischen Modelle der SAR- und InSAR-Signale im **Anhang A** zusammengefaßt.

Die Auswirkungen des Sensorprinzips auf die Erfassung von Gebäuden sind Gegenstand von **Kapitel 3**. Die SAR-Phänomene Layover, Schatten sowie spiegelnde Reflexion und Mehrfachreflexionen können einerseits als Merkmale zur Gebäuderekonstruktion dienen und andererseits die Aufgabe erschweren oder unmöglich machen, zum Beispiel, falls ein niedriges Gebäude von einem Hochhaus verdeckt wird. Anhand geometrischer Betrachtungen lassen sich, in Abhängigkeit von Sensorparametern, Aussagen hinsichtlich des Auftretens der Phänomene an Gebäuden in SAR-Bildern ableiten.

In **Kapitel 4** werden Verfahren zur Simulation von SAR-Bildern vorgestellt, die auf Höhenmodellen basieren. Damit ist es möglich festzustellen, von welchen Gebäuden und Gebäudeteilen brauchbare Daten zu erwarten sind und wo problematische Bereiche vorliegen. Darunter fallen zum Beispiel Layover- und Abschattungsgebiete. Das Ziel ist abzuschätzen, inwieweit eine Detektion und Rekonstruktion von Gebäuden aus den SAR-Daten im *günstigsten* Fall möglich ist. Der Nutzen einer kombinierten Analyse von Multiaspekt-Daten wird durch entsprechende Simulationen demonstriert. Darüber hinaus werden Verfahren zur Detektion von starken Streuern sowie zur Simulation von SAR-Betragsbildern und InSAR-Differenzphasenbildern vorgestellt, die bei der Bildanalyse zum Einsatz kommen.

Die Beschreibung der iterativen Verfahren zur Detektion und Rekonstruktion von Gebäuden ist Gegenstand von **Kapitel 5**. Die Modellierung der Objekte und die Anforderungen an SAR-Daten hinsichtlich einer Gebäudeerkennung werden vorgestellt. Dabei fließen die Schlußfolgerungen der vorangehenden Kapitel ein. Auf dieser Modellierung fußen die im Anschluß vorgestellten Verfahren. Die Gebäudedetektion erfolgt in der SAR-Entfernungsgeometrie, die Rekonstruktion im Weltkoordinatensystem.

Die Resultate der Verfahren werden in **Kapitel 6** anhand von Testdaten vorgestellt. Bei einer Analyse synthetischer Daten oder realer Daten idealisierter künstlicher Szenen besteht die Gefahr einer zu optimistischen Einschätzung der erzielbaren Resultate. Daher werden nur hochaufgelöste Datensätze realer Szenen untersucht. Es werden mehrere Datensätze dreier Szenen von zwei Sensoren verarbeitet, wobei mindestens ein InSAR-Datensatz für jede Szene vorliegt. Die Bewertung der Resultate erfolgt durch Abgleich mit Referenzdaten. Die Güte der Detektions- und Rekonstruktionsergebnisse wird mittels Maßzahlen quantifiziert.

Die Arbeit schließt mit einer Diskussion der Ergebnisse und einem Ausblick in **Kapitel 7**.

Kapitel 2

Grundlagen

In diesem Kapitel wird zunächst das allgemeine Radar-Prinzip dargelegt. Radar diente ursprünglich der Detektion von Flugzeugen und Schiffen. Schon bald wurden bildgebende Radarsensoren in der Fernerkundung verwendet. Eine entscheidende Verbesserung der Azimutauflösung gelang durch die Entwicklung der SAR-Technologie. Nach Beschreibung des SAR-Prinzips werden die Besonderheiten der Szenenerfassung mit SAR betrachtet. Im Vordergrund stehen die von der schrägen Beleuchtung verursachten Abbildungsphänomene. Anhand mehrerer versetzter SAR-Messungen kann man durch interferometrische Auswertung (InSAR) die Höhe der Szene bestimmen. Hierzu wertet man die Phasendifferenz der SAR-Messungen aus, die aus dem Weglängenunterschied der Signale resultiert.

2.1 Das Radar-Prinzip

Das Radar-Prinzip basiert auf aktiver Beleuchtung der Umgebung mit elektromagnetischer Strahlung, die von einem Sender mittels einer Antenne emittiert wird. An Objekten, die sich im Ausbreitungsweg des Signals befinden, tritt Reflexion und Streuung auf. Ein Empfänger mißt den von den Objekten in seine Richtung zurückgestreuten Signalanteil. Als Empfänger dient entweder ein zweites System mit eigener Antenne, das unabhängig vom Sender betrieben wird, oder eine kombinierte Sende- und Empfangseinheit. Im letzteren Fall betreibt man eine einzelne Antenne abwechselnd im Sende- und Empfangsmodus, wie in Abbildung 2.1 schematisch illustriert.

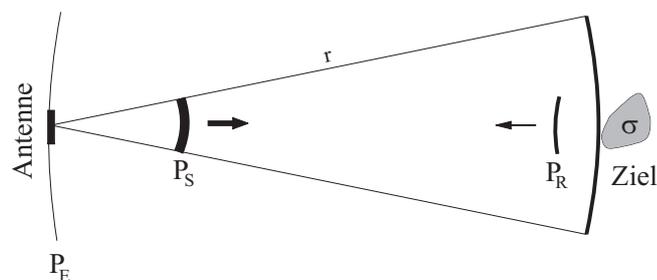


Abbildung 2.1: Signalausbreitung bei Radar (nach [118])

2.1.1 Die Radargleichung

Die Antenne emittiert Radarimpulse mit der Leistung P_S . Im Allgemeinen kommen Richtantennen zum Einsatz, deren Sendeleistung in Beleuchtungsrichtung um einen *Antennengewinn* G erhöht ist, verglichen mit Antennen, die ohne Vorzugsrichtung abstrahlen. Die Sendeleistungsdichte S_Z am Ort eines Ziels in Entfernung r ist dann:

$$S_Z = \frac{P_S \cdot G}{4\pi \cdot r^2}. \quad (2.1)$$

Die Abmessungen des Ziels werden als klein gegenüber der Radarkeule angenommen. Die vom Ziel zurückgestreute Leistung P_R ist vom sogenannten *Radarrückstreuquerschnitt* σ abhängig:

$$P_R = \sigma \cdot S_Z. \quad (2.2)$$

Der Rückstreuquerschnitt σ , mit der Einheit m^2 , ist definiert als Verhältnis der pro Einheitsraumwinkel vom Ziel zum Empfänger gestreuten Leistung zu der auf das Ziel einfallenden Flächenleistungsdichte [63]. Die Empfangsantenne kann nur einen Bruchteil des in den Raum rückgestreuten Signals auffangen. Als charakteristisches Antennenmerkmal definiert man die effektive Antennenfläche A_{eff} :

$$A_{eff} = \frac{G \cdot \lambda^2}{4\pi}, \quad (2.3)$$

bezüglich einer Signalwellenlänge λ . Die Systemverluste werden in einem dimensionslosen Faktor L_v zusammengefaßt. Mit Gleichung 2.1 gilt für die Empfangsleistung P_E :

$$P_E = \frac{P_R \cdot A_{eff}}{4\pi r^2 \cdot L_v} = \frac{P_S \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{(4\pi)^3 \cdot r^4 \cdot L_v}. \quad (2.4)$$

Die *Radargleichung* 2.4 verdeutlicht das Abfallen der Empfangsleistung mit der vierten Potenz des Abstands. Daneben tritt auf beiden Signalwegen Atmosphärendämpfung auf, die aber in diesen Betrachtungen vernachlässigt wird.

Die Fähigkeit des Radarempfängers, ein schwaches Echosignal zu detektieren, wird durch das Empfängerrauschen begrenzt. Neben externen Quellen, wie etwa kosmischer Strahlung, hat dabei das thermische Rauschen den maßgeblichen Einfluß. Es wird durch die thermische Bewegung der Elektronen in der Elektronik des Empfängers verursacht. Alle Rauschanteile sind in der effektiven Rauschtemperatur T_{eff} zusammengefaßt. T_{eff} eines gedachten idealen Empfängers wäre 0 Kelvin. Die Rauschleistung N_A am Ausgang des Empfängers während einer Impulsdauer τ wird somit

$$N_A = k \cdot T_{eff} \cdot B \cdot V \approx \frac{k \cdot T_{eff}}{\tau} \cdot V \quad \text{mit} \quad B \cdot \tau \approx 1, \quad (2.5)$$

mit der *Boltzmann-Konstante* k , Verstärkung V und Bandbreite B des Pulses. Das Produkt von Pulsdauer τ mit der Bandbreite B ist für einen Rechteckimpuls näherungsweise 1. Das Nutzsinal P_E wird ebenfalls mit V zu P_A verstärkt. Mit Gleichung 2.5 erhält man

$$P_E = \frac{1}{V} \cdot P_A = \frac{k \cdot T_{eff}}{\tau} \cdot \frac{P_A}{N_A}. \quad (2.6)$$

Der Quotient P_A/N_A ist der *Signal-Rausch-Abstand* (SNR). Dieses Verhältnis ist von fundamentaler Bedeutung hinsichtlich einer Analyse von Radar-Daten. Mit den Gleichungen 2.6 und 2.5 integriert man das SNR in die Radargleichung 2.4 für einen Sendeimpuls:

$$SNR_{Imp} = \frac{P_S \cdot G^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma \cdot \tau}{(4\pi)^3 \cdot k \cdot T_{eff} \cdot r^4 \cdot L_v}. \quad (2.7)$$

2.1.2 Auflösungsvermögen in Entfernung und Azimut

Im Folgenden werden luft- und raumgestützte bildgebende Radarsysteme betrachtet. Der Sensor beleuchtet die Szene seitlich in Schrägsicht. Als ausgeleuchteten Raumwinkel bezeichnet man den Bereich der Antennenkeule, in dem die Signalleistung maximal um 3 dB vom Maximalwert abfällt. Er wird durch Form und Größe der Antenne bestimmt: Mit Antennenhöhe d und -länge D erhält man näherungsweise die Winkel λ/d in Entfernungsrichtung (*Slant Range*) und λ/D in Azimut. Die Auflösung in Entfernungsrichtung δ_r ist von der Pulsdauer τ abhängig:

$$\delta_r = \frac{c \cdot \tau}{2}, \quad (2.8)$$

wobei c für die Lichtgeschwindigkeit steht. Die Pulsdauer τ fällt mit steigender Bandbreite des Signals. Aufgrund der geometrischen Verhältnisse ist die Entfernungsauflösung, projiziert auf den als eben angenommenen Boden (*Ground Range*), vom Beleuchtungswinkel θ (zwischen dem Nadirpunkt des Sensors und dem Objekt) abhängig (Bild 2.2):

$$\delta_{r_{Boden}} = \frac{c \cdot \tau}{2 \sin(\theta)}. \quad (2.9)$$

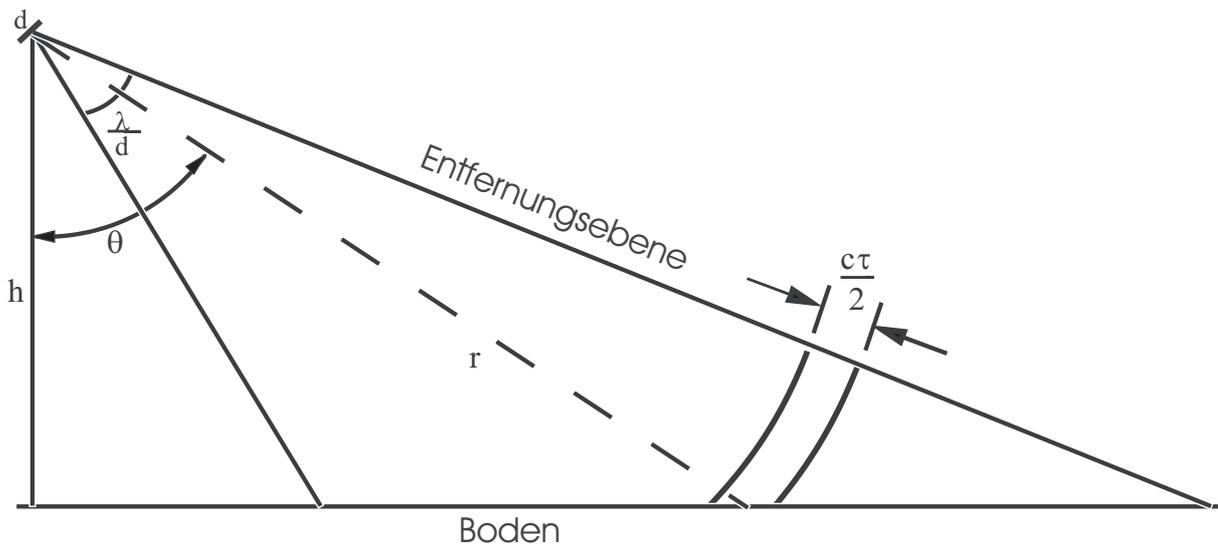


Abbildung 2.2: Entfernungsauflösung

Man erkennt, daß bei kleinem Beleuchtungswinkel die Entfernungsauflösung auf dem Boden sehr schlecht wird. Bei senkrechter Beleuchtung aus großer Entfernung würde eine als Ebene

gedachte Erdoberfläche nur in eine einzige Entfernungszelle abgebildet werden. Daraus folgt die Notwendigkeit der Schrägsicht.

Die Impulsdauer τ kann nicht beliebig kurz gewählt werden, da die gesamte Sendeleistung während des Impulses emittiert werden muß. Man behilft sich daher mit einem Trick: statt eines kurzen Impulses wird ein zeitlich sehr viel ausgedehnteres, linear frequenzmoduliertes Signal gesendet (*Chirp*). Im Zuge der Signalverarbeitung des Empfangssignals (*Entfernungskompression*) erfolgt eine Faltung mit dem komplex konjugierten Chirp (*Matched-Filter-Prinzip*). Das Resultat ist so interpretierbar, als ob tatsächlich der gewünschte sehr kurze Impuls gesendet worden wäre.

Bei herkömmlichem Radar mit realer Apertur (*RAR*) ist die Azimutauflösung (Abbildung 2.3) auf dem Boden δ_{ra} durch das Produkt der Winkelauflösung θ_a mit der Entfernung r gegeben:

$$\delta_{ra} = \theta_a \cdot r \approx \frac{\lambda \cdot r}{D} \quad \text{mit} \quad \theta_a \approx \lambda/D. \quad (2.10)$$

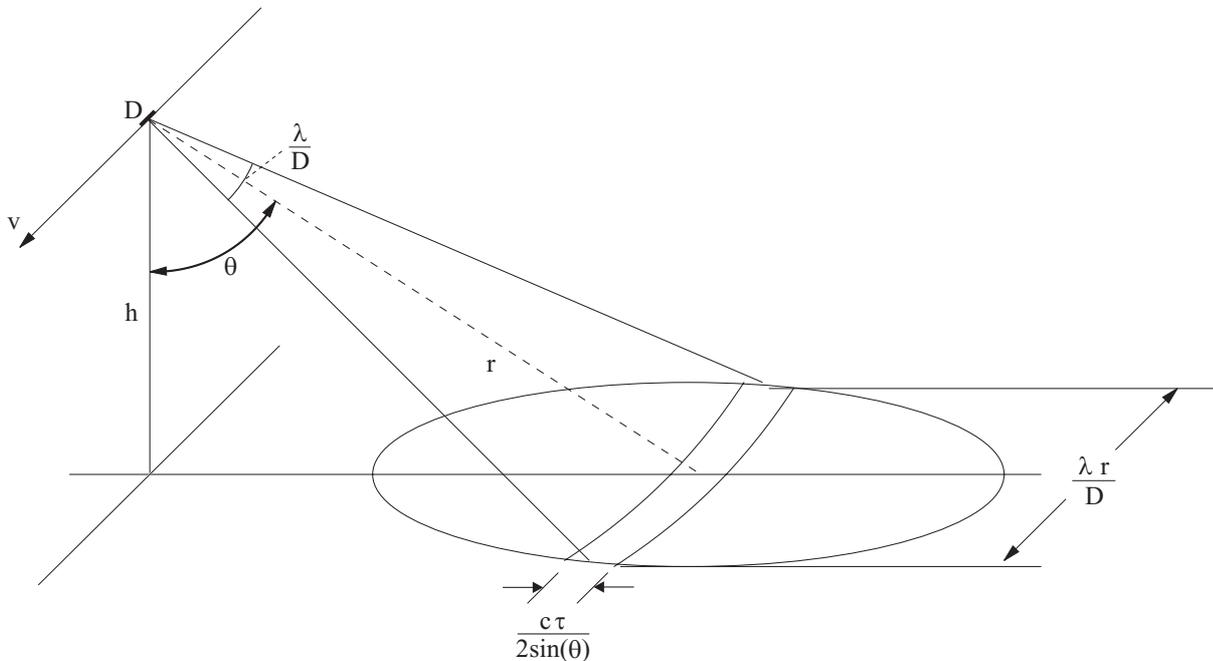


Abbildung 2.3: Azimutauflösung bei Radar mit realer Apertur

Wie aus Gleichung 2.10 hervorgeht, kann die Azimutauflösung bei gegebener Entfernung nur durch Verkleinerung der Wellenlänge oder Vergrößerung der Azimutantennenlänge erreicht werden. Die Wellenlänge läßt sich aber nicht beliebig verkleinern, zum Beispiel, weil mit zunehmender Frequenz die Atmosphärendämpfung steigt, und andererseits ist die maximale Antennengröße von der Ausdehnung des Trägers begrenzt.

2.2 Das SAR-Prinzip

Die Azimutauflösung wird durch das SAR-Prinzip (*Synthetic Aperture Radar*) erheblich verbessert. Die Idee ist dabei, durch mehrere örtlich und zeitlich versetzte Messungen eine große Antenne zu simulieren. Entlang der Flugbahn werden mit der Pulswiederholrate *PRF* wechselnd Radarimpulse emittiert und deren Empfangssignale gespeichert. Ein Objekt wird daher, solange es sich in einem von der Antenne beleuchteten Abschnitt befindet, von n verschiedenen Impulsen getroffen, wie in Abbildung 2.4 schematisch dargestellt.

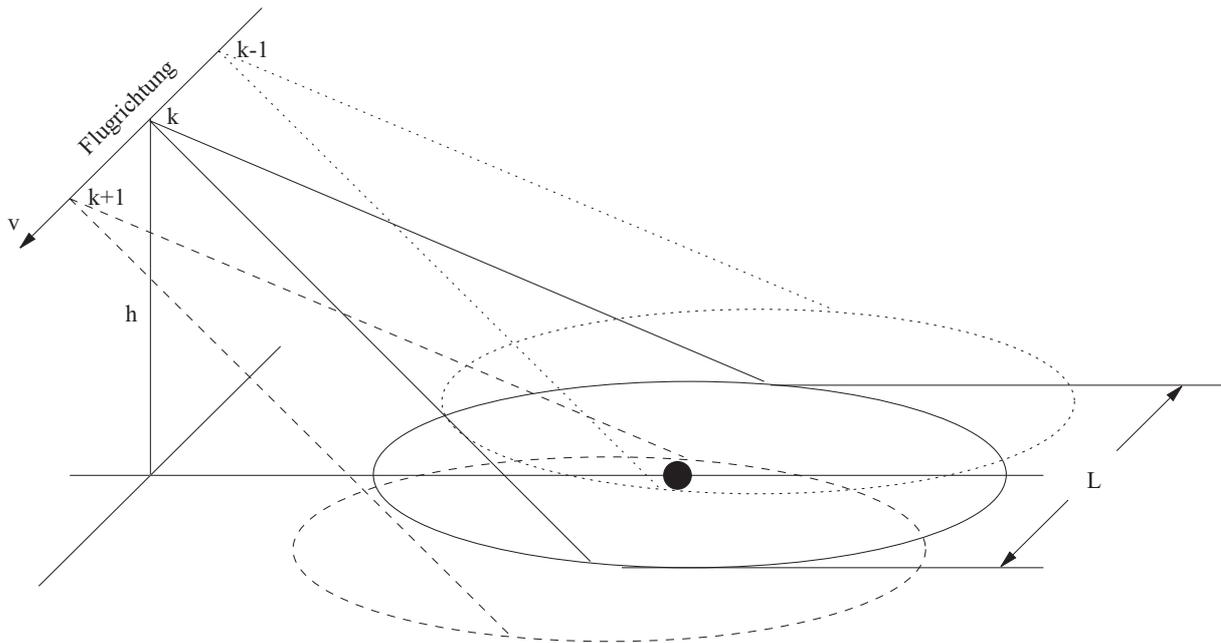


Abbildung 2.4: Das SAR-Prinzip

Durch die Entfernungsänderung beim Vorbeiflug ändert sich die Relativgeschwindigkeit zwischen Sensorträger und Ziel, was zu einer *Dopplerverschiebung* f_D der Frequenz der rückgestreuten Zielantworten führt. Die Entfernungskurve beschreibt eine Parabel, deren Scheitelpunkt sich am Ort der geringsten Entfernung r_0 befindet. Dort ist auch f_D gleich Null. Für die Summierung der komplexen Zielantworten muß die Entfernungsvariation berücksichtigt werden. Hierfür wertet man die Dopplerverschiebung aus. Durch diese Vorgehensweise wird eine Antenne mit großer Apertur simuliert. Die Länge L_s der synthetischen Apertur ist dabei gleich der Entfernung entlang des Flugwegs des Trägers vom ersten bis zum letzten Impuls, die das Ziel treffen. L_s entspricht also der RAR-Azimutauflösung δ_{ra} aus Gleichung 2.10:

$$L_s = \delta_{ra} \approx \frac{\lambda \cdot r}{D}. \quad (2.11)$$

Bewegungen des Flugzeugs, die von einem geplanten Kurs abweichen, müssen erfaßt werden, damit sie bei der Summation über die synthetische Apertur berücksichtigt und kompensiert werden können. Die Synthese der Einzelimpulse führt zu einer etwa halb so schmalen Antennenkeule, als sie eine reale Antenne der Länge L_s hätte [118]. Die Azimutwinkelaufklärung bei

SAR θ_{sa} ist somit näherungsweise:

$$\theta_{sa} \approx \frac{\lambda}{2 \cdot L_s}. \quad (2.12)$$

Mit den Gleichungen 2.11 und 2.12 erhält man die Azimutauflösung δ_{sa} für SAR:

$$\delta_{sa} = \theta_{sa} \cdot r \approx \frac{\lambda \cdot r}{2 \cdot L_s} \approx \frac{D}{2}. \quad (2.13)$$

Die SAR-Azimutauflösung ist also in der Größenordnung der halben Antennenlänge, unabhängig von Entfernung und Wellenlänge [63]!

Das SAR-Prinzip hat auch günstige Auswirkungen auf das Signal-Rausch-Verhältnis. Durch die kohärente Verarbeitung der n Empfangssignale ist das SNR_{SAR} das Produkt von n mit dem SNR eines Einzelimpulses SNR_{Imp} nach Gleichung 2.7. Die Impulsanzahl hängt von der synthetischen Apertur L_s , der Trägergeschwindigkeit v und der Pulswiederholrate PRF ab:

$$n = \frac{L_s \cdot PRF}{v} = \frac{\lambda \cdot r \cdot PRF}{2 \cdot \delta_{sa} \cdot v}. \quad (2.14)$$

Das SNR eines SAR-Sensors für ein Einzelziel ist somit:

$$SNR_{SAR} = SNR_{Imp} \cdot n = \frac{P_S \cdot G^2 \cdot \lambda^3 \cdot \sigma \cdot \tau \cdot PRF}{2 \cdot (4\pi)^3 \cdot k \cdot T_{eff} \cdot r^3 \cdot L_v \cdot \delta_{sa} \cdot v}. \quad (2.15)$$

Eine wesentliche Verbesserung durch die Integration über die synthetische Apertur liegt darin, daß die Zielentfernung r nur noch mit der dritten Potenz eingeht. Es können daher auch sehr schwache oder weitentfernte Ziele noch detektiert werden. Ihre Rückstreuungen addieren sich konstruktiv, im Gegensatz zum als mittelwertfrei modellierten Rauschen. Für die Betrachtung von Flächenzielen (*Chutter*), wie sie in dieser Arbeit im Vordergrund steht, geht man vom Radarrückstreuquerschnitt σ eines Einzelziels zu einem auf eine Einheitsfläche bezogenen, dimensionslosen *Radarrückstreukoeffizienten* σ_0 über:

$$\sigma_0 = \frac{\sigma}{\delta_r \cdot \delta_{sa}}. \quad (2.16)$$

Schließlich erhält man damit das SNR_{FZ} von SAR für Flächenziele:

$$SNR_{FZ} = \frac{P_S \cdot G^2 \cdot \lambda^3 \cdot \sigma_0 \cdot \delta_r \cdot \tau \cdot PRF}{2 \cdot (4\pi)^3 \cdot k \cdot T_{eff} \cdot r^3 \cdot L_v \cdot v}. \quad (2.17)$$

Typische Werte für das SNR liegen im Bereich von 0.5 bis 25 dB. Auch bei niedrigen SNR-Werten kann der Mensch im SAR-Betragsbild häufig noch Objekte erkennen. Da das SNR zum Beispiel auch die radiometrische Auflösung beeinflußt (vgl. Abschnitt 2.3.6), ist es für automatische Bildanalyseverfahren notwendig, diesen Wert zu berücksichtigen, etwa für die Wahl von lokalen Schwellwerten. Das Rauschniveau einer Messung ist einfach bestimmbar, indem man einige Zeit mißt, ohne vorher ein Signal zu senden. Falls dies unterbleibt, kann es aus den Bilddaten geschätzt werden, zum Beispiel in ausgedehnten Schattenbereichen. Bei interferometrischer Auswertung mehrerer SAR-Bilder ist eine lokale Schätzung des SNR auch anhand der komplexen Korrelation (*Kohärenz*) der Daten möglich (siehe Abschnitt 2.5.2).

2.3 Eigenschaften der SAR-Abbildung

Die Abbildung einer Szene hängt sowohl von den Sensorparametern als auch von den Geländeeigenschaften ab [76]. Wichtige Parameter sind der Beleuchtungswinkel, die Wellenlänge und die Polarisation des Signals. Anhand der Messung lassen sich Aussagen über die Beschaffenheit des Geländes machen, zum Beispiel hinsichtlich der Rauigkeit der Oberfläche, der Dielektrizitätskonstante, des Bewuchses oder der Ausrichtung von Objekten. Aufgrund des Meßprinzips ergibt sich eine besondere Abbildungsgeometrie, die Phänomene verursacht, welche bei der Bildinterpretation zu berücksichtigen sind.

2.3.1 Geometrische Verhältnisse bei der SAR-Abbildung

Das Radarprinzip beruht auf der Messung der Objektentfernungen. Die Abbildung einer als eben gedachten Oberfläche in die Entfernungsebene ist nichtlinear, wie Grafik 2.5a zeigt.

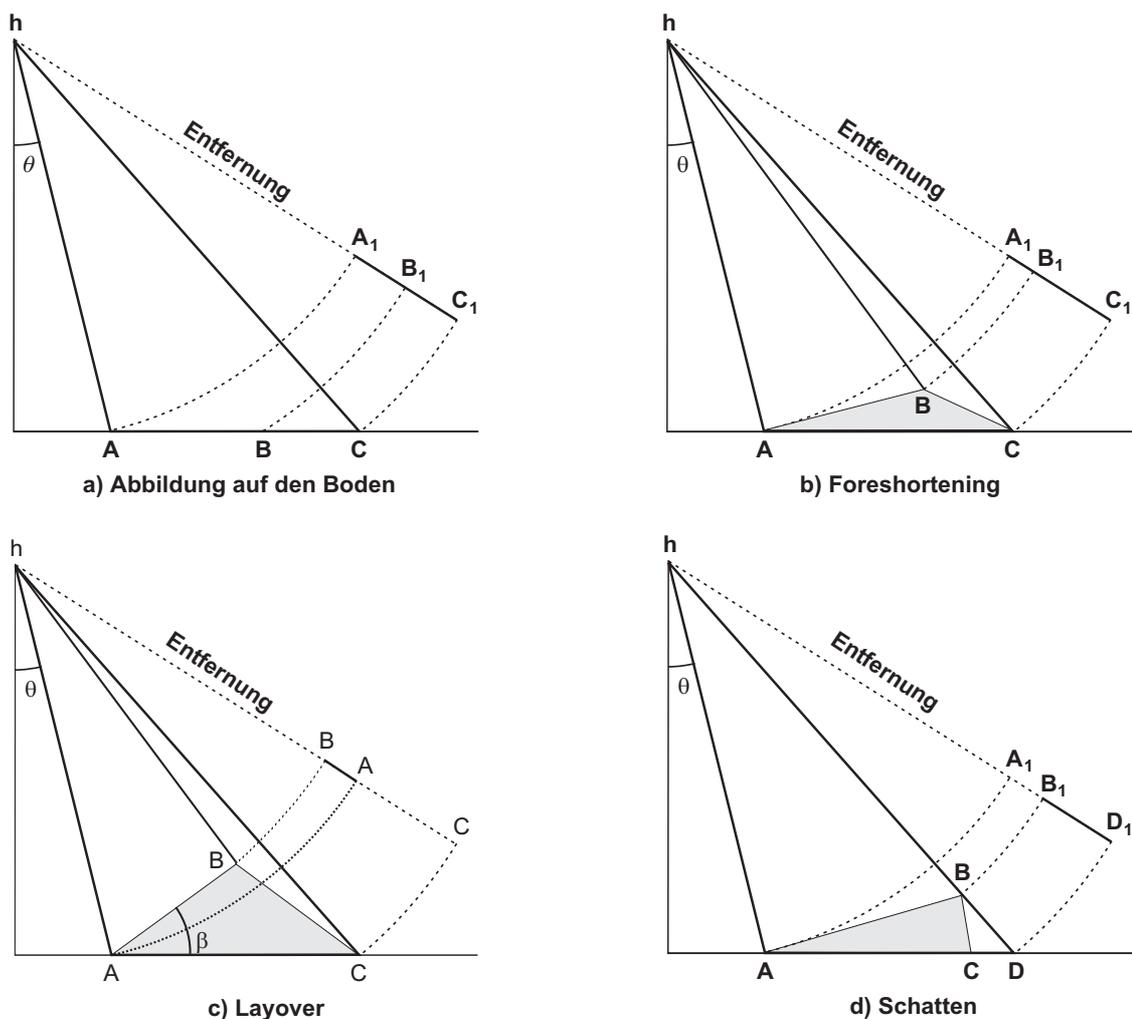


Abbildung 2.5: Phänomene der SAR-Abbildung (nach [80])

Da die Geländetopographie im Allgemeinen nicht flach ist, treten wegen der seitlichen Beleuchtung zusätzliche Phänomene auf, wie etwa *Foreshortening* [97]: Zum Sensor geneigte Flächen erscheinen verkürzt im SAR-Bild, wie zum Beispiel bei Abbildung der Strecke \overline{AB} auf $\overline{A_1B_1}$ in Bild 2.5b deutlich wird. Der Abschnitt $\overline{A_1B_1}$ wirkt zudem vergleichsweise hell im SAR-Betragsbild, da er die gesamte Energie enthält, die von \overline{AB} reflektiert wurde.

Bei Hangneigungen, die größer als der Beleuchtungswinkel sind, ist die Entfernung des Sensors zur Spitze kürzer als zum Fußpunkt. Daher kommt in Abbildung 2.5c die Projektion des Berggipfels B vor die des Fußpunktes A zu liegen. Diesen Umklappeffekt nennt man *Layover*. Das Layover widerspricht der gewohnten visuellen Interpretation einer dreidimensionalen Szene durch den Menschen. Denn es wäre nach den Gesetzen der Zentralperspektive zu erwarten, daß erhabene Objekte nach hinten wegklappen.

Abschattungsbereiche können an steilen, vom Sensor abgewandten Flächen auftreten. Dies ist immer dann der Fall, wenn der Neigungswinkel der Fläche größer ist als der Beleuchtungswinkel. Das Gelände zwischen den Punkten B und D in Bild 2.5d kann nicht eingesehen werden. Die entsprechende Region erscheint sehr dunkel im SAR-Betragsbild.

Die Auswirkung der Abbildungsphänomene hinsichtlich einer Gebäuderekonstruktion wird eingehender in Abschnitt 3.2 untersucht.

2.3.2 Rückstreuung von der Erdoberfläche

Im Wesentlichen wird die Rückstreuung des Geländes von dessen Rauigkeit und Dielektrizitätskonstante bestimmt. Man modelliert die Einflüsse der Geländerauhigkeit im Mikro-, Meso- und Makromaßstab [76]:

- *Mikromaßstab*: Die Rauigkeit des Geländes wird in der Größenordnung der Signalwellenlänge betrachtet. Als Maß für die Rauigkeit setzt man die Höhenvariation Δh in Bezug zur Wellenlänge λ und zum Inzidenzwinkel α (zwischen der Flächennormalen und der Beleuchtungsrichtung). Nach einer Faustregel gilt eine Fläche als eben, falls

$$\Delta h < \frac{\lambda}{8 \cdot \sin(\alpha)} \quad (2.18)$$

gilt [63]. Man unterscheidet zwischen zwei Streumechanismen: zum einen Reflexion, die eine direkte Spiegelung darstellt [124], zum anderen diffuse Rückstreuung. Bei ebenen Flächen tritt fast keine Rückstreuung auf. Da der SAR-Sensor schräg ausgerichtet sein muß, wird das Sendesignal bei flachen ebenen Oberflächen, wie etwa Straßen oder stehenden Gewässern bei Windstille, vollständig wegreflektiert. Solche Oberflächen erscheinen tiefschwarz im SAR-Bild. Mit zunehmender Rauigkeit tritt die Streuung in den Vordergrund, wie in Bild 2.6 skizziert. Bei sehr rauhen Oberflächen ($\Delta h \gg \lambda$) verhält sich die Streuung analog dem *Lambertschen Kosinusetz* aus der Optik. Die beobachtete Signalstärke E_B aus einer bestimmten Richtung hängt dann vom Inzidenzwinkel α zur Flächennormalen ab:

$$E_B = E \cdot \cos(\alpha). \quad (2.19)$$

Die Mikrorauigkeit bestimmt den mittleren Intensitätswert einer Fläche.

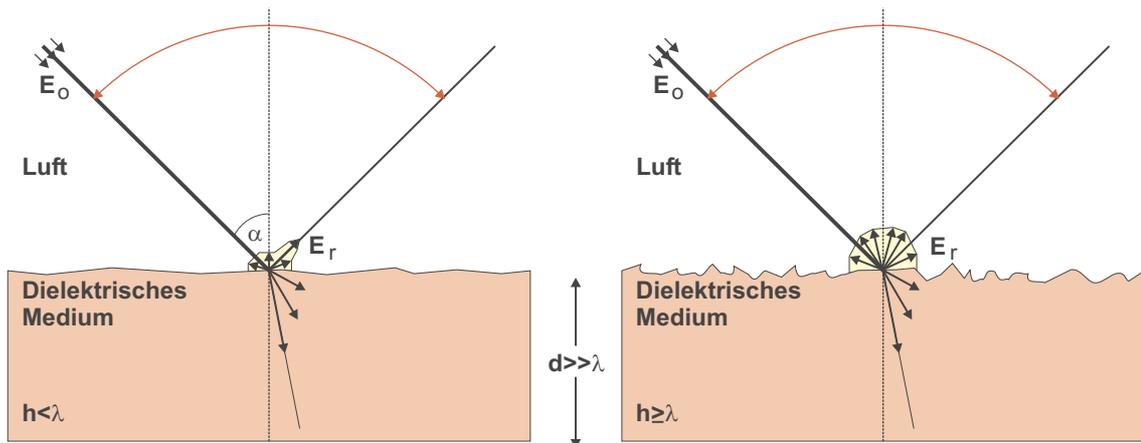


Abbildung 2.6: Zunahme der Streuung mit der Rauigkeit der Oberfläche

- *Mesomaßstab*: Hierunter fallen Einflüsse von Objekten, deren Ausmaße die Größe einer Auflösungszelle übersteigen, zum Beispiel Bäume oder Gebäude. Die Mesorauigkeit bestimmt im Wesentlichen die Textur des SAR-Bildes. So weisen Wälder typischerweise eine gröbere Textur auf als Grasflächen.
- *Makromaßstab*: Der Makromaßstab berücksichtigt Einflüsse der Topographie, deren Ausdehnung die Größe einer Auflösungszelle um ein Vielfaches übersteigt. Es wird die Neigung des Terrains zum Radarsensor betrachtet, die zu den Phänomenen Foreshortening, Layover und Abschattungen führt. An Hügeln und Bergen können ausgedehnte Flächen davon betroffen sein. Die Stärke des rückgestreuten Signals pro Auflösungszelle nimmt mit sinkendem *Inzidenzwinkel* α zu (Foreshortening). Falls das Sendesignal senkrecht auf die Fläche trifft ($\alpha = 0$), wird das Empfangssignal durch spiegelnde Reflexion maximal.

Daneben spielen *elektrische Eigenschaften* eine Rolle, wie Leitfähigkeit und Dielektrizitätskonstante. Bei Metalloberflächen wird das Signal, wie Licht an einem Spiegel, vollständig reflektiert, während bei anderen Materialien ein Teil der Energie transmittiert wird (Abbildung 2.7). Die komplexe Dielektrizitätskonstante ε bestimmt maßgeblich das Verhältnis von Transmission zu Reflexion und die Eindringtiefe in den Boden. Typische Werte von ε für trockene, natürliche Materialien liegen zwischen 3 und 8, was geringe Reflexion und große Eindringtiefe zur Folge hat. Wasser hingegen zeigt einen hohen Wert von etwa 80, wodurch das Signal fast ausschließlich reflektiert wird. Dies macht man sich zu Nutze, um die Bodenfeuchte zu bestimmen.

Der Speckle-Effekt

Die Auflösungszelle gegenwärtiger SAR-Systeme ist oft sehr viel größer als die Signalwellenlänge. Für raue Oberflächen (Mikromaßstab) kommt es innerhalb der Auflösungszelle zur Überlagerung der Rückstreuung vieler Substreuer. Gemessen wird das Summensignal, das als Zufallsprozeß modellierbar ist. Durch den *Speckle* wirken SAR-Bilder sehr körnig, was insbesondere automatische Bildanalyseverfahren beeinträchtigt. Eine Speckle-Filterung ist deshalb üblicherweise der erste Schritt einer SAR-Bildverarbeitungskette. Details hinsichtlich der statistischen Modellierung des SAR-Signals und der Speckle-Filterung finden sich in Anhang A.1.

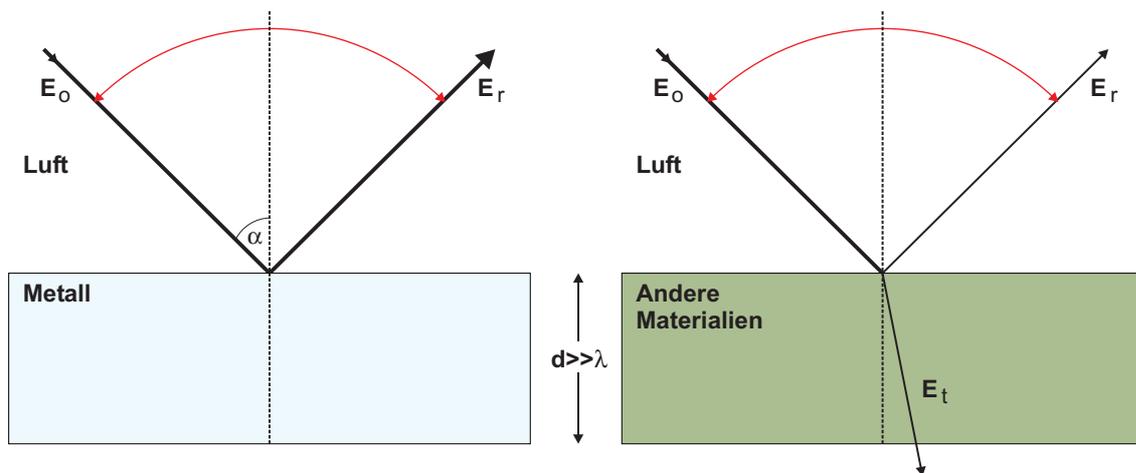


Abbildung 2.7: Spiegelnde Reflexion an Metallen, Reflexion und Transmission bei anderen Materialien

2.3.3 Spezialfälle der SAR-Rückstreuung

Im vorherigen Abschnitt wurde die Streuung abhängig von den Eigenschaften der Geländeoberfläche betrachtet. Mit SAR können aber auch Aussagen über den Bewuchs sowie Art und Ausrichtung erhabener künstlicher Objekte gemacht werden. Die Ausprägung von Gebäuden in SAR- und InSAR-Daten wird ausführlicher in Kapitel 3 dargelegt.

- *Volumenstreuung*: Neben der Signalstreuung vom Boden tritt bei Bodenbewuchs, zum Beispiel Gras, Büschen und insbesondere Bäumen, ein Anteil hinzu, der aus dem Volumen des Bewuchses zurückgestreut wird. Der Beitrag der beiden Streuanteile zum Gesamtsignal wird vom Größenverhältnis der Signalwellenlänge zu den Volumenobjekten (Blätter, Äste usw.) bestimmt. Demnach kommen für spezielle Fernerkundungsaufgaben unterschiedliche Radarwellenlängen in Frage. Bei einer Untersuchung von Waldgebieten können mit kurzen Wellenlängen, wie dem X-Band (3 cm), Aussagen über die Baumhöhen gemacht werden, da das Gros der Rückstreuung von Laub und Geäst der Kronen stammt. Für eine vorwiegende Penetration bis zum Waldboden geht man zu langwelligerem Signal über, wie etwa L-Band (24 cm) oder P-Band (64 cm).
- *Corner-Reflektoren*: Wenn zwei oder drei sich schneidende, glatte Ebenen im Winkel von 90 Grad zueinander angeordnet sind, spricht man von dihedralen oder trihedralen Corner-Reflektoren. Die senkrechte Anordnung kann durch Zweifach- beziehungsweise Dreifachreflexion zu sehr starken Signalantworten führen, die weite Teile der umgebenden Szene überstrahlen. Ein trihedraler Corner-Reflektor beeinflusst etwa ein Viertel des Halbraums. Das bedeutet: Egal wo sich der Sensor in diesem Bereich befindet, wird das Signal durch die Dreifachreflexion zum Sensor zurückgeworfen. Im SAR-Bild führt dies zu sternförmigen hellen Strukturen, weil das Corner-Signal so groß ist, daß es trotz der Nebenkeulendämpfung der Richtantenne das lokale Signal überdeckt. Bei Meßkampagnen dienen bewußt in der Szene platzierte metallische Corner-Reflektoren Kalibrierungszwecken. In urbanen Gebieten führt die Vielzahl rechtwinkliger künstlicher Objekte (Gebäude, Fahr-

zeuge, Masten usw.) zu einer Anhäufung dominanter Streuer. Deren Signale sind schwer modellierbar, da sie mit dem Aspektwinkel stark variieren können.

- *Bragg-Resonanz*: An regelmäßigen Strukturen, wie zum Beispiel an Metallzäunen, führt Interferenz zu Signalfuktuationen. Abhängig von dem Aspekt, der Wellenlänge und dem Abstand der Strukturen kann Signalverstärkung durch Resonanz die Folge sein.

2.3.4 Rückstreuung und Polarisation

Der Radarrückstreuquerschnitt σ ist im Allgemeinen nicht isotrop. Materialeigenschaften und die Ausrichtung von Objekten zum Sensor beeinflussen die Polarisation der elektromagnetischen Welle. Für polarimetrische Untersuchungen geht man daher zu einer Streumatrix über:

$$[\mathbf{S}_0] = \begin{bmatrix} \sqrt{\sigma_{HH} \cdot e^{j\varphi_{HH}}} & \sqrt{\sigma_{HV} \cdot e^{j\varphi_{HV}}} \\ \sqrt{\sigma_{VH} \cdot e^{j\varphi_{VH}}} & \sqrt{\sigma_{VV} \cdot e^{j\varphi_{VV}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix}. \quad (2.20)$$

Die Indizes H und V stehen für horizontal und vertikal, es können auch andere Polarisationsbasen betrachtet werden. Der erste Index ist die Polarisation des Senders, der zweite die des Empfängers. Die Streumatrix kann in deterministische Streumechanismen [46] zerlegt werden:

$$[\mathbf{S}_0] = \begin{bmatrix} a + b & c - jd \\ c + jd & a - b \end{bmatrix} = \mathbf{a} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \mathbf{b} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} + \mathbf{c} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} + \mathbf{d} \begin{bmatrix} 0 & -j \\ j & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.21)$$

Die Matrizen auf der rechten Seite nennt man *Pauli-Matrizen*. Bei isotropen Medien gilt das *Reziprozitätstheorem*, das heißt, die beiden Kreuzkomponenten sind gleich: $S_{HV} = S_{VH} = S_X$. In diesem Fall fällt die vierte Pauli-Matrix in Gleichung 2.21 weg. Bei ungerader Anzahl von Streuvorgängen sind S_{HH} und S_{VV} in Phase, etwa bei Flächenstreuung oder trihedralen Corner-Reflektoren. Das Verhalten bei gerader Anzahl von Streuvorgängen ist aspektabhängig (siehe Tabelle 2.1). Durch die Volumenstreuung hat das Signal von Wäldern keine Vorzugsrichtung.

Pauli-Matrix	Art der Streuung	Interpretation
$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	ungeradzahlige Streuereignisse	Fläche, Kugel, trihedraler Corner
$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$	geradzahlige Streuereignisse	Dihedron bei senkrechter Beleuchtung
$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$	geradzahlige Streuereignisse	Dihedron um 45° verdreht

Tabelle 2.1: Interpretation von Pauli-Matrizen (nach [46])

Mit zunehmend verbesserter Ortsauflösung der Daten wird eine polarimetrische Auswertung weiter an Bedeutung gewinnen, insbesondere in urbanen Gebieten. Ein einzelner Streuer in einer Auflösungszelle kann anhand der Polarisationsmatrix genau charakterisiert werden.

2.3.5 Modellierung der Rückstreuung

Die Ausführungen in den vorangehenden Abschnitten machen deutlich, daß dasselbe Gelände sehr unterschiedlich in SAR-Bildern erscheinen kann, etwa aufgrund einer Variation von Wellenlänge oder Aufnahme­richtung. Die Bandbreite des *Radarrückstreu­koeffizienten* σ_0 wurde für wichtige Gelände­klassen und verschiedene Sensor- und Materialparameter bestimmt [124]. In Abbildung 2.8 sind für das X-Band die typischen Werte von σ_0 für einige Landoberflächen als Funktion des Inzidenzwinkels α dargestellt.

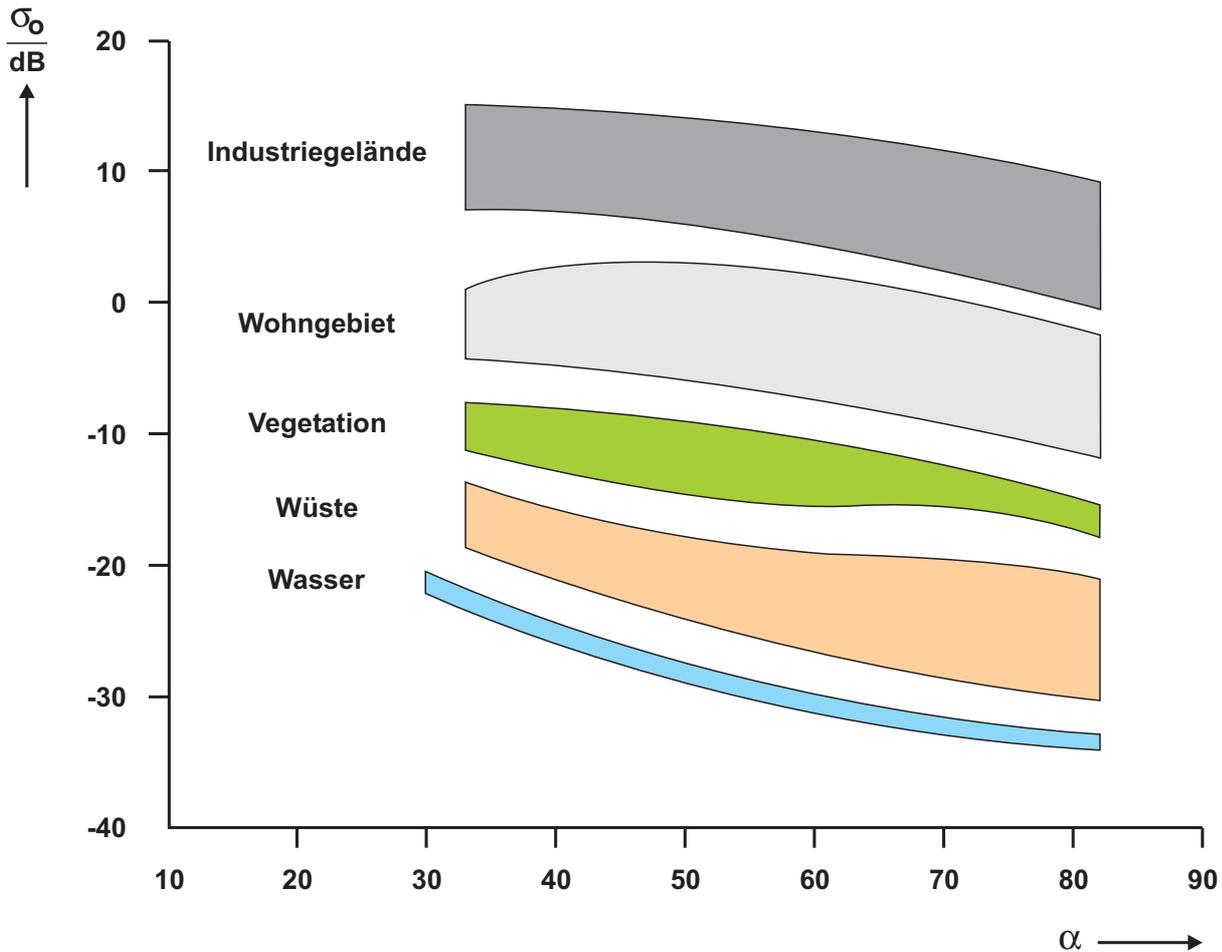


Abbildung 2.8: Werte für σ_0 als Funktion des Inzidenzwinkels α für X-Band (nach [63])

2.3.6 Radiometrische Auflösung

Häufig sollen in SAR-Bildern Gelände­flächen segmentiert werden. Dabei erfolgt die Flächen­segmentierung allein aufgrund einer Pixel­klassifikation mittels eines Schwellwertes. Der Schwellwert sollte dabei abhängig von der radiometrischen Auflösung der SAR-Daten gewählt werden. Unter der radiometrischen Auflösung versteht man in der Radarfernerkundung ein Maß für die Trennbarkeit zweier benachbarter Flächen. Die Erwartungswerte der beiden gerade noch

unterscheidbaren Flächen in Abbildung 2.9 (χ^2 -Verteilungen eines Multilook-Intensitätsbilds) seien \bar{x} und $\bar{x} + \Delta x$. Die radiometrische Auflösung δ_R ist dann wie folgt definiert:

$$\delta_R = \frac{\bar{x} + \Delta x}{\bar{x}}. \quad (2.22)$$

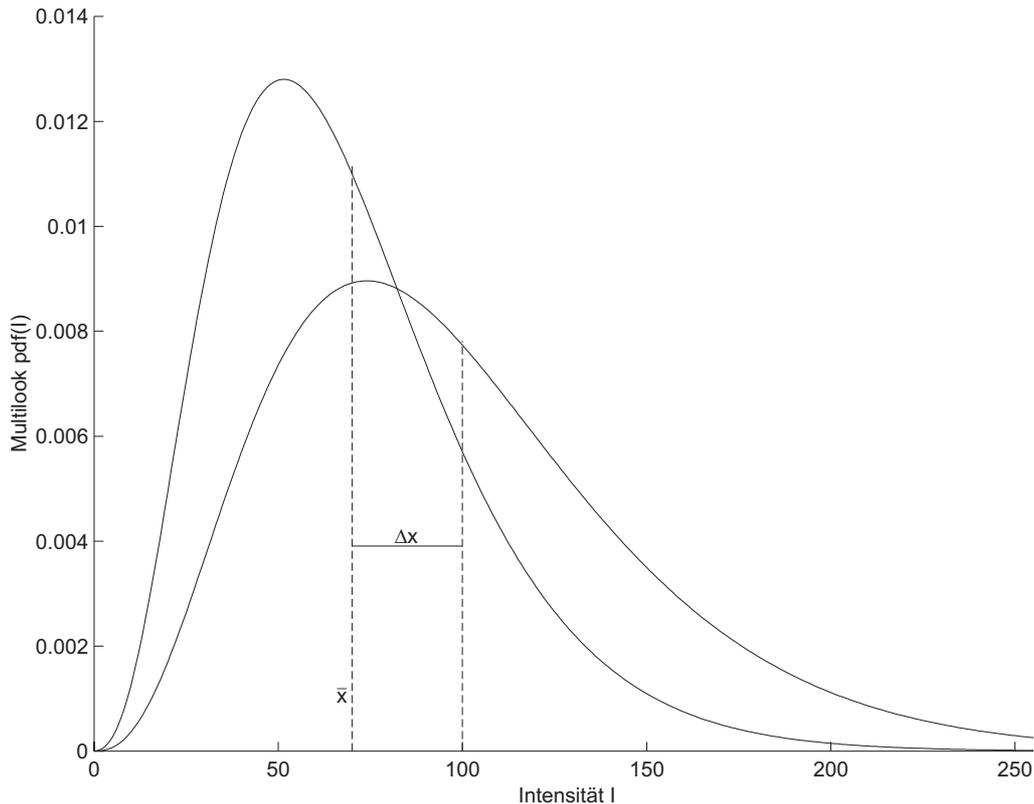


Abbildung 2.9: Radiometrische Auflösung am Beispiel zweier benachbarter Flächen mit unterschiedlichen Erwartungswerten in einem 4-Look-Intensitätsbild

Für Δx wählt man üblicherweise die Standardabweichung der Bezugsfläche [63]. Unter Berücksichtigung des SNR gilt nach Übergang zum logarithmischen Maßstab:

$$\delta_R = 10 \cdot \log_{10} \left[1 + \frac{1 + \frac{1}{SNR}}{\sqrt{L_{eff}}} \right]. \quad (2.23)$$

L_{eff} bezeichnet die Anzahl der sogenannten effektiven Looks zur Speckle-Reduktion. Durch die Verringerung des Speckle erhöht sich die radiometrische Auflösung, was sich als vorteilhaft für nachfolgende Bildanalyseschritte erwiesen hat. Daher nimmt man meist die damit verbundene geringere geometrische Auflösung in Kauf. Anhand der ermittelten radiometrischen Auflösung der verarbeiteten Datensätze werden in dieser Arbeit die Parameter für die Segmentierungsverfahren gewählt.

2.3.7 Transformation des SAR-Signals in Grauwerte

Der *Dynamikbereich* R_σ des Radarsignals [124] ist durch das Verhältnis von maximalem zu minimalem Rückstreuquerschnitt σ definiert:

$$R_\sigma = 10 \cdot \log \left(\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}} \right). \quad (2.24)$$

Dieser Wert kann, bei Vorhandensein starker Rückstreuer, durchaus 80 Dezibel überschreiten. Zur Analyse der Sensordaten werden die Meßwerte als Bilder aufbereitet. Dies erfordert eine geeignete Abbildung der hohen Dynamik der SAR-Information auf den geringeren Dynamikbereich gängiger digitaler Bilder, wie etwa Byte- oder Integerbilder. Um einen möglichst großen Bereich der Signaldynamik abzubilden, verwendet man bei der Quantisierung üblicherweise nichtlineare Transformationen, wie Logarithmierung oder die Wurzelfunktion. Dennoch geraten oft sehr kleine Meßwerte und die Signalspitzen starker Rückstreuer in die Sättigung; sie werden durch die jeweiligen Minimal- beziehungsweise Maximalwerte ersetzt [110]. Durch nichtlineare Transformation und Beschneidung des Wertebereiches wird die Statistik der SAR-Daten verfälscht. Daher sollten statistische Verfahren, wie etwa spezielle Speckle-Filter, stets nur auf den Originaldaten angewendet werden.

Es sind bei den verschiedenen Anbietern von SAR-Bildern unterschiedliche Methoden der Bildgenerierung entwickelt worden. Dabei spielen Sensortyp, die Art der Szene und der Zweck, der mit der Analyse des SAR-Bildes verbunden ist, eine Rolle. Für eine Analyse von SAR-Bildern mittels Methoden der Bildverarbeitung ist daher Wissen über den jeweiligen Sensor, die SAR-Prozessierung und die Bildgenerierung unerlässlich.

2.4 Georeferenzierung

Für den Abgleich mit anderem Datenmaterial ist die Transformation vom SAR-Bildkoordinatensystem in ein geeignetes Weltkoordinatensystem erforderlich. Im Falle Deutschlands ist dies üblicherweise das Gauß-Krüger-Koordinatensystem. Aus der Fernerkundung sind verschiedene Georeferenzierungsverfahren bekannt. Polynomiale Verfahren basieren meist auf der Schätzung der Parameter eines linearen, quadratischen oder kubischen zweidimensionalen Polynoms, wobei man den quadratischen Fehler über eine Menge von Paßpunkten minimiert. Die berechnete Transformationsvorschrift wird dann global auf das Bild angewandt. Aufgrund der angesprochenen Abbildungsphänomene sind polynomiale Verfahren für die Georeferenzierung von SAR-Bildern kaum geeignet. Man verwendet bei SAR-Bildern daher üblicherweise parametrische Verfahren, bei denen ein sensorspezifisches Abbildungsmodell und ein digitales Geländemodell (DGM) einfließen. Die parametrischen Ansätze unterscheiden sich hinsichtlich des Detailgrads von Sensor- und Geländemodellierung, die die Qualität der Georeferenzierung bestimmen.

2.4.1 Abbildung auf die Bodenebene

Die bereits erwähnte einfache Projektion der Entfernungsebene auf eine als eben gedachte Erdoberfläche ist mit vertretbarem Fehler nur bei kleinräumiger Erfassung und flacher Szene zulässig. Dabei bleiben die Abbildungsfehler erhalten. Üblicherweise wird ein regelmäßiges Abtastraster am Boden vorgegeben. Dessen Gitterpunkte fallen meist auf Zwischengitterpunkte in der Entfernungsgeometrie. Der Wert im Bodenraster resultiert aus bilinearer oder kubischer Interpolation im Entfernungs-Azimut-Raster. Dabei gilt es, die Abhängigkeit der Entfernungsauflösung vom Beleuchtungswinkel (Gleichung 2.9) zu beachten. Die Auflösung am Boden ist am höchsten für die am weitesten entfernten Bereiche. Daher sollte sinnvollerweise das Bodenraster so gewählt werden, daß im sensornahen Bildbereich die Bodenauflösung gerade der Entfernungsauflösung entspricht.

2.4.2 Abbildung auf ein Ellipsoid

Bei großflächiger Erfassung durch Satellitensensoren kann man die Szene nicht mehr mit vertretbarem Fehler als eben betrachten; es muß zusätzlich die tatsächliche Gestalt der Erde berücksichtigt werden. Hierzu bezieht man sich in erster Näherung auf Referenzellipsoide wie WGS84 [95]. Üblicherweise wird für die gesamte Szene eine einheitliche Höhe über dem Ellipsoid vorgegeben. Die Georeferenzierung erfolgt anhand der Sensortrajektorie und des Beleuchtungswinkels in einem dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystem mit dem Ellipsoidzentrum als Ursprung. Anschließend überführt man die Daten in ein Landeskoordinatensystem.

2.4.3 Abbildung auf ein digitales Geländemodell

Für höhere Genauigkeitsansprüche und bei hügeligem Terrain sind für die Georeferenzierung DGM [66] der Erdoberfläche erforderlich, um die tatsächliche Topographie der Szene zu berücksichtigen [90]. Sowohl bei der Referenzierung auf ein Ellipsoid als auch auf ein DGM erfolgt die

Verknüpfung der Weltkoordinaten mit dem SAR-Koordinatensystem häufig über die *Doppler-Gleichung* F_D und die *Range-Gleichung* F_R [34], [90]:

$$F_D = f_{DC} - \frac{2 \cdot (\vec{p} - \vec{s}) \cdot (\vec{p} - \vec{s})}{\lambda \cdot |\vec{p} - \vec{s}|} = 0, \quad (2.25)$$

$$F_R = r - |\vec{p} - \vec{s}| = 0. \quad (2.26)$$

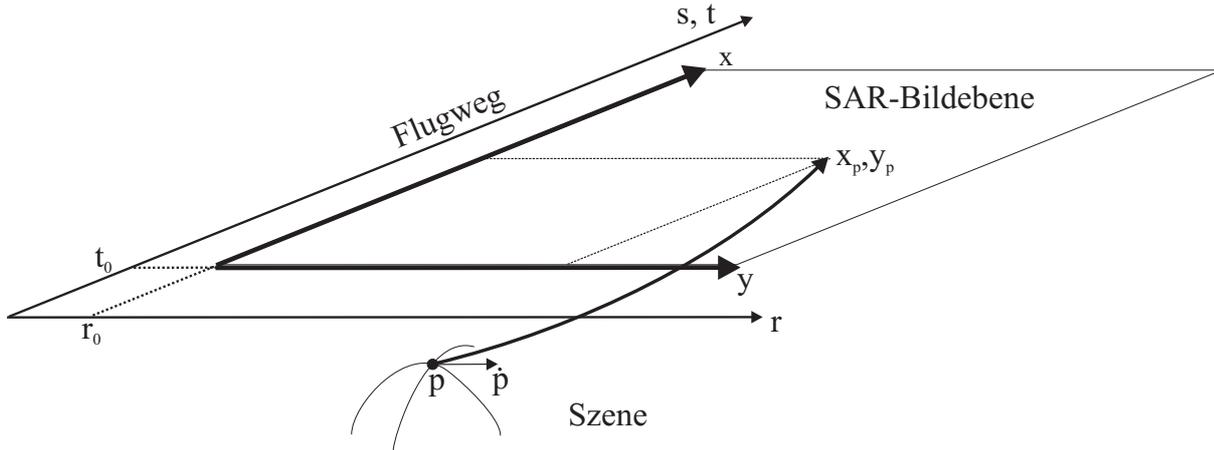


Abbildung 2.10: Indirekte Georeferenzierung mit DGM

Es handelt sich um eine indirekte Referenzierung, bei der der Weltpunkt $\vec{p} = (X, Y, Z)^T$ in die SAR-Bildebene transformiert wird (siehe Abbildung 2.10). Der Vektor \vec{p} kompensiert die Erdrotation:

$$\vec{p} = \vec{\omega}_E \times \vec{p}, \quad (2.27)$$

wobei $\vec{\omega}_E$ für die Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation steht. Bei flugzeuggestützten Sensoren ist \vec{p} häufig vernachlässigbar. Die Trajektorie des Sensors $\vec{s} = (X_S(t), Y_S(t), Z_S(t))^T$ wird als Polynom niedriger Ordnung approximiert:

$$\begin{aligned} X_S(t) &= a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 + a_3 \cdot t^3, \\ Y_S(t) &= b_0 + b_1 \cdot t + b_2 \cdot t^2 + b_3 \cdot t^3, \\ Z_S(t) &= c_0 + c_1 \cdot t + c_2 \cdot t^2 + c_3 \cdot t^3. \end{aligned} \quad (2.28)$$

Die Beziehung zwischen den physikalischen Radarkoordinaten Entfernung r und Azimut t und den SAR-Bildkoordinaten x und y nähert man als linear an,

$$t = t_0 + t_1 \cdot x, \quad (2.29)$$

$$r = r_0 + r_1 \cdot y. \quad (2.30)$$

mit den bekannten Offsetwerten t_0, r_0 und den Pixelabständen t_1, r_1 . Als Bezug für die Zuordnung des Signals zu einer Azimutkoordinate im Zuge des SAR-Prozesses dient meist die senkrechte Ebene durch die Mitte der Antennenkeule (*Zentroid*). Für die übliche seitliche Antennenausrichtung von 90 Grad ist die Dopplerfrequenz f_{DC} in der Zentroidebene Null (*Zero-Doppler-Ebene*). Andernfalls hängt f_{DC} sowohl von der Entfernung als auch von der Azimutposition ab, was bei der SAR-Prozessierung zu berücksichtigen ist. Zur Approximation von f_{DC}

dient dann ein zweidimensionales quadratisches Polynom:

$$f_{DC} = d_0 + d_1 \cdot y + d_2 \cdot y^2 + d_3 \cdot x + d_4 \cdot x^2. \quad (2.31)$$

Zur Georeferenzierung des SAR-Bildes dient ein iteratives Verfahren nach der Newton-Methode. Dazu linearisiert man die Gleichungen 2.25 und 2.26:

$$F_D(x_0, y_0) + \frac{\delta F_D}{\delta x} \cdot \Delta x + \frac{\delta F_D}{\delta y} \cdot \Delta y = 0, \quad (2.32)$$

$$F_R(x_0, y_0) + \frac{\delta F_R}{\delta x} \cdot \Delta x + \frac{\delta F_R}{\delta y} \cdot \Delta y = 0. \quad (2.33)$$

Zur Bestimmung der Bildpunkte (x_p, y_p) wird nach den Unbekannten Δx und Δy aufgelöst und die Abweichung schrittweise verkleinert, bis vorgegebene Genauigkeitsanforderungen erreicht sind. Startwert (x_0, y_0) der ersten Iteration ist das Resultat eines Nachbarpunktes.

Im Idealfall können die unbekanntes Größen in den Gleichungen 2.29-2.31 aus Navigations- und Prozessierungsdaten abgeleitet werden. Eine unabhängige Messung der Lagedaten des Sensorträgers liegt allerdings üblicherweise nicht für jeden Puls vor, sondern in einem größeren Zeitraster, etwa im Sekundenabstand. Zudem können die Navigationsdaten ungenau sein. Es empfiehlt sich daher, zumindest einen Teil der Navigationsparameter in die Optimierung miteinzubeziehen. Hierfür sind Paßpunkte erforderlich. Für alle in dieser Arbeit untersuchten SAR-Datensätze wurden daher mindestens zwei Paßpunkte verwendet.

Anhand eines Höhenmodells können Foreshortening-, Layover- und Schattenbereiche im SAR-Bild bestimmt werden. Diese als problematisch erkannten Bildbereiche lassen sich dann vor der weiteren Analyse korrigieren oder maskieren. Zudem ist es möglich, ein SAR-Bild zu simulieren, was zum Beispiel für eine iterative Auswertung von Interesse ist. Entsprechende Verfahren werden in Abschnitt 4.2 eingehender diskutiert.

2.4.4 Radiometrische Korrektur

Da der Radarrückstreuquerschnitt σ_0 vom örtlichen Inzidenzwinkel α abhängt, werden nach der Georeferenzierung häufig die Einflüsse der Geländeneigung im Makromaßstab und der geometriebedingten Änderung des Beleuchtungswinkels θ über die Streifenbreite in Entfernungsrichtung korrigiert (bei ebenem Gelände gilt $\alpha = \theta$). Für die radiometrische Korrektur verwendet man als einfachste Näherung den *normalisierten Rückstreuoeffizienten* σ_n [125]:

$$\sigma_n = \frac{\sigma_0}{\cos(\alpha)}. \quad (2.34)$$

Daneben wurden eine ganze Reihe von verbesserten Näherungen vorgeschlagen [3], [52]. Um auch den Einfluß des Geländes im Meso- und Mikromaßstab zu erfassen, muß detaillierte Information über die Geländebeschaffenheit (z. B. Landnutzung, Feuchtigkeit, Rauigkeit) ausgewertet werden. Derartige Angaben können einem GIS (*Geographisches Informationssystem*) [5] entnommen werden. Es hat sich zum Beispiel gezeigt, daß Gletscherflächen gesondert behandelt werden müssen [34].

2.5 SAR-Interferometrie

In der konventionellen SAR-Bildauswertung werden nur die Signalbeträge betrachtet, da die Phase eines Pixels für sich alleine keine Information trägt. Wegen des kohärenten Meßprinzips ändert sich die Lage, wenn mehrere Messungen vom selben Ort vorliegen. Mit interferometrischen Methoden lassen sich aus der Phasendifferenz der Messungen Aussagen über Objekthöhen beziehungsweise Objektgeschwindigkeiten ableiten, abhängig von der Anordnung der Antennen.

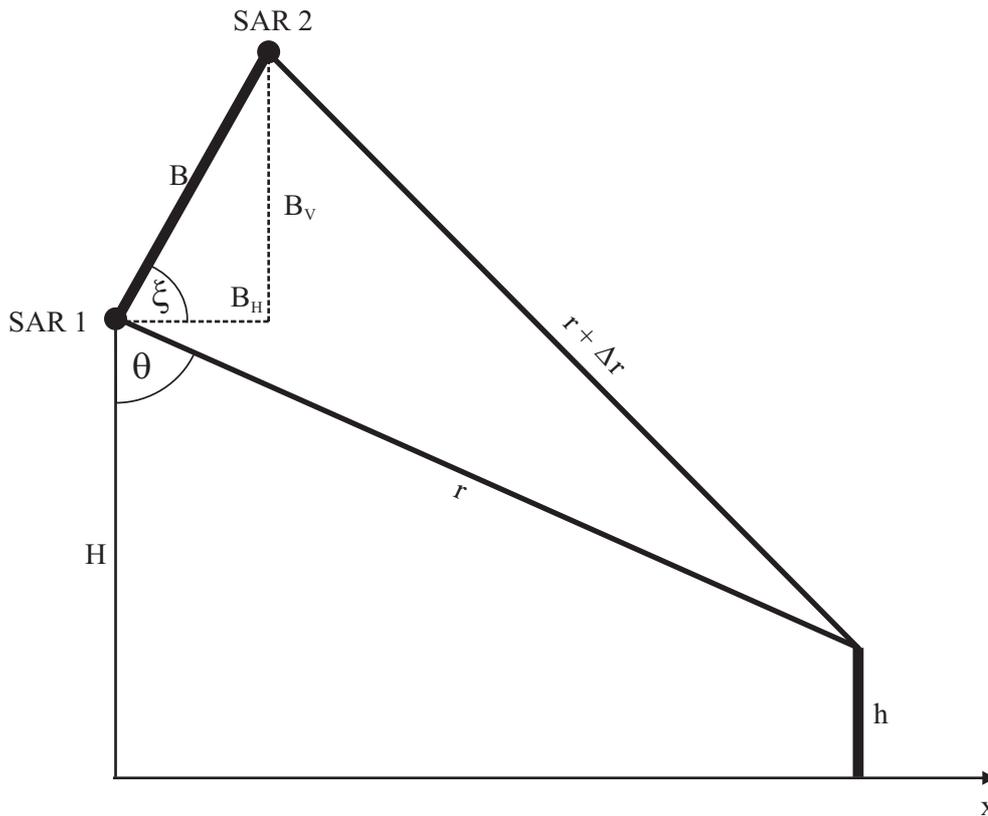


Abbildung 2.11: Geometrie der InSAR Messung (nach [63])

Bild 2.11 illustriert die geometrischen Verhältnisse bei einer interferometrischen SAR-Höhenmessung (InSAR). Die Messung kann zum einen im Einmalüberflugmodus (*Single-Pass*) erfolgen, das heißt, der Träger ist mit zwei Antennen bestückt und die Messungen finden gleichzeitig statt. Vorteilhaft sind dabei der feste Antennenabstand und die Tatsache daß keine zeitliche Dekorrelation auftreten kann. Nachteilig ist der erhöhte Aufwand, da gleichzeitig zwei Signale zu empfangen und zu verarbeiten sind. Derartige Messungen werden im Normalfall mit luftgetragenen Sensoren durchgeführt. Daneben spielt der *Repeat-Pass-Modus* eine Rolle. Dabei kombiniert man zwei konventionelle SAR-Bilder, die zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommen sein können und möglicherweise von unterschiedlichen Sensoren stammen. Darunter fällt zum Beispiel die Auswertung der vorhandenen und noch wachsenden großen Datenbanken von Satellitendaten, etwa zur Überwachung sehr langsamer Veränderungen.

2.5.1 Erzeugung eines DOM mit InSAR

Die folgenden Betrachtungen beschränken sich auf den Fall einer Messung im Einmalüberflugmodus eines luftgetragenen Sensors. Die Erzeugung eines DOM aus SAR-Daten läßt sich, wie in Abbildung 2.12 dargestellt, in folgende wesentliche Teilschritte gliedern:

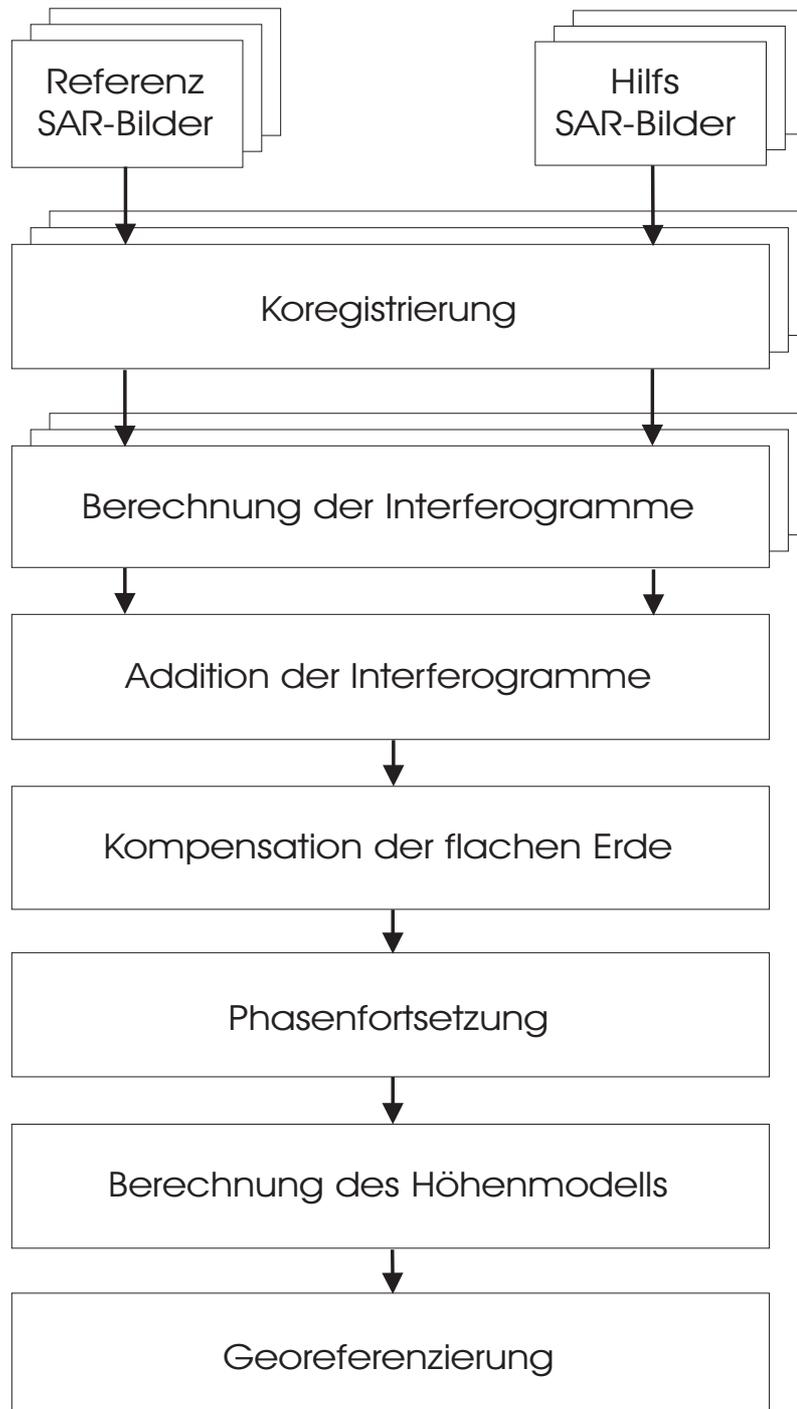


Abbildung 2.12: Ablauf der InSAR-Verarbeitung

Datenerfassung. Am Träger sind zwei Antennen senkrecht zur Flugrichtung, um eine Basis B versetzt, montiert. Die Entfernung zur Szene ist sehr viel größer als der Basisabstand ($B \ll r$). Im *Single-Baseline-Modus* beleuchtet eine der beiden Antennen die Szene. Beide Antennen empfangen die rückgestreuten komplexen Signale u_1 und u_2 . Daneben spielt in der Praxis auch der *Double-Baseline-Modus* oder *Pingpong-Modus* eine Rolle. Dabei sendet und empfängt abwechselnd jeweils eine Antenne. Dieser Modus trifft auch für *Repeat-Pass* zu. Da der Weglängenunterschied zweimal durchlaufen wird, ist die Meßempfindlichkeit verdoppelt. Im Vergleich zum Single-Baseline-Modus ist der eindeutige Höhenbereich allerdings halbiert. Nach der SAR-Verarbeitung liegen schließlich zwei komplexe Bilder vor.

Koregistrierung. Aufgrund der unterschiedlichen Aufnahmeposition sind die beiden SAR-Bilder nicht deckungsgleich. Daher ist eine Koregistrierung erforderlich. Üblicherweise wird hierzu anhand einer Menge von Paßpunkten eine globale Transformationsvorschrift berechnet. Beim Einmalüberflugmodus genügt meist eine einfache Translation für die Koregistrierung. Die Paßpunkte können zum Beispiel durch Maximierung der Kohärenz in lokalen Suchbereichen ermittelt werden. Anschließend erfolgt die Transformation des zweiten SAR-Bildes (SAR 2 in Abbildung 2.11) auf das Referenzbild (SAR 1) mittels Interpolation.

Berechnung des Interferogramms. Das Interferogramm v berechnet sich aus der pixelweisen komplexen Multiplikation von u_1 mit dem konjugierten Signal u_2^* :

$$v = u_1 \cdot u_2^* = a_1 \cdot a_2 \cdot e^{j\Delta\varphi}. \quad (2.35)$$

Das Produkt der beiden Amplituden $a_1 \cdot a_2$ nennt man *Intensität*, analog zu den Zusammenhängen zwischen konventionellen Amplituden- und Intensitätsbildern. Die bisherigen Schritte werden für jeden Look separat durchgeführt. Zur Reduktion des Rauschens addiert man die aus den einzelnen Looks erzeugten Interferogramme komplex, bevor eine Transformation von kartesischen zu Polarkoordinaten erfolgt. Die Phasendifferenz $\Delta\varphi$ wird durch den Entfernungswegunterschied Δr eines Streuzentrums zu den beiden Antennen verursacht:

$$\Delta\varphi = -\frac{2\pi}{\lambda} \Delta r. \quad (2.36)$$

Die zur Berechnung der Phasendifferenzwerte verwendete Arkustangensfunktion bildet alle Phasenwerte in den Bereich von $-\pi < \Delta\varphi \leq \pi$ ab. Die Messung ist daher im Allgemeinen mehrdeutig.

Kompensation des Anteils der flachen Erde. Aufgrund der Schrägsicht ergibt sich ein Phasenanteil, der nicht von der Topographie abhängt. Dieser Phasenanteil der *flachen Erde* resultiert aus der Abhängigkeit der Weglängendifferenz Δr von der Entfernung. Der Anteil der flachen Erde $\Delta\varphi_{fE}$ wird von der gemessenen Phase abgezogen:

$$\Delta\varphi_{Topo} = \Delta\varphi - \Delta\varphi_{fE}. \quad (2.37)$$

Phasenfortsetzung. Die im vorigen Abschnitt angesprochene Kompensation der flachen Erde beseitigt ausschließlich den durch die Entfernung bedingten Anteil der Phase. Für eine Szene mit einer geringen Höhenvariation, die nicht stärker als der eindeutige Höhenbereich von der flachen Erde abweicht, ist dieser Schritt ausreichend. Wegen der Phasenmehrdeutigkeit sind im Falle stärkerer Höhenvariation zusätzliche Maßnahmen erforderlich. Das sogenannte *Phase-Unwrapping* ist ein Hauptproblem der interferometrischen SAR-Verarbeitung. Die Aufgabe besteht darin, die Phasenwerte $\Delta\varphi_{Topo}$ über das gesamte Interferogramm durch Addition oder Subtraktion von Vielfachen von 2π konsistent fortzusetzen, um die Topographie der Szene nachzubilden. Die Bandbreite entsprechender Verfahren reicht von einfacher Filterung bis zu ausgeklügelten Methoden, die zum Beispiel eine globale Kostenfunktion minimieren. Eine Übersicht gängiger Verfahren findet sich in *Bamler und Hartl* [1].

Berechnung des DOM. Nachdem der Einfluß der flachen Erde kompensiert wurde und die Phasenmehrdeutigkeit aufgelöst worden ist, kann mit Gleichung 2.36 die Weglängendifferenz bestimmt werden. Unter Verwendung des Kosinussatzes erhält man nach Umformung:

$$\Delta r = \sqrt{r^2 + B^2 + 2 \cdot B \cdot r \cdot \sin(\xi - \theta)} - r \quad \text{mit} \quad \xi = \arctan\left(\frac{B_V}{B_H}\right), \quad (2.38)$$

mit den Parametern Entfernung r , Wellenlänge λ , Basislinie B und dem durch die Antennenkonfiguration vorgegebenen Winkel ξ . Damit läßt sich die unbekannte Größe berechnen, nämlich der tatsächliche Beleuchtungswinkel θ zum Objekt. Ein DOM in der Entfernungsgeometrie erhält man durch Bestimmung der Höhe h für jedes Pixel:

$$h = H - r \cdot \cos(\theta). \quad (2.39)$$

Georeferenzierung. Sowohl das DOM als auch das Intensitätsbild werden aus der Entfernungsgeometrie in ein Weltkoordinatensystem überführt. Als Höhenreferenz dient dabei das erzeugte InSAR-DOM. Üblicherweise erfolgt die Lagekorrektur der Höhendaten bezüglich des Bodens mit

$$x = r \cdot \sin(\theta). \quad (2.40)$$

Durch die Vorwärtsprojektion mit Gleichung 2.40 werden die Pixel aus der Entfernungsgeometrie ungleichmäßig auf den Boden abgebildet [8], [55]. Unbesetzte Pixel auf dem Boden deuten auf Abschattungen hin. Die Löcher können durch Triangulation überbrückt und die fehlenden Daten anschließend interpoliert werden [99]. Layover führt häufig zu einer Abbildung mehrerer Pixel aus dem SAR-Entfernungsbild auf ein Pixel am Boden. Um Layoverbereiche zu detektieren, kann man in der Bodengeometrie ein Histogramm über die Anzahl der abgebildeten Pixel erzeugen. Maxima im Histogramm deuten auf Layover hin.

Selbst bei Abwesenheit von Layover und Verdeckungen ist durch die Vorwärtsprojektion mit Verzerrungen zu rechnen. Dies liegt an der starken Streuung der Höhengenaugigkeit aufgrund von Rauscheinflüssen. So erscheinen insbesondere Objektkanten häufig gestört nach der Georeferenzierung. Es werden daher in dieser Arbeit die Objektsegmentierungen in der Entfernungsebene vorgenommen und erst die Resultate in symbolischer Form in das Weltkoordinatensystem abgebildet. Indem die Objektkanten als Zwangsbruchkanten eingeführt werden, bleiben sie erhalten. Der Ausgleich der Höhenwerte über das Objekt hat eine Verbesserung der Höhen- und Lagegenauigkeit zur Folge. Einzelheiten bleiben Kapitel 5 vorbehalten.

2.5.2 Kohärenz

SAR-Interferometrie ist nur möglich im Falle signifikanter Korrelation zwischen den komplexen SAR-Bildern. Den komplexen Korrelationskoeffizienten γ der Signale $u_{1,2}$ nennt man *Kohärenz*:

$$\gamma = \frac{E[u_1 \cdot u_2^*]}{\sqrt{E[|u_1|^2] \cdot E[|u_2|^2]}} = |\gamma| \cdot e^{j\Phi_0}. \quad (2.41)$$

Die beiden Signale $u_{1,2}$ werden als stochastische Prozesse aufgefaßt mit mittelwertfreien, zirkular komplexen, gaußschen Verteilungsdichtefunktionen. Daher fallen die Erwartungswerte der Einzelsignale bei der Berechnung der Korrelation in Gleichung 2.41 weg. Üblicherweise steht nur eine interferometrische Messung zur Verfügung, deswegen sind die Erwartungswerte unbekannt. Wenn man benachbarte Pixel als Stichproben eines Zufallsprozesses gleichen Mittelwerts und gleicher Varianz betrachtet, ist der *Maximum-Likelihood-Schätzwert* (MLE) der Kohärenz γ aus den Daten bestimmbar [47]. Im Normalfall ist nur der Kohärenzbetrag von Interesse:

$$|\hat{\gamma}|_{MLE} = \frac{\left| \sum_{n=1}^N u_1^{(n)} \cdot u_2^{*(n)} \right|}{\sqrt{\sum_{n=1}^N |u_1^{(n)}|^2 \cdot \sum_{n=1}^N |u_2^{(n)}|^2}}. \quad (2.42)$$

Die Fenstergröße ist nach oben an die Ausdehnung der interessierenden Objekte anzupassen. Andererseits dürfen die Fenster nicht zu klein werden, damit der Schätzwert zuverlässig bleibt [122]. Beim hier betrachteten Einmalüberflugmodus sind zeitliche und geometrische Dekorrelationen gegenüber dem thermischen Rauschen vernachlässigbar. Für additives Rauschen lassen sich die komplexen Signale u_i in einen Korrelationsanteil c und Rauschanteile n_i trennen:

$$u_i = c + n_i. \quad (2.43)$$

Der Kohärenzbetrag $|\gamma|$ kann als Funktion des *SNR* aufgefaßt werden [92]:

$$|\gamma| = \frac{1}{1 + \frac{1}{SNR}}, \quad \text{mit } SNR = \frac{|c|^2}{|n|^2}. \quad (2.44)$$

In Formel 2.44 ist das tatsächliche Verhältnis der Leistung von Signal und Rauschen einzusetzen und nicht der Dezibelwert. Tabelle 2.2 zeigt die Kohärenz für einige typische SNR-Werte.

SNR	100 (20 dB)	10 (10 dB)	2 (3 dB)	1 (0 dB)	0.5 (-3 dB)
Kohärenz	0.99	0.9	0.67	0.5	0.33

Tabelle 2.2: Zusammenhang zwischen SNR und Kohärenz

2.5.3 Genauigkeit der InSAR-Höhenmessung

Wegen $B \ll r$ kann von der vereinfachenden Annahme ausgegangen werden, daß die Blickrichtungen der beiden Sensoren parallel verlaufen [99]. In diesem Fall kann die Wurzel in Gl. 2.38 durch eine Potenzreihenentwicklung bis zum linearen Glied angenähert werden:

$$\Delta r \approx B \cdot \sin(\xi - \theta). \quad (2.45)$$

B und ξ sind durch die Antennenkonfiguration gegeben. Für ein Pixel des SAR-Bildes in Entfernungsgeometrie im Abstand r variiert der Beleuchtungswinkel θ mit der Geländehöhe h :

$$\theta(h) = \arccos\left(\frac{H-h}{r}\right) = \arccos\left(\cos(\theta_0) - \frac{h}{r}\right) \quad \text{mit } \theta_0 = \theta(h=0). \quad (2.46)$$

Mit den Gl. 2.45 und 2.46 erhält man nach Taylorentwicklung bis zum linearen Glied:

$$\Delta r(h) \approx B \cdot \sin(\xi - \theta_0) + \frac{B \cdot \cos(\xi - \theta_0)}{r \cdot \sin(\theta_0)} \cdot \Delta h. \quad (2.47)$$

Mit Gleichung 2.36 ersetzt man Δr durch die Differenzphase $\Delta\varphi$:

$$\Delta\varphi(h) \approx \frac{2\pi B}{\lambda} \cdot \left(\sin(\xi - \theta_0) + \frac{\cos(\xi - \theta_0)}{r \cdot \sin(\theta_0)} \cdot \Delta h \right). \quad (2.48)$$

Der erste Term entspricht der Phase der flachen Erde und wird vor der Höhenberechnung beseitigt. Die Änderung der Höhe Δh ist damit näherungsweise linear abhängig von $\Delta\varphi$:

$$\Delta h \approx \frac{\lambda}{2\pi B} \cdot \frac{r \cdot \sin(\theta_0)}{\cos(\xi - \theta_0)} \cdot \Delta\varphi. \quad (2.49)$$

Falls bei der Phasenfortsetzung keine Fehler auftreten, kann die Standardabweichung der Höhenmessung σ_h abgeschätzt werden (siehe Anhang A.2). Man erhält schließlich mit Gl. A.19:

$$\sigma_h \approx \frac{\lambda}{2\pi B} \cdot \frac{r \cdot \sin(\theta_0)}{\cos(\xi - \theta_0) \cdot \sqrt{SNR} \cdot \sqrt{L}}. \quad (2.50)$$

Man erkennt, daß σ_h mit wachsender Basislinie B fällt und mit zunehmender Entfernung steigt. Da das SNR nach Gleichung 2.15 kubisch mit der Entfernung r fällt, steigt σ_h tatsächlich mit der zweieinhalbfachen Potenz der Entfernung:

$$\sigma_h \sim r^{2.5}/B. \quad (2.51)$$

Die Basislänge ist für Flugzeugsensoren durch die Größe des Trägers begrenzt. Sie kann aber auch für Satellitensensoren nicht beliebig hoch gewählt werden, damit das Signal nicht de-korreliert (kritische Basislänge [99]). Der geringere Signalweg luftgestützter Sensoren wirkt sich günstiger auf die Höhenmeßgenauigkeit aus als die größere Basis bei Satelliten. Als grobe Richtwerte kann man σ_h für Flugzeugsensoren im Meterbereich ansetzen und für Satelliten eine Größenordnung schlechter.

Analog zur Vorgehensweise bei der Speckle-Reduktion ist auch hier eine Verbesserung der Höhengenaugigkeit durch Mittelung über L unabhängige Interferogramme (Looks) möglich. Diese Mittelwertbildung kann auch über benachbarte Werte durchgeführt werden, unter der Annahme eines vorwiegend ebenen Szenenbereiches innerhalb des Fensters. Mit Gleichung 2.50 läßt sich das SNR auch aus den Höhenwerten abschätzen, etwa indem man einen ausgedehnten, flachen Bereich in der Szene wählt - zum Beispiel Grasflächen - und dort die Standardabweichung der Höhe σ_h bestimmt.

Durch Rauschen kann die InSAR-Phase nach oben oder unten vom richtigen Wert abweichen. Man kann daher nicht davon ausgehen, daß die Höhenwerte eines Hausdaches nur zwischen der tatsächlichen Höhe und dem Bodenniveau liegen, sondern es treten auch Ausreißer auf.

Neben dem Rauschen beeinflusst die Geländetopographie die Genauigkeit der Höhenmessung:

- Abschattungsbereiche können nicht erfaßt werden. Die Meßwerte sind unbrauchbar.
- In Layoverbereichen ist die InSAR-Höhe unzuverlässig.
- Bei Szenen mit großen Wasserflächen scheitern gängige Verfahren zur Phasenfortsetzung häufig. Dies gilt auch für Flüsse, die die gesamte Szene durchschneiden.
- In der Umgebung starker Streuer leidet die Meßgenauigkeit durch Sättigungseffekte [121].

Die Höhengenaugigkeit für urbane Szenen wird in Abschnitt 3.1 genauer betrachtet. Ein wesentlicher Vorteil der InSAR-Technologie, verglichen mit konventionellem SAR, liegt darin, daß die koregistrierte Höheninformation Bestandteil der Daten ist. Allerdings sind die Höhendaten zunächst ebenfalls geometrisch verzerrt. Nach Beseitigung der Verzerrung kann eine Georeferenzierung alleine aus den InSAR-Daten erfolgen.

2.5.4 Restaurierung gestörter InSAR-Daten bei natürlicher Szene

Meist ist man an einem möglichst rauschfreien und lückenlosen DOM interessiert. Bei einfacher Mittelung des InSAR-DOM über ein quadratisches Fenster werden Bruchkanten abgeschliffen. Um die unerwünschte Glättung zu minimieren, kommen zum Beispiel anisotrope Filter zum Einsatz [74]. In jüngster Zeit wurden verschiedene Methoden vorgeschlagen, die auf statistischer Modellierung von Sensor und Szene beruhen [132]. Dabei geht man von einer ländlichen Szene aus, deren Topographie *a priori* modelliert wird als Gauß-Markov-Random-Field (GMRF) [127] oder als fraktale Funktion [18]. Man beschreibt den Übergang von der Szene zur Messung und modelliert Sensor, Atmosphäreneinfluß sowie Rauschen mathematisch durch eine *Likelihood-Funktion*. Unter Verwendung der *bayesschen Regel* [78] wird das Maximum des Produktes aus Apriori-Verteilung und Likelihood gesucht, die *Maximale A-posteriori-Wahrscheinlichkeit (MAP)* [133]. Das Ziel ist, ein rauschfreies DGM des Geländes in Rasterform zu erhalten.

2.6 SAR-Sensorsysteme

SAR-Sensoren kommen raum- und luftgestützt zum Einsatz. Beispiele für raumgestützte Sensoren sind die Fernerkundungssatelliten ERS-1/ERS-2 sowie Radarsat. Luftgestützte SAR-Sensoren werden in Deutschland etwa von den Firmen Dornier (DO-SAR [25]) und Intermap GmbH (AeS-1 [53]) sowie zu Forschungszwecken betrieben, wie AER-II [23] und MEMPHIS [4] von FGAN-FHR. Die Sensoren ERS-1 und AER-II sind in Abbildung 2.13 dargestellt. Einige Sensorparameter finden sich in Tabelle 2.3.

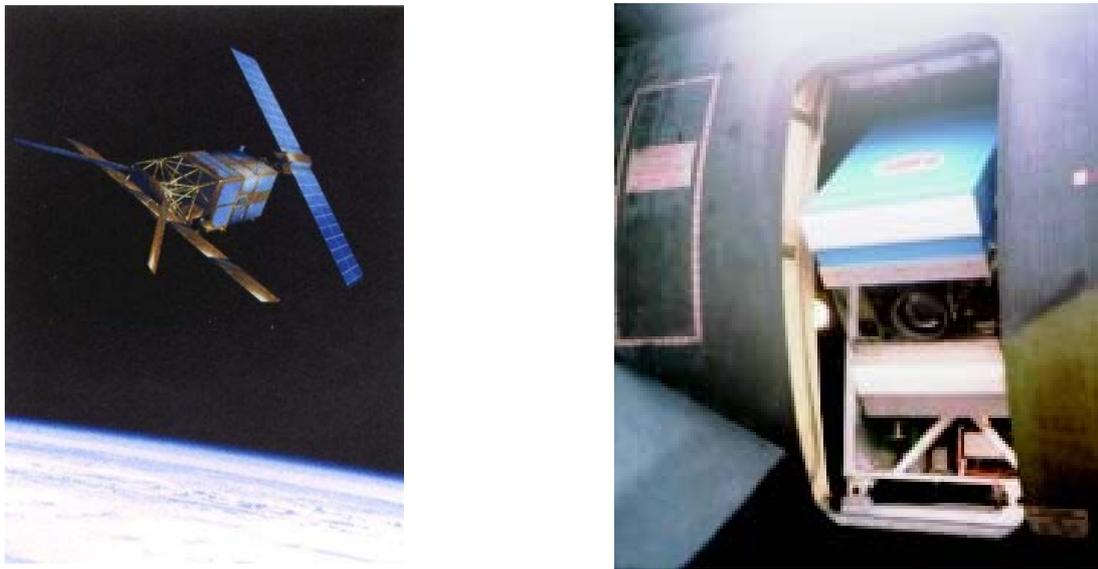


Abbildung 2.13: Satellit ERS-1 und der AER-II Sensor

ERS-1 arbeitet im C-Band bei einer Trägerfrequenz von 5,3 GHz, was einer Wellenlänge von 5,66 cm entspricht. Die Antennenmaße sind 10 m x 1 m. Ein Vorteil von Fernerkundungssatelliten liegt in der präzise bestimmbaren Umlaufbahn. Bei der Georeferenzierung muß allerdings die Erdkrümmung berücksichtigt werden. InSAR ist nur mit mehreren Überflügen möglich (z. B. Zyklus von 35 Tagen bei ERS-1), die Basislinie kann über den Verlauf der Messung variieren und muß genau bestimmt werden. Die kritische Basislinie liegt für ERS-1 bei etwa 1 km [36]. Derartige Missionen sind nicht auf die Erde beschränkt. Von 1990-1994 fand mit dem SAR-Instrument der Magellansonde der NASA eine Erkundung der Venus statt. Aus überlappenden Streifen wurde ein Geländemodell des Planeten berechnet [12]. Mit zunehmendem zeitlichem Abstand tritt das Problem der Dekorrelation der Szene auf. Die Dekorrelation äußert sich in niedriger Kohärenz, wodurch eine Höhenbestimmung unmöglich wird. Andererseits kann gerade das Verhalten der Kohärenz über die Zeit Aufschluß geben über Änderungen in der Szene, etwa durch landwirtschaftliche Maßnahmen oder durch natürliche Ereignisse wie Erdbeben. Ein Satellit gewinnt seine Energie autonom aus den Solarzellen. Daher sind Sendeleistung und Signalbandbreite des Sensors nach oben begrenzt. Als Impulsbandbreite für ERS-1 wurde 15,5 MHz gewählt, was zu einer Auflösung auf dem Boden von etwa 25 m führt [26], [97].

Eine Besonderheit stellt die SRTM-Shuttlemission (Shuttle Radar Topography Mission [86]) vom Februar 1999 dar. Mittels eines ausfahrbaren Arms wurde eine Basislinie von 60 m erreicht. In den 10 Tagen des Shuttlefluges gelang es, ein nahezu flächendeckendes DGM der Landflächen unseres Planeten herzustellen, mit einer geometrischen Auflösung von etwa 30 m und einer absoluten Höhengenaugigkeit im Meterbereich [45].

Sensor	Bandbreite/Ortsauflösung	Streifenlänge x -breite	Entfernung zur Szene
ERS-1	15.5 MHz / ca. 30 m	ca. 100 x 100 km	ca. 820 km
AER-II	160 MHz / ca. 1 m	ca. 10 x 3.5 km	< 20 km

Tabelle 2.3: Vergleich von ERS-1 und AER-II

Wegen der in der Regel höheren Signalbandbreite erreichen luftgestützte Sensoren geometrische Auflösungen von einem Meter und besser [23]. Der geringere Abstand zur Szene wirkt sich günstig auf das SNR aus, das nach Gleichung 2.15 indirekt proportional zur dritten Potenz der Entfernung ist. InSAR ist im Einmalüberflugmodus möglich, wodurch die Güte der Höhenmessung allein vom SNR und vom Abstand zur Szene abhängt. Im Zuge der SAR-Prozessierung lassen sich eventuelle Abweichungen des Trägers von der gewünschten Flugbahn kompensieren. Hierzu ist eine hochpräzise Erfassung von Sensorposition und -lage erforderlich.

2.6.1 Neueste Entwicklungen von Sensorik und Analyse

Der Fortschritt der Elektronik erlaubt eine Erhöhung der Signalbandbreite und somit eine Verbesserung der Entfernungsauflösung. Eine Weiterentwicklung des klassischen SAR-Prinzips im Streifenmodus ist der sogenannte Spotlight-Modus. Durch Ausrichtung und Nachführung der Antenne auf einen Bereich der Szene erhöht sich die Integrationszeit und damit auch die Auflösung in Azimutrichtung. Mittels einer Signalbandbreite im Gigahertzbereich und durch Verwendung des Spotlight-Modus erzielen Experimentalsysteme wie PAMIR [24] von FGAN-FHR bereits eine geometrische Auflösung von etwa einem Dezimeter. Zukünftige Satellitensysteme, wie etwa Radarsat-2, TerraSAR und SAR-Lupe, sollen geometrische Auflösungen im Meterbereich erzielen.

Durch Analyse multitemporaler Interferogramme können Höhenänderungen erfaßt werden. Mit dieser sogenannten Differentiellen InSAR-Methode (D-InSAR) wurden Bodenabsenkungen, etwa aufgrund von Bergbautätigkeit oder Grundwasserentnahme, zentimetergenau gemessen [27].

In jüngster Zeit wurde vorgeschlagen, mehr als zwei Antennen im Einmalüberflugmodus zu verwenden beziehungsweise mehrere normale SAR-Bilder zu kombinieren, um die bestehenden Mehrdeutigkeiten der konventionellen InSAR-Messung, etwa in Layoverbereichen, zu überwinden [91], [93], [94]. Man spricht dann von Multi-Basislinien-tomographie. Anschaulich gesagt, wird eine zweite synthetische Apertur erzeugt, diesmal in z-Richtung. Dieser Ansatz ist noch in einem sehr experimentellen Stadium. Für die vorliegende Arbeit standen keine entsprechenden Daten zur Verfügung, es werden ausschließlich konventionelle SAR- und InSAR-Daten betrachtet.

2.7 Zusammenfassung

Fernerkundung mit SAR ist tageszeit- und wetterunabhängig. Es können rasch sehr große Geländeflächen erfaßt werden. Die erzielbare Auflösung hängt in Entfernungsrichtung von der Impulsbandbreite ab. Die Azimutauflösung ist von der Integrationszeit entlang der synthetischen Apertur begrenzt. Im Streifenmodus erreicht man eine Azimutauflösung von etwa der halben Antennenlänge. Die Auflösungszelle ist üblicherweise wesentlich größer als die Wellenlänge des Signals. Aufgrund des kohärenten Meßprinzips und der Vielzahl von Streuern in der Auflösungszelle ist das resultierende SAR-Signal als stochastischer Prozeß bekannter Verteilung zu betrachten. Durch den Speckle-Effekt wirken SAR-Bilder sehr körnig. Die Speckle-Reduktion sollte in den Originaldaten geschehen. Der in Seitensicht betriebene Sensor mißt den Radarrückstreuquerschnitt σ , der von Geländeeigenschaften wie Neigung zum Sensor, Rauigkeit und Materialart abhängt. Mittels polarimetrischer Auswertung lassen sich weitere Informationen über das Gelände ableiten. SAR-Sensoren eignen sich gut, um Bodennutzungsklassen zu bestimmen. Die seitliche Beleuchtung führt zu unerwünschten Phänomenen, die zu gestörten Meßwerten führen, wie z. B. Foreshortening, Layover, Abschattungen und dominanter Streuung. Im Zuge der Georeferenzierung können radiometrische Effekte zum Teil korrigiert werden.

Durch die Kombination von zwei oder mehr SAR-Messungen, die um eine Basislinie versetzt erfolgen, kann mittels interferometrischer Auswertung aus der Differenzphase die Geländehöhe bestimmt werden. Da es sich um die Differenz zweier rauschbehafteter Signale handelt, ist das SNR beider Messungen für die Genauigkeit der InSAR-Phase bestimmend. Die Kohärenz ist ein Maß für den lokalen Rauscheinfluß bei der Messung. Die Glättung der Phase ist ein Forschungsschwerpunkt in der Radarfernerkundung. Durch Mittelung von Phasenwerten, die Objekten gleicher Höhe zugeordnet sind, kann das Rauschen erheblich verringert werden. Die Schwierigkeit bei der Glättung liegt darin, nur jene Phasenwerte zu mitteln, die ohne Störung gleich wären. Eine Vorzugsrichtung des Phasen- und damit des Höhenfehlers ist aus der Fehlerbetrachtung nicht herleitbar. Da die Standardabweichung der Höhenmessung mit der Entfernung zunimmt, ist eine möglichst geringe Distanz zwischen Szene und Sensor günstig. Flugzeuggetragene Sensoren, die die SAR-Messungen gleichzeitig vornehmen, liefern die Daten mit der besten Höhenmeßgenauigkeit und der höchsten Ortsauflösung. Daher eignen sich derartige Sensoren am besten für Aufgaben, die einen hohen Detailgrad erfordern, wie die Detektion und Rekonstruktion von Gebäuden.

Kapitel 3

Gebäude in SAR- und InSAR-Daten

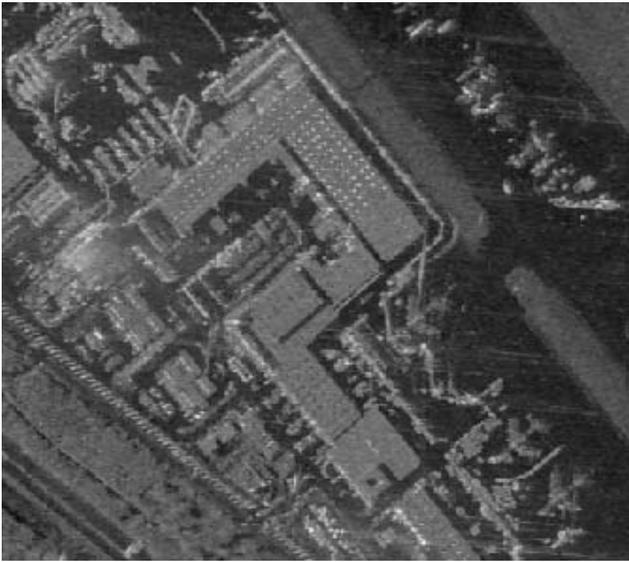
Thema dieses Kapitels sind die Auswirkungen des Sensorprinzips auf die Erfassung von urbanen Gebieten. Zunächst steht das Erscheinungsbild städtischer Objekte wie Gebäude und Straßen in SAR- und InSAR-Daten im Vordergrund. Die gemachten Aussagen bezüglich der InSAR-Betragsbilder gelten ebenso für konventionelle SAR-Betragsbilder. Der darauffolgende Abschnitt thematisiert die geometrischen Zusammenhänge hinsichtlich der Sichtbarkeit von Gebäuden in SAR-Bildern.

3.1 Ausprägung urbaner Objekte in InSAR-Daten

Die SAR-Abbildungsphänomene sind auch in InSAR-Daten präsent. Die typische Ausprägung von Gebäuden in InSAR-Daten soll anhand des in Abbildung 3.1 gezeigten Datensatzes erläutert werden. Dort sind die Betrags-, Höhen- und Kohärenzdaten einer Szene dargestellt, die das Gelände um ein großes Frachtabfertigungsgebäude am Frankfurter Flughafen umfaßt. Der Datensatz stammt vom AER-II-Sensor. Zum Vergleich zeigt Bild 3.1d ein Luftbild der Szene.

Um die Interpretation zu erleichtern, wurden die SAR-Daten auf ein Bodenraster mit einem Gitterabstand von einem Meter abgebildet. Die Transformation erfolgte ohne Berücksichtigung des InSAR-DOM, damit keine möglicherweise irritierenden Datenlöcher durch die Vorwärts-Transformation nach Gleichung 2.40 auftreten und Kanten geradlinig verlaufen. Der daraus resultierende Lagefehler spielt für die folgenden Betrachtungen keine Rolle. Die Szene wurde von links beleuchtet. Zwischen Flughafengelände und Autobahn links unten befindet sich ein Wäldchen. Die Asphaltflächen des Verkehrsnetzes des Flugplatzes werden durch Grasflächen getrennt. Anhand der Beispieldaten läßt sich für Daten mit dieser Qualität folgendes feststellen:

- Gebäude und Straßengrenzen sind häufig in den Intensitätsdaten deutlich erkennbar.
- An den dem Sensor zugewandten Gebäudewänden tritt grundsätzlich das Layover-Phänomen auf, wie in Abbildung 3.2 schematisch dargestellt. In diesem Layoverbereich überlagern sich Signalbeiträge vom Boden, von der Wand und vom Dach. Die entsprechenden



a) InSAR-Betrag



b) InSAR-DOM

c) Kohärenz (hell \equiv hoch)

d) Luftbild

Abbildung 3.1: Beispieldatensatz Frachtzentrum des Flughafens Frankfurt

Stellen erscheinen hell im Betragsbild. Durch Layover werden die Dächer zum Sensor hin abgebildet.

- Mehrfachreflexionen führen zu einer Abbildung hinter den tatsächlichen Ort, weil das Signal durch den längeren Weg scheinbar von dort stammt [119]. An freistehenden Gebäuden spannt die Gebäudewand mit dem davorliegenden Boden einen dihedralen Corner-Reflektor auf. Eine Beleuchtung senkrecht dazu hat eine Zweifachreflexion zum Sensor zurück zur Folge. Aufgrund der geometrischen Verhältnisse ist der durchlaufene Weg (und somit

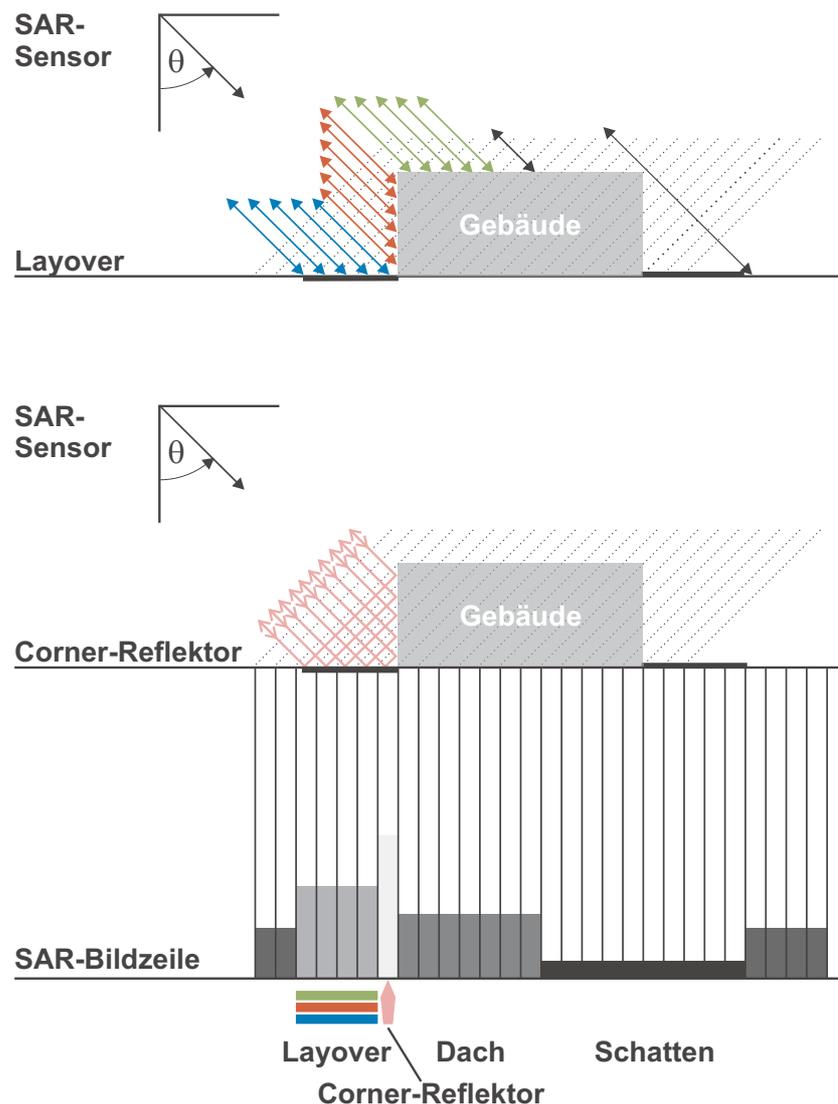


Abbildung 3.2: Phänomene an Gebäuden in SAR-Bildern

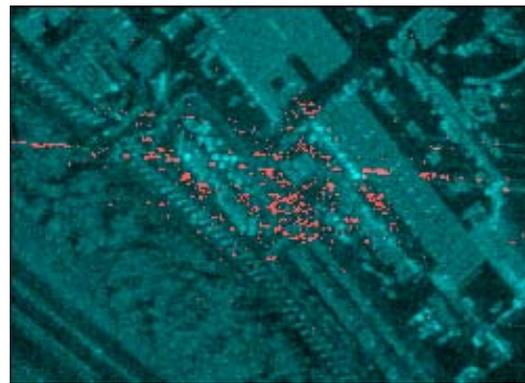
die Laufzeit) all dieser Signale identisch. Dadurch erfolgt eine Abbildung in dieselbe Entfernungszelle, was zu einem hellen Betragstreifen entlang der Fußpunkte des Gebäudes führt. Der helle Streifen liegt am Ende des Layoverbereichs (siehe Abbildung 3.2 unten).

- An parallel zur Flugrichtung ausgerichteten Giebel- oder Pultdächern findet eine spiegelnde Reflexion des Signals statt. Ähnlich wie bei der oben angesprochenen Zweifachreflexion an der Wand hat dies einen schmalen hellen Streifen im SAR-Bild in Azimutrichtung zur Folge. Dieser Streifen liegt näher zum Sensor als der des Corner-Reflektors. In polarimetrischen SAR-Daten können die beiden Effekte voneinander getrennt werden, da sich die Anzahl der Streuereignisse unterscheidet. Die Rückstreuung am Dachfirst sowie an Regenrinnen und Schneerückhaltegittern an den Dachrändern kann ebenfalls zu deutlich sichtbaren hellen Streifen im SAR-Bild führen.

- Gebäudefassaden sind häufig nicht völlig glatt, sondern rau; zudem variieren Material und Tiefe, etwa an Fenstern und Balkonen. Daher kann es auch an Gebäudewänden, die nicht direkt zum Sensor weisen, zu starker Rückstreuung kommen, wie man in Bild 3.1a an den Gebäuden im unteren Bereich gut erkennt.
- InSAR-Betrag und Kohärenz sind stark korreliert. Flächen mit geringem Signalbetrag weisen meist auch niedrige Kohärenz und damit verrauschte Höhenwerte auf. Es gibt aber Fälle, bei denen trotz hoher Signalleistung die Messung unzuverlässig ist. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn der Sensor durch starke Rückstreuung in die Sättigung gerät, was unbrauchbare Phasenmessungen zur Folge hat. Abbildung 3.3a zeigt einen Ausschnitt des Betragskanals von Bild 3.1. Es sind dominante Streuer auf Gebäudedächern vorhanden, die ihre Umgebung überstrahlen. In 3.3b sind dem Betragsbild in Rot Stellen mit relativ hohem Betrag und geringer Kohärenz überlagert. Man erkennt, daß vor allem die Überstrahlungsbereiche betroffen sind. Allerdings werden sie nicht vollständig erfaßt. Bei den fehlenden Bereichen sind vermutlich beide Messungen in ähnlicher Weise gestört, wodurch der geschätzte Kohärenzwert hoch wird.



a



b

Abbildung 3.3: a) InSAR-Betrag, b) Bereiche hohen Betrags und kleiner Kohärenz (rot)

- An der vom Sensor abgewandten Gebäudeseite wird dahinterliegendes Gelände verdeckt. Da aus dem verdeckten Bereich kein Signal zurückgestreut wird, erscheinen die entsprechenden Flächen im Betragsbild dunkel.
- Asphaltierte Flächen, wie Straßen und Parkplätze, erscheinen ebenfalls dunkel im Betragsbild, weil das Signal weitgehend vom Sensor wegreflektiert wird.
- Da es sich um stationäre Objekte handelt, ist die Kohärenz an Gebäuden häufig sehr hoch ($|\gamma| > 0.9$); das gilt allerdings auch für Layoverbereiche.
- Die Grasflächen und das Wäldchen sind im Betragskanal gut erkennbar. Ihre Kohärenz ist im Normalfall etwas geringer als die von Gebäuden. Das liegt zum Beispiel an der Bewegung des Laubes und der Grashalme durch Wind während der Integrationszeit über die synthetische Apertur, die viele Sekunden betragen kann.

wegen Bäumen keine Zweifachreflexion statt. Das Beispiel verdeutlicht, daß von den drei Merkmalen Layover, Schatten und Zweifachreflexion das zuletzt genannte am wenigsten zuverlässig auftritt. Dies liegt zum einen an der starken Abhängigkeit vom Beleuchtungsaspekt und zum anderen an der Unterbrechung des Signalwegs durch vorgelagerte kleinere Objekte.

In Abbildung 3.5a sind die vom Layovereffekt beeinträchtigte Bereiche des Bodens und des Daches für ein flaches Gebäude dargestellt. Der betroffene Abschnitt am Boden l_b kann bei gegebener Höhe unmittelbar aus dem Beleuchtungswinkel abgeleitet werden:

$$l_b = h \cdot \cot(\theta). \quad (3.1)$$

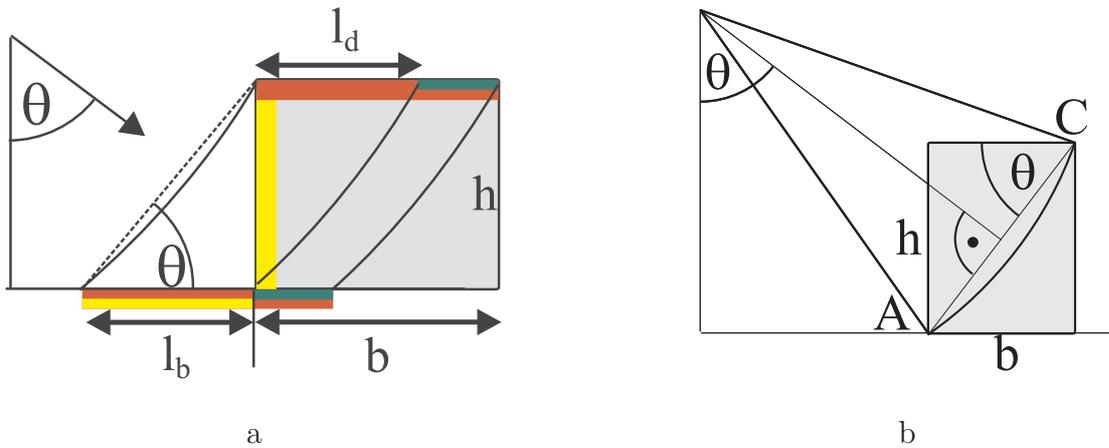


Abbildung 3.5: a) Layover an Boden und Dach b) Grenzfall für Layover am Dach

Die Ausdehnung des Layoverbereiches auf dem Dach l_d hängt zusätzlich von der Gebäudebreite ab. Mit Breite ist hier die Strecke entlang des Schnittes durch das Gebäude in Abbildung 3.5a gemeint. In Abbildung 3.5b ist der Grenzfall dargestellt, bei dem durch Layover das Meßsignal der gesamten Dachfläche durch gleich weit vom Sensor entfernte Signale von der Wand und dem Boden verfälscht wird. Dies ist dann der Fall, wenn die Punkte A und C in der Entfernungsgometrie zusammenfallen. Bei gegebenem Beleuchtungswinkel θ tritt, bezogen auf die Höhe h und Breite b eines Gebäudes, dieser Grenzfall ein, wenn gilt:

$$h = b \cdot \tan(\theta). \quad (3.2)$$

In Abbildung 3.6 sind drei Fälle für Flachdachgebäude gleicher Breite und unterschiedlicher Höhe dargestellt:

- In Bild 3.6a gilt $h < b \cdot \tan(\theta)$. Abgesehen von einem vorderen Layoverbereich (rot) ist eine unverfälschte Dachrekonstruktion möglich (grüner Bereich). Durch die Signalmischung im Layoverbereich entsteht dort in den Höhendaten häufig ein Bereich mittlerer Höhe, der wie eine dem eigentlichen Gebäude vorgelagerte Veranda wirkt (*Front-Porch-Effekt* [15]).
- Ab dem oben angesprochenen Grenzfall ($h = b \cdot \tan(\theta)$) ist eine Rekonstruktion aus den InSAR-Höhenwerten nicht mehr möglich (Bild 3.6b). Das betrifft natürlich ebenfalls noch höhere Gebäude, für die gilt $h > b \cdot \tan(\theta)$, wie in Abbildung 3.6c illustriert.

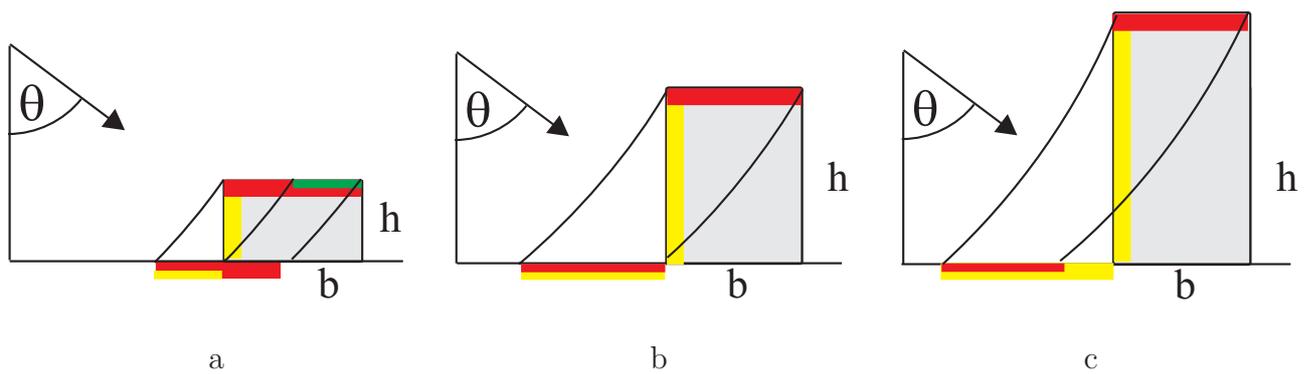


Abbildung 3.6: Gebäude gleicher Breite und unterschiedlicher Höhe

Bei gegebener Gebäudebreite wird also die InSAR-Höhenmessung mit zunehmender Gebäudehöhe kritisch, wenn nicht gar unmöglich. Umgekehrt kann man fragen, welche Mindestbreite Gebäude einer gewissen Höhe h haben müssen, damit eine Dachrekonstruktion bei einem Beleuchtungswinkel θ möglich ist. Dies ist in Bild 3.6 für drei Fälle dargestellt.

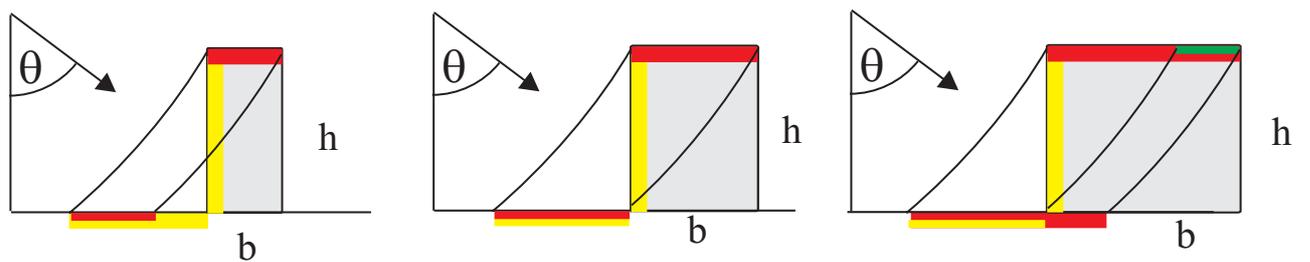


Abbildung 3.7: Gebäude gleicher Höhe und unterschiedlicher Breite

Bei anderen Dachformen als Flachdächern gewinnt die gewählte Beleuchtungsrichtung an Bedeutung. Es ist zum Beispiel unter Umständen durchaus möglich, daß im SAR-Bild die Fläche eines Giebeldaches *überhaupt nicht sichtbar* ist. In Abbildung 3.8a ist der ungünstigste Fall schematisch dargestellt, bei paralleler Ausrichtung von Gebäude und Flugbahn, wenn der Beleuchtungswinkel θ gleich dem Dachneigungswinkel ist. An der dem Sensor zugewandten Dachseite findet eine spiegelnde Reflexion des Signals statt, wodurch diese Dachhälfte als sehr heller schmaler Streifen in Azimutrichtung erscheint. Die andere Dachhälfte liegt vollständig im Schatten. Die Verhältnisse wären günstiger bei einer um 90° versetzten Beleuchtung des Gebäudes. Die Flächennormale des Giebeldaches des Schloßflügels (Abbildung 3.8b) weist fast direkt zum Sensor. Im daneben gezeigten SAR-Bild erkennt man den entsprechenden hellen Streifen auf der vorgelagerten Terrasse. Der dahinterliegende helle Streifen des Corner-Reflektors am Fußpunkt ist noch etwas stärker ausgeprägt. Teile der hinteren Dachhälfte sind vom Sensor aus gerade noch sichtbar, insbesondere die Aufbauten, daher ist das SAR-Bild dort nicht völlig dunkel. Interessant ist auch der deutliche Layover-Versatz des Turmes links oben.

Da in Gleichung 3.1 der Kotangens des Beleuchtungswinkels θ eingeht, erscheint ein möglichst großes θ für die Dachrekonstruktion vorteilhaft. Andererseits ist zu beachten, daß mit steigen-

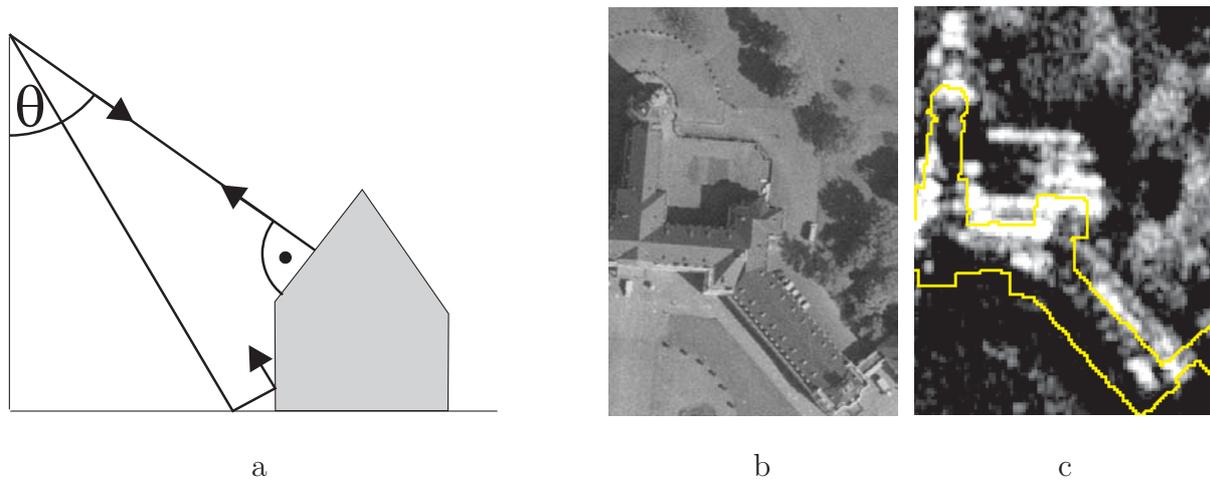


Abbildung 3.8: a) Spiegelnde Reflexion und Mehrfachreflexionen an einem Gebäude mit Giebeldach, b) Luftbild, c) SAR-Bild überlagert mit Grundrissen

dem Winkel θ die Abschattungsgebiete wachsen. Bei ebenem Gelände gilt für die Länge s_b (Bild 3.9) des von einem freistehenden Gebäude mit der Höhe h geworfenen Schattens:

$$s_b = h \cdot \tan(\theta). \quad (3.3)$$

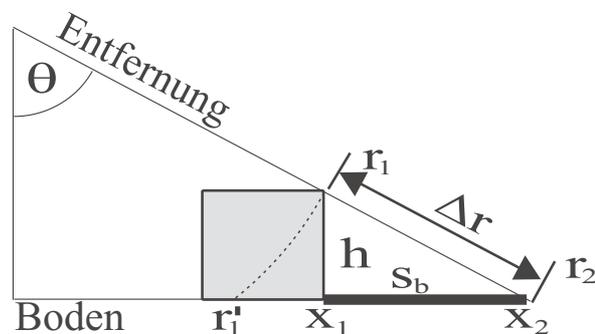


Abbildung 3.9: Abschattung hinter einem Gebäude

Zur Verdeutlichung der Auswirkung der gegenläufigen Effekte sind in Tabelle 3.1 die Ausdehnungen der Layover- und Schattenbereiche (Gleichungen 3.1 und 3.3) an einem 20 m hohen Gebäude für verschiedene Beleuchtungswinkel θ aufgeführt.

Winkel θ	25°	35°	45°	55°	65°
Layover	42.9 m	28.6 m	20 m	14 m	9.3 m
Schatten	9.3 m	14 m	20 m	28.6 m	42.9 m

Tabelle 3.1: Ausdehnung von Layover- und Schattenbereichen für ein 20 m hohes Gebäude

Der Beleuchtungswinkel θ nimmt über die Streifenbreite in Entfernungsrichtung vom Nah- zum Fernbereich zu. Wie man der Tabelle entnehmen kann, verdoppelt sich z. B. die Schattenlänge des Gebäudes für eine Winkeländerung zwischen 35° und 55° entlang des Streifens.

Die Ausdehnung der Abschattung Δr hinter einem Gebäude in der Entfernungsgeometrie ist länger als der verdeckte Boden s_b , da Δr die Hypotenuse des rechtwinkligen Dreiecks ist, dessen Schenkel von Gebäudehöhe h und s_b gebildet werden (Abbildung 3.9). Die Höhe h kann man direkt aus Δr und dem lokalen Wert des Winkels θ berechnen:

$$h = \Delta r \cdot \cos(\theta). \quad (3.4)$$

Bei einer einfachen Projektion auf die Bodenebene mit $x = r \cdot \sin(\theta)$ käme Punkt r_1 an die Stelle r'_1 zu liegen. Der Punkt r_2 wird richtig abgebildet, da er auf dem Boden liegt. Ausgehend von diesem Punkt kann man die tatsächliche Position x_1 der hinteren Gebäudewand in der Bodengeometrie bestimmen:

$$x_2 = r_2 \cdot \sin(\theta), \quad (3.5)$$

$$x_1 = x_2 - \Delta r \sin(\theta). \quad (3.6)$$

Aus der Schattenlänge ist also sowohl die Position der Wand als auch die hintere Gebäudehöhe ableitbar. Falls der Schattenbereich durch dahinterliegende Objekte verkürzt wird und das unerkannt bleibt, führt dieses Verfahren zur Unterschätzung der Höhe und zur falschen Positionierung der Wand. Ein weiteres Problem ist die Unterscheidung von Schatten und Straßen, weil beide sich sehr ähnlich in den SAR-Bildern ausprägen.

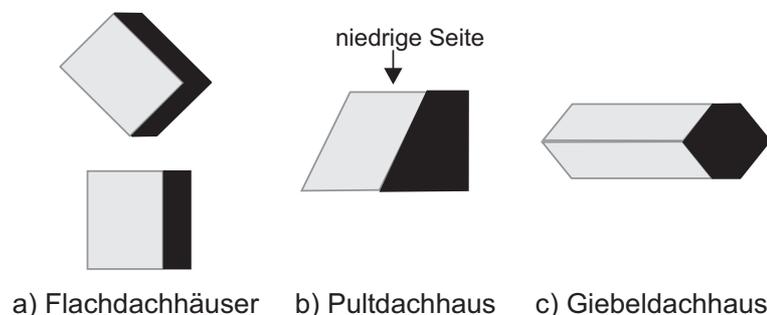


Abbildung 3.10: Form des Radarschattens hinter Gebäuden bei Beleuchtung von links

Aus der Form des Schattens kann somit auf die Struktur erhabener Objekte zurückgeschlossen werden [88]. In Abbildung 3.10 ist dieser Sachverhalt für drei unterschiedliche Gebäudemodelle bei einer Beleuchtung von links schematisch dargestellt. Streifen- oder L-förmige Schatten sind typisch für Flachdachgebäude. Bei Pultdach- oder Giebeldachhäusern können bei seitlicher Beleuchtung (entlang der Schmalseite) auch trapezartige beziehungsweise sechseckige Formen auftreten. Für die beiden letztgenannten Gebäudetypen ist dieser Idealfall dargestellt. Bei einer Beleuchtungsrichtung entlang der Breitseite (entspricht oben oder unten in Bild 3.10) hingegen würden ebenfalls Schatten in Streifenform auftreten.

Layover- und Schattenbereiche können auch benachbart auftreten oder zusammenfallen. In Bild 3.11b ist eine solche Situation illustriert: zwei Gebäude sind in Entfernungsrichtung direkt

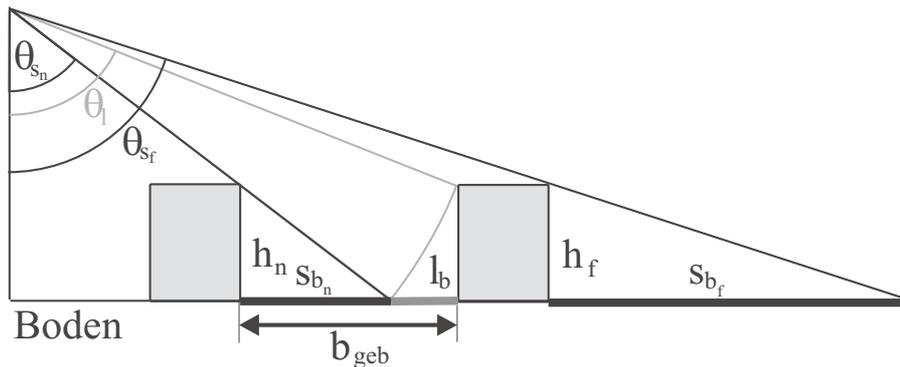


Abbildung 3.11: Abschattung und Layover in Straßenschluchten

hintereinander angeordnet. In die Fläche zwischen den beiden Gebäuden fällt der Schatten vom vorderen und das Layover vom hinteren Haus.

Ein Signal von einem Objekt zwischen den Gebäuden kann nur dann unverfälscht gemessen werden, wenn es sich hinter dem Schatten- und vor dem Layoverbereich befindet. Ein solcher ungestörter Bereich tritt auf, wenn die Distanz der Gebäude b_{geb} der Bedingung genügt:

$$b_{geb} > s_{b_n} + l_b = h_n \cdot \tan(\theta_{s_n}) + h_n \cdot \cot(\theta_l). \quad (3.7)$$

Eine Abschätzung unter den Annahmen gleicher Gebäudehöhen $h_n = h_n = 20$ m und näherungsweise gleichem Beleuchtungswinkel $\theta_{s_n} \approx \theta_l = 45^\circ$ ergibt eine Mindestdistanz b_{geb} von 40 m zwischen den beiden Gebäuden.

3.2.1 Auswirkungen auf die Höhenmessung

Die im letzten Abschnitt untersuchten Phänomene beeinflussen selbstverständlich auch die InSAR-Höhenmessung. Der Einfluß von Mehrfachreflexion auf die InSAR-Differenzphase ist schwer modellierbar und wird hier nicht weiter betrachtet. In Schattenbereichen ist die InSAR-Phase die Differenz zweier Rauschsignale und daher unbrauchbar. Diese Bereiche müssen von der Höhenbestimmung ausgeschlossen werden. Auch Layover hat ungünstige Auswirkungen auf InSAR. Besonders interessant ist der bereits erwähnte Front-Porch-Effekt an den sensornahen Gebäudewänden und Dachbereichen. Wie in Abbildung 3.12 dargestellt, tritt dort bei beiden SAR-Messungen S_1 und S_2 Layover auf. Die entsprechenden Phasenwerte resultieren jeweils aus der Überlagerung mehrerer Signale. Durch den unterschiedlichen Blickwinkel sind die überlagerten Signale der beiden Messungen verschieden: Die in Bild 3.12 für S_1 zusammenfallenden Signale von Dach, Wand und Boden werden für S_2 in anderen Entfernungen gemessen.

In Abbildung 3.13a,b sind LIDAR- und InSAR-Höhendaten desselben Flachdachgebäudes dargestellt. Die Schnitte entlang der gelben Linie sind in Bild 3.13c aufgetragen. Die Beleuchtung des Gebäudes erfolgte bei der InSAR-Messung von oben. Erkannte Schattenbereiche sind schwarz dargestellt. Die nach der Vorwärtstransformation auftretenden Datenlöcher wurden ansonsten durch Interpolation ergänzt. Man erkennt deutlich die Auswirkung der Mischung der Signale durch Layover an der Vorderseite des Gebäudes. Bei der Ermittlung der Gebäudehöhe ist es daher sinnvoll, die vorderen Bereiche nicht zu berücksichtigen.

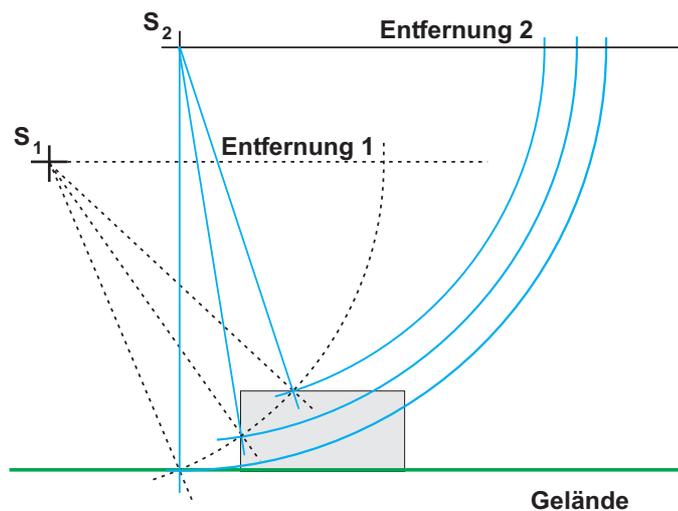


Abbildung 3.12: Unterschiedliches Layoververhalten der beiden Messungen

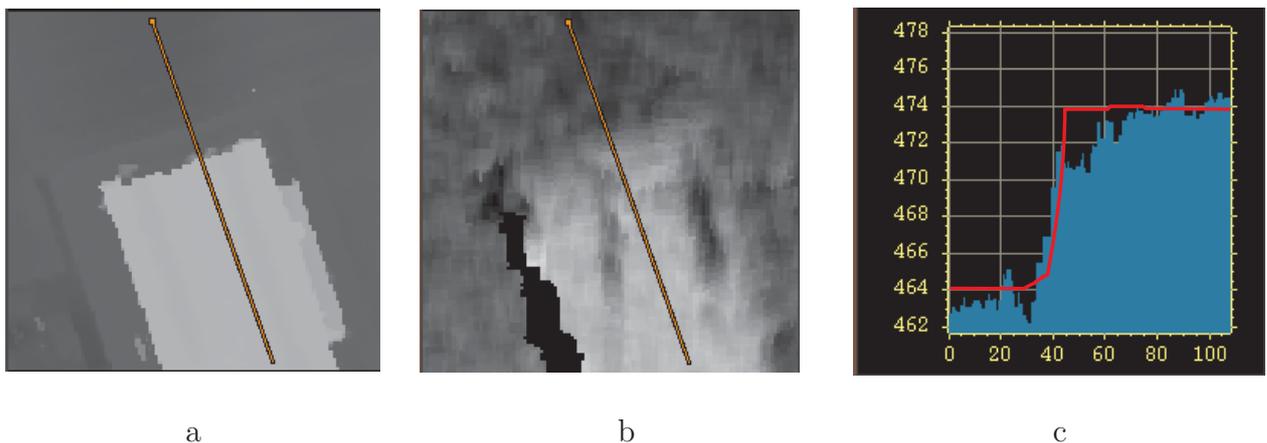


Abbildung 3.13: Flachdachgebäude in a) LIDAR, b) InSAR-Daten, c) Höhenwerte entlang der gelben Linie: LIDAR in Rot und InSAR in Blau

3.3 Schlußfolgerungen

Die obigen Ausführungen zeigen, daß bei gegebener Szene die Erkennbarkeit von Gebäuden in SAR-Daten stark vom gewählten Beleuchtungswinkel und -aspekt abhängt. Dies sollte im Zuge der Planung einer Meßkampagne berücksichtigt werden, etwa indem die Vorzugsrichtung der Gebäude aus Karten abgeleitet wird. Falls detaillierte 3D-Stadtmodelle vorliegen, könnte auch die Ausrichtung von Giebeldächern Berücksichtigung finden.

Schatten- und Layoverbereiche sowie Mehrfachausbreitung und spiegelnde Reflexionen prägen sich deutlich in den Daten aus. Diese Phänomene können daher bei der Bildanalyse detektiert und für eine Gebäudeerkennung ausgewertet werden. Hinweise auf die Dachstruktur können sowohl aus den InSAR-Höhenwerten als auch anhand der SAR-Betragsdaten gewonnen werden. Im letzteren Fall ist vor allem die Gestalt der Radarschatten von Interesse.

Kapitel 4

Simulation urbaner Szenen

Wie gezeigt wurde, hängt die SAR-Abbildung vor allem von der Geländetopographie und den Materialeigenschaften ab. Unter Verwendung von DOM und Karten kann diese Abhängigkeit simuliert werden. Im Folgendem werden, aufeinander aufbauend, einige Möglichkeiten vorgestellt:

- Die Detektion von Layoverbereichen und verdeckten Flächen.
- Die Simulation eines SAR-Betragsbildes.
- Die Detektion von Orten möglicher starker Rückstreuung.
- Die Simulation der InSAR-Phasendifferenz.

Im Rahmen dieser Arbeit dienen Simulationen verschiedenen Zwecken. In diesem Kapitel soll untersucht werden, von welchen Szenenbereichen mit einer oder mehreren SAR-Messungen brauchbare Signale zu erwarten sind. Daraus läßt sich abschätzen, in welchem Umfang eine Detektion und Rekonstruktion von Gebäuden bestenfalls möglich ist. Simulationen sind auch Bestandteil der in Kapitel 5 vorgestellten iterativen Verfahren zur Gebäudeerkennung. Die Resultate des vorausgehenden Iterationsschritts dienen dort als Grundlage für eine Simulation, und durch Vergleich mit den realen Daten sollen Abweichungen sukzessive beseitigt werden.

4.1 Referenzdaten für die Simulation

Die Betrachtungen in diesem Kapitel basieren auf Höhenmodellen sowie thematischen Vektordaten aus einem GIS [6] als Referenz.

4.1.1 Höhenmodelle

Die Ortsauflösung und Höhengenaugigkeit der verwendeten Referenz sollte an die SAR-Daten angepaßt sein. Im Falle von Satellitendaten genügen relativ grobe Modelle, wie etwa DTED-2

(30 m Raster). Eine Simulation ist in einem solchen Fall auf den Makromaßstab beschränkt. Die zunehmend verbesserte Auflösung der Sensorsysteme erfordert entsprechend detailliertere Höhenmodelle. Insbesondere in urbanem Gelände genügt die alleinige Berücksichtigung des Geländeverlaufs nicht mehr, sondern es muß auch der Mesomaßstab mit Bauten und Bewuchs repräsentiert sein. CAD-Vektordaten, wie etwa 3-D Stadtmodelle, beschränken sich meist auf die Bauten. Sie bieten aber dafür die Möglichkeit, die Orte von Mehrfachreflexionen zu bestimmen, indem man die Ausrichtung der Objektflächen zum Sensor auswertet. Da auch in dichtem urbanem Gebiet häufig nennenswerte Flächen mit natürlichem Bewuchs bedeckt sind, wie etwa Bäumen und Büschen, führt deren Vernachlässigung zu einer zu optimistischen Schätzung des mit SAR unverfälscht meßbaren Anteils der städtischen Szene. In dieser Arbeit werden daher sowohl hochaufgelöste LIDAR-DOM [79] als auch daraus abgeleitet Vektormodelle [111] als Referenzdaten für die Simulationen verwendet.

Die untersuchten SAR-Daten wurden im kurzwelligen X-Band ($\lambda = 3$ cm) gemessen. Für die Simulation kommen daher *First-Pulse*-LIDAR-Daten in Frage, deren Streuung an Bäumen, wie beim Radarsignal, weitgehend an Geäst und Belaubung erfolgt. Im Falle langwelligeren Radars, z. B. dem P-Band ($\lambda = 70$ cm), bietet sich die Verwendung von *Last-Pulse*-Daten an. Die beiden LIDAR-Modi sind in Bild 4.1a,b am Beispiel des Architekturgebäudes der Universität Karlsruhe illustriert. Bild 4.1c zeigt ein aus den LIDAR-Daten erzeugtes Vektormodell.

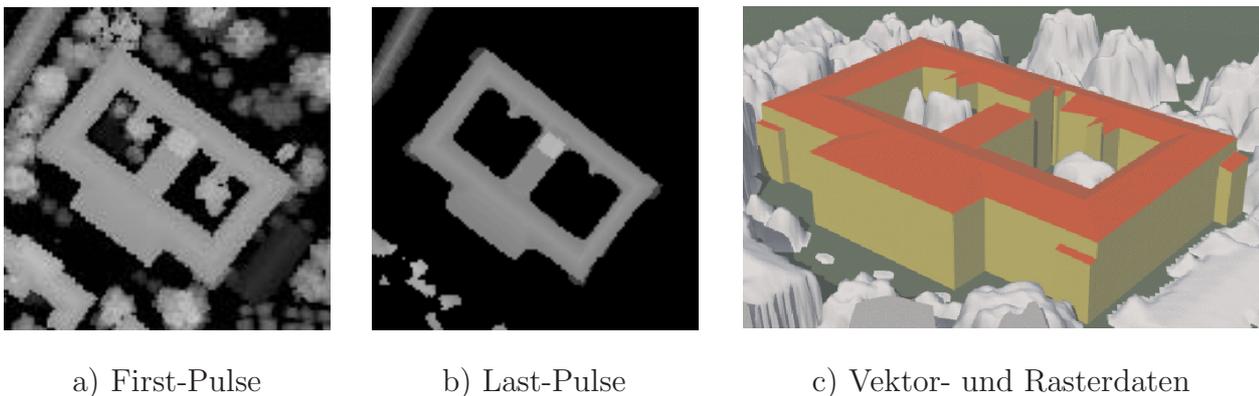


Abbildung 4.1: Höhendaten in Raster- (LIDAR-DOM) und Vektorrepräsentation

4.1.2 Thematische Vektordaten

Im Zusammenhang mit der Gebäuderekonstruktion sind neben den Gebäuden die Straßen von Interesse. Ein GIS ermöglicht den Zugriff auf entsprechende thematische Vektordaten.

Die thematische Information dient zur Berücksichtigung der in Abschnitt 2.3.2 dargelegten Abhängigkeit der Rückstreuung vom Material. Weil die Radarrückstreuung von vielen Parametern abhängt, kann die Modellierung der Materialeinflüsse im Mikromaßstab nur grob erfolgen. Sie ist daher auf einfache Fälle beschränkt, wie etwa die geringe Rückstreuung von Asphaltstraßen.

4.2 Bestimmung von Layover und Verdeckungen

Durch Vorgabe von Sensortrajektorie und -orientierung ist es möglich, anhand eines DOM Layover- und Schattenbereiche zu bestimmen. Dazu wurde ein *inkohärentes* Verfahren nach Meier *et al.* [80] implementiert. Das bedeutet, daß der reale SAR-Prozeß vernachlässigt wird und eine Abtastung des DOM mit einem Strahl erfolgt. Diese Vereinfachung ist vertretbar für die hier durchgeführte Abschätzung der Einflüsse der Beleuchtungsrichtung und der Szenengeometrie auf die Sichtbarkeitsverhältnisse sowie die Signalqualität.

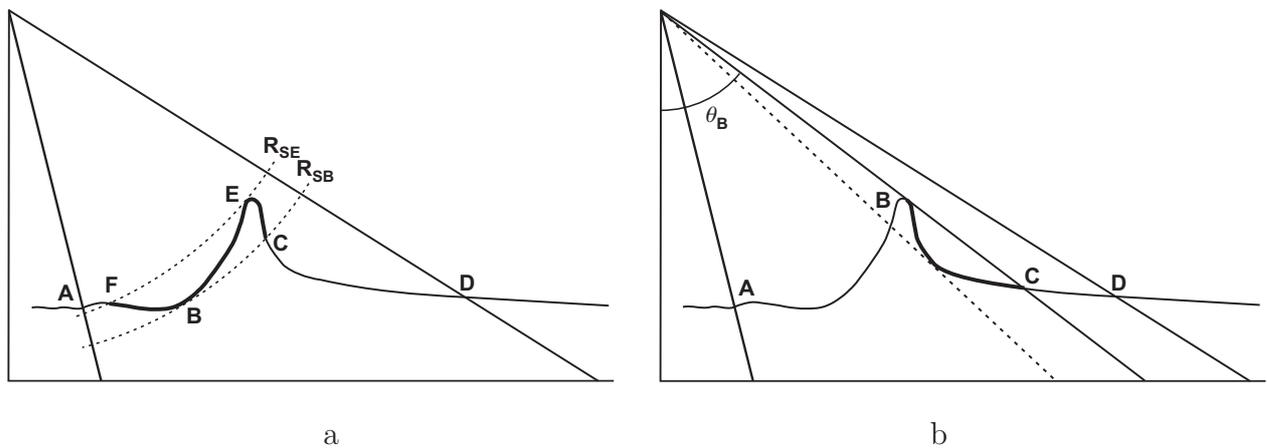


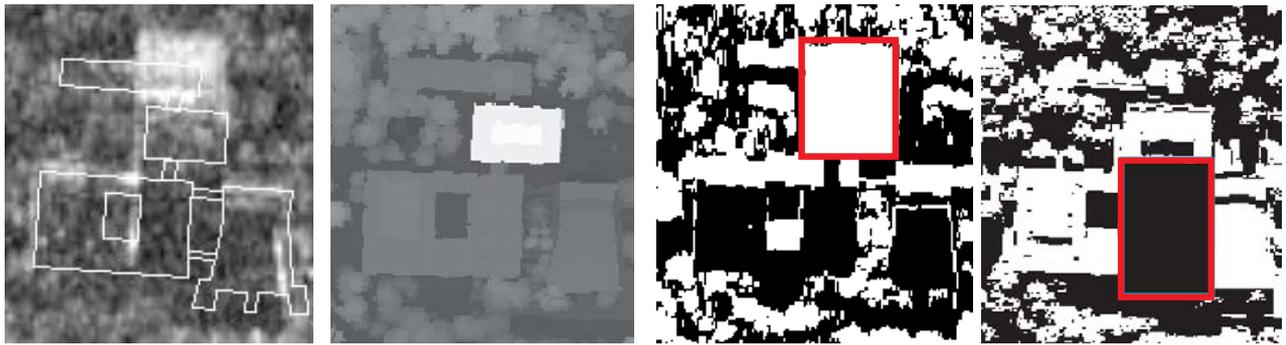
Abbildung 4.2: Segmentierung von a) Layover, b) Abschattungen (nach [80])

Zunächst erfolgt eine Transformation des DOM in das Raster der SAR-Daten in der Boden-geometrie. Die Suche erfolgt anschließend entlang der Zeilen in Entfernungsrichtung. In einem ersten Durchlauf, beginnend mit der geringsten Entfernung, werden der Beleuchtungswinkel und die Entfernung bestimmt. Layover liegt vor, sobald die Entfernung abnimmt, verglichen mit den davorliegenden Punkten. Im ersten Durchlauf kann so der Bereich von Punkt *B* nach Punkt *C* in Bild 4.2a als Layover detektiert werden. Der zweite Durchlauf startet am fernen Ende der Entfernungszeile. Nun tritt Layover auf, falls die Entfernung wieder zunimmt, wie zwischen den Punkten *E* und *F*. Im Beispiel wäre somit der gesamte Bereich zwischen *F* und *C* von Layover betroffen. Für den Bereich zwischen *E* und *C* trifft dies aber wegen der Abschattung gar nicht zu. Dieser Fehler wird im Zuge der im Folgenden beschriebenen Schattendetektion behoben.

Solange der Beleuchtungswinkel θ im ersten Durchlauf zunimmt, tritt keine Abschattung auf, wie im Bereich von Punkt *A* bis zum Punkt *B* in Abbildung 4.2b. Am Punkt *B* liegt ein lokales Maximum des Beleuchtungswinkels vor. Der gesamte dahinterliegende Bereich bis Punkt *C* liegt im Schatten von *B*, da dort der Winkel kleiner ist als das bisherige Maximum ($\theta \leq \theta_B$).

Die Vorgehensweise soll wieder anhand des Beispiels des Physikhochhauses der Universität Karlsruhe gezeigt werden. Zur Verdeutlichung wurde dem SAR-Bild (Bild 4.3a) das LIDAR-DOM (Bild 4.3b) gegenübergestellt. Die vom Hochhaus verursachten Layover- und Schattenbereiche sind in den Abbildungen 4.3c,d rot unterlegt.

Das Verfahren wurde für das gesamte Testgebiet durchgeführt [105]. In Abbildung 4.4a ist das DOM der Szene dargestellt, überlagert mit Straßenzügen und Gebäudegrundrissen. Die



a) SAR-Bild

b) DOM

c) Layover (weiß)

d) Schatten (schwarz)

Abbildung 4.3: Bestimmung von Layover- und Schattenbereichen mittels DOM

Layover- und Schattenbereiche sind in Bild 4.4b abgebildet, wobei Mischbereiche (Layover *und* Schatten) gesondert berücksichtigt wurden.

Wie erwartet, finden sich die ungestörten Meßwerte im sensorfernen Bereich der Dächer, während vorne ein Layoversaum zu beobachten ist. Wie man am Beispiel des Physikhochhauses sieht, kann durch Layover eines hohen Gebäudes der hintere Teil eines davorliegenden Daches beeinflusst werden, der ansonsten unverfälscht meßbar wäre. In Tabelle 4.1 ist das Resultat der Analyse zusammengefaßt.

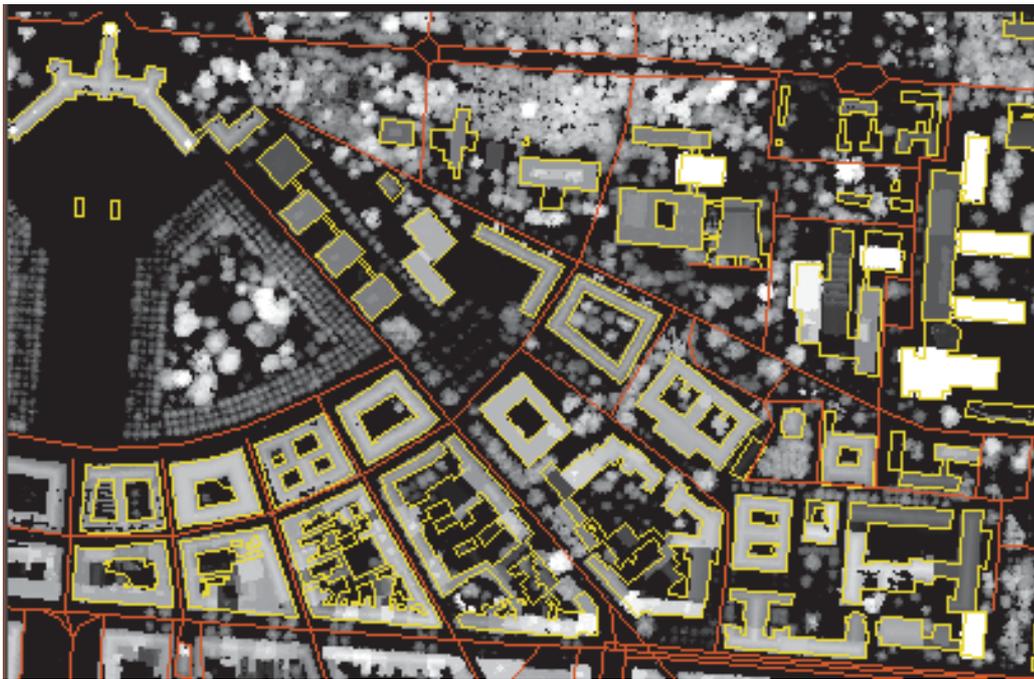
	ganze Szene	Gebäude	Straßen
Abschattung	28%	16%	38.5%
Layover	25%	33.5%	18.5%
Mischbereich	19%	7.5%	23.5%
Ungestört	28%	43%	19.5%

Tabelle 4.1: Anteile der problematischen und zuverlässigen Messungen

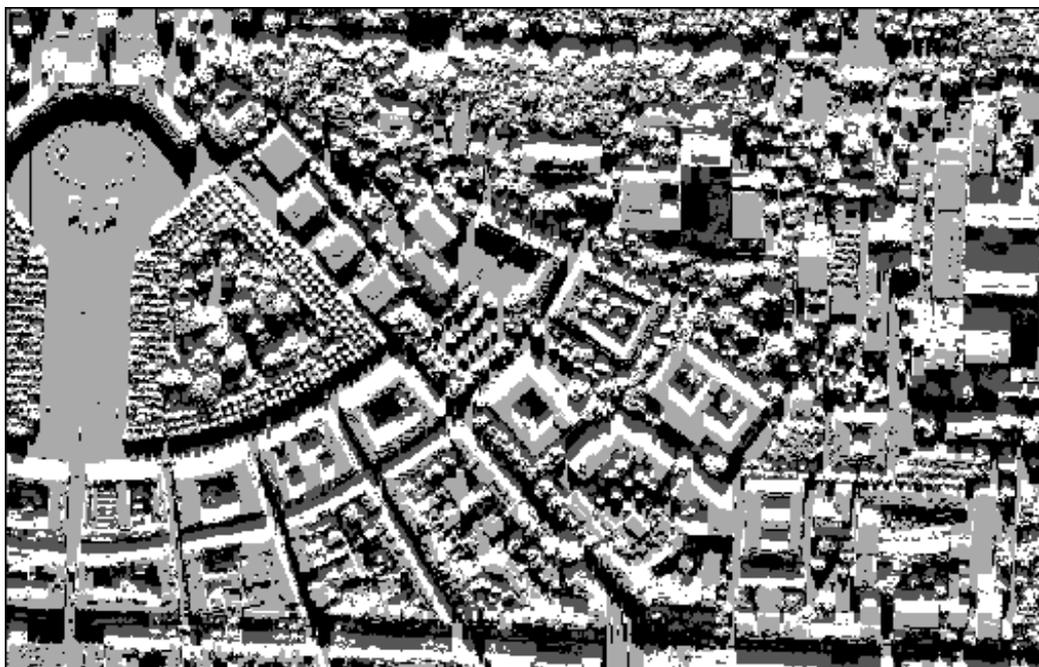
Unter Berücksichtigung der Mischbereiche sind 41% der Dächer von Layover beeinflusst. Interessant ist auch der mit insgesamt 23.5% (Abschattung und Mischbereich) beachtliche Anteil der abgeschatteten Dachflächen. Der geringere Teil davon ist auf vom Sensor abgewandte Giebel- und Dachflächen zurückzuführen; vielmehr stammt das Gros von Verdeckung durch davorliegende höhere Gebäude. Nur etwa 43% der Dachfläche und 19.5% der Straßen sind mit dieser SAR-Messung ungestört erfaßbar.

4.2.1 Gewinn durch Auswertung von Multiaspekt-Daten

Um das Potential einer Auswertung von Multiaspekt-Daten zu prüfen, wurde die Analyse mit anderen Werten von Aspekt- und Beleuchtungswinkel systematisch wiederholt [107]. Es erfolgten insgesamt 648 Simulationen, unter Variation des Aspektwinkels in 72 Schritten von je 5° und des Beleuchtungswinkels θ , ebenfalls mit 5° Inkrement von 30 bis 70 Grad. Anschließend wurden



a) LIDAR-DOM überlagert mit Gebäudegrundrissen (gelb) und Straßen (rot)



b) Layover (weiß), Schatten (schwarz), Layover und Schatten (dunkel), ungestört (hellgrau)

Abbildung 4.4: Bestimmung von Bereichen problematischer und zuverlässiger Meßwerte

die günstigsten Kombinationen von zwei, drei und vier Messungen bestimmt. Die günstigste Kombination ist jene, die die sichtbare Fläche von Dächern oder Straßen maximiert, wobei die entsprechenden Orte aus mindestens einer Richtung sichtbar sein müssen.

Es zeigte sich, daß für die Gebäude die besten vier Aspektrichtungen genau den vier Himmelsrichtungen entsprechen, in der Reihenfolge Osten, Norden, Westen und Süden, mit jeweils 60 Grad Beleuchtungswinkel. Dies ist bemerkenswert, weil in der Testszene einige Gebäude schräg dazu orientiert sind. Das reale SAR-Bild wurde aus Norden mit 57 Grad Beleuchtungswinkel erzeugt und entspricht damit fast dem Optimum. Das Resultat für die Kombination der beiden besten Richtungen aus Osten und Norden ist in Tabelle 4.2 aufgeführt. Interessanterweise sind dies auch hinsichtlich der Straßen die besten Richtungen, allerdings mit einem Beleuchtungswinkel von jeweils 45 Grad. Um die Tabelle übersichtlich zu halten, wurde an einigen Stellen das Zusammentreffen von Layover und/oder Schatten zu einem Mischbereich X zusammengefaßt.

	ganze Szene		Gebäude		Straßen	
S_O, S_N	8.6%	52.3%	8.6%	28.2%	6.3%	53%
L_O, L_N	9.4%		4.6%		8.7%	
X_O, X_N	34.3%		15%		38%	
Z_O, X_N	14.4%	47.7%	24.6%	72.8%	26%	47%
X_O, Z_N	19.7%		21.2%		13%	
Z_O, Z_N	13.6%		27%		8%	

Tabelle 4.2: Kombination zweier Messungen aus Osten (O) und Norden (N): Schatten (S), Layover (L), Mischung von Schatten und/oder Layover (X) und zuverlässiger Bereich (Z)

Durch die zusätzliche zweite Messung sind nun mehr als 70% der Dachflächen, zumindest aus einer Ansicht, zuverlässig meßbar und immerhin gut ein Viertel in beiden Ansichten. Wegen der orthogonalen Beleuchtungsrichtungen ist der Anteil des vollständig verdeckten Bereichs mit 8.6% gering. In Tabelle 4.3 sind die Flächen der erfaßten Dächer und Straßen für verschiedene Anzahlen kombinierter Richtungen dargestellt. Die Werte für die günstigste einzelne Messung ergeben sich aus der Tabelle 4.2. Bei den Straßen sind die dritt- und viertbesten Richtungen entlang der diagonalen Straße von Südosten gesehen bzw. von Westen nach Osten. Selbst bei Kombination der vier besten Richtungen wäre weniger als zwei Drittel der Straßenfläche einsehbar. Der Gewinn durch weitere Messungen nimmt jeweils mit steigender Anzahl ab.

Richtungen	1	2	3	4
Erfaßte Dachfläche	51.6%	72.8%	81.5%	86.5%
Erfaßte Straßenfläche	39%	47%	55.6%	62%

Tabelle 4.3: Maximaler Anteil der erfaßten Dachfläche aus einer, zwei, drei und vier Richtungen

Die Ergebnisse dieses Abschnitts beziehen sich auf die Analyse einer Szene. Daraus kann man selbstverständlich keine allgemeinen quantitativen Aussagen hinsichtlich der Möglichkeiten ei-

ner Multiaspekt-SAR-Analyse für andere Szenen ableiten. Dennoch darf man davon ausgehen, daß eine solche kombinierte Auswertung in vielen Fällen von Nutzen ist. Besonders eignen sich offenbar SAR-Datensätze aus orthogonalen oder antiparallelen Aspekten. Bei optimaler Wahl der Beleuchtung kann schon mit zwei Messungen ein Großteil der Gebäude erfaßt werden.

4.3 Simulation eines SAR-Betragsbildes

Man unterscheidet auch hier kohärente und inkohärente Verfahren zur Simulation von SAR-Betragsbildern [34], [67]. Erstere bilden den gesamten SAR-Prozeß ab, vom Sensor über die SAR-Prozessierung bis zur Bildgenerierung [28], [108]. Derartige Verfahren sind sehr aufwendig und gegebenenfalls an den Sensor anzupassen. Für die Zwecke dieser Arbeit ist eine inkohärente Approximation der SAR-Bildgenerierung in der Entfernungsgeometrie ausreichend. Ein entsprechendes Verfahren nach *Bolter et al.* [7] wurde implementiert. Es ist eine Erweiterung der oben vorgestellten Detektion von Layover und Schatten: Auch hier erfolgt eine Abtastung des DOM mit einem Strahl. Für jedes Pixel des simulierten SAR-Betragsbildes ist in einem Durchlauf durch das DOM zu prüfen, ob es Objekte in der entsprechenden Entfernung gibt. Die Beiträge aller Treffer werden aufaddiert, unter Berücksichtigung des lokalen Inzidenzwinkels α . Abschattungsgebiete erscheinen schwarz im Simulationsergebnis. Es ist anzumerken, daß in realen SAR-Bildern Abschattungen selten völlig schwarz sind. Dies liegt an den Nebenkeulen der Radarantenne, an der Aspektänderung über die synthetische Apertur und am Systemrauschen.

Durch Hinzufügung eines Speckle wirken simulierte SAR-Bilder realistischer. Abhängig vom Typ des SAR-Betragsbildes ist die Verteilungsdichtefunktion des Speckle zu wählen (siehe Anhang A). Eine weitere Verbesserung ist durch die Berücksichtigung der Rückstreuungseigenschaften des Geländes erzielbar. In Abbildung 4.5b ist eine SAR-Simulation dargestellt. Zum besseren Vergleich wurden die realen SAR-Daten (Bild 4.5b) auf den Boden transformiert.

Gemäß der groben Richtwerte des Rückstreuoeffizienten σ_0 nach Abbildung 2.8 wurden die Straßenbereiche um 20 dB gedämpft, verglichen mit dem Rest. Es wurde darauf verzichtet, die Gebäude besonders zu behandeln, weil die in Bild 2.8 aufgeführten Richtwerte nur als Mittelwerte für größere Bereiche verstanden werden dürfen und daraus für ein bestimmtes Gebäude keine Aussagen abgeleitet werden sollten. Die Simulation der Rückstreuung berücksichtigt Materialabhängigkeiten ($\sigma_0(mat)$), den Speckle ($\sigma_0(sp)$) und die lokale Geometrie [83] ($\sigma_0(\alpha)$):

$$\sigma_{0sim}(mat, sp, \alpha) = \sigma_0(mat) \cdot \sigma_0(sp) \cdot \sigma_0(\alpha) = \sigma_0(mat) \cdot \sigma_0(sp) \cdot \frac{0.0188 \cdot \cos(\alpha)}{(\sin(\alpha) + 0.111 \cdot \cos(\alpha))^3}. \quad (4.1)$$

Der Grad der Übereinstimmung zwischen der Simulation und den realen Daten variiert. Für die Unterschiede sind zwei Hauptursachen zu nennen. Der eine Grund ist die Einteilung des Geländes in nur zwei Klassen, was letztlich durch die nur grob modellierbare Radarrückstreuung verschiedener Materialien bedingt ist. Dies ist augenfällig beim Schloßvorplatz, der aus Sand-, Kies- und Rasenflächen besteht, aber auch bei dem zu homogenen Erscheinungsbild der Gebäude, über deren Dachmaterial keine Information vorlag. Die zweite Ursache ist die Nichtberücksichtigung von spiegelnder Reflexion oder Mehrfachreflexionen sowie anderer starker Streuer, die man gut an den zum Sensor geneigten Gebäuden am Zirkel (konzentrischer



a) Beträgskanal des InSAR-Datensatzes



b) Simuliertes SAR-Bild unter Berücksichtigung der Geländeneigung

Abbildung 4.5: Simulation eines SAR-Bildes

Straßenverlauf um das Schloß im linken Bildbereich) und rechts oben beobachten kann. Dadurch erscheinen auch die Schattenflächen hinter den Gebäuden in der Simulation zu dunkel.

4.3.1 Detektion von Orten starker Rückstreuung

Im letzten Abschnitt wurde deutlich, daß auch die Orte starker Rückstreuung berücksichtigt werden sollten. Diese stellen auch wichtige Merkmale für die Gebäuderekonstruktion dar. Eine entsprechende Analyse erfordert die Repräsentation künstlicher Objekte im Vektorformat. Erste Ansätze beschränken sich auf die Modellierung prominenter Gebäudeteile, wie zum Beispiel Dachränder und Ecken [81]. Für diese Arbeit werden die Flächenorientierungen analysiert, um für eine bestimmte Beleuchtungsrichtung Orte ausgedehnter, linienhafter, starker Steuer zu detektieren [105]. Es sind zwei Fälle zu unterscheiden:

- *Zweifachreflexion*: Detektion von Corner-Reflektoren an Wänden, die mit einer Toleranz von drei Grad zum Sensor weisen und deren Vorfeld nicht verdeckt ist, sei es durch andere Gebäude oder Bäume. Die zweite Reflexionsfläche ist meist der Boden; es kann aber auch das Flachdach eines niedrigeren Gebäudes sein.
- *Spiegelnde Reflexion*: Erfassung von Flächen, deren Normale direkt zum Sensor zeigt. Dies ist häufig an Giebeldächern und Aufbauten großer Gebäude der Fall.

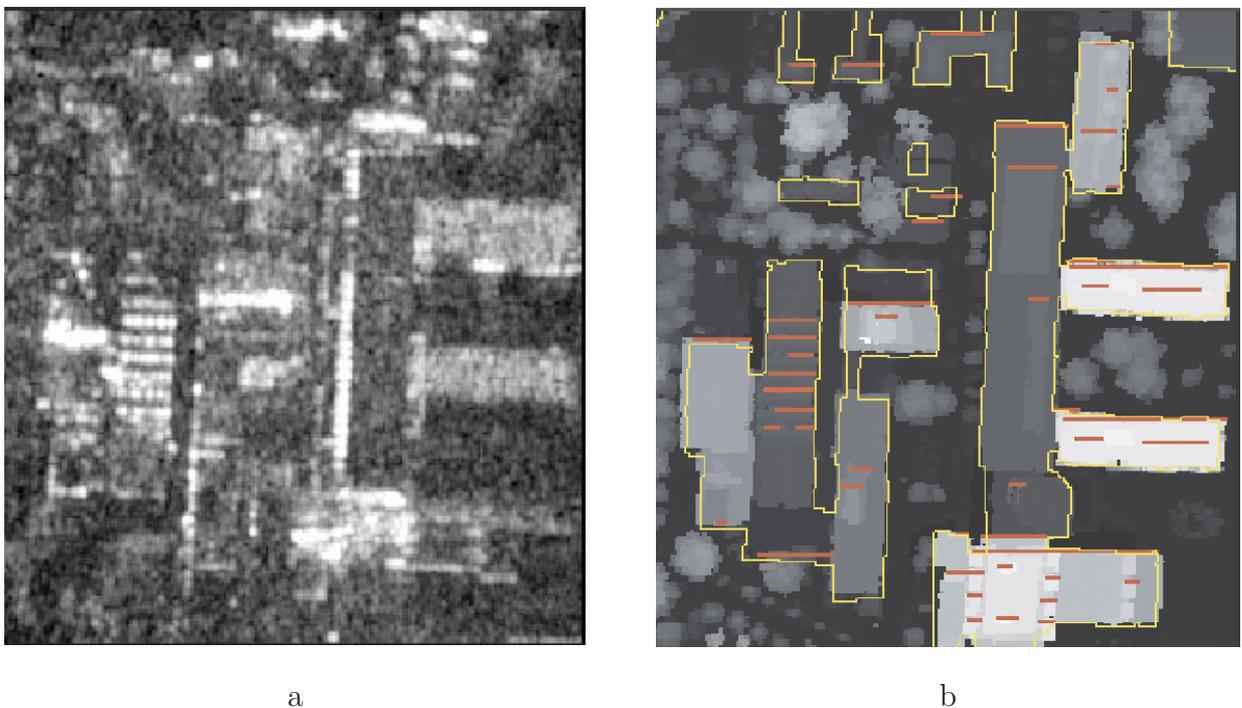


Abbildung 4.6: Chemiegebäude a) SAR-Bild b) DOM überlagert mit Gebäudeumrissen (gelb) und möglichen Orten ausgedehnter dominanter Streuer (rot)

In Abbildung 4.6a ist ein Ausschnitt aus dem rechten oberen Teil des SAR-Bildes dargestellt. Dort befinden sich einige größere Gebäude der Fachbereiche Elektrotechnik (links) und Chemie, die senkrecht zum Sensor ausgerichtet sind. In Bild 4.6b wurde das DOM mit den Gebäudegrundrissen und den detektierten Orten möglicher starker Rückstreuung überlagert. Auffällig ist die periodische Struktur auf dem Dach links, die zu spiegelnder Reflexion führt. Bei dem hohen Gebäude rechts daneben findet eine Zweifachreflexion zwischen dem Hauptgebäude und dem Flachdach des vorgelagerten Eingangsbereiches statt. Alle wesentlichen Orte der betrachteten zwei Typen von linienhaften Streuern wurden durch die Analyse des DOM erfaßt. Im rechten Bildbereich treten einige erwartete Streuer im SAR-Bild nicht auf. Dies mag daran liegen, daß das Signal der beiden hohen Gebäude vollständig durch Layover gestört wird, wie man am großen Versatz zum Sensor hin erkennt. Der nahezu vertikal verlaufende helle Streifen entlang des Gebäudes in der Mitte ist auf Streueffekte an der Fassade zurückzuführen, die nicht modelliert worden sind.

4.4 Simulation von InSAR

In jüngster Zeit wurden Verfahren zur Simulation von InSAR-Höhendaten vorgestellt [11], [131], [134]. Dabei bestimmt man die absolute Phasendifferenz aufgrund der Antennenkonfiguration (vgl. Abbildung 2.11):

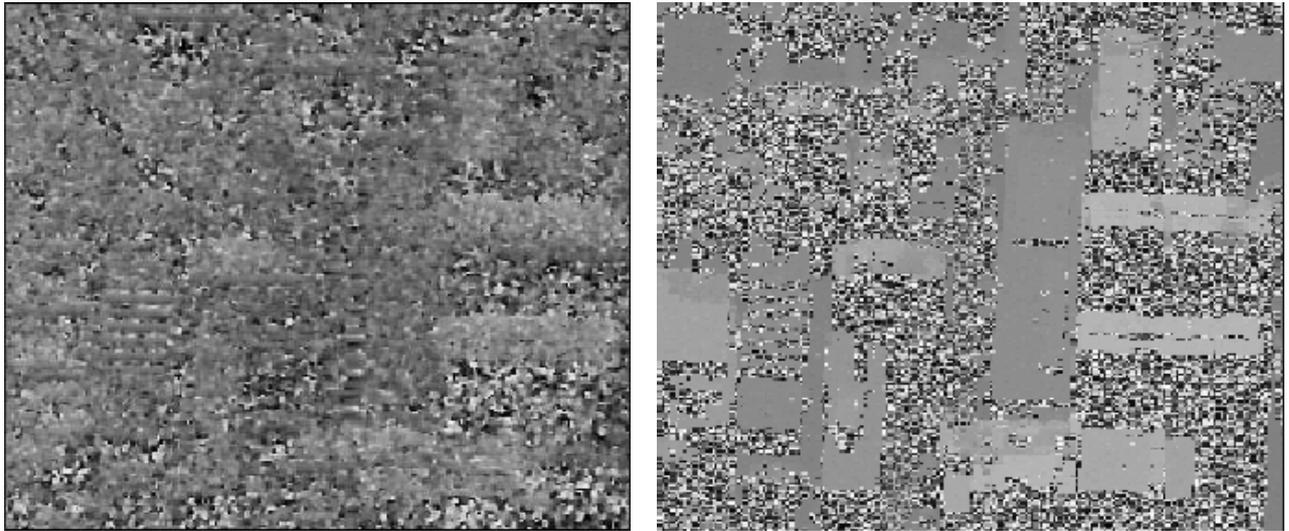
$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(H-h)^2 + x^2}, \\ \varphi_2 &= \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(H'-h)^2 + x'^2},\end{aligned}\tag{4.2}$$

mit

$$\begin{aligned}H' &= H + B_V, \\ x' &= x + B_H.\end{aligned}$$

Weil die absolute Phasendifferenz vorliegt, ist keine Phasenfortsetzung vor der Höhenberechnung erforderlich. In Layoverbereichen erfolgt eine Überlagerung der Beiträge der einzelnen Auflösungszellen unter Berücksichtigung des Betrags. Die erzeugten Phasenwerte entsprechen einer idealen InSAR-Messung bei der Abwesenheit von Rauschen. Ideal ist hierbei bezüglich des zugrundeliegenden DOM zu verstehen. Eine derartige inkohärente InSAR-Simulation ist kritischer zu beurteilen als die oben vorgestellte Betragssimulation, weil jetzt die Phasenwerte betrachtet werden, deren Standardabweichung vom SNR abhängt. Dennoch kann sie nützlich sein für ein iteratives Analyseverfahren. Hier dient die Simulation zur Rückprojektion der Zwischenergebnisse in die Entfernungsgeometrie. Um den Einfluß des Geländes auf die Güte der InSAR-Phasenmessung zu berücksichtigen, werden die Phasenwerte detektierter Schattenbereiche und Straßen von der weiteren Verarbeitung in den folgenden Zyklen ausgeschlossen.

In Abbildung 4.7 sind reale und simulierte Höhendaten dargestellt. Es handelt sich um in etwa denselben Ausschnitt der Szene wie in Bild 4.6, allerdings in der Entfernungsgeometrie. Für die Visualisierung wurden die Phasenwerte der Schattenbereiche und Straßen als gleichverteiltes Rauschen im Bereich $[-\pi, \pi[$ modelliert.



a) Reale Höhendaten

b) Simulierte Höhendaten

Abbildung 4.7: Reale und simulierte Höhendaten (Entfernungsgeometrie)

4.5 Zusammenfassung

Mit der Szene Karlsruhe wurde für die Betrachtungen in diesem Kapitel bewußt die anspruchsvollste der zu verarbeitenden Szenen gewählt. Das Ziel war, die Grenzen einer Gebäuderekonstruktion herauszuarbeiten, die sich aufgrund der inhärenten Schrägsicht von SAR-Sensoren ergeben. Die räumliche Nähe von Gebäuden führt zu gegenseitiger Störung des Signals. Durch eine kombinierte Auswertung von Daten aus verschiedenen Aspekten sind diese Störungen zum Großteil kompensierbar.

Wegen der Verdeckungsproblematik erscheint die Einbeziehung von Straßenverläufen in die Gebäudeerkennung zumindest in städtischen Gebieten wenig erfolgversprechend. Die Straßen werden daher nur für die Analyse ländlicher Szenen berücksichtigt.

In diesem Kapitel wurde dargelegt, daß die Simulation von SAR-Betragsbildern in urbanen Gebieten auf ikonischer Ebene genaue und sehr detaillierte Information über die Szene erfordert. So können schon leichte Variationen von Struktur und Material an Fassaden und Dächern zu stark unterschiedlichen Ausprägungen von Gebäuden in den SAR-Betragsbildern führen. Bei der Analyse unbekannter Szenen führt dies zu einer Mannigfaltigkeit des Erscheinungsbildes von Gebäuden in den Daten, die kaum zu modellieren und zu handhaben ist. Daher beschränken sich die Simulationen, die bei den im nächsten Kapitel vorgestellten Verfahren zur Gebäudeerkennung zum Einsatz kommen, auf die symbolische Ebene. Die 3D-Beschreibung von Zwischenergebnissen der Rekonstruktion dient als Grundlage zur Detektion von Layover, Corner-Reflektoren, Schattenbereichen und allen Dachkanten. Die Rückprojektion dieser Objekte in die SAR-Geometrie erfolgt mittels der InSAR-Simulation.

Kapitel 5

Rekonstruktion von Gebäuden aus SAR- und InSAR-Daten

Dieses Kapitel behandelt zunächst die Modellierung der Gebäude und die sich daraus ergebenden Anforderungen an Sensor und Daten für eine Gebäudeerkennung. Danach wird das Auswertekonzept vorgestellt. Die Beschreibung der Verfahrensschritte schließt sich daran an. Die Detektion und die anschließende Rekonstruktion der Gebäude stellen getrennte Module dar. Abschließend wird auf die iterative Verbesserung der Ergebnisse eingegangen sowie die Strategie für die Kombination von Daten aus verschiedenen Aufnahmerichtungen dargelegt.

5.1 Modellierung

Die Auswahl geeigneter Merkmale für die Objektmodellierung ist zum einen durch die Aufgabe bestimmt. Zum anderen müssen die sensorspezifischen Besonderheiten (z. B. Spektralbereich, Aufnahmegeometrie) der Abbildung der Objekte berücksichtigt werden. In den beiden folgenden Abschnitten wird zunächst die Objektmodellierung beschrieben und im Anschluß daran die Anforderungen an den Sensor und die Daten.

5.1.1 Objektmodellierung

Die Modellierung ist so zu wählen, daß die im Modell berücksichtigten Merkmale zur Erkennung geeignet sind und sie eine Unterscheidung von anderen Objekten ermöglicht [112]. Es werden allgemeine geometrisch-topologische und sensorspezifische Merkmale betrachtet.

Geometrisch-topologische Objektmerkmale

Folgende Modellvorstellungen bestehen hinsichtlich der geometrischen und topologischen Eigenschaften von Gebäuden:

- Gebäude sind erhabene Objekte mit senkrechten Wänden und unterschiedlichen Dachformen.
- Grundflächen und Dachstrukturen zeichnen sich häufig durch Geradlinigkeit, Rechtwinkligkeit, Parallelität und Symmetrien aus.
- Gebäude können aus mehreren Teilen verschiedener Form, Höhe und Materialien bestehen.
- Gebäude sind in der Regel an Straßen angebunden und häufig entlang Straßen gruppiert.

Neben Einzelgebäuden, wie etwa Wohnhäusern, werden auch Gebäudekomplexe untersucht. Zur Beschreibung der Gebäude dienen *parametrische* und *generische* Modelle:

Parametrische Modelle. Darunter fallen Modelle mit fester Topologie, aber freien Parametern (Abbildung 5.1a-c). Bei einem Flachdachhaus zum Beispiel können die Parameter Länge, Breite und Höhe variieren. Bei der Analyse werden die parametrischen Gebäudemodelle Flach-, Pult- und Giebeldachhaus berücksichtigt, die alle einen rechteckigen Grundriß aufweisen.

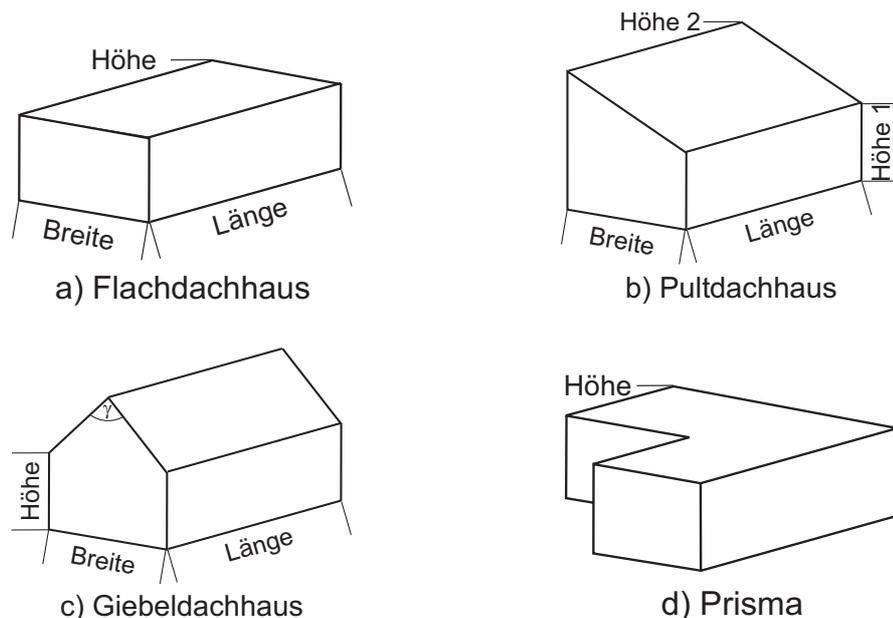


Abbildung 5.1: Parametrische Gebäudemodelle und ein prismatisches Gebäudemodell

Generische Modelle. Sie sind allgemeiner und beschreiben Objekte ohne eine feste topologische Struktur. Die Anzahl der Teilobjekte ist im Gegensatz zu parametrischen Modellen frei. In dieser Arbeit dienen generische Modelle unter anderem zur Beschreibung zusammenhängender Gebäudekomplexe, wie sie etwa bei Industrieanlagen auftreten. Die Einzelgebäude des Komplexes werden als *prismatische* Objekte modelliert, das heißt als Prisma mit konstanter Höhe und n Ecken. Das Objekt ist also durch n Seitenflächen und eine Dachfläche charakterisiert (Abbildung 5.1d). Bei großflächigen Gebäuden ist es in manchen Fällen möglich, Aufbauten zu

detektieren. Das Modell unterstellt eine Ausrichtung von Gruppen dieser Aufbauten vorzugsweise entlang der Hauptorientierungen der Gebäude.

Um die Nachbarschaft von Gebäuden und Straßen für die Analyse zu nutzen, werden bei ländlichen Szenen die Straßenverläufe erfaßt. Sie sind als Bestandteile eines generischen Straßennetzes modelliert.

Meist sind Informationen über die Art der urbanen Szene vorhanden, etwa ob es sich um Gelände im Innenstadtbereich, in Vororten oder Gewerbegebieten handelt. Dieses Wissen wird bei der Wahl der Modellparameter berücksichtigt.

Sensorspezifische Objektmerkmale

Die Ausprägung künstlicher Objekte in SAR-Daten wurde in den vorangehenden Kapiteln ausführlich dargelegt. Auf diesen Ergebnissen gründet sich die Auswahl von Merkmalen zur Unterscheidung der Gebäude von anderen Objekten in den Daten:

- Am sensorfernen Gebäudeende schließt sich ein Schattenbereich an.
- Am sensornahen Gebäudeteil finden sich helle Bereiche, verursacht von Layover und Corner-Reflektoren.
- Größere Flachdächer prägen sich oft als Regionen ähnlicher Helligkeit im Betragsbild aus. Dachaufbauten können sich deutlich daraus hervorheben.
- Gebäude sind auch im InSAR-DOM als erhaben erkennbar.
- Straßen erscheinen dunkel im Betragsbild.

5.1.2 Anforderungen an Sensor und Daten

Damit eine Detektion und Rekonstruktion von Gebäuden möglich wird, müssen die oben angesprochenen geometrischen und sensorspezifischen Merkmale in den Daten erkennbar sein. Die Ortsauflösung der SAR-Bilder sollte daher so hoch wie möglich sein. Daher kommen nur hochaufgelöste Daten luftgestützter Sensoren für die Analyse in Frage. Die hier untersuchten Datensätze weisen eine Auflösung von 1,2 m und besser auf, was dem Stand der Technik entspricht.

In SAR-Betragsbildern urbaner Gebiete treten auch unabhängig von Gebäuden viele benachbarte sehr helle und dunkle Bereiche auf. Eine alleinige Analyse der Betragsbilder birgt daher die Gefahr einer Detektion vieler falscher Gebäude. Die Trennung der Gebäude vom Hintergrund erfordert aus diesem Grunde Information über die Höhe von Objekten. Für jede Szene muß deswegen mindestens ein InSAR-Datensatz vorliegen. Dieser sollte im Einmalüberflugmodus erfaßt worden sein, um eine möglichst hohe Genauigkeit zu gewährleisten.

Bei der Georeferenzierung von SAR-Bildern können störende Artefakte auftreten, z. B. die Verzerrung von Gebäudekanten. Es werden daher nur Datensätze verarbeitet, die in der Entfernungsgeometrie vorliegen. Es wird unterstellt, daß die Erfassung und die SAR-Prozessierung

optimal erfolgten. Abgesehen vom thermischen Rauschen bilden die Daten somit perfekt die Gegebenheiten der Szene ab.

Für die Verarbeitung sind eine Vielzahl von Sensorparametern und die Navigationsdaten erforderlich. Die Sensorparameter müssen möglichst präzise gegeben sein. Kleine Abweichungen der erfaßten Navigations- und Lagedaten des Sensorträgers von der Realität hingegen sind im Normalfall unvermeidlich. So können schon kleine Abweichungen der Sensorausrichtung, etwa durch Wind, aufgrund der Schrägsicht und der großen Distanz zur Szene zu relativ großen Lagefehlern führen, zum Beispiel in der Größenordnung von 100 m. Die Lagefehler werden anhand gemessener Paßpunkte korrigiert.

5.2 Auswertekonzept

In Abbildung 5.2 ist der Ablauf des Verfahrens dargestellt. In einem ersten Schritt ist eine Aufbereitung der Daten erforderlich, damit eine Segmentierung mit Standardverfahren der Bildverarbeitung möglich wird. Diese Vorverarbeitung, unter anderem eine Speckle-Filterung, wird in Abschnitt 5.3 erläutert. Daran schließt sich die Segmentierung von Primitivobjekten an, wie z. B. Linien und Regionen (Abschnitt 5.4). Damit ist der ikonische Teil der Verarbeitung abgeschlossen. Aus der Menge der Primitivobjekte werden schrittweise, mit zunehmender Komplexität, Hinweise auf die Gebäude und Straßen erzeugt (siehe Abschnitt 5.5). Im Falle lokal konkurrierender, sich widersprechender Hinweise wird nur der am besten bewertete weiterverfolgt.

Die Gebäuderekonstruktion erfolgt nach Übergang vom SAR-Koordinatensystem in das 3D-Weltkoordinatensystem. Die Gebäudehinweise werden als Ganzes transformiert, wodurch sich die Zuverlässigkeit von Lage und Höhe verbessert, verglichen mit einer punktwisen Abbildung. Abhängig vom Modell erfolgt die Rekonstruktion des Grundrisses als Rechteck, als rechtwinklige Struktur oder als anderes Polygon (Abschnitt 5.6).

Eine 2D-Projektion einer 3D-Szene hat zur Folge, daß sich die Topologie der abgebildeten Objekte von der tatsächlichen Topologie unterscheiden kann. Wegen der inhärenten Schrägsicht und der starken Aspektabhängigkeit trifft das auf die SAR-Abbildung in besonderem Maße zu. So kann sich ein Gebäude sehr unterschiedlich in SAR-Daten ausprägen und benachbarte Gebäude müssen im SAR-Bild nicht benachbart erscheinen. Auch wenn die Aufnahmegeometrie die Sichtbarkeit eines bestimmten Gebäudemerkmals ermöglichen würde, kann es unter Umständen nicht detektiert werden, etwa wegen Verdeckung durch Überstrahlung. Aufgrund dieser Problematik ist nicht zu erwarten, daß eine umfassende Gebäudeerkennung in einem Schritt möglich ist. Die Gebäudeerkennung soll daher in *Analyse-durch-Synthese*-Verfahren iterativ erfolgen. Das heißt, Analyseergebnisse aus einem Schritt bilden die Grundlage für den darauffolgenden Schritt. Mit zunehmender Anzahl an Iterationen nimmt das Wissen über die Szene zu (z. B. Nachbarschaftsbeziehungen), was mit einer Verfeinerung der Rekonstruktion einhergeht. Der erste Analysezyklus ist daher auf einfache rechteckige Modelle beschränkt. In den darauffolgenden Schritten werden generische Modelle zugelassen. Das Ziel ist, Abweichungen zwischen den Ergebnissen und den Daten sukzessive zu beseitigen. Die gewonnene 3D-Szenenbeschreibung dient als Grundlage für eine Simulation mit den Parametern der realen SAR-Daten. Durch Vergleich werden als falsch erkannte Hinweise verworfen und neue erzeugt.

expliziten Repräsentation von Modellen verwendet werden: z. B. formale Grammatiken, Graphen, semantische Netze und Produktionssysteme [84]. Analysesysteme, die auf einer expliziten Modellrepräsentation beruhen, nennt man auch *wissensbasierte Systeme*. Diese unterscheiden sich hinsichtlich einer vorwiegend *deklarativen* (z. B. semantische Netze) oder vorwiegend *prozeduralen* Repräsentation (z. B. Produktionssysteme) der Modelle. Eine deklarative Formulierung ist gekennzeichnet durch eine Aufzählung von Fakten, die gewöhnlich in Form komplexer Datenstrukturen realisiert wird. Eine prozedurale Formulierung enthält Handlungsanweisungen, etwa durch *Regeln*. Die Darstellung rekursiver Strukturen und des Konstruktionsprozesses ist im Allgemeinen bei Produktionssystemen transparenter. Für diese Arbeit wurde die Modellrepräsentation in Form von Regeln eines Produktionssystems gewählt.

Produktionssystem

Man unterscheidet zwischen *Objektkonzepten* (kurz: Konzepten) und *Objektinstanzen* (kurz: Instanzen). Unter Konzepten versteht man die begriffliche Erfassung von Objekten. Sie bilden den Rahmen für die Beschreibung eines speziellen Objektes (der Instanz) [115]. Den Aufbau komplexer Objekte aus Teilobjekten auf der Konzeptebene kann man als ein Ersetzungssystem durch eine formale Grammatik G beschreiben:

$$G = \{S, V_n, V_t, P\}. \quad (5.1)$$

Die Objektmodelle S (Startsymbole) lassen sich in primitive Teilobjekte V_t (terminale Symbole) zerlegen. Verschiedene Teilmengen $\{V_t\}$ gleicher Struktur können, anhand der definierten Produktionsregeln P , zu komplexeren Objektkonzepten V_n (nichtterminale Symbole) gruppiert und schließlich zu einem Objekt aus der Menge der Startsymbole zusammengefaßt werden. Die Nomenklatur ergibt sich, weil formale Grammatiken zunächst Verwendung fanden, um zu prüfen, ob Zeichenketten in die Bestandteile eines gegebenen Alphabets von Terminalsymbolen zerlegbar sind. Im Gegensatz zu dieser *top-down*-Analyse ist man in der Bildverarbeitung meist an der oben beschriebenen *bottom-up*-Synthese interessiert.

Ein Produktionssystem besteht im Allgemeinen aus den drei Komponenten Datenbasis, der Menge der Regeln und der Systemsteuerung [77]:

Datenbasis. Die Datenbasis enthält alle Instanzen der durch eine Segmentierung erzeugten initialen Menge der Primitivobjekte $\{V_t\}$ und der daraus abgeleiteten Objekte $\{V_n\}$.

Produktionsregeln. Topologische oder geometrische Relationen zwischen den Konzepten sind durch Produktionsregeln beschreibbar. Sie bestehen aus einer Anweisung der Form:

WENN *Bedingung* erfüllt, DANN führe *Aktion* aus.

Im Bedingungsteil wird die Eingangs-Konfiguration überprüft. Eine Konfiguration heißt kompatibel, falls eine Relation \odot zwischen den Objekten X und Y erfüllt ist. Wenn der Bedingungsteil wahr ist, wird eine Generierungsfunktion \xrightarrow{i} ausgeführt, die ein Objekt vom Typ Z erzeugt. Die symbolische Schreibweise [111] einer Produktionsregel ist:

$$P_i : X \wedge Y \odot \xrightarrow{i} Z$$

Es werden nur Regeln verwendet, auf deren rechter Seite ein einzelnes Objekt aus der Menge $\{V_n, S\}$ steht. Das Zusammenwirken der Produktionen und die stufenweise Überführung der Objekte in Objekte höherer Abstraktionsstufen läßt sich graphisch durch ein *Produktionsnetz* verdeutlichen. Ein Produktionsnetz hat zwei verschiedene Mengen von Knoten: Konzepte und Produktionen. Konzepte werden durch Ovale versinnbildlicht und Produktionen durch Kreise. Kanten können nur zwischen Knoten verschiedener Mengen bestehen. In Abbildung 5.3 sind einige Arten von Produktionen zusammen mit ihrer graphischen Repräsentation illustriert. Sie unterscheiden sich in den Typen der Objekte (Konzepte) in der Ein- und Ausgangskonfiguration sowie der Anzahl der Objekte in der Eingangs-Konfiguration. Die beim Aufbau der Instanzen durchgeführten Zusammensetzungen können z. B. durch Ableitungsgraphen dargestellt werden.

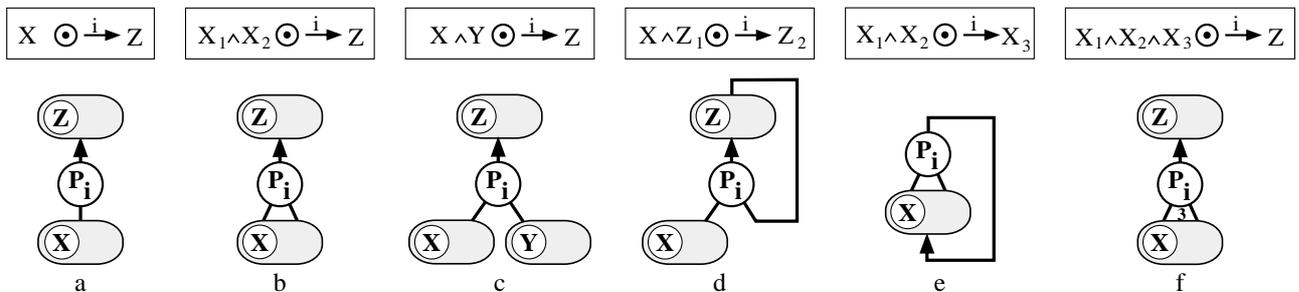


Abbildung 5.3: Beispiele für verschiedene Typen von Produktionen (nach [114])

Systemsteuerung. Die Systemsteuerung oder Inferenzmaschine analysiert den Bestand der Datenbasis und bestimmt, welche Regeln in welcher Reihenfolge zur Anwendung kommen. Häufig sind viele Konfigurationen gleichzeitig kompatibel. Abhängig von der Applikation, z. B. einer Klassifikationsaufgabe oder einer Verifikationsaufgabe, kann die Systemsteuerung entsprechend die Suche beeinflussen (z. B. Breitensuche oder Tiefensuche). Die hier betrachtete Gebäudedetektion ist eine Klassifikationsaufgabe, daher erfordert sie eine Breitensuche. Diese initiale Detektion beschränkt sich auf die Instanziierung von Konzepten GEBÄUDEHINWEIS, die viereckige Grundrisse aufweisen. Von Instanzen GEBÄUDEHINWEIS wird bei Überschneidungen nur die am besten bewertete an das Rekonstruktionsmodul weitergeleitet. Im Zuge der Iteration werden bestehende Instanzen GEBÄUDEHINWEIS verworfen oder neu bewertet und aufgrund der veränderten Lage neue Instanzen GEBÄUDEHINWEIS mit komplexeren Grundrissen generiert.

5.2.2 Fokussierung auf relevante Bildbereiche

Um den Rechenaufwand zu senken und um Ausreißer zu vermeiden, können Bereiche mit natürlichen Objekten durch eine Klassifikation der Landnutzungsklassen von der Verarbeitung

ausgeschlossen werden. Die traditionelle Klassifikationsmethode bei SAR fußt auf der Analyse der lokalen Statistik der Betragsbilder, etwa anhand des Variationskoeffizienten σ_v [20], [126] oder der Verteilungsfunktion [17], [40]. Aus der Polarisationsmatrix kann auf die Struktur von Objekten zurückgeschlossen werden [46]. Es wurden auch Verfahren vorgestellt, die den kompletten InSAR-Datensatz auswerten [56], [57], [89], [135]. An der Vielfalt der genannten Beispiele erkennt man, daß die Untersuchung geeigneter Klassifikationsverfahren im Vorfeld der eigentlichen Rekonstruktionsverfahren ein Thema für sich ist. Eine derartige Untersuchung würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Daher wird im Weiteren davon ausgegangen, daß bereits eine Trennung der städtischen Gebiete vom Rest der Szene erfolgte.

5.2.3 Auswahl der Daten für die Analyse

Bei konventionellen SAR-Bildern ist die Analyse auf den Signalbetrag beschränkt, da die Phase keine verwertbare Information trägt. Im Falle von InSAR-Daten stehen darüber hinaus die Kohärenz- und Höheninformation für die Auswertung zur Verfügung. Zudem liegen nun zwei Betragsbilder vor. Diese sind zwar stark korreliert (sonst wäre die interferometrische Auswertung nicht möglich), dennoch kann es zu unterschiedlichen Ergebnissen bei Segmentierungsverfahren kommen. Dies liegt zum einen am leicht versetzten Aspekt und zum anderen am möglicherweise abweichenden Übertragungsverhalten der Sensor-Empfangszüge aufgrund von Toleranzen in der Elektronik. Es ist also sinnvoll, in beiden Bildern eine Segmentierung von Primitivobjekten vorzunehmen und die Ergebnisse später zu verschneiden.

5.3 Vorverarbeitung

Die Vorverarbeitung beschränkt sich auf die Betragsbilder. Um dort überhaupt eine sinnvolle Segmentierung zu ermöglichen, ist die Beseitigung oder zumindest signifikante Reduzierung des Speckle erforderlich. Es wurden verschiedene adaptive Speckle-Filter aus der Literatur untersucht [20], [69], [44], [126]. Dabei zeigte sich, daß der ESTEC-Filter [20] am besten abschnitt hinsichtlich der Resultate der nachfolgenden Segmentierungsverfahren. Die Filterung erfolgt ausschließlich in SAR-Daten, die in der Entfernungsgeometrie vorliegen.

Damit die Segmentierung von Primitivobjekten mit Standardverfahren der Bildverarbeitung erfolgen kann, ist zusätzlich zur Speckle-Filterung eine Reduzierung des normalerweise sehr großen Dynamikbereichs der Betragsbilder notwendig. Hierzu erfolgt eine Kappung von Signalspitzen starker Einzelstreuer, die insbesondere in urbanen Gebieten häufig auftreten. Dabei weist man überschwelligen Werten einen Maximalwert zu. Der Maximalwert th_b zur Beschneidung des Betragshistogramms wird häufig von einem Operateur nach subjektiven Gesichtspunkten für verschiedene Bilder unterschiedlich gewählt. In dieser Arbeit wurde als Maximalwert th_b jener Betragswert gewählt, der dem Mittelwert plus dem Fünffachen der Standardabweichung der vorliegenden Verteilung entsprach (die Verteilungsfunktionen sind in Anhang A.1 aufgeführt). Im Falle einer Exponentialverteilung ist th_b jener Wert, der im Betragshistogramm größer als 99.75% aller Werte ist. Dadurch erreicht man eine deutliche Reduzierung der Signaldynamik. Beginnend mit dem Schwellwert werden nun maximal 40 dB des verbleibenden Signalumfangs logarithmiert. Abbildung 5.4a,b zeigt Betragsdaten vor und nach der Vorverarbeitung.

5.4 Segmentierung von Primitivobjekten

Die in Abschnitt 5.4.1 vorgestellten Methoden zur Segmentierung von Primitivobjekten kommen sowohl bei dem Verfahren zur Rekonstruktion von Wohnhäusern als auch bei dem zweiten Verfahren zur Erkennung von Industriebauten zum Einsatz. Im letztgenannten Fall kommen noch weitere Primitivobjekte hinzu, wie in Abschnitt 5.4.2 beschrieben wird.

5.4.1 Primitivobjekte für die Erkennung von Gebäuden und Straßen



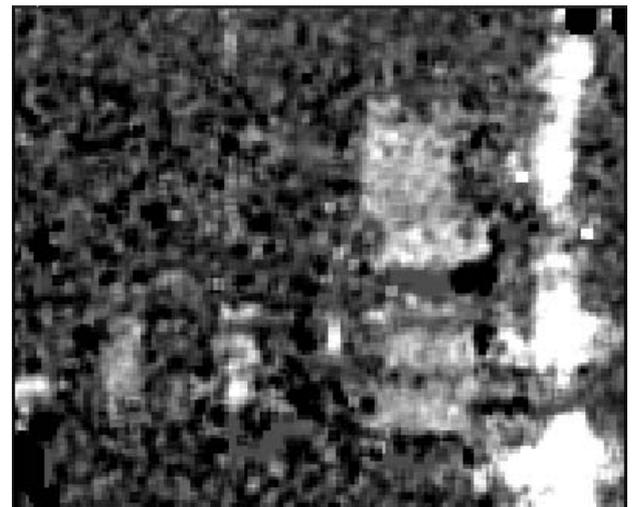
a) Betrag



b) Betrag nach Speckle-Filterung



c) Kohärenz



d) Höhendaten

Abbildung 5.4: InSAR-Daten der Szene Solothurn

In Abbildung 5.4 sind einige Gebäude aus der Szene Solothurn dargestellt. An diesem Beispiel soll die Vorgehensweise erläutert werden. Die SAR-Beleuchtung erfolgte von Norden. Der Rasterabstand beträgt in Entfernungs- und Azimutrichtung jeweils etwa 1.2 m.

Abbildung 5.5 zeigt zur Verdeutlichung ein LIDAR-DOM der Szene. Dort befinden sich unterschiedliche Gebäudetypen: Die Gebäude A und B entsprechen den Modellen für Flachdach- beziehungsweise Giebeldachhäusern, während C und D komplexere Strukturen aufweisen. Gebäude A ist etwa 30 m lang. Da die InSAR-Daten in der Entfernungsgeometrie vorliegen, sind sie nicht deckungsgleich mit dem DOM.

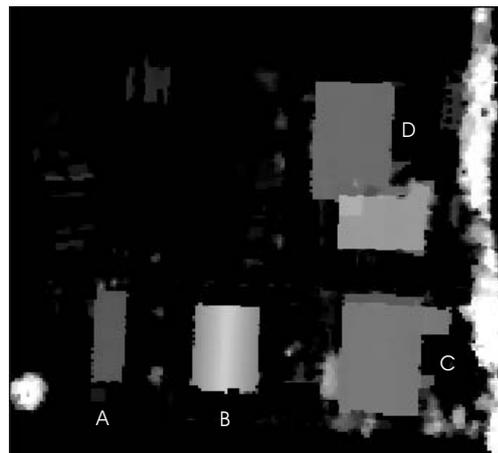
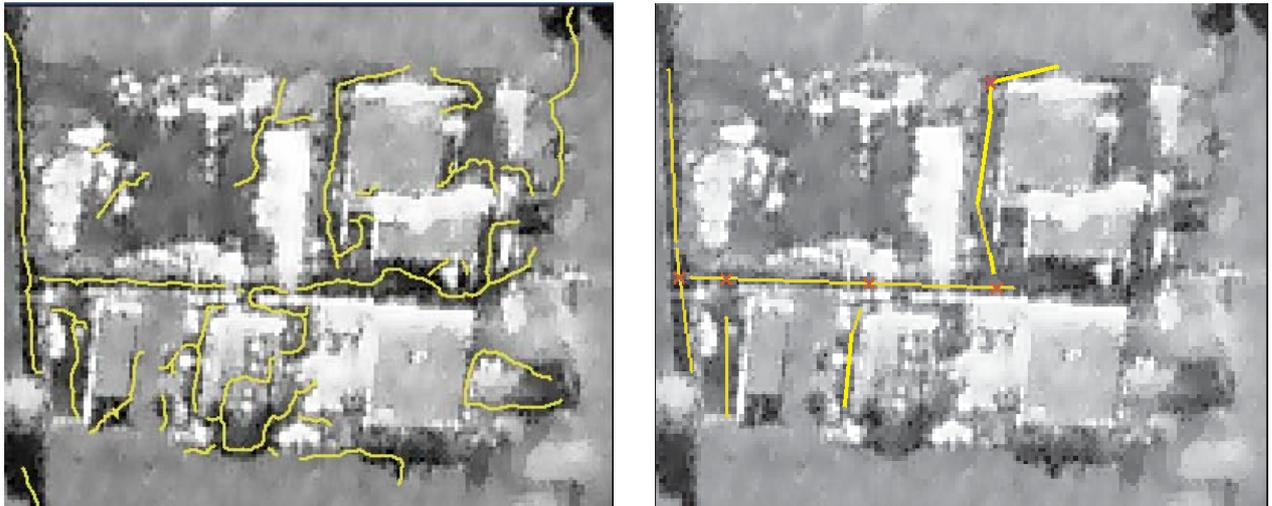


Abbildung 5.5: LIDAR-DOM der Szene Solothurn

Die Parameter und Schwellwerte der Segmentierungsverfahren werden, soweit möglich, aus dem bekannten oder geschätzten SNR abgeleitet (siehe auch Abschnitt 2.3.6). Es werden linien- und flächenhafte Primitivobjekte erzeugt.

Linienhafte Primitive. Die Segmentierung linienhafter Primitive beschränkt sich auf die Betragsbilder. Neben den Straßenverläufen sollen vor allem die Kanten von Gebäuderändern und Dachstrukturen extrahiert werden:

- *Straßenverläufe:* Die seitliche Beleuchtungsrichtung erschwert die Detektion von Straßen in SAR-Daten [123], verglichen mit Daten optischer Sensoren [50]. Wie die Sichtbarkeitsanalyse in Abschnitt 4.2 zeigt, ist eine Straßendetektion besonders im städtischen Gebiet problematisch. Von den Straßen selbst sind dort meist nur kurze Stücke sichtbar, die von längeren Schattenbereichen unterbrochen werden. In ländlichen Gebieten eignet sich der *Steger-Operator* [109] gut zur Segmentierung von Straßenverläufen [130]. Langgestreckte dunkle Linien oder schmale Streifen mit näherungsweise konstanter Breite bilden die Menge der Objekte STRASSENLINIE (Abbildung 5.6a). Da die Rekonstruktion von Straßennetzen hier nicht im Vordergrund steht, stellen die Straßen vielmehr zusätzliche Hinweise auf anliegende Gebäudestandorte dar. Die Zuverlässigkeit der Gebäuderekonstruktion soll so erhöht werden. Die mit einem Produktionsnetz erzeugte Instanz STRASSENNETZ, bestehend aus Instanzen STRASSE und KREUZUNG, ist in Bild 5.6b dargestellt. Für Details der Vorgehensweise sei auf *Stilla et al.* [111], [115] verwiesen.



a) Instanzen STRASSENLINIE

b) Instanz STRASSENNETZ

Abbildung 5.6: Erkennung von Straßen

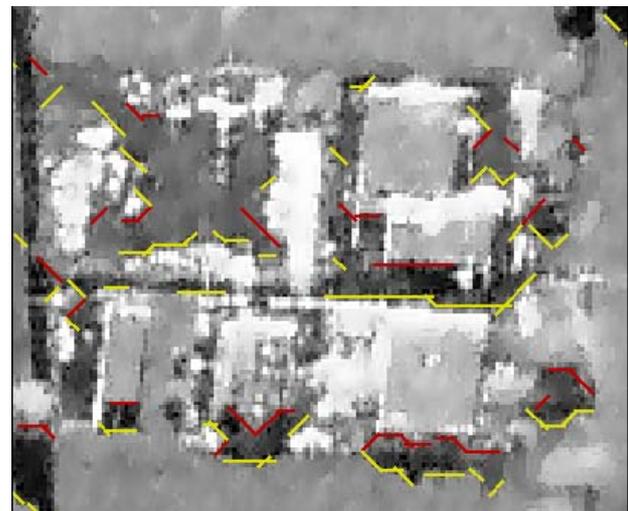
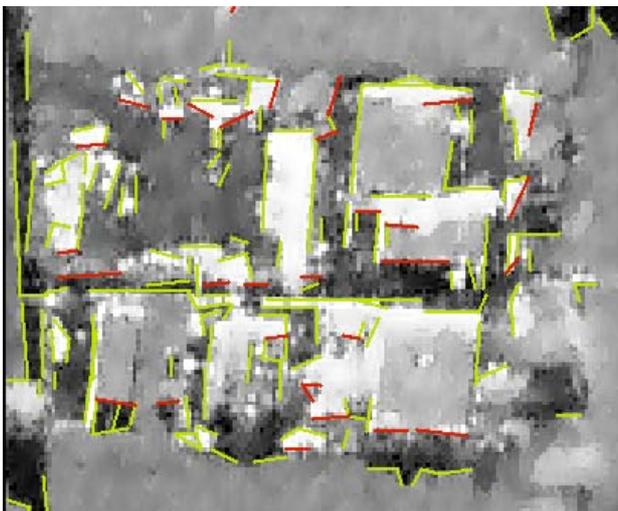
- *Gebäudekanten*: Für die Kantenextraktion kommt das Verfahren nach *Canny* [16] zum Einsatz. Aufgrund der oft gestörten Kantenverläufe kann die zu fordernde Mindestlänge der initial erzeugten Kanten nur wenige Pixel betragen. Als Konsequenz werden viele Kanten generiert, darunter eine beträchtliche Menge falscher Kanten (z. B. wegen Rauschen oder Überstrahlung). Durch eine anschließende Kantenverlängerung benachbarter, kollinearere Kantenstücke wird die Anzahl dieser Ausreißer erheblich vermindert. Hier werden die erzeugten längeren Kanten als zwei Mengen von Primitivobjekten betrachtet. Die erste Menge der Objekte *SCHATTENKANTE* bilden Kanten mit hohem Gradienten, wobei der dunklere Bereich auf der vom Sensor abgewandten Seite liegen muß. Die restlichen Kanten bilden die Menge der Objekte *KANTE*. Die aus den Beispieldaten erzeugten Instanzen sind in Abbildung 5.7a dargestellt.

Wegen Überstrahlern und der auch nach einer Speckle-Filterung meist noch teilweise vorhandenen Körnigkeit sind mit dem genannten Verfahren zur Kantenextraktion in der Regel nur Teile der Gebäudekanten erfaßbar. Um dies zu kompensieren, werden zusätzlich potentielle Schattenränder und linienhafte helle Strukturen aus lokal ähnlichen Regionen abgeleitet:

- *Schattenränder*: Mit einer Schwellwertoperation werden die dunklen Bildbereiche erfaßt. Als Schwellwert th_{dunkel} dient das erste signifikante Minimum im Betragshistogramm. Falls kein ausgeprägtes Minimum auftritt, werden die dunkelsten 25% der Pixel genommen. Durch morphologische Operationen (z.B. Erosion, Dilatation und deren Kombinationen [37]) lassen sich zu kleine Regionen beseitigen und Löcher schließen. Die Mindestfläche für die Erzeugung einer Instanz *SCHATTENREGION* ist aus den zu erwartenden Gebäudeflächen und -höhen sowie anhand der SAR-Parameter Beleuchtungswinkel und Auflösung ableitbar. An die Regionenränder werden Linienstücke angepaßt. Die Menge der Objekte *SCHATTENKANTE* wird um jene Linienstücke einer Schattenregion erweitert, die näher zum Sensor liegen. Die verbleibenden Linienstücke bilden die Menge der

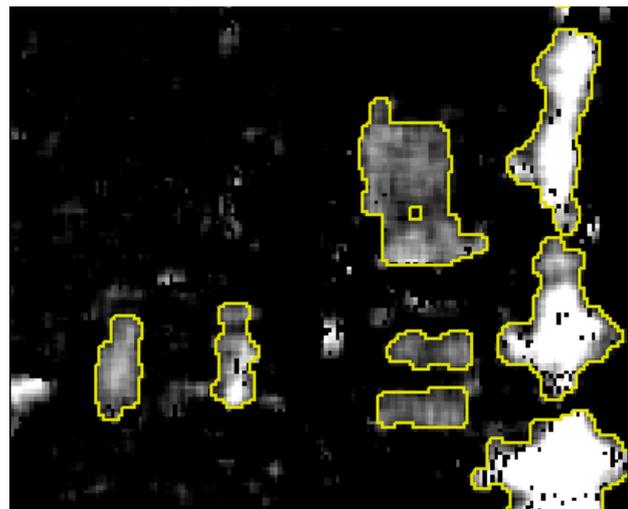
Objekte BODENSCHATTENKANTE. Instanzen beider Mengen sind in Abbildung 5.7b illustriert. Das Konzept SCHATTENREGION wird darüber hinaus zur Konsistenzprüfung der Ergebnisse benötigt.

- *Starke Streuer und Layover*: Die hellsten Pixel gelten als Kandidaten für linienhafte starke Streuer oder Layover ($th_{hell} = 10\%$). Nach der Entfernung zu kleiner Strukturen erfolgt eine Skelettierung [37] von in Frage kommenden länglichen Segmenten. An diese Segmentskelette werden dann Linien angepaßt. Derartige Linien mit einer Mindestlänge bilden die Menge der Objekte STREUERLINIE (Abbildung 5.7c).



a) Linienbasiert: SCHATTENKANTE (rot), KANTE (gelb)

b) Regionenbasiert: SCHATTENKANTE (rot), BODENSCHATTENKANTE (gelb)



c) STREUERLINIE (grün)

d) ERHABENEREGION (gelb)

Abbildung 5.7: Instanzen von Primitivobjekten für die Gebäudedetektion

Flächenhafte Primitive. Zur Segmentierung erhabener Objekte in den Höhendaten dient ein normalisiertes DOM, das aus dem InSAR-DOM hervorgeht. Um der unterschiedlichen Zuverlässigkeit der Höhenwerte Rechnung zu tragen, wird aus der Kohärenz und dem Betrag des Interferogramms eine Maske M gültiger Werte abgeleitet. Höhenwerte mit geringem Betrag oder schlechter Kohärenz werden ausgeblendet. Bei den Betragsdaten kommt derselbe Schwellwert th_{dunkel} zur Anwendung wie bei der Segmentierung der Schattenregionen. Der Schwellwert der Kohärenz th_{koh} liegt bei 0.9. Durch morphologisches Schließen werden kleine Löcher innerhalb zusammenhängender, unzuverlässiger Regionen beseitigt.

Die Erzeugung eines DGM aus dem InSAR-DOM durch Anwendung eines einfachen Minimumfilters über ein Fenster W :

$$\bar{z} = \inf\{z(x, y) \mid x, y \in (W \cap M)\} \quad (5.2)$$

kann, wegen der starken Streuung der Daten, große Abweichungen der geschätzten Geländehöhe vom tatsächlichen Wert zur Folge haben. Daher kommt der duale Rangfilter DR [22] zum Einsatz:

$$DR(z(x, y), k) = R(z(x, y), k) \otimes R(z(x, y), n - k + 1) \quad \text{mit } x, y \in (W \cap M). \quad (5.3)$$

R bezeichnet einen Rangoperator, der innerhalb der aufsteigend sortierten Werte z , aus der Nachbarschaft W mit n Elementen, das Element k bzw. $n-k+1$ zurückgibt. Für $k = 1$ entspricht der duale Rangfilter einer morphologischen Öffnung, also einer Erosion mit anschließender Dilatation. Das Besondere des dualen Rangfilters ist die freie Wahl des Parameters k . Dessen Wert wird abhängig vom Mittelwert der Kohärenz der Szene gewählt. Die Fenstergröße W ist an die zu erwartenden Gebäudeausdehnungen anzupassen.

Das normalisierte DOM gewinnt man durch Differenzbildung zwischen dem InSAR-DOM und dem soeben erzeugten DGM. Die Trennung der erhabenen Segmente vom Boden erfolgt durch einen Schwellwert $th_{\Delta h}$ von 5 m. Auch hier werden zu kleine Segmente beseitigt und kleinere Löcher interpoliert, die z. B. durch Ausreißer oder die Maskierung entstanden. Die resultierenden größeren, zusammenhängenden Objekte ERHABENEREGION zeigt Abbildung 5.7d.

5.4.2 Zusätzliche Primitivobjekte bei großen Gebäuden

Wie in Abschnitt 3.1 dargelegt, erscheinen in SAR-Daten mit einer Ortsauflösung im Meterbereich große Gebäude, wie z. B. Industriebauten mit Flachdächern, in den Betragsbildern häufig als zusammenhängende Regionen mit lokal ähnlichem Betragswert. Das relativ homogene Erscheinungsbild der Dächer wird in vielen Fällen unterbrochen von regelmäßig angeordneten, punktförmigen dominanten Streuern, die von Aufbauten verursacht werden. Das Auftreten dieser auffälligen Streuer in den SAR-Bildern ist dabei stark aspektabhängig. Es bietet sich daher an, zusätzlich zu den oben angesprochenen Primitivobjekten zusammenhängende Regionen ähnlichen Betrags zu segmentieren und in den als erhaben erkannten Bereichen Punktstreuer zu detektieren, um daraus später regelmäßige Anordnungen zu gruppieren.

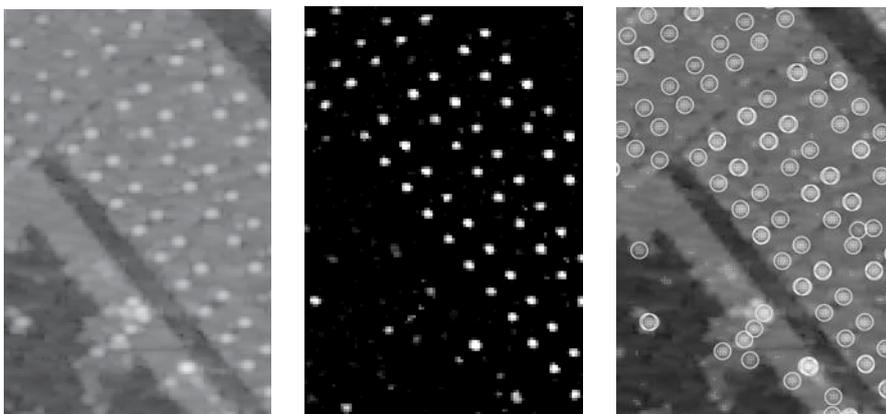
Flächenhafte Primitive. Die Segmentierung zusammenhängender Regionen lokal ähnlichen Betrags erfolgt mit einem Flächenwachstumsverfahrens nach *Levine und Shaheen* [75]. Die Regionen dürfen dabei nicht über die oben beschriebenen Instanzen der linienhaften Hinweise auf

Gebäudekanten wachsen. Der einzige Parameter dieses Algorithmus ist die maximal zulässige Differenz des Betrags eines Pixels $th_{\Delta b}$, verglichen mit dem Mittel des betrachteten benachbarten Segmentes. Falls die Differenz kleiner als der Schwellwert ist, wird das Segment um das Pixel erweitert. Um möglichst alle Gebäudestrukturen zu erfassen, wurde für $th_{\Delta b}$ der nach Gleichung 2.23 zu erwartende Grenzwert der radiometrischen Auflösung gewählt. Der niedrige Schwellwert führt im Allgemeinen zu einer Übersegmentierung, die aber in Kauf genommen wird und später korrigiert werden kann. Das Verfahren erzeugt eine Partitionierung des Bildes in Segmente. Davon werden nur Segmente S mit einer Mindestfläche f_{min} weiterverarbeitet. Für diese erfolgt die Berechnung der Merkmale *mittlere Intensität* \hat{i}_S , *mittlere Kohärenz* \hat{k}_S und *mittlere gewichtete Höhe* \hat{h}_S aus den zulässigen Bereichen. Als Gewichte bei der Bestimmung von \hat{h}_S aus den N zulässigen Höhenwerten h dienen die jeweiligen Kohärenzwerte k :

$$\hat{h}_S = \frac{\sum_{n=1}^N k_n \cdot h_n}{\sum_{n=1}^N k_n} \quad \forall \quad n \in (S \cap M). \quad (5.4)$$

Segmente mit niedrigem \hat{i}_S oder \hat{k}_S werden herausgefiltert. Die verbliebenen Segmente bilden die Menge der Primitivobjekte BETRAGSSEGMENT.

Punktförmige Primitive. Für die Segmentierung punktförmiger, auffälliger Bereiche kommt ein sogenannter *Hotspot-Operator* [64] zum Einsatz. Dieser Operator wurde ursprünglich zur Detektion kleiner heißer Objekte in Infrarotbildern entwickelt. Er eignet sich aber auch gut zur Segmentierung heller Streuer in SAR-Betragsbildern. Abbildung 5.8a zeigt einen Ausschnitt des Betragsbildes vom großen Frachtgebäude aus Bild 3.1. Jedes positive Filterergebnis führt zur Instanziierung eines Konzeptes PIXEL. In Abbildung 5.8b erkennt man, daß die Instanzen PIXEL vorzugsweise in Gruppen auftreten.



a) Betragsbild b) Instanzen PIXEL c) Instanzen SPOT

Abbildung 5.8: Instanzen PIXEL, SPOT (unterlegt mit Betragsbild)

5.5 Gebäudedetektion

Bei den Verfahren zur Gebäudedetektion wird zwischen Gebäuden im städtischen Bereich und Industriebauten unterschieden, da bei den Letztgenannten zusätzliche Primitivobjekte zu berücksichtigen sind. Die Beschreibung der Detektion von Wohngebäuden und anderen städtischen Bauten ist Gegenstand von Abschnitt 5.5.1. Die Vorgehensweise bei größeren Industriebauten wird in Abschnitt 5.5.2 erläutert.

5.5.1 Detektion von Wohngebäuden

Die Gebäudedetektion dient der Instanziierung von Konzepten GEBÄUDEHINWEIS (GH), aufbauend auf den Mengen der Primitivobjekte. In der Tabelle 5.1 und der Abbildung 5.9 sind die Produktionsregeln in der Symbolschreibweise bzw. graphisch als Produktionsnetz dargestellt. Den Ablauf bei der Generierung einer Instanz GH verdeutlicht Abbildung 5.10 anhand eines schematischen Beispiels.

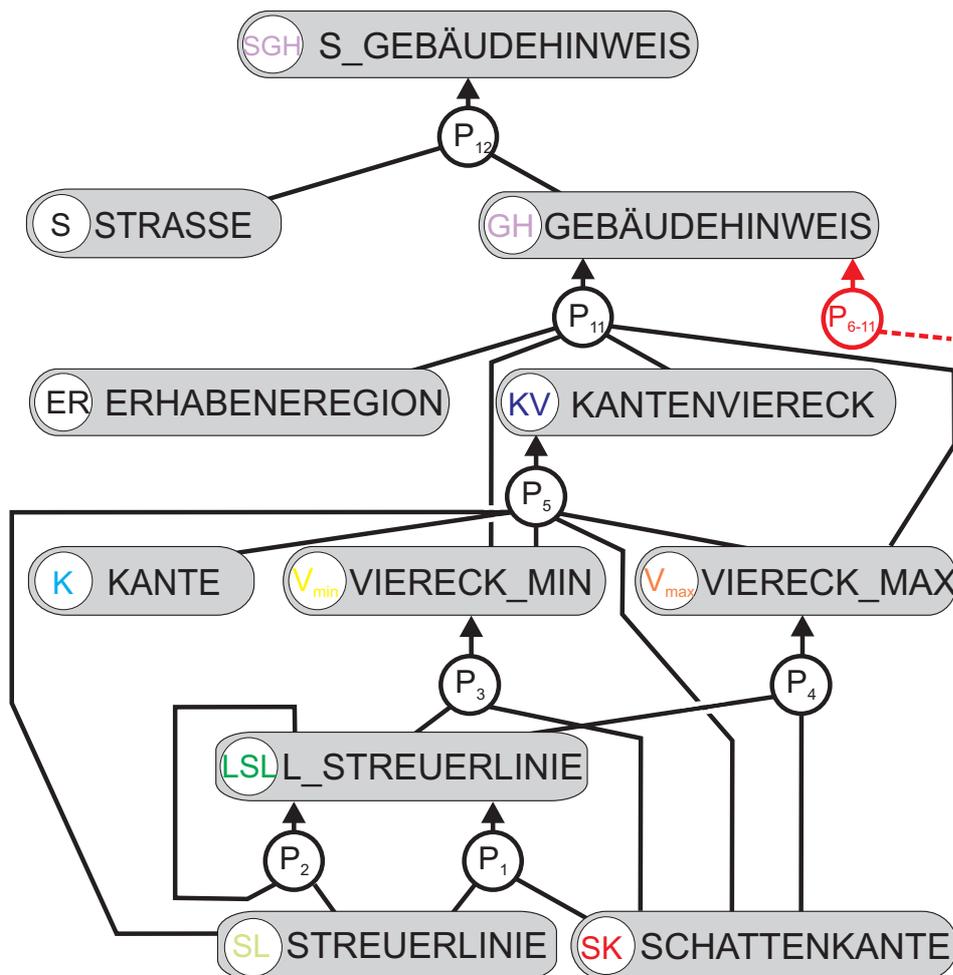


Abbildung 5.9: Produktionsnetz zur Gebäudedetektion

P_i	Objekte X, Y	\odot	\xrightarrow{i}	Objekt Z
P_1	$SK \wedge SL$	\Leftarrow	$\xrightarrow{1}$	LSL
P_2	$LSL \wedge LSL$	\parallel	$\xrightarrow{2}$	LSL
P_3	$SK \wedge LSL$	\diamond_{min}	$\xrightarrow{3}$	V_{min}
P_4	$SK \wedge LSL$	\diamond_{max}	$\xrightarrow{4}$	V_{max}
P_5	$V_{min} \wedge V_{max} \wedge (K \vee SK \vee SL)$	$\diamond\angle$	$\xrightarrow{5}$	KV
P_6	$SL \wedge SK$	\Rightarrow	$\xrightarrow{6}$	LSK
P_7	$LSK \wedge LSK$	\parallel	$\xrightarrow{7}$	LSK
P_8	$SL \wedge LSK$	\diamond_{min}	$\xrightarrow{8}$	V_{min}
P_9	$SL \wedge LSK$	\diamond_{max}	$\xrightarrow{9}$	V_{max}
P_{10}	$V_{min} \wedge V_{max} \wedge (K \vee SK \vee SL)$	$\diamond\angle$	$\xrightarrow{10}$	KV
P_{11}	$(V_{min} \vee V_{max} \vee KV) \wedge ER$	\Uparrow	$\xrightarrow{11}$	GH
P_{12}	$GH \wedge S$	\Leftrightarrow	$\xrightarrow{12}$	SGH
\Leftarrow, \Rightarrow	im Triggersuchbereich, Mindestlänge l_{min}			
\parallel	parallel, in einem engen Band			
\diamond_{min}	Minimales Viereck			
\diamond_{max}	Maximales Viereck			
$\diamond\angle$	Viereck, mit senkrechtem Kantenhinweis			
\Uparrow	erhabenes Viereck			
\Leftrightarrow	Gebäudehinweis und Straße benachbart			

Tabelle 5.1: Produktionen zur Gebäudedetektion ($(A \vee B) \equiv$ Objekt aus Menge A oder B)

Die Synthese kann sowohl von den Konzepten SCHATTENKANTE (SK) als auch von den Konzepten STREUERLINIE (SL) ausgehen. Im ersteren Fall erfolgt senkrecht zur Orientierung der Instanzen SK eine Suche nach Instanzen SL in Richtung Sensor. Produktion P_1 überführt Konzepte SL in Konzepte LANGESTREUERLINIE (LSL). Die Instanzen SL müssen dabei Anforderungen bezüglich einer Mindestlänge l_{min} und einer maximalen Abweichung des Orientierungswinkels Δ_θ genügen. Die maximale Suchtiefe d_{max} hängt von der erwarteten Gebäudeausdehnung ab.

Aufgrund von Störungen der Daten kommt es häufig vor, daß die vordere Gebäudekante durch mehrere kurze Instanzen LSL repräsentiert wird, die näherungsweise parallel zueinander, versetzt in einem engen Band liegen. Für diesen Fall ist die generische Produktion P_2 vorgesehen. Sie erzeugt aus Konzepten LSL weitere Konzepte LSL , die längere Linienstücke aufweisen und als zusätzliches Attribut die Anzahl der generierenden Instanzen LSL besitzen.

Die Produktionen P_3 und P_4 überführen Konzepte LSL und SK in die beiden Konzepte VIERECK_MIN (V_{min}) bzw. VIERECK_MAX (V_{max}). Attribute dieser Konzepte sind Polygone mit minimaler (P_3) bzw. maximaler Fläche (P_4). Die Instanzen V_{min} und V_{max} gehen aus den

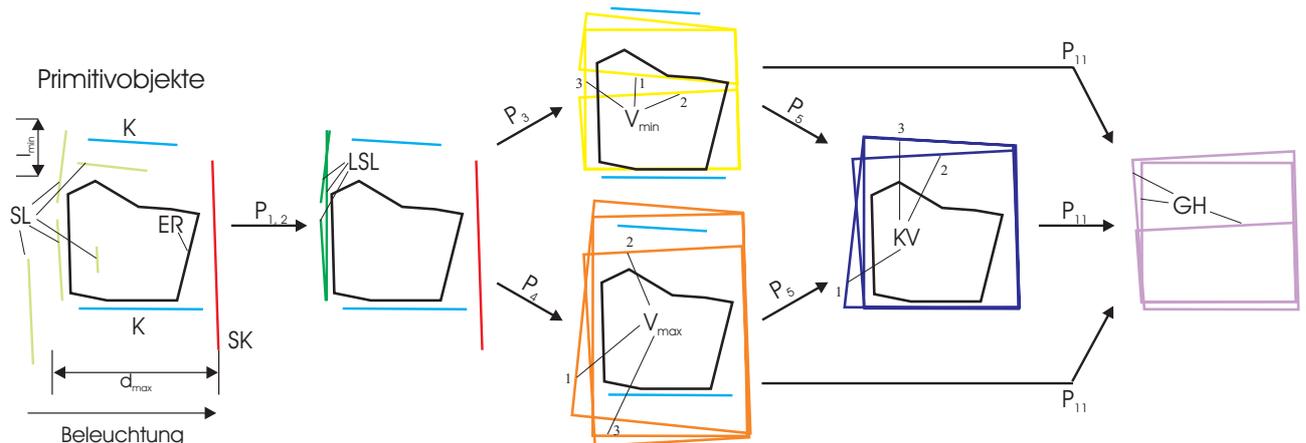


Abbildung 5.10: Beispiel für die Erzeugung von Instanzen GEBÄUDEHINWEIS

Endpunkten einer Linie (Instanzen LSL , SK) und deren Projektion auf die Gerade der anderen Linie hervor. In Abbildung 5.10 sind zusammengehörige Instanzen am Index erkennbar.

Die Überlappung und die Parallelität der Instanzen SK und LSL dienen zur Ableitung von Maßen bezüglich der Zuverlässigkeit der erzeugten Instanzen V_{min} und V_{max} . Beide Maße $\gamma_{\text{überl}}$ und γ_{para} sind auf den Bereich $[0, 1]$ normiert, wobei der Wert 1 vollständige Überlappung bzw. gleichen Orientierungswinkel bedeutet.

Die Differenzfläche $D = V_{max} \setminus V_{min}$ ist der Suchbereich für Instanzen KANTE (K) oder weiterer Instanzen SK bzw. SL , die senkrecht zur Instanz SK orientiert sind (bei der Winkelberechnung ist gegebenenfalls die unterschiedliche Auflösung in Entfernung und Azimut zu berücksichtigen). Die Einbeziehung der Konzepte SK bzw. SL ist erforderlich, weil Gebäude auch verdreht zum Sensor orientiert sein können (siehe Abbildung 3.10). Konzepte STREUERLINIE werden nur an der sensornahen Seite zugelassen und Konzepte SCHATTENKANTE entsprechend an der sensorfernen. Die Konzepte der genannten Objekte führen mit P_5 zu einem Konzept KANTENVIERECK (KV). Eine Seite der Instanz KV ist durch die Instanz KANTE bzw. SK oder SL vorgegeben. Als weiteres Maß tritt der Überlappungsgrad $\gamma_{\text{überl}_K}$ der letztgenannten Instanzen mit der entsprechenden Kante des Polygons hinzu. Der Ablauf einer Analyse beginnend mit einer Instanz STREUERLINIE ist analog ($P_6 - P_{11}$).

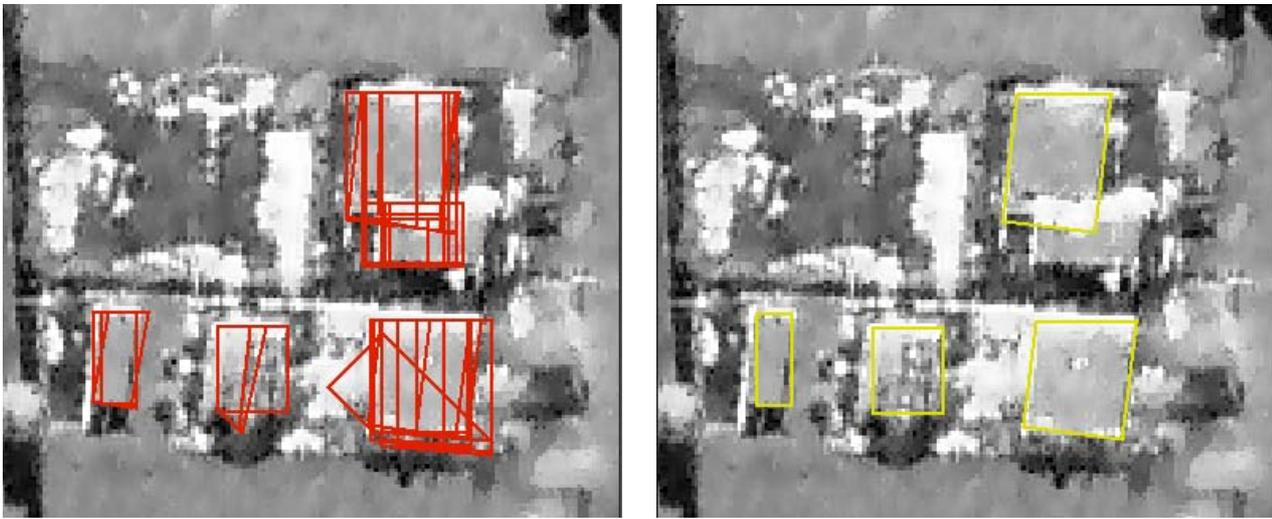
Die Konzepte V_{min} , V_{max} und KV werden im Folgenden zusammenfassend auch als Konzept VIERECK (V) bezeichnet. Produktion P_{11} überführt die Konzepte V und ERHABENEREGION (ER) in das Konzept GEBÄUDEHINWEIS. Für jede Instanz V wird die Schnittmenge mit allen Instanzen ER gebildet. Damit eine Instanz GH generiert werden kann, muß die Schnittfläche mindestens 60% der Viereckfläche betragen. Diese Schnittmenge bezogen auf die Viereckfläche ergibt ein Maß γ_{hoch} für die Erhabenheit der Instanz GH . Falls es sich um einen reinen SAR-Datensatz handelt, werden Instanzen ERHABENEREGION, die aus InSAR-Daten gewonnen wurden, in die Entfernungsgeometrie abgebildet.

Die räumliche Nähe zu einer Instanz STRASSE (S) erhöht die Evidenz einer Instanz GEBÄUDEHINWEIS. Aus den Konzepten dieser Objekte erfolgt die Generierung eines Konzepts STRASSEN- GEBÄUDEHINWEIS (SGH). Neben dem Abstand wird die Übereinstimmung der Orientierung beider Instanzen bewertet. Mit steigendem Abstand und/oder zunehmender Orientie-

rungsabweichung sinkt das Gütemaß $\gamma_{strasse}$ der Instanz SGH . Die Bewertung γ_{gh} einer Instanz GH oder SGH basiert auf den Einzelbewertungen:

$$\gamma_{gh} = (\gamma_{überl} + \gamma_{para} + \gamma_{überl-K} + \gamma_{strasse}) \cdot \gamma_{hoch}. \quad (5.5)$$

Die Wahl der Kostenfunktion ergibt eine Gleichgewichtung der aus den Betragsdaten abgeleiteten geometrisch-topologischen Merkmale und deren Bestätigung in den Höhendaten. In Abbildung 5.11a sind die so generierten Hinweise auf Gebäude für die Beispieldaten dargestellt. Sie befinden sich alle im Bereich der tatsächlich vorhandenen Gebäude. Von örtlich konkurrierenden Hinweisen werden nur die am besten bewerteten (siehe 5.11b) zum Rekonstruktionsmodul weitergeleitet.



a) Alle Instanzen

b) Die am besten bewerteten Instanzen

Abbildung 5.11: Instanzen GEBÄUDEHINWEIS und STRASSEN GEBÄUDEHINWEIS

5.5.2 Detektion von Gebäuden in Industriekomplexen

In Abbildung 5.12a ist das Produktionsnetz zur Ableitung von Konzepten GEBÄUDEHINWEIS im Falle von Industriekomplexen dargestellt. Der kleine Schwellwert beim Flächenwachstum hat in der Regel eine Übersegmentierung der Instanzen BETRAGSSEGMENT (BS) zur Folge. Zur Korrektur ist die generische Produktion P_1 vorgesehen, die aus benachbarten Konzepten BS größere Konzepte BS erzeugt, die als weiteres Attribut die Anzahl der verschmolzenen Instanzen BS erhalten. Benachbarte Instanzen BS mit ähnlicher Höhe \hat{h}_S werden schrittweise verschmolzen. Dadurch lassen sich auch zusammengehörige Teile eines größeren Objektes mit stückweise unterschiedlichem Rückstreuverhalten (mittlerer Grauwert) zusammenfassen, wie sie etwa bei Hausdächern mit teilweiser Beton- und Blechabdeckung auftreten.

Produktion P_2 führt die Konzepte BS , $STREUERLINIE$, $SCHATTENKANTE$ und $ERHABENEREGION$ in Konzepte GEBÄUDEHINWEIS über. Eine Instanz GEBÄUDEHINWEIS wird erzeugt, wenn drei Bedingungen erfüllt sind:

- Benachbart zur Instanz BETRAGSSEGMENT müssen sich in Richtung Sensor Instanz(en) STREUERLINIE befinden.
- In der anderen Richtung gilt das Gleiche für Instanzen SCHATTENKANTE.
- Die Schnittfläche mit den Instanzen ERHABENEREGION muß mindestens 70% betragen.

Einen Teil der resultierenden Instanzen GEBÄUDEHINWEIS für einen Ausschnitt der Szene zeigt Bild 5.12b. Aufgrund der höheren Auflösung in Azimutrichtung erscheint der rechtwinklige Gebäudekomplex verzerrt in der hier dargestellten Entfernungsgometrie.

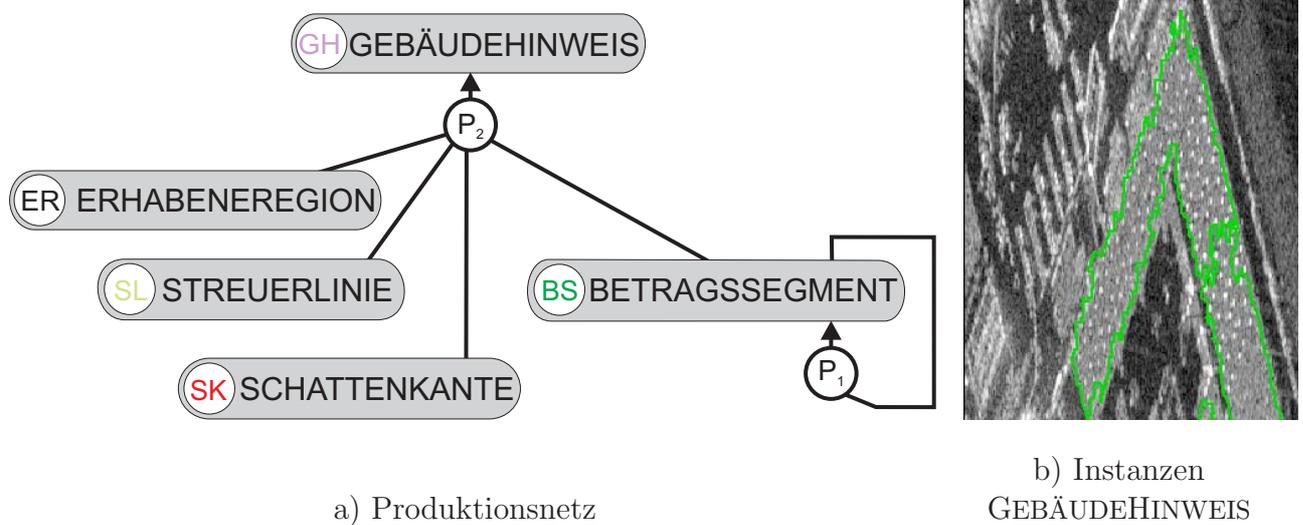


Abbildung 5.12: Hinweise auf Industriebauten am Beispiel der Szene Frankfurt

Neben der Übersegmentierung treten auch Untersegmentierungen auf. Instanzen GEBÄUDEHINWEIS, die eine Instanz SCHATTENREGION umschließen, werden dahingehend untersucht, ob sie sich in mehrere Unterinstanzen aufspalten lassen [101], [106]. Zwei Verfahren kommen für die Analyse des Segmentes zum Einsatz. Zunächst erfolgt in beiden Fällen eine Median-Filterung der Höhendaten innerhalb des fraglichen Segmentes. Die erste Methode basiert auf einer Histogrammanalyse: Falls eine bimodale Verteilung vorliegt und sich die beiden Höhenniveaus auch räumlich voneinander trennen lassen, wird die Instanz GEBÄUDEHINWEIS in zwei geschlossene Instanzen zerlegt. Bei stark verrauschten Daten oder bei nur kleiner Höhendifferenz schlägt diese Methode fehl. Daher wird in einem zweiten Ansatz ein Flächenwachstumsschritt in den Höhendaten des Segmentes ausgeführt, und zwar mit dem Rand der Instanz SCHATTENREGION als Saatpunkte (Startpunkte).

5.6 Gebäuderekonstruktion

Es sind drei Konzepte für die Rekonstruktion der Grundrisse vorgesehen: RECHTECKGRUNDRISS (RG), RECHTWINKLIGERGRUNDRISS (RWG) und POLYGONGRUNDRISS (PG). Die Rekonstruktion des gesamten Gebäudes basiert auf vier Konzepten. Das Konzept PARAMETRISCHESGEBÄUDE umfaßt die drei Spezialisierungen FLACHDACHHAUS, PULTDACHHAUS und GIEBELDACHHAUS (siehe Abbildung 5.1a-c). Diese Konzepte können ausschließlich aus einem Konzept RG hervorgehen. Das generische Konzept PRISMATISCHESGEBÄUDE kann aus den beiden Konzepten der Grundrisse RWG oder PG abgeleitet werden. Im Folgenden werden die genannten Konzepte PARAMETRISCHESGEBÄUDE und PRISMATISCHESGEBÄUDE auch kurz als Konzept GEBÄUDE angesprochen.

5.6.1 Rekonstruktion der Grundrisse

Die Rekonstruktion der Grundrisse erfolgt, entsprechend den drei genannten Konzepten, als Rechteck, als rechtwinklige Struktur oder als beliebiges Polygon. Die Instanzen GEBÄUDEHINWEIS können als *Polygone* (Konzept VIERECK) oder als *Flächensegmente* (Konzept BETRAGSGEGENSTÄND) vorliegen. In der ersten Iteration ist die Analyse darauf beschränkt, ob sich den Instanzen GEBÄUDEHINWEIS parametrische Modelle mit rechteckigen Grundrissen zuweisen lassen. Erst in den weiteren Iterationen kommen generische Modelle mit anderen Grundrißformen in Betracht, etwa bei zwei sehr nahe zusammenstehenden Instanzen GEBÄUDEHINWEIS, die tatsächlich Teile eines komplexeren Gebäudes sind.

Zur Bestimmung des Grundrisses ist die Transformation aus der SAR-Geometrie in das Weltkoordinatensystem erforderlich. Die Objekte werden als Einheit transformiert, was die Genauigkeit der Lage verbessert, verglichen mit einer pixelweisen Abbildung. Dabei sind *Polygone* und *Flächensegmente* unterschiedlich zu behandeln. Im Falle der Segmente erfolgt die Berechnung der mit der Kohärenz k gewichteten mittleren Höhe über das Segment. In Erweiterung der in Gleichung 5.4 beschriebenen Vorgehensweise wird nun eine zweite Maske M_L eingeführt, um die durch Layover gestörten Höhenwerte an den sensornahen Objektseiten auszublenden:

$$\hat{h}_{S \setminus L} = \frac{\sum_{n=1}^N k_n \cdot h_n}{\sum_{n=1}^N k_n} \quad \forall \quad n \in (S \cap M \cap M_L). \quad (5.6)$$

Die Breite des Ausschlußbereiches der Maske M_L läßt sich aus der Differenz der mittleren gewichteten Höhe \hat{h}_S des Segments S (nach Gl. 5.4) zur Umgebung und dem Beleuchtungswinkel θ ableiten.

Bei Polygonen werden Ebenen an die umschlossenen Höhendaten angepaßt, um die Höhe der Stützstellen der Polygone zu bestimmen. Analog zu den Segmenten ist das Layover entsprechend zu berücksichtigen. Im ersten Schritt ist auch hier die Berechnung der gewichteten mittleren Höhe $\hat{h}_{S \setminus L}$ vorgesehen.

Approximation durch Rechtecke

Die parametrischen Gebäudemodelle sind durch einen rechteckigen Grundriß charakterisiert. Die Flächensegmente weisen schon wegen der Pixelraasterung meist keine rechtwinklige Form auf. Aufgrund der Toleranzen bei der Detektion und der nichtlinearen Transformation ins Weltkoordinatensystem gilt dies in der Regel auch für die viereckigen Polygone.

Polygone. Eine Approximation als Rechteck kommt für Gebäudehinweise in Betracht, die aus Instanzen `VIERECK` hervorgingen. Die Skizzen in Abbildung 5.13 sollen die Vorgehensweise verdeutlichen. Links ist dort das viereckige Polygon (gelb) dargestellt, überlagert mit der triggernden Instanz und deren gefundenem Partner (beide rot) sowie einer Instanz `KANTE` (blau). Die Orientierung der zu erzeugenden Instanz `RECHTECKGRUNDRISS` wird aus dem Trigger und seinem Partner bestimmt. Hierzu werden aus den Endpunkten der beiden Linien gewichtete Mittelwerte berechnet (rote Kreuze). Als Gewichte dienen die Überlappungsgrade der Linien mit den dazugehörigen Seiten des Vierecks. Die Verbindungslinie (*ML*) der gewichteten Mittelwerte weist die gesuchte Orientierung auf. Parallele Geraden (*PG*) zur Verbindungslinie, durch die Mittelpunkte des Triggers und seines Partners, legen zwei Seiten des Rechtecks fest. Im Falle der anderen Seiten sind zwei Möglichkeiten zu unterscheiden: Liegt eine Instanz `KANTE` vor, führt die Rechteckseite durch deren Mitte. Andernfalls wird die Senkrechte durch den gewichteten Mittelwert gewählt.

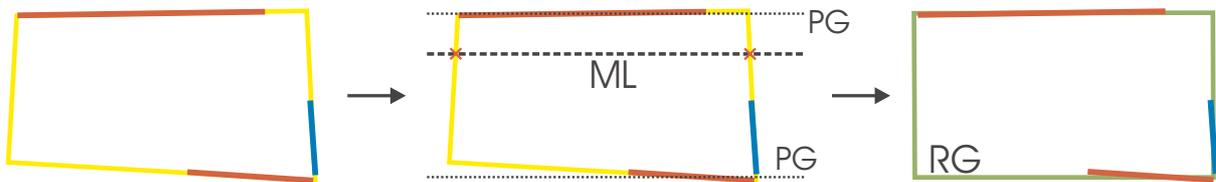


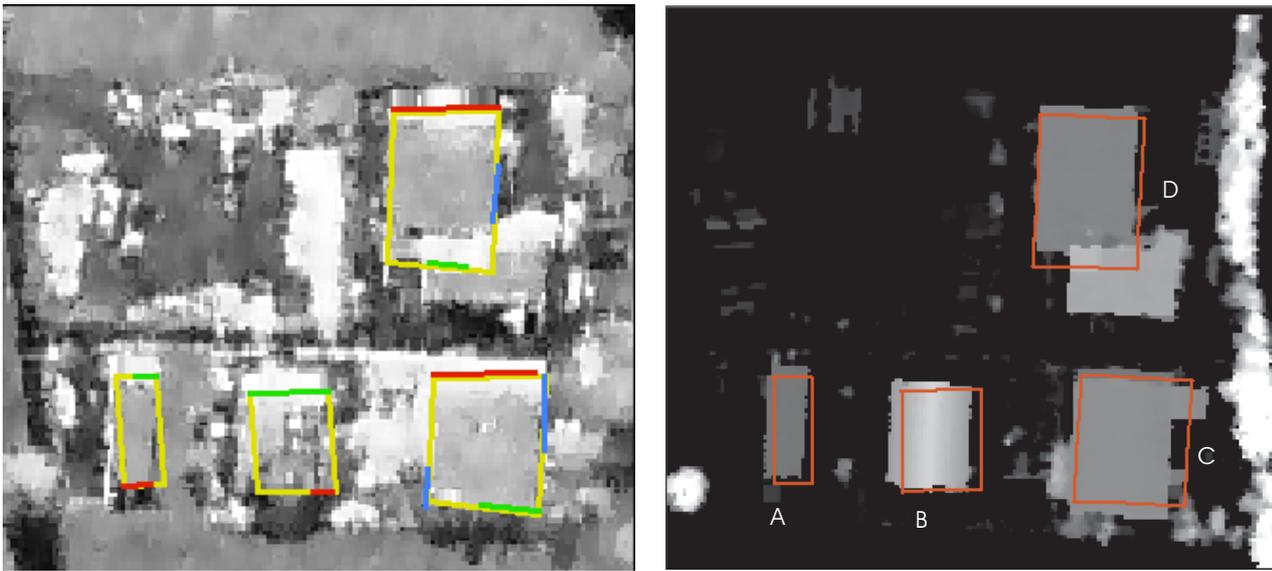
Abbildung 5.13: Beispiel für die Erzeugung einer Instanz `RECHTECKGRUNDRISS` aus einer Instanz `VIERECK`

Die für die Szene Solothurn generierten und ins Weltkoordinatensystem transformierten Instanzen `GEBÄUDEHINWEIS` sind in Abbildung 5.14a illustriert. Die dazugehörigen Primitivobjekte wurden überlagert. Die seitlichen Instanzen `KANTEN` sind blau, die triggernde Instanz rot und deren Partner grün dargestellt. Die beiden rechten Hinweise gingen also aus Instanzen `KANTENVIERECK` hervor, wobei die Synthese jeweils von einer Instanz `STREUERLINIE` ausging. Die anderen beiden Hinweise basieren auf Instanzen `VIERECK_MAX`, die auf eine Instanz `SCHATTENKANTE` zurückzuführen sind. Bild 5.14b zeigt die erzeugten Instanzen `RECHTECKGRUNDRISS` überlagert auf das LIDAR-Höhenmodell.

Segmente. Für jedes Segment S wird das umfassende Rechteck mit minimaler Fläche (*MBR*) berechnet. Zur Bestimmung der Güte einer Approximation des Segmentes durch das *MBR* dient der Füllgrad F :

$$F = \frac{MBR \cap S}{MBR}. \quad (5.7)$$

Falls $F \geq 0.95$ gilt, wird das *MBR* als Approximation des Grundrisses übernommen und eine Instanz `RECHTECKGRUNDRISS` erzeugt.



a) Instanzen GEBÄUDEHINWEIS mit Primitiven auf Betragsbild (Bodengeometrie)

b) Instanzen RECHTECKGRUNDRISS, unterlegt mit LIDAR-DOM

Abbildung 5.14: Rekonstruktion mit rechteckigem Grundriß

Approximation durch rechtwinklige Strukturen

Nach der ersten Iteration werden auch andere als rechteckige Grundrisse zugelassen. Für komplexere Gebäude gelten meist ebenfalls die Prinzipien von Geradlinigkeit, Parallelität und Rechtwinkligkeit.

Polygone. Konzepte RECHTWINKLIGERGRUNDRISS können aus verschiedenen Konstellationen von Konzepten hervorgehen. Neben den Konzepten der unterschiedlichen Primitivobjekte sind dies die Konzepte VIERECK, RECHTECKGRUNDRISS oder RECHTWINKLIGERGRUNDRISS selbst. Die Gruppierung geht von den höchstwertigen Objekten aus, in der Regel von den Instanzen der beiden letztgenannten Objekte. In Abbildung 5.15 ist dargestellt, wie aus zwei Instanzen RECHTECKGRUNDRISS eine Instanz *RWG* erzeugt wird. Im Normalfall weichen die Orientierungen der erzeugenden Instanzen leicht voneinander ab. Die Orientierung der neuen Instanz *RWG* ist daher zu bestimmen. Bei Unterinstanzen verschiedener Hierarchieebenen ist dies die Orientierung der Instanz auf der höchsten Stufe. Bei gleichrangigen Instanzen wird ein mit der Bewertung γ gewichteter Mittelwert berechnet. Die so gedrehten Instanzen können sich überschneiden, oder es treten möglicherweise Lücken auf. In beiden Fällen erfolgt eine entsprechende Verkleinerung bzw. Vergrößerung der Instanz mit der niedrigeren Bewertung. Gegebenenfalls wird im Anschluß eine Generalisierung durchgeführt [112], um entstandene kleine Vorsprünge oder Ähnliches zu entfernen. Mit jedem Iterationsschritt kann nur eine weitere Instanz hinzugefügt werden.

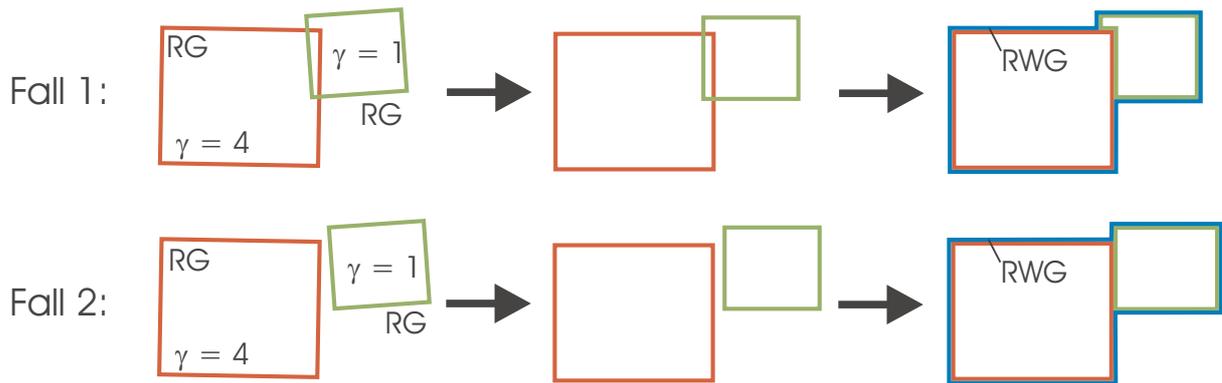


Abbildung 5.15: Gruppierung einer Instanz RECHTWINKLIGERGRUNDRISS aus Instanzen RECHTECKGRUNDRISS

Segmente. Die Instanzen GEBÄUDEHINWEIS, die aus dem Konzept BETRAGSSEGMENT hervorgehen, können beliebig umrandet sein. Das Verfahren zur Anpassung rechtwinkliger Strukturen an diese Segmente erfordert die Bestimmung einer Hauptorientierung. Für konvexe Segmente ist dies unmittelbar möglich. Im Falle eines konkaven Segmentes wird die Orientierung des größten konvexen Teilsegmentes gewählt.

Das Verfahrensprinzip [113] zur Anpassung rechtwinkliger Linien an Segmente ist in Abbildung 5.16 skizziert. Das Segment wird so in ein zweidimensionales kartesisches Koordinatensystem gedreht, daß die Hauptorientierung mit der y-Achse zusammenfällt. Nun erfolgt eine Abbildung der Segmentumrandung in das Raster des Koordinatensystems. Die Projektion der Umrandung auf die beiden Achsen führt zu zwei Histogrammen. Maxima der Histogramme stellen Hinweise auf geradlinige Strukturen dar. Für jedes überschwellige Maximum max_{x_i} auf der x-Achse wird über alle zugehörigen Pixel der Überdeckungsbereich der Koordinaten $k_{i,u,o}$ auf der y-Achse bestimmt und umgekehrt. Die Schnittpunkte mit allen in diesem Überdeckungsbereich liegenden Maxima der anderen Achse werden berechnet und durch Linienstücke verbunden. Beginnend bei einem beliebigen Element der konvexen Hülle aller Schnittpunkte läßt sich die rechtwinklige äußere Umrandung (RU) bestimmen, zum Beispiel, indem man stets den am weitesten nach rechts weisenden Pfad wählt. Das Verfahren eignet sich auch für komplexere rechtwinkliger Strukturen.

Analog zu der Vorgehensweise bei rechteckigen Gebäuden wird das Verhältnis F der Schnittmenge von Segmentfläche S und der RU zur Segmentfläche bestimmt. Ein weiteres Merkmal ist die Differenzfläche D :

$$F = \frac{RU \cap S}{S}, \quad (5.8)$$

$$D = \frac{(RU \cup S) \setminus S}{S}. \quad (5.9)$$

Falls $F \geq 0.95$ und $D \leq 0.05$ gelten, wird die RU als Instanz RECHTWINKLIGERGRUNDRISS erzeugt.

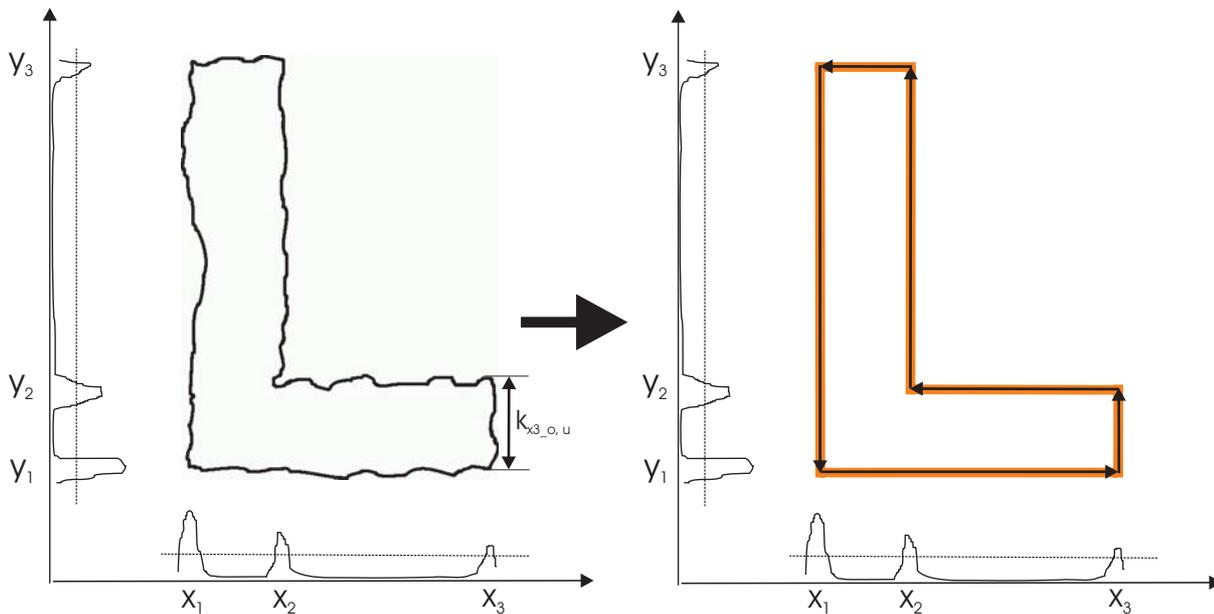


Abbildung 5.16: Rechtwinklige Umrandung eines Segmentes

Approximation durch Geradenstücke

In manchen Fällen werden die Approximationen sowohl als Objekt RECHTECKGRUNDRISS wie auch als Objekt RECHTWINKLIGERGRUNDRISS verworfen. Bei *Polygonen* wird dann das Polygon unverändert als Grundriß übernommen. Im Falle von *Segmenten* erfolgt eine Approximation mit einem dynamischen Split-Verfahren [115]. Beide Varianten resultieren in einer Instanz POLYGONGRUNDRISS.

5.6.2 Rekonstruktion der Dächer

Zur Bestimmung der Dachform kommen zwei Verfahren zum Einsatz. Das erste Verfahren wertet direkt die vom rechteckigen Grundriß umschlossenen Höhenwerte aus, während die zweite Methode auf der Analyse von Länge und Form der Schattenbereiche basiert.

Analyse der InSAR-Höhendaten

Für die Analyse des InSAR-DOM ist die Rückprojektion der rekonstruierten Grundrisse in die Entfernungsgeometrie der SAR-Bilder erforderlich. Als Hypothese für die Gebäudehöhe dient zunächst die mittlere Höhe $\hat{h}_{S \setminus L}$ aus Gleichung 5.6. Im Falle prismatischer Objekte wird $\hat{h}_{S \setminus L}$ über den rekonstruierten Grundriß neu berechnet. Bei Hinweisen auf Gebäude, die parametrischen Modellen entsprechen, erfolgt eine Anpassung von Ebenen an die Höhendaten:

- Anpassung einer Ebene über das Rechteck.

- Anpassung von je zwei Ebenen in Längs- und Querrichtung zum Objekt. Dabei ist zu beachten, daß aufgrund des Layover die Firstkante eines Giebeldachhauses nicht mittig liegen muß. Die Approximation erfolgt daher iterativ. Im ersten Schritt wird die Mitte gewählt. Die mittlere quadratische Abweichung der Höhenwerte zur Ebene dient als Kriterium für die Bewertung der Anpassung. Falls eine der beiden Ebenen einen deutlich schlechteren Wert aufweist, wird die Firstkante in Richtung Sensor verschoben. Anschließend werden neue Ebenen angepaßt.

Die Ebenenapproximation h_{ebene} mit der minimalen quadratischen Abweichung σ_E bestimmt die Zuweisung des Gebäudemodells. Der Winkel der Dachebene zum Boden dient zur Entscheidung zwischen den Konzepten FLACHDACHHAUS und PULTDACHHAUS. Falls der Winkel kleiner als 25 Grad ist, wird das Gebäude als Instanz FLACHDACHHAUS erzeugt, wobei die approximierte Ebene verworfen wird. Wenn die Approximation des Daches mit zwei Ebenen günstiger ist, erfolgt die Generierung einer Instanz GIEBELDACHHAUS. Der Parameter σ_E stellt ein Gütemaß bei der Weiterverarbeitung dar.

Analyse der Schatten

Wie in Abschnitt 3.2 dargelegt wurde, ist es möglich, aus der Ausdehnung und der Form des vom Gebäude verursachten Radarschattens auf die Gebäudehöhe und die Dachform zu schließen. Für jede Instanz GEBÄUDEHINWEIS erfolgt eine Analyse der Form der zugehörigen Instanzen SCHATTENREGION. Dabei werden die erzeugten Instanzen SCHATTENKANTE und BODENSCHATTENKANTE betrachtet. Streifen und L-Strukturen stellen Hinweise auf Flachdächer dar, während trapezförmige oder sechseckige Schatten Pult- bzw. Giebeldächer nahelegen. Als Maß für die Zuverlässigkeit der Schattenanalyse γ_{sch} dient die Überdeckung der Linienprimitive mit dem Umriß der Schattenregion.

Nach der Rekonstruktion der Dachform kann, mit den Gleichungen 3.4 und 3.6, anhand des Schattens der Verlauf der Gebäudehöhe h_{sch} bzw. die tatsächliche Lage des Grundrisses bestimmt werden. Dabei ist es allerdings nur möglich, Aussagen über jene Gebäudeseiten zu machen, an denen der Schatten auftritt. Für eine vollständige Rekonstruktion aus den Schatten allein müssen SAR-Daten aus verschiedenen Ansichten vorliegen.

Bestimmung der Dachform anhand beider Analysen

Beide Methoden zur Bestimmung der Dachform haben ihre Vorzüge und Nachteile. So ist die Schattenanalyse bei kleineren Gebäuden meist robuster, allerdings nur dann, wenn keine störenden Überstrahlungen auftreten und das Gelände hinter dem Gebäude frei ist. Die zweite Einschränkung gilt so nicht für die Analyse der Höhenwerte, die zudem mit wachsender Gebäudeausdehnung zuverlässiger wird. Zur Bestimmung eines Fehlermaßes Δ_{Dach} werden daher drei Fälle unterschieden:

- Wenn beide Analysen hinsichtlich der Dachform zum selben Ergebnis führen, ist Δ_{Dach} die Summe von σ_E , γ_{sch} und der Differenz Δ_{R_E} der aus dem Schatten berechneten Höhe

mit der Ebenenhöhe am Gebäuderand:

$$\Delta_{Dach} = \sigma_E + \gamma_{sch} + \Delta_{R-E}. \quad (5.10)$$

Bei kleinem Δ_{R-E} erfolgt eine Verbesserung des Grundrisses an der betreffenden Gebäude-
seite anhand der Schattenanalyse.

- Bei sich widersprechenden Resultaten der beiden Analysen und einem eindeutigen, guten Ergebnis der Höhenanalyse wird deren Ergebnis h_{ebene} übernommen. Das Maß Δ_{Dach} ist das Produkt aus σ_E und einem Malusfaktor 3:

$$\Delta_{Dach} = 3 \cdot \sigma_E. \quad (5.11)$$

- Analog ist das Vorgehen bei einer schlechten Approximation der Höhen durch Ebenen, oder falls zwei Ebenenkonfigurationen zu einem vergleichbaren Fehler σ_E führen. Als Gebäudehöhe dient h_{sch} und für Δ_{Dach} gilt:

$$\Delta_{Dach} = 3 \cdot \gamma_{sch}. \quad (5.12)$$

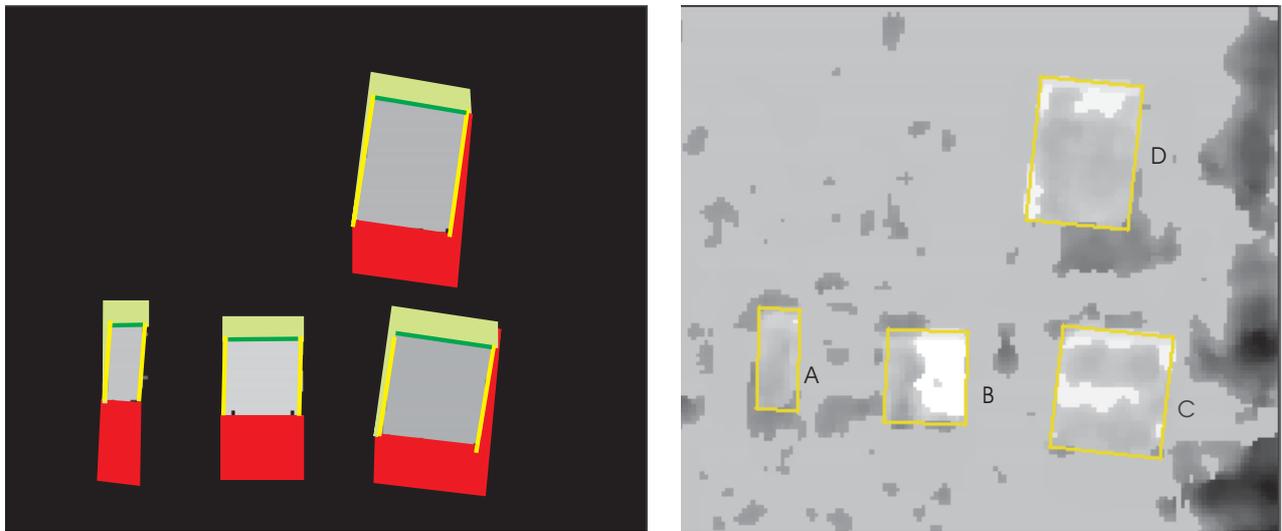
Der hintere Gebäudegrundriß wird entsprechend neu positioniert.

Bei den in Bild 5.14b dargestellten Grundrissen des Beispiels ergab sich folgendes Bild:

- Bei den Gebäuden A und C sprachen sowohl die Höhen- als auch die Schattenanalyse für ein Flachdach. Wegen des kleineren σ_E erhielt Gebäude A letztlich ein etwas besseres Δ_{Dach} als Gebäude C .
- Die Höhenanalyse ergab für Gebäude D ein Flachdach. Allerdings fiel die Schattenanalyse negativ aus, weil sich dort tatsächlich ein weiterer Gebäudeteil findet und nur in einem kleinen Bereich links ein Schatten auftritt. Das hatte nach Gleichung 5.11 ein schlechteres Δ_{Dach} zur Folge als bei A und C .
- Offenbar aufgrund von Überstrahlungen sind die Höhen- und Betragsdaten des Giebel-
dachhauses B gestört. Die beste Ebene in den Höhen wies einen großen Restfehler σ_E auf. Die Ebenenorientierung im Raum führte zur Zuweisung eines Flachdaches. Die Schatten-
analyse ergab einen schwachen Hinweis auf ein gedrehtes Flachdachhaus, was allerdings dem Grundriß widersprach und daher verworfen wurde. Das Gebäude erhielt schließlich die schlechteste Bewertung Δ_{Dach} von allen.

5.6.3 Iterative Verbesserung

In den folgenden Iterationsschritten werden auch Nachbarschaftsbeziehungen zwischen Gebäuden und Gebäudeteilen berücksichtigt. Die Grundlage für die weitere Verarbeitung stellen Simulationen von SAR-Bildern dar, die sich auf die bisherigen Ergebnisse stützen. Abbildung 5.17 zeigt das simulierte InSAR-DOM in der Entfernungsgeometrie. Den Höhendaten überlagert sind die zu erwartenden Orte des Schattens (rot), des Layoverbereichs (hellgrün), des Corner-Reflektors (dunkelgrün) und der restlichen Dachkanten (gelb).



a) Simulationsergebnis

b) Differenzbild der Höhenmodelle

Abbildung 5.17: Simulation als Basis für weitere Iterationen

Die Differenz zwischen dem rekonstruierten DOM und dem realen normalisierten DOM aus Bild 5.7d gibt Aufschluß über den aktuellen Stand des Verfahrens. Das Differenzbild ist in Abbildung 5.17b dargestellt. Mittelgraue Bereiche entsprechen einer Höhendifferenz von unter einem Meter. Dunkle Regionen stehen für eine rekonstruierte Höhe, die kleiner ist als im realen Datensatz. Dies ist hier bei den Bäumen rechts der Fall. Helle Bereiche treten zum Beispiel an Stellen auf, an denen die rekonstruierte Gebäudehöhe größer als die reale Höhe ist. Kleinere Abweichungen vorne und hinten am Gebäude können mit Layover- und Schatteneffekten erklärt werden. Die weitere Verarbeitung beinhaltet folgende Maßnahmen:

- *Übernahme als Ergebnis:* Stimmen die simulierten mit den realen Merkmalen überein, wird das Ergebnis akzeptiert. Das Ergebnis ist eine Instanz der vier möglichen Konzepte FLACHDACHHAUS, PULTDACHHAUS, GIEBELDACHHAUS oder PRISMATISCHESGEBÄUDE. Im Falle der drei erstgenannten Instanzen (Konzepte PARAMETRISCHESGEBÄUDE) ist die Bearbeitung für diesen Bereich weitgehend abgeschlossen. Zum Abschluß des Verfahrens erfolgt noch ein Ausgleich der Gebäudeorientierungen entlang von Straßen. Eine Instanz PRISMATISCHESGEBÄUDE kann im Zuge weiterer Iterationen noch wachsen.
- *Neubewertung:* Die Neubewertung erfolgt anhand zweier Kriterien: Zum einen wird festgestellt, ob Widersprüche zwischen den realen Daten und der Simulation bestehen. Zum anderen beinhaltet die Modellierung der Szene eine vorzugsweise geordnete, geradlinige Anordnung der Gebäude. Ausgehend von der Orientierung der am besten bewerteten Instanzen GEBÄUDE oder GEBÄUDEHINWEIS werden daher alle anderen Instanzen GEBÄUDEHINWEIS in der Nachbarschaft neu bewertet. Die Neubewertung fällt dabei umso günstiger aus, je geringer die Abweichung der Orientierungen ist.
- *Weitere Verarbeitung:* Die Neubewertung kann zur Folge haben, daß bei der nächsten Iteration eine andere Instanz GEBÄUDEHINWEIS als Grundlage für den Rekonstruktions-

schritt dient. Wenn dies nicht der Fall ist, erfolgt eine Verfeinerung durch gezielte Suche nach in der Nähe liegenden weiteren Hinweisen, wobei das Differenzbild die Richtung vorgibt:

- *Wachstum*: Falls sich am Gebäude ein noch nicht erfaßter erhabener Bereich anschließt, wird in diese Richtung gezielt nach entsprechenden Primitivobjekten gesucht. Südlich von Gebäude D befindet sich ein solcher Bereich. Im Ergebnis kann dies im einfachsten Fall zu einer Vergrößerung der bestehenden Instanz PARAMETRISCHESGEBÄUDE führen. Die andere Möglichkeit ist der Übergang von einem parametrischen zu einem generischen Modell, also zu einem komplexen Gebäude mit mehreren Teilgebäuden. Es wird nach der günstigsten Ergänzung für die vorhandene Instanz GEBÄUDEHINWEIS gesucht. Als Ergänzung kommen sowohl Instanzen der Primitivobjekte als auch weitere Instanzen GEBÄUDEHINWEIS in Betracht. Dabei werden in der Entfernungsgeometrie zunächst auch Überschneidungen der Instanzen GEBÄUDEHINWEIS zugelassen. Die Instanziierung benachbarter, überlappungsfreier Konzepte PRISMATISCHESGEBÄUDE erfolgt nach der Transformation in das Weltkoordinatensystem, mit dem in Abschnitt 5.6.1 beschriebenen Verfahren. Die Bewertung der neuen, größeren Instanz PRISMATISCHESGEBÄUDE ist die Summe der Einzelbewertungen. Diese günstige Bewertung spiegelt die zunehmende Evidenz durch die Berücksichtigung der Nachbarschaftsbeziehungen wider.
- *Verkleinerung*: Enthält der Umriß einer Instanz GEBÄUDE einen Bereich, der offenbar zu hoch rekonstruiert wurde (helle Region im Differenzbild), ist eine Verkleinerung vorzunehmen. Im Beispiel trifft das auf Gebäude B zu.
- *Aufspaltung*: Im Zuge der schrittweisen Verfeinerung kann sich herausstellen, daß ein zunächst als Einheit betrachtetes Gebäude tatsächlich aus verschiedenen Teilen besteht. Ein Hinweis darauf ist z. B. ein heller Streifen im Differenzbild, der die Instanz durchschneidet, wie er etwa an Gebäude C auftritt (Abbildung 5.17b). Die betroffene Instanz GEBÄUDE wird gegebenenfalls verworfen und aus der zugehörigen Instanz GEBÄUDEHINWEIS entsprechend kleinere neue Instanzen GEBÄUDEHINWEIS abgeleitet. Diese neuen Instanzen werden so gewählt, daß der verbleibende Höhenfehler minimiert wird. Für jede der so generierten Instanzen erfolgt eine Neuberechnung der Bewertung.
- *Zusammenfassung*: Umgekehrt zum gerade betrachteten Fall können zunächst getrennte Gebäudeteile schließlich zusammenwachsen. Entsprechende Instanzen GEBÄUDE mit ähnlicher Höhe werden fusioniert. Auch hier erfolgt eine Neuberechnung der Bewertung anhand der zugehörigen Instanzen von Teil- und Primitivobjekten.
- *Endgültige Ablehnung*: Falls schließlich alle lokal vorhandenen Instanzen GEBÄUDEHINWEIS abgearbeitet wurden und für keine der erzeugten Instanzen GEBÄUDE ein befriedigendes Ergebnis zu erzielen war, werden sie allesamt verworfen. An dieser Stelle findet sich im Endergebnis kein Gebäude.

Abbruchkriterien

Iterative Analyseverfahren erfordern Abbruchkriterien für die Beendigung der Verarbeitung. Hierzu wird der Fehler des Differenzbildes (zum Beispiel Abbildung 5.17b) bzw. der Differenzbilder im Falle einer Multiaspekt-Analyse betrachtet. Das Ziel ist, die mittlere quadrierte Abweichung RMS (*Root Mean Square*) zwischen Rekonstruktionsergebnis und dem bzw. den normalisierten InSAR-DOM zu minimieren. Es wird unterschieden zwischen dem Abschluß der Analyse an einer lokalen Stelle der Szene und dem globalen Ende der gesamten Verarbeitung:

- *Lokale Abbruchkriterien:*
 - An der entsprechenden Stelle sind alle Instanzen GEBÄUDEHINWEIS abgearbeitet worden. Das Gebäude mit dem kleinsten RMS wird übernommen, falls dieser RMS -Wert kleiner als ein Schwellwert RMS_{max_lokal} ist.
 - Alternativ zu der im vorhergehenden Punkt beschriebenen vollständigen Suche nach dem besten Ergebnis kann ein weiterer, kleinerer Schwellwert $RMS_{akzept_ersten_lokal}$ vorgegeben werden. Das erste lokale Ergebnis, das diesen zweiten Schwellwert unterschreitet, wird übernommen und anschließend die Analyse an dieser Stelle beendet.
- *Globale Abbruchkriterien:*
 - Analog zum Vorgehen auf der lokalen Ebene ist ein Schwellwert RMS_{akzept_global} definiert. Falls der RMS kleiner wird als dieser Schwellwert, erfolgt der Abbruch. Ein Wert von Null für RMS_{akzept_global} hat somit eine vollständige Suche zur Folge.
 - Eine Maximalanzahl von Iterationsschritten kann vorgegeben werden.

5.6.4 Auswertung von Multiaspekt-Daten

Die iterative Verbesserung der Resultate entfaltet ihre volle Wirkung, wenn mehrere SAR-Datensätze aus verschiedenen Aufnahmerrichtungen vorliegen. In Abbildung 5.18a-c sind für die drei vorhandenen Datensätze der Szene Solothurn die Analyseergebnisse nach der ersten Iteration dargestellt. Abbildung 5.18a zeigt das Ergebnis des bisher betrachteten Datensatzes, bei dem die Beleuchtung von Norden aus erfolgte. Bei den anderen beiden Aufnahmen wurde die Szene von Süden erfaßt, wobei sich der Beleuchtungswinkel unterscheidet.

Falls die Analysen in den einzelnen Aspekten zu sehr ähnlichen Ergebnissen führen, werden diese Ergebnisse durch Ausgleichsrechnung fusioniert. Dabei dient die Bewertung der zu fusionierenden Instanzen als Gewichtung. Die Bewertung einer fusionierten Instanz GEBÄUDE ergibt sich aus der Summe der Einzelbewertungen. Bei anderen sich überschneidenden Instanzen GEBÄUDE wird die am besten bewertete für das zu erzeugende 3D-Szenenmodell übernommen. Abbildung 5.18d zeigt das so gewonnene Fusionsergebnis zusammen mit den Referenzgrundrissen (weiß). An der Einfärbung wird deutlich, daß die Hinweise tatsächlich aus den verschiedenen Einzelanalysen hervorgingen.

Das Giebeldachhaus unten in der Mitte wurde im Fall der steilen Beleuchtung von Süden nicht detektiert. Durch die Fusion der Resultate ist es aber nun möglich, bei den weiteren Iterationsschritten auch in diesem Datensatz dort gezielt nach Hinweisen zu suchen.



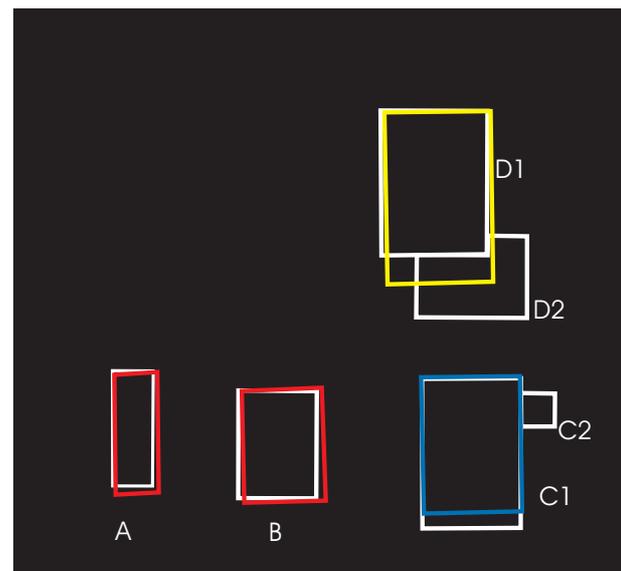
a) Beleuchtung von Norden



b) flache Beleuchtung von Süden



c) steile Beleuchtung von Süden



d) Ergebnisse auf Referenzgrundrissen

Abbildung 5.18: Analyseergebnisse aus verschiedenen Aspekten

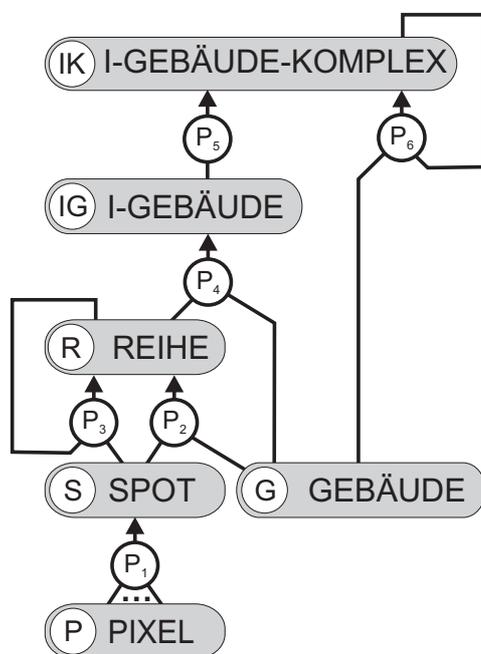
Die Analyse des Schattenwurfs ist nun an verschiedenen Gebäudeseiten möglich. Aus der Schattenganalyse kann daher an mehreren Seiten der Grundriß verbessert werden. Neben den Instanzen GEBÄUDE werden auch die Ergebnisse der Straßenextraktion kombiniert. Aus der Vereinigungsmenge der Instanzen STRASSENLINE erfolgt die Generierung einer Instanz STRASSENNETZ. Für das gezeigte Beispiel ergab sich hierbei keine wesentliche Verbesserung. Die weiteren Ergebnisse der Gebäuderekonstruktion werden in Kapitel 6 vorgestellt.

5.6.5 Rekonstruktion von Industriekomplexen

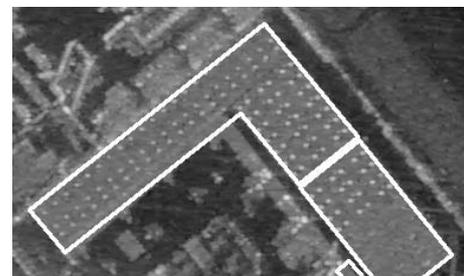
An dieser Stelle erfolgt die Beschreibung des Verfahrens zur Gruppierung von Industriekomplexen, basierend auf einer Gruppierung auffälliger, regelmäßiger Dachstrukturen.

Gruppierung anhand regelmäßiger Dachstrukturen

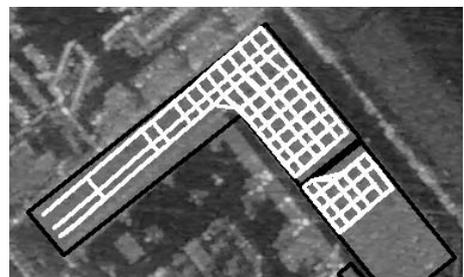
Die Analyse [82] beginnt mit der Gruppierung von Konzepten PIXEL zu Konzepten SPOT, durch Produktion P_1 . In Abbildung 5.8c sind die erzeugten Instanzen SPOT als Kreise versinnbildlicht. Mit P_2 werden die Konzepte SPOT und GEBÄUDE in ein Konzept REIHE überführt. Die Instanziierung von Konzepten REIHE beschränkt sich auf Instanzen SPOT, die innerhalb von Instanzen GEBÄUDE liegen. Die generische Produktion P_3 verwertet das Attribut *Ausrichtung* des Konzeptes GEBÄUDE als Kontextinformation zur Gruppierung von Konzepten REIHE. Dadurch läßt sich der Aufwand der Suche erheblich reduzieren, verglichen mit einer Suche in alle Richtungen. Das Vorhandensein einer Instanz REIHE mit einer gewissen Länge und Regelmäßigkeit ist hinreichend für die Ableitung einer Instanz I-GEBÄUDE (Industriegebäude). Produktion P_4 gibt den Vorgang auf der Konzeptebene wieder. Produktion P_6 faßt die Konzepte GEBÄUDE und I-GEBÄUDE zum Konzept I-GEBÄUDEKOMPLEX zusammen. Voraussetzung dafür ist die Nachbarschaft von Instanzen GEBÄUDE und I-GEBÄUDE. Dabei können nur Konzepte I-GEBÄUDE als Ausgangspunkte dienen (P_5). Das Ergebnis sind schließlich Instanzen I-GEBÄUDEKOMPLEX, die nicht weiter ausgebaut werden können und somit nicht Teil eines umfassenderen Objektes I-GEBÄUDEKOMPLEX sind.



a) Produktionsnetz



b) Instanzen GEBÄUDE



c) gruppierte Instanzen REIHEN

Abbildung 5.19: Gruppierung regelmäßiger, auffälliger Dachstrukturen

Kapitel 6

Ergebnisse

Dieses Kapitel behandelt zunächst das Konzept zur Bewertung der Ergebnisse. Daran schließt sich für jede Szene die Beschreibung der Daten, der Ergebnisse und deren Bewertung an.

6.1 Bewertekonzept

Eine Bewertung soll wiedergeben, zu welchem Grade eine gegebene Aufgabenstellung erfüllt wurde. Hier lautet die Aufgabe festzustellen, inwieweit eine Detektion und Rekonstruktion von Gebäuden durch eine Analyse von SAR- und InSAR-Daten möglich ist. Die beiden Teilaufgaben Detektion und Rekonstruktion sind dabei getrennt zu bewerten. Bei der Bewertung der Detektionsleistung wird zwischen den Ebenen der Sensorik und der Verfahren unterschieden:

- *Sensorebene:* Es stellt sich die Frage, welche Teilmenge G_E der Menge aller Gebäude G_R in den SAR-Daten erkennbar ist und somit von einem Verfahren detektiert werden kann. Die Menge G_E bilden jene Gebäude, die ein mit SAR-Daten vertrauter Mensch in den Bildern erkennen kann. Die Erkennungsleistung des Menschen wird in der Regel von keinem Verfahren erreicht. Daher kann man davon ausgehen, daß die so gewonnene Menge G_E eine obere Schranke für ein automatisches Verfahren darstellt. Die Referenzmenge G_R geht aus einer Auswertung von Karten, Luftbildern und DOM hervor. Die beiden beschriebenen Mengen G_E und G_R werden im Weiteren als *erfaßbare* und *reale Gebäudereferenzen* bezeichnet. Die Bewertung der Unterschiede von G_E und G_R erfolgt qualitativ.
- *Verfahrensebene:* Hier interessiert, welche Teilmenge G_D der erfaßbaren Gebäude G_E tatsächlich vom Verfahren detektiert wird. Bei der quantitativen Bewertung dieser Klassifikationsaufgabe sind mehrere Möglichkeiten zu berücksichtigen. Die gewählte Methode lehnt sich an Hoover et al. [54] und Geibel und Stilla [33] an. Es werden verschiedene Konfigurationen von Verfahrensergebnissen (*M-Segmente*) und erfaßbaren Gebäudereferenzen (*T-Segmente*) betrachtet, die in Abbildung 6.1 schematisch illustriert sind. Zunächst erfolgt die Berechnung aller Schnittmengen der Segmente $S = T \cap M$. Durch Normalisierung der Schnittfläche A_S mit den Segmentflächen A_T und A_M erhält man die Maße:

$$S_T := \frac{A_S}{A_T} \quad \text{und} \quad S_M := \frac{A_S}{A_M}. \quad (6.1)$$

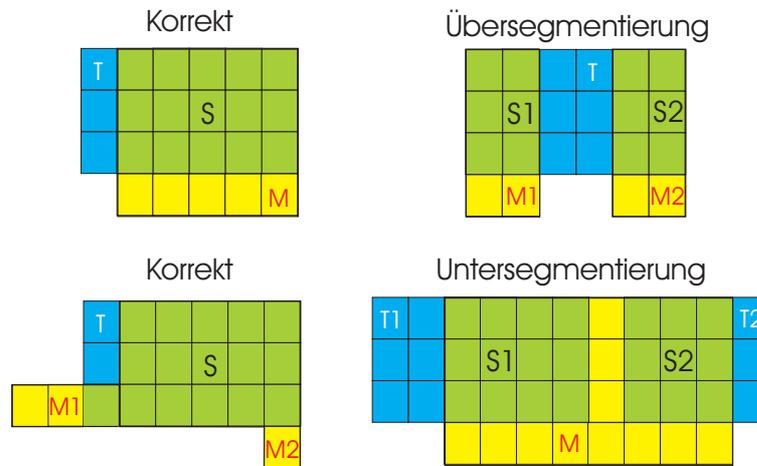


Abbildung 6.1: Beispiele zur Bewertung (grün: Schnittmenge S von T (blau) und M (gelb))

Es werden fünf Fälle unterschieden:

- *Korrekt*: Die Schnittmenge muß in beiden Richtungen signifikant sein, das heißt, die Flächenverhältnisse aus Gleichung 6.1 sind beide größer als ein Schwellwert $S_{th} = 0.5$:

$$S_T > S_{th} \quad \wedge \quad S_M > S_{th}. \quad (6.2)$$

- *Übersegmentierung*: Manchmal schneiden mehrere M -Segmente ein T -Segment. Die Schnittfläche $A_{S\ddot{U}}$ besteht nun aus der Vereinigungsmenge der Schnittflächen. Die Maße aus Gleichung 6.1 sind entsprechend anzupassen:

$$S_{T\ddot{U}} := \frac{A_{S\ddot{U}}}{A_T} \quad \text{und} \quad S_{M\ddot{U}} := \frac{A_{S\ddot{U}}}{A_{M_1 \cup M_2 \dots}}. \quad (6.3)$$

Falls eines der M -Segmente das Gros der Überdeckung verursacht, gilt trotz der weiteren M -Segmente das Ergebnis unter folgenden Bedingungen als korrekt:

$$\frac{S_{T\ddot{U}} + S_{M\ddot{U}}}{2} < \frac{S_T + S_M}{2}, \quad (6.4)$$

$$S_T > S_{th} \quad \wedge \quad S_M > S_{th}. \quad (6.5)$$

Andernfalls liegt eine Übersegmentierung vor, wenn gilt:

$$S_{T\ddot{U}} > S_{th} \quad \wedge \quad S_{M\ddot{U}} > S_{th}. \quad (6.6)$$

- *Untersegmentierung*: Mehrere T -Segmente schneiden ein M -Segment. Analog zu Gleichung 6.3 sind die Maße zu verändern:

$$S_{TU} := \frac{A_{SU}}{A_{T_1 \cup T_2 \dots}} \quad \text{und} \quad S_{MU} := \frac{A_{SU}}{A_M}. \quad (6.7)$$

Eine Untersegmentierung liegt vor, falls folgende Bedingung zutrifft:

$$S_{TU} > S_{th} \quad \wedge \quad S_{MU} > S_{th}. \quad (6.8)$$

Es kann unter Umständen zu Konflikten kommen, wenn das *T-Segment* bereits als korrekt oder übersegmentiert eingestuft wurde. Dann wird jene Einstufung übernommen, deren Bedingungsteil (Gl. 6.5, 6.6 und 6.8) den höchsten Mittelwert aufweist.

- *Nicht detektiert*: Die verbleibenden *T-Segmente* aus der Gesamtmenge T_A wurden nicht detektiert.
- *Falsch detektiert*: Die restlichen *M-Segmente*.

Bei der Wahl eines Qualitätsmaßes sollten korrekte Segmente T_K besser bewertet werden, verglichen mit Über- und Untersegmentierung (Mengen $T_{\ddot{U}}$ bzw. M_U). Nicht detektierte *T-Segmente* oder fehlende *M-Segmente* (Menge M_N) hingegen schmälern die Qualität. Ein reines Zählen der Segmente birgt die Gefahr, daß viele kleine Segmente das Ergebnis dominieren. Daher sollte die Fläche der Objekte eingehen. Das aus der Literatur [33] übernommene Maß q_L leistet dies:

$$q_{L0} = \frac{\sum_{T \in T_K} S_T \cdot A_T + \sum_{T \in T_{\ddot{U}}} k_{\ddot{U}} \cdot S_T \cdot A_T + \sum_{M \in M_U} k_U \cdot S_{U_T} \cdot A_{U_T} - \sum_{M \in M_N} A_M}{\sum_{T \in T_A} A_T}, \quad (6.9)$$

$$q_L = \max(q_{L0}, 0), \quad (6.10)$$

mit den Malusfaktoren $k_{\ddot{U}}$ und k_U für Über- und Untersegmentierung:

$$k_{\ddot{U}} = (2m - 1)/m^2 \quad m = \text{Anzahl M-Segmente}, \quad (6.11)$$

$$k_U = 1/t^2 \quad t = \text{Anzahl T-Segmente}. \quad (6.12)$$

- *Gesamtsystem*: Hier werden Sensor und Verfahren zusammen betrachtet. Dies geschieht durch Vergleich der Ergebnisse G_D mit der realen Gebäudereferenz G_R , wobei wieder die oben beschriebenen Methoden verwendet werden.

Die Bewertung der Rekonstruktionsleistung basiert auf den folgenden Merkmalen:

- Zuordnung des Gebäudemodells,
- Abweichung der Ecken der Grundrisse,
- Abweichung der mittleren Gebäudehöhe.

Bei den beiden letztgenannten Merkmalen folgt die Gesamtbewertung jeder Szene der Methode nach *Sester et al.* [100]. Hierbei erfolgt die Berechnung der Wurzel aus der mittleren quadrierten Abweichung *RMS* (*Root Mean Square*) σ_x , σ_y und σ_z , für die x-, y- und z-Koordinaten.

Neben rechteckigen sind rechtwinklige Grundrisse zugelassen. Daher ist eine topologische Abweichung zwischen Referenz und Ergebnis möglich. So wurde ein Objekt RECHTECKGEBÄUDE als Objekt RECHTWINKLIGESGEBÄUDE rekonstruiert, mit einem zusätzlichen kleinen Vorbau. Auch in solchen Fällen soll eine Bewertung erfolgen. Als Abstand wird dann die Minimaldistanz zwischen der fraglichen zusätzlichen Ecke und der entsprechenden Kante des zu vergleichenden Objekts gewählt. Für die geometrische Bewertung übersegmentierter Gebäude werden die Einzelsegmente zusammengefaßt.

6.2 Bewertung der Ergebnisse

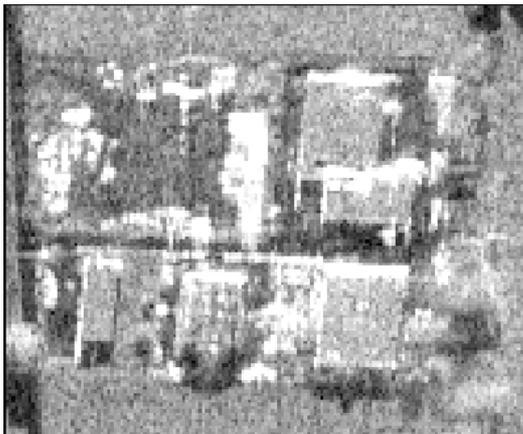
Es wurden sieben Datensätze dreier Szenen verarbeitet, die allesamt in der Entfernungsgeometrie vorlagen. Die Datensätze Frankfurt Flughafen und Universität Karlsruhe stammen vom AER-II-Sensor [23] des FGAN-FHR. Zur Erzeugung der InSAR-DOM aus den komplexwertigen Interferogrammen waren die in Abschnitt 2.5 vorgestellten Schritte durchzuführen: Koregistrierung, Interferogrammberechnung, Kohärenzschätzung, Abzug der flachen Erde, Phasenfortsetzung und schließlich die Höhenberechnung. Die Datensätze der Szene Solothurn wurden dem Autor freundlicherweise von Herrn Dr. Schmid vom Wehrbeschaffungsamt der Schweiz überlassen. Es handelt sich um InSAR-Daten des DO-SAR-Sensors [25]. Hier waren bereits die Verarbeitungsschritte bis einschließlich der Phasenfortsetzung von seiten der Firma Dornier erfolgt. Die wichtigsten Parameter der Daten sind in der Tabelle 6.1 aufgeführt. Die Angaben zu Beleuchtungswinkel, Entfernung und Flughöhe beziehen sich auf die Mitte des betrachteten Szenenausschnitts. Der eindeutige Höhenbereich ($\Delta\varphi < 2\pi$) ergibt sich aus Gleichung 2.49. Die Standardabweichung der Höhe σ_h wurde über größere, ebene Flächen im InSAR-DOM geschätzt. Dieser Wert kann an anderen Stellen schlechter sein. Die Datensätze werden im Folgenden zunächst eingehend vorgestellt und anschließend die Verfahrensergebnisse bewertet.

Szene	Solothurn	Karlsruhe	Frankfurt
Anzahl Datensätze	3	3	1
davon InSAR	3	1	1
Beleuchtungsrichtung	Norden, Süden, Süden	Norden	Nord-Ost
Azimutauflösung	1.25, 1.17, 1.25 m	26 cm	33 cm
Entfernungsauflösung	≈ 1.25 m	94 cm	94 cm
Beleuchtungswinkel θ	$64^\circ, 57^\circ, 70^\circ$	$57^\circ, 57^\circ, 52^\circ$	57°
Flughöhe über Grund	3100 m	3020, 3020, 1100 m	3020 m
Entfernung	7.3, 5.7, 9 km	5.5, 5.5, 1.8 km	5 km
Polarisation	HH	HV (InSAR), HH, VV	HH
Signalwellenlänge λ	3.15 cm	3 cm	3 cm
Basislinie B (InSAR)	81 cm	80 cm	80 cm
Antennenwinkel ξ (InSAR)	90°	58°	47°
Eindeutige Höhe (InSAR)	283, 222, 350 m	173 m	160 m
geschätztes σ_h (InSAR)	1, 1, 2 m	5 m	2 m

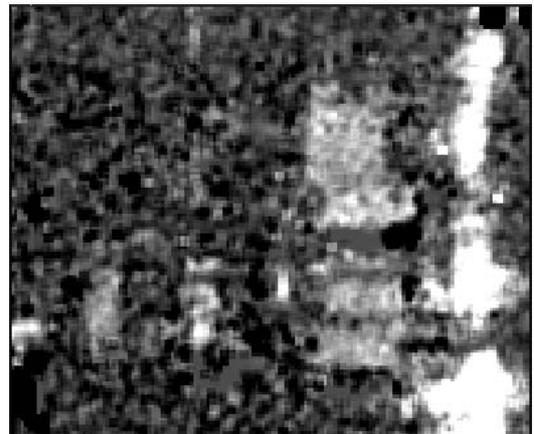
Tabelle 6.1: Parameter der verarbeiteten Datensätze

Szene Solothurn

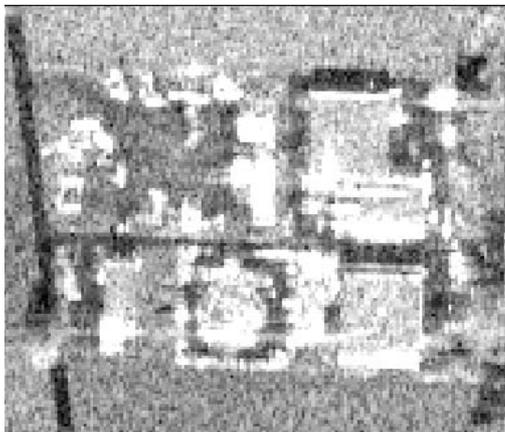
Für jeden der drei Datensätze der Szene Solothurn liegen die InSAR-Phase, die Betragsbilder und die Kohärenz vor. Die SAR-Daten decken einen größeren Bereich ab. In Abbildung 6.2



a) Betrag bei Beleuchtung von Norden



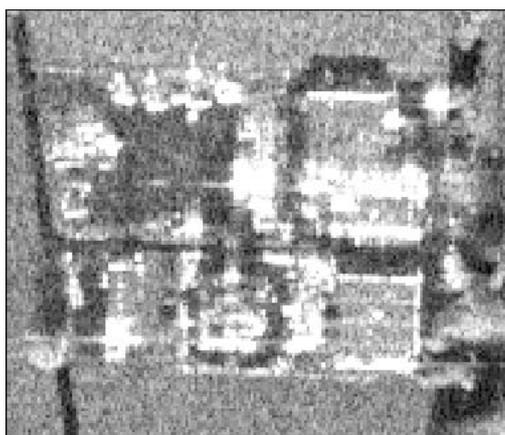
b) DOM zu Bild a)



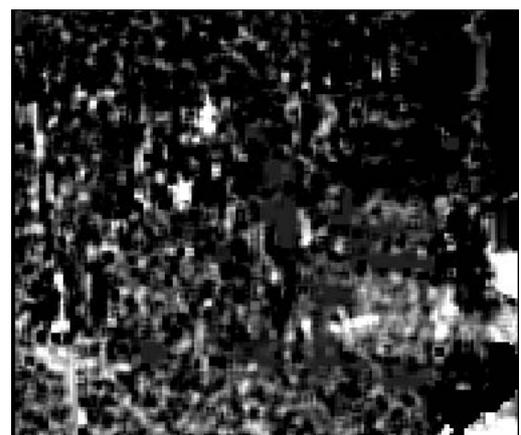
c) Betrag bei steiler Beleuchtung von Süden



d) DOM zu Bild c)



e) Betrag bei flacher Beleuchtung von Süden



f) DOM zu Bild e)

Abbildung 6.2: 3 InSAR-Datensätze der Szene Solothurn

sind jeweils der Betrag und das aus der Phase berechnete DOM für einen Teil der Szene dargestellt. Es wurde ein Bereich der Szene ausgewählt, der in allen drei Messungen enthalten war. An den Betragsbildern erkennt man gut die Aspektabhängigkeit der SAR-Messungen. Bei der Richtungsänderung um 180 Grad treten nun Schatten dort auf, wo vorher Layover und Corner-Reflektoren zu sehen waren. Es fällt auf, daß die Qualität der InSAR-Höhe bei der flachen Beleuchtung (Abbildung 6.2f) stark abfällt. Ein Vergleich der mittleren Kohärenz der freien Fläche im unteren Bereich ergab, daß auch die Kohärenz bei diesem Datensatz niedriger war als bei den anderen Messungen. Dies liegt vermutlich an der größeren Entfernung von etwa 9 km, verglichen mit 6 km und 7 km bei den beiden anderen Aufnahmen.

Zur Bestimmung der realen Gebäudereferenz diente ein LIDAR-DOM, das dankenswerterweise ebenfalls von Herrn Dr. Schmid zur Verfügung gestellt wurde (Abbildung 6.3). Es stammt vom Sensor der Firma TopoSys [79] und liegt in einem Bodenraster von einem Meter vor. Anhand der Höhenschnitte können die Gebäude *A* und *B* als Flachdach- beziehungsweise Giebeldachhaus klassifiziert werden. Die Gebäudestrukturen *C* und *D* bestehen im Wesentlichen jeweils aus zwei Flachbauten. Das Teilgebäude *C2* ist in keinem der InSAR-Betragsbilder zu erkennen. Davon abgesehen entspricht die erfaßbare Gebäudereferenz der realen Gebäudereferenz.

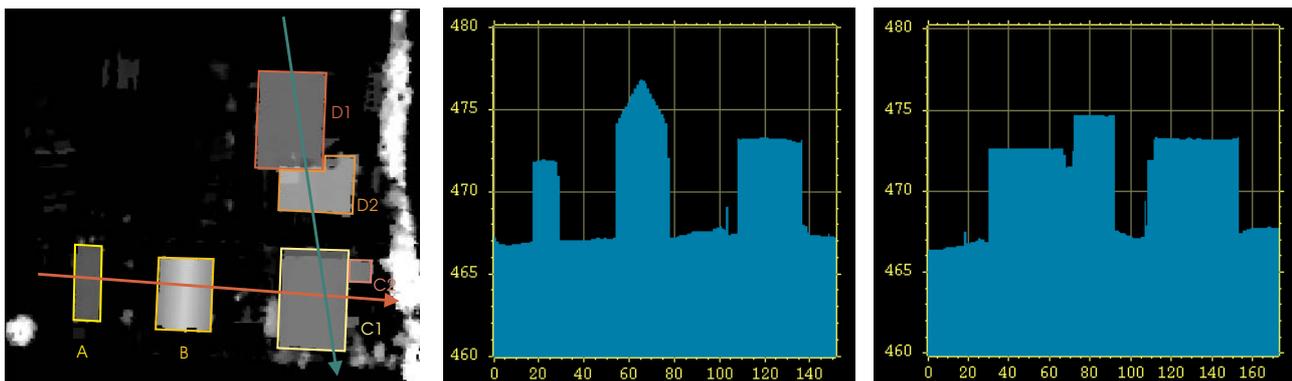
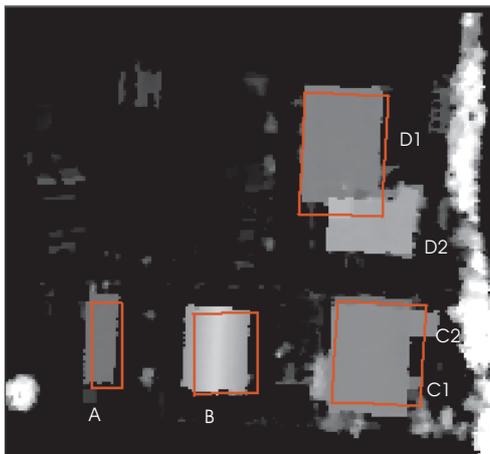


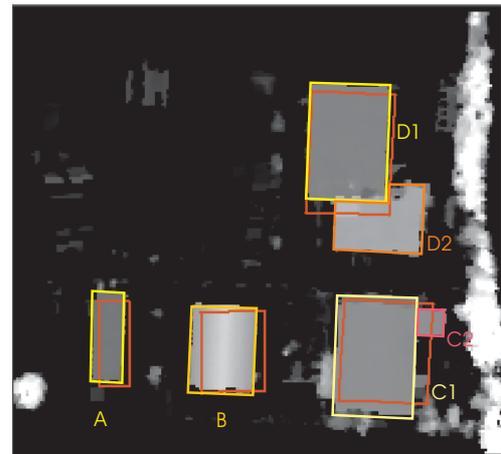
Abbildung 6.3: DOM der Szene Solothurn und Schnitte entlang des roten bzw. grünen Pfeils

Abbildung 6.4a zeigt das Ergebnis der Rekonstruktion für den aus Norden gemessenen Datensatz nach der ersten Iteration, überlagert auf das LIDAR-DOM. Ein Vergleich mit den Referenzdaten ergibt, daß vier von sechs Gebäuden bzw. Teilgebäuden detektiert wurden (Bild 6.4b). Es fehlen der untere Teil (*D2*) des zweiteiligen Gebäudes *D* und der kleine Anbau *C2* der Gruppe *C*.

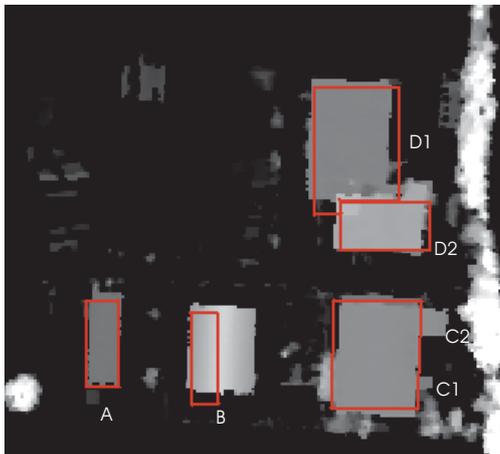
Das Endergebnis nach drei Iterationen, unter alleiniger Auswertung des Datensatzes der Beleuchtung von Norden, zeigt Bild 6.4c. Das Teilgebäude *D2* ist nun enthalten. Das komplexe Gebäude *D* wurde als Instanz PRISMATISCHESGEBÄUDE rekonstruiert, hervorgegangen aus zwei Instanzen der Konzepte RECHTECKGRUNDRISS (*D2*) und RECHTWINKLIGERGRUNDRISS (*D1*). In der Realität verhält es sich allerdings genau umgekehrt. Die Fehlinterpretation ist vermutlich auf Layovereffekte zurückzuführen. Die betroffene Gebäudefläche ist aber verhältnismäßig klein. Die Höhenwerte an der rechten Seite des Giebeldachhauses *B* sind gestört, wie man in Bild 6.2b sehen kann. Daher wurde nur die linke Gebäudehälfte rekonstruiert, der das Gebäudemodell Pultdachhaus zugewiesen wurde. Das Verhältnis der Schnittfläche zur Fläche des Referenzobjekts ist etwas kleiner als der Schwellwert $S_{th} = 0.5$. Daher ist das Gebäude



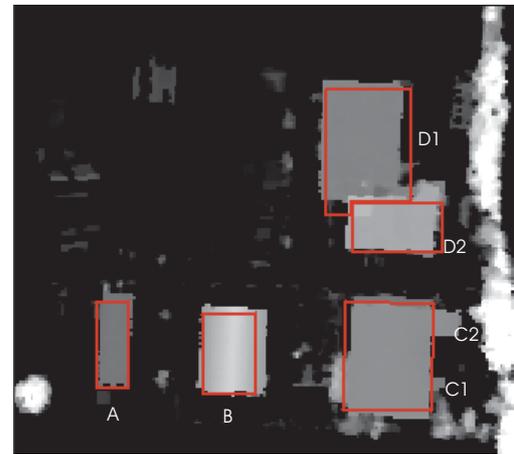
a) Beleuchtung von Norden: 1. Iteration



b) Ergebnis aus a) und Referenzdaten



c) Beleuchtung von Norden: Endergebnis

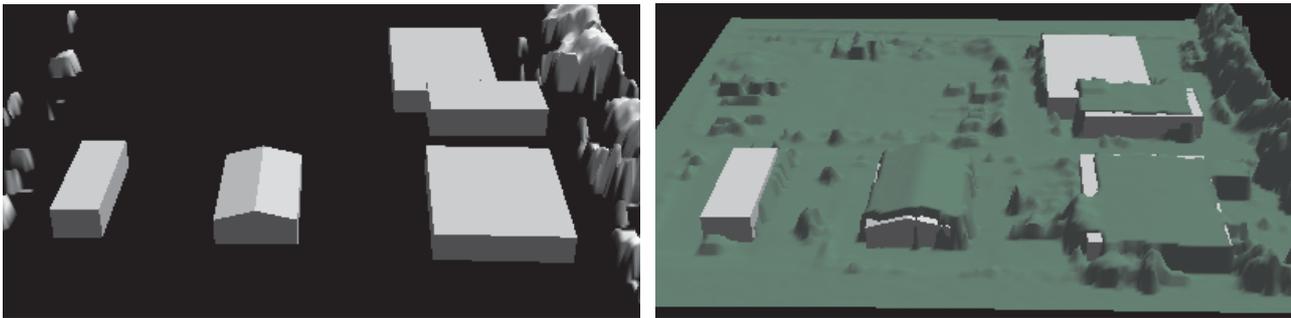


d) Endergebnis für Multiaspekt-Analyse

Abbildung 6.4: Ergebnisse für die Szene Solothurn, überlagert auf LIDAR-DOM

als fehlend zu werten. Gebäude *A* ist richtig als Flachdachhaus erkannt worden. Dieses Modell wurde auch Gebäude *C1* zugewiesen, was mit der erfaßbaren Gebäudereferenz übereinstimmt.

In 6.4d ist das Endergebnis der gemeinsamen Analyse der drei Datensätze dargestellt. Auch in diesem Fall wurden drei Iterationsschritte durchgeführt. Eine wesentliche Verbesserung ergab sich bei Gebäude *B*, dessen Grundriß nun besser der Referenz entspricht und daher als detektiert gelten kann. Aufgrund von Störungen ergab die Analyse der Höhendaten kein klares Bild. Die Schattenanalyse führte letztlich zur korrekten Klassifizierung als Giebeldachhaus. Es ist kein falsches Gebäude erzeugt worden. Abbildung 6.5a zeigt eine 3D-Ansicht des letztgenannten Ergebnisses. Neben den rekonstruierten Gebäuden sind dort die Bäume aus dem InSAR-DOM zu sehen. In Abbildung 6.5b wurde die Vektordarstellung der Gebäude mit dem LIDAR-DOM überlagert. Man sieht, daß die Grundrisse und Höhen teilweise voneinander abweichen, aber im Großen und Ganzen richtig erkannt wurden.



a) 3D-Ansicht des Ergebnisses

b) 3D-Ansicht aus a) und LIDAR-DOM (grün)

Abbildung 6.5: Visualisierung des Endergebnisses

In den Tabellen 6.2 und 6.3 sind die quantitativen Bewertungen von Detektion und Rekonstruktion zusammengefaßt. Da sich die erfaßbare und die reale Referenz nur um das kleinste Gebäude *C2* unterscheiden, fallen beide Bewertungen ähnlich aus. Insbesondere die Güte der Detektion bei der Auswertung aller drei Ansichten kann, mit $q_L = 0.86$, als gut bezeichnet werden.

Einordnung des Ergebnisses	erfaßbare Referenz G_E		reale Referenz G_R	
	1 Aspekt	3 Aspekte	1 Aspekt	3 Aspekte
Anzahl Referenz	5	5	6	6
Anzahl Ergebnis	5	5	5	5
korrekt	4	5	4	5
übersegmentiert	0	0	0	0
untersegmentiert	0	0	0	0
fehlt	1	0	2	1
falsch	0	0	0	0
q_L	0.73	0.86	0.71	0.84

Tabelle 6.2: Bewertung der Detektion bezüglich erfaßbarer und realer Gebäudereferenz

Hinsichtlich der Rekonstruktion bezieht sich die Bewertung auf die fünf Referenzgebäude, denen detektierte Objekte zugeordnet worden sind. Bei den x- und y-Koordinaten ist jeweils der RMS für das betrachtete Gebäude aufgeführt. Der Wert σ gibt die Gesamtbewertung wieder. Bei der Bewertung der topologisch nicht korrekt erkannten Gebäude *D1* und *D2* tritt das angesprochene Problem einer abweichenden Eckenanzahl von Objekt und Referenz auf. Es wurden die Abstände der drei korrekten Ecken gewertet und der minimale Abstand des zusätzlichen Erkers zu dem von diesen drei Punkten aufgespannten Rechteck. Von den fünf Gebäuden ist auch bei der Analyse aller drei Datensätze nur zwei Gebäuden das richtige Modell zugewiesen worden. Im Falle von *D1* und *D2* lag das an den erwähnten fehlenden bzw. zusätzlichen Detail-

strukturen. Die Dachform selber wurde richtig erkannt. Um das zu verdeutlichen, ist für diese Szene als weiteres Merkmal die Dachform berücksichtigt worden.

Gebäude	Ein Aspekt					Drei Aspekte				
	Fehler in Meter			Modell	Dach	Fehler in Meter			Modell	Dach
	x	y	z	richtig	richtig	x	y	z	richtig	richtig
<i>A</i>	1.4	2.3	+1.5	✓	✓	1.4	2.3	+1.5	✓	✓
<i>B</i>	8.5	4	-2.8	-	-	2.5	2.1	-2.5	✓	✓
<i>C1</i>	1.9	2.0	+0.5	-	✓	1.9	2.0	+0.5	-	✓
<i>D1</i>	1.4	2.9	-0.8	-	✓	1.4	2.9	-0.8	-	✓
<i>D2</i>	2.5	3.9	+0.5	-	✓	2.5	3.9	+0.5	-	✓
σ , Modell, Dach	4.1	3.1	1.5	1/5	4/5	2.0	2.7	1.4	2/5	5/5

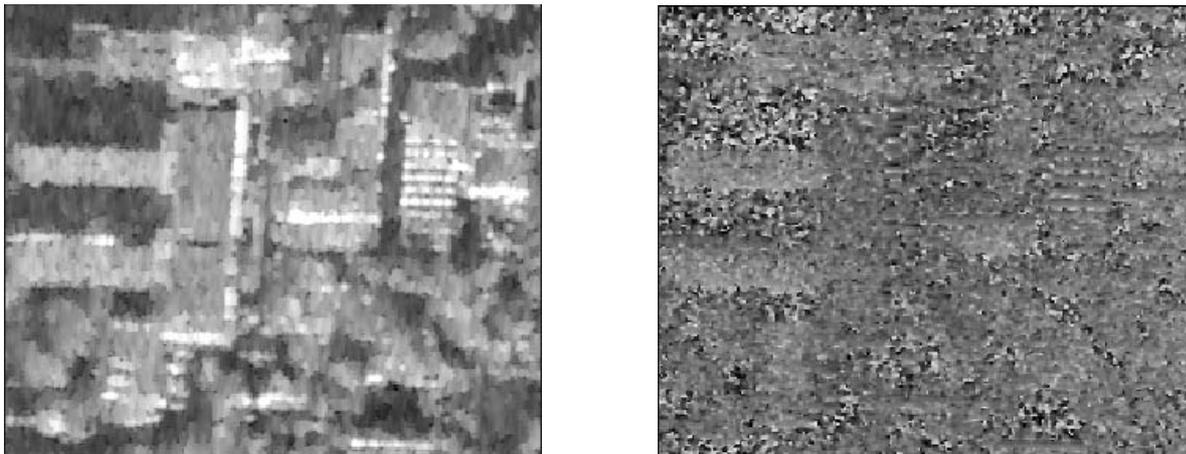
Tabelle 6.3: Bewertung der Rekonstruktion bezüglich der realen Gebäudereferenz

Bei der geringen Stichprobe von fünf Gebäuden ist natürlich von einer tiefgehenden statistischen Analyse der Ergebnisse abzusehen. Es läßt sich aber feststellen: die kombinierte Auswertung mehrerer Datensätze unterschiedlicher Beleuchtungsrichtungen hat eine Verbesserung der Detektion und Rekonstruktion ermöglicht.

Szene Universitätsgelände Karlsruhe

Zur Generierung des InSAR-DOM standen für jeden der Kanäle 1 und 2 des Sensors je drei komplexe SAR-Bilder zur Verfügung. Die Polarisation dieser SAR-Bilder war HV. Der Meßflug fand im September 1999 statt. Der Beleuchtungswinkel θ betrug in der Szenenmitte 57° , bei einer Höhe über Grund von etwa 3020 m. Die Ortsauflösung ist circa 94 cm in Entfernungsrichtung und 26 cm in Azimut. Aus den zusammengehörigen Bildpaaren wurden zunächst drei Interferogramme berechnet. Durch komplexe Mittelwertbildung ist daraus das Interferogramm erzeugt worden, das als Grundlage zur Höhenbestimmung diente. Abbildung 6.6 zeigt dessen Intensität und Höhe in der Entfernungsgeometrie. Zur Visualisierung wurden die Daten in Azimutrichtung um einen Faktor 3 unterabgetastet und zum besseren Vergleich mit den Referenzdaten um 180° gedreht. Für die Darstellung der Ergebnisse in diesem Kapitel wurde ein Teilbereich des Universitätsgeländes ausgewählt, der Gebäude verschiedener Typen enthält. In dem gewählten Szenenausschnitt befinden sich im oberen Bereich die Gebäude der Elektrotechnik (rechts) und der Chemie. Darunter sind einige kleinere und niedrigere Bauten zu finden.

Das folgende Beispiel soll verdeutlichen, daß sowohl der kleine Aspektunterschied der interferometrischen Kanäle als auch eine Polarisationsänderung zu abweichenden Resultaten bei der Segmentierung von Primitivobjekten führen kann. In Bild 6.7a,b sind die Ergebnisse einer Kantendetektion in den 3-Look-Amplitudenbildern für den linken Bereich der Szene dargestellt. Zeitgleich erfolgte in Kanal 3 eine SAR-Messung in HH-Polarisation. Die darin segmentierten Kanten sind in Bild 6.7c illustriert. Die strukturelle Analyse setzt stets auf der Vereinigungsmenge der Primitivobjekte aus allen Kanälen eines Aspektes auf, damit möglichst alle

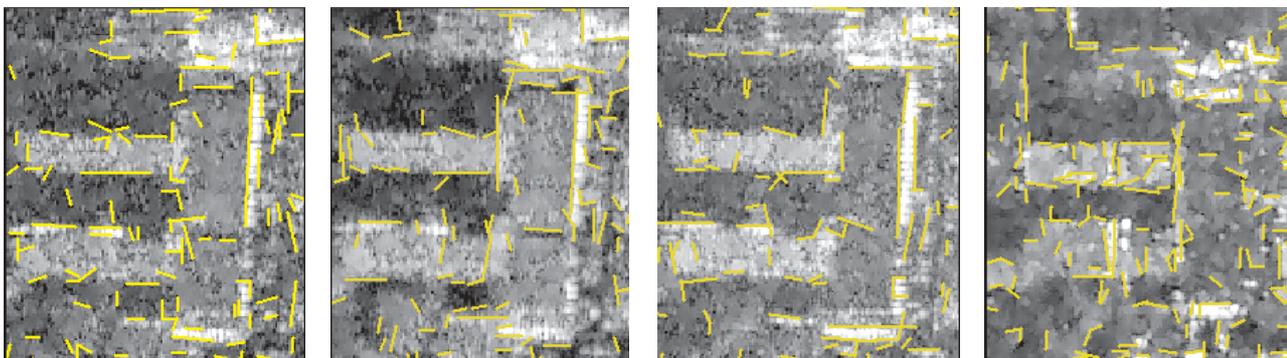


a) InSAR-Intensität (HV-Polarisation)

b) InSAR-DOM

Abbildung 6.6: InSAR-Datensatz der Szene Karlsruhe in Enfernungsgeometrie

Gebäudekanten erfasst werden. Es stand noch ein weiteres SAR-Bild zur Verfügung. Die Messung (VV-Polarisation) erfolgte ebenfalls von Norden, bei einer Flughöhe von etwa 1100 m. Abbildung 6.7d zeigt die dort extrahierten Kanten.



a) Kanal 1 (HV)

b) Kanal 2 (HV)

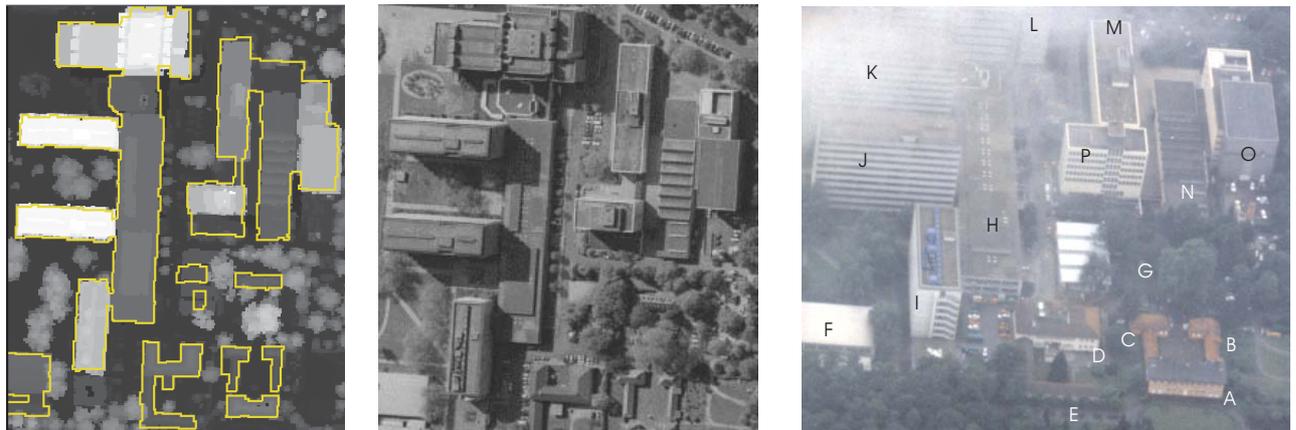
c) Kanal 3 (HH)

d) niedriger Flug

Abbildung 6.7: Kantenextraktion in verschiedenen Betragsbildern

Als Höhenreferenz wurde auch hier ein LIDAR-DOM vom TopoSys-Sensor mit einer Rasterweite von einem Meter verwendet. In Abbildung 6.8a ist das DOM zusammen mit den Gebäudeumrissen aus einer Karte dargestellt. Diese innerstädtische Szene ist wegen der dichten Bebauung, mit zum Teil hohen Gebäuden, und der vielen Bäume problematischer als die Szene Solothurn. Die Auswirkung der Bäume sieht man besonders gut an dem Luftbild in Schrägsicht, das während des niedrigeren SAR-Meßflugs aufgenommen wurde (Abbildung 6.8c). Man erkennt allerdings auch die negativen Auswirkungen von Bewölkung im sichtbaren Spektralbereich, die bei Radar dieser Wellenlänge kaum eine Rolle spielt.

Die reale Gebäudereferenz ging aus der Auswertung des DOM, der Karte, des Orthophotos und einer Begehung der Szene hervor. In Bild 6.8d ist sie dem DOM überlagert dargestellt. Die



a) DOM mit Grundrissen

b) Orthophoto

c) Aufnahme während SAR-Messung

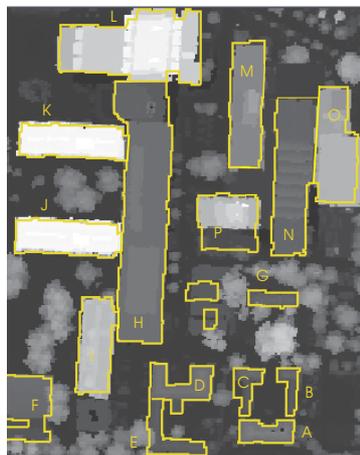
d) Reale Gebäudereferenz G_R e) Erfassbare Gebäudereferenz G_E

Abbildung 6.8: Referenzdaten der Szene Karlsruhe

Gebäudekomplexe oben sind in ihre Teile zerlegt worden. Bei den beiden kleinen Strukturen in der Mitte handelt es sich nicht um Gebäude, sondern um wandlose Unterstände für Lagerzwecke. Insgesamt bilden die 16 Gebäude und Teilgebäude *A* bis *P* die reale Gebäudereferenz. Dem stehen 11 in den SAR-Bildern erkennbare Gebäude (Kleinbuchstaben *a-p*) gegenüber (Abbildung 6.8e). Meist handelt es sich dabei um die größeren Bauten. Bei den nicht erkennbaren Gebäuden wirken sich vor allem Verdeckungen durch Bäume aus. Gebäude *G* ist auch im Luftbild 6.8c nicht zu sehen. Besonders interessant sind die Gebäude *B*, *C*, *E* und *F* (Bild 6.8d), die auch durch Layover von dahinterliegenden großen Bäumen zum Teil überdeckt werden.

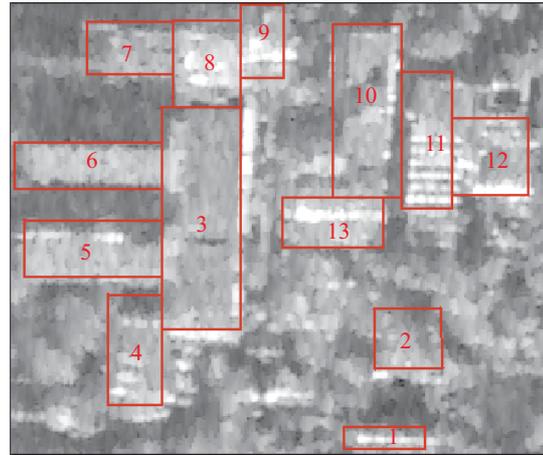
Die dichte Bebauung und die Bäume erwiesen sich als Hindernisse für die Analyse der Radarschatten und Straßen. Im Hinblick auf die in Abschnitt 4.2 vorgestellte Layover/Schattensimulation der Szene war dies nicht anders zu erwarten. Die Höhenbestimmung der rekonstruierten Gebäude basierte daher fast ausschließlich auf der Analyse des InSAR-DOM. Allerdings war die Standardabweichung der InSAR-Höhe mit 5 m schlechter als bei den anderen Datensätzen.

Dies lag möglicherweise an Schwankungen des Flugzeugs während der Messung, die im Zuge der SAR-Prozessierung nicht vollständig kompensiert werden konnten.

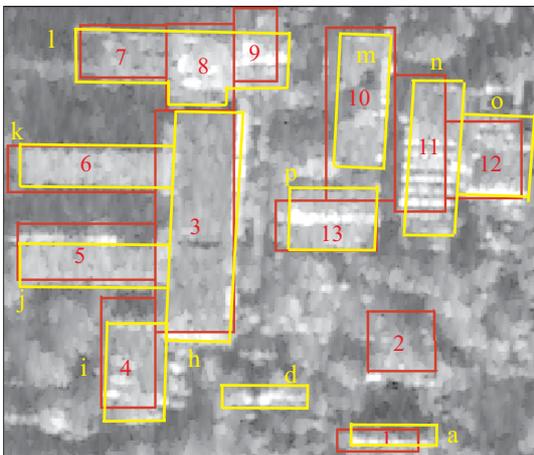
In Abbildung 6.9a ist die Menge aller im Zuge der ersten Iteration detektierten Instanzen GEBÄUDEHINWEIS dargestellt. Das in die Entfernungsgeometrie zurückprojizierte Ergebnis mit 13 Instanzen GEBÄUDE illustriert Bild 6.9b. Abbildung 6.9c zeigt das Resultat von Bild 6.9b zusammen mit der erfaßbaren Gebäudereferenz. Nach fünf Iterationsschritten lag das Endergebnis vor. Dessen Vergleich mit der realen Gebäudereferenz ermöglicht Abbildung 6.9d.



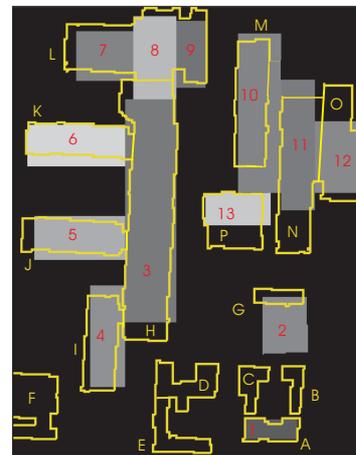
a) alle Instanzen GEBÄUDEHINWEIS



b) Die besten Instanzen GEBÄUDE aus a)



c) Stand nach 1. Iteration, erfaßbare Referenz



d) Endergebnis und reale Referenz

Abbildung 6.9: Ergebnisse für den InSAR-Datensatz Karlsruhe

Der Abgleich des Ergebnisses mit den 11 Gebäuden der erfaßbaren Referenz ergibt: 9 Gebäude sind korrekt, je eines fehlt (*d*) oder ist übersegmentiert (*l*). Ein falsches Gebäude (*M-Segment 2*) wurde erzeugt. Für das Qualitätsmaß q_L ergibt sich ein Wert von 0.68. Eine Übersicht der Bewertung der Detektionsleistung findet sich in Tabelle 6.4.

Im Vergleich mit der realen Gebäudereferenz ist festzustellen, daß von den 16 Gebäuden immerhin 6 fehlen. Das liegt vor allem an der bereits diskutierten Verdeckung durch Bäume. Die Ursache für die Übersegmentierung von Gebäude L in drei Teile ist offenbar in den Höhenunterschieden der Aufbauten zu suchen. Nur die verbleibenden 9 Gebäude sind als korrekt zu bezeichnen. Da sich darunter die großflächigen Gebäude befinden, sinkt der Wert des Qualitätsmaßes der Detektion nur moderat auf $q_L = 0.58$.

Die beiden oberen Komplexe wurden als zusammenhängend erkannt. Für die Teilgebäude kam somit nur eine Rekonstruktion als prismatische Objekte in Frage. Der Durchgang in Nord-Süd-Richtung zwischen den Teilen M und N des Elektrotechnik-Komplexes (rechts oben) wurde bei der Rekonstruktion nicht berücksichtigt. Die Lücke, die man in den Instanzen GH der ersten Iteration (Bild 6.9a) noch sieht, wurde in späteren Durchläufen geschlossen. Dem Giebeldachhaus A ist fälschlicherweise das Gebäudemodell Flachdachhaus zugewiesen worden.

Bei der Höhenbestimmung kam es zum Teil zu beachtlichen Unterschätzungen (Tabelle 6.5). Das betrifft vor allem die hohen Gebäude, bei denen sich das Layover besonders nachteilig auswirkt. Die Höhenunterschätzung hatte, etwa bei den hohen Gebäuden J und K , einen Versatz der Grundrisse in Richtung Sensor zur Folge. Die Ausreißer bei den hohen Gebäuden führten zu einem großen σ_z von 7.4 m. Die Höhenschwankungen bei den anderen Gebäuden liegen im Rahmen der Genauigkeit des InSAR-DOM von etwa 5 m. Im Falle von Gebäude L beziehen sich die Werte in der Tabelle auf die drei M -*Segmente* 7 bis 9. Zum Vergleich der Höhe wurde ein mit der Fläche der M -*Segmente* gewichteter Mittelwert berechnet. Hinsichtlich der Grundrisse traten ebenfalls größere Fehler auf, vor allem in der Entfernungsrichtung (hier y-Koordinate). Beim niedrigen Gebäude N lag das an den Bäumen. Der vordere Teil von Gebäude P ist wegen Layover im SAR-Bild nicht erkennbar. Bei Gebäude O hingegen fehlt vor allem der zum Teil verdeckte, etwas niedrigere hintere Teil (vgl. mit LIDAR-DOM in Bild 6.8a).

	erf. Ref. G_E	reale ref. G_R
Anzahl Referenz	11	16
Anzahl Ergebnis	13	13
korrekt	9	9
übersegmentiert	1	1
untersegmentiert	0	0
fehlt	1	6
falsch	1	1
q_L	0.68	0.58

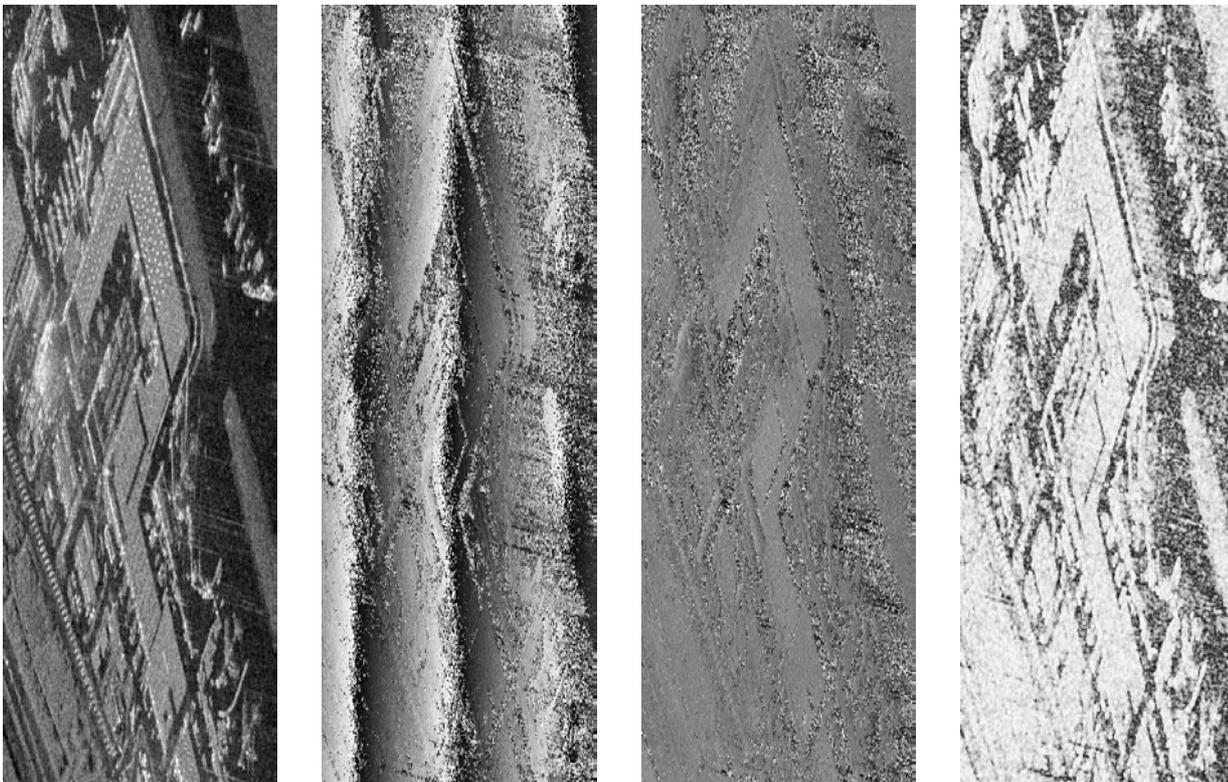
Tabelle 6.4: Bewertung der Detektion für die Szene Karlsruhe

Gebäude, Höhe (m)	Fehler in Meter			Modell
	x	y	z	
A, 10	1	1	-3	-
H, 9	4.5	9	+2	✓
I, 26	3.5	4	-8	✓
J, 40	5	6	-15	✓
K, 40	1.5	5	-7	✓
L, 30	4	5.5	-10	✓
M, 28	5	10	0	✓
N, 8	2	19	+3	✓
O, 26	4	16	-9	✓
P, 41	3	8.5	+1	✓
σ , Modell	3.6	9.9	7.4	9/10

Tabelle 6.5: Bewertung der Rekonstruktion für die Szene Karlsruhe

Szene Frankfurt Flughafen

Die Szene Frankfurt Flughafen umfaßt einen Gebäudekomplex des Frachtzentrums sowie einige größere Nachbargebäude. Abbildung 6.10 zeigt die InSAR-Daten (3-Looks) in der Entfernungsgeometrie. Die Messung fand im Juli 1996 statt. Wegen der unterschiedlichen Auflösung in Entfernungs- und Azimutrichtung (94 cm bzw. 33 cm) erscheinen die Gebäude stark verzerrt in den Bildern. Auf den im Wesentlichen flachen Dächern befinden sich zum Teil Aufbauten, die Belüftungs- und Beleuchtungszwecken dienen. Darüber hinaus sind Autobahnen, Zäune, Wälder und Wiesen in der Szene enthalten. Im Betragsbild 6.10a sind eine Vielzahl starker Streuer sichtbar, deren weitreichende Auswirkungen man gut in den dunklen Bereichen des Flughafenvorfeldes erkennt. Besonders auffällig ist ein Bereich in der Mitte links. Dort befindet sich ein hohes Gebäude, dessen Signal eine größere Fläche in der Umgebung überstrahlt. Abbildung 6.10b zeigt die interferometrische Differenzphase mit dem welligen Anteil der flachen Erde und Abbildung 6.10c das daraus berechnete Höhenmodell. An Stellen mit schlechter Kohärenz ist die Höheninformation entsprechend stärker verrauscht (Bilder 6.10c,d).



a) Betrag

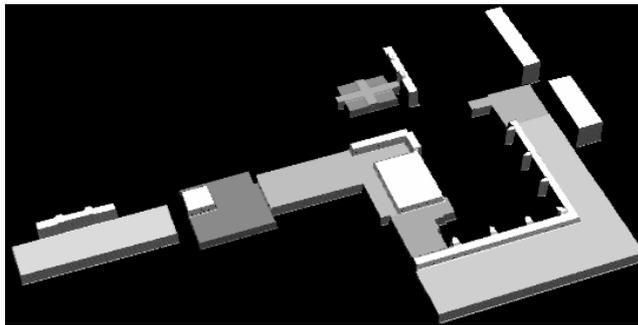
b) Phase

c) Höhe

d) Kohärenz

Abbildung 6.10: InSAR-Daten der Szene Frankfurt Flughafen in Entfernungsgeometrie

Ein digitales Höhenmodell der Szene lag leider nicht vor. Von der Frankfurt Flughafen AG wurden aber freundlicherweise Karten und Architektenpläne für die meisten Gebäude zur Verfügung gestellt. Die Architektenpläne enthielten neben den genauen Grundrissen Angaben zur Gebäudehöhe, auch von Aufbauten. Abbildung 6.11a zeigt eine 3D-Ansicht der Gebäude. Darüber hinaus lag ein Orthophoto der Szene vor (Bild 6.11b).



a) 3D-Ansicht



b) Orthophoto

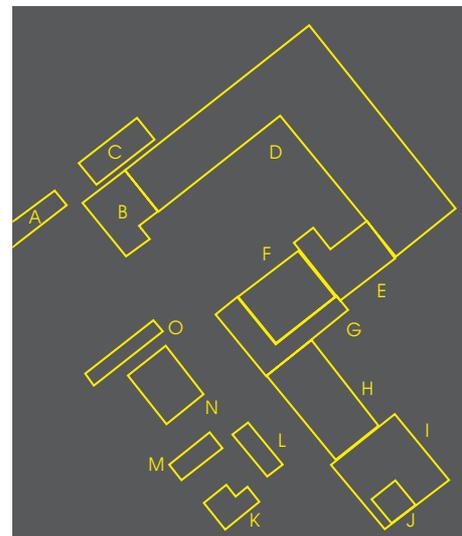
c) Erfassbare Gebäudereferenz G_E d) Reale Gebäudereferenz G_R

Abbildung 6.11: Referenzdaten für die Szene Frankfurt Flughafen

Anhand der Karten, der Architektenpläne und des Orthophotos wurde die reale Gebäudereferenz bestimmt. Es konnten 15 Gebäude und Teilgebäude *A* bis *O* identifiziert werden (Bild 6.11d). In den Betragsdaten waren 12 Gebäude visuell erkennbar. Für die Darstellung der erfassbaren Gebäudereferenz in Abbildung 6.11c wurde zur besseren Vergleichbarkeit die Bodengeometrie gewählt. Die von dem bereits angesprochenen hohen Gebäude *A* verursachten Überstrahlungen und Verdeckungen hatten zur Folge, daß dieses und das dahinterliegende Teilgebäude *B* nicht im Betragsbild erkennbar sind. Der sichtbare Bereich von Teilgebäude *B* wurde bei der visuellen Interpretation dem großen Teilgebäude *d* zugeschlagen. Das Gebäude *C* kann im Bild nicht verifiziert werden. Die im SAR-Bild dort sichtbare Struktur widerspricht der realen Referenz. Die Ursache dafür ist unbekannt. Im unteren Bereich hebt sich das Gebäude *K* kaum aus der Umgebung hervor, insbesondere ist kein Schatten sichtbar. Besonders interessant ist das im Betragsbild (Bild 6.11c) in der Mitte links erkennbare Gebäude *p*, das in der realen Gebäudereferenz nicht vorliegt. Wie sich herausstellte, handelt es sich um einen Neubau, der in das Kartenmaterial noch nicht aufgenommen worden war.

In Abbildung 6.12a sind die Instanzen GEBÄUDE dargestellt. Sie gingen sowohl aus Instanzen RECHTECKGRUNDRISS als auch aus Instanzen RECHTWINKLIGERGRUNDRISS hervor. Die von Schatten verursachten Lücken zwischen den Teilgebäuden des Frachtzentrums wurden durch Fortführung des dahinterliegenden niedrigeren Teilgebäudes geschlossen.

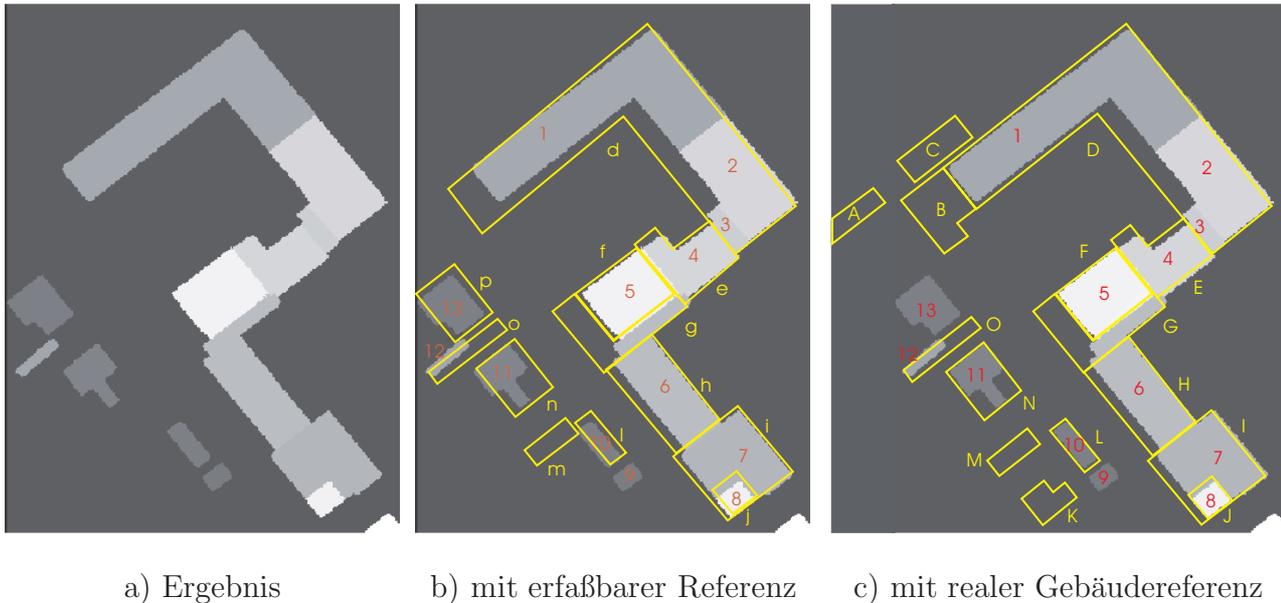


Abbildung 6.12: Die rekonstruierten Gebäude der Szene Frankfurt

Insgesamt wurden 13 Gebäude detektiert. Abbildung 6.12b zeigt das Ergebnis, überlagert mit den Umrissen der 12 Gebäude der erfaßbaren Referenz. Bei den detektierten Gebäuden ist auffällig, daß insbesondere hohe Aufbauten in Randbereichen nicht erfaßt worden sind. Dies liegt an dem dort vermehrten Auftreten von dominanter Streuung, Layover und Verdeckungen, mit den beschriebenen negativen Auswirkungen auf die InSAR-Höhenmessung. Als korrekt erkannt können 8 Gebäude bezeichnet werden. Der große Gebäudeteil d wurde in drei Teile übersegmentiert. Es fehlen die Gebäude g , m und o . Der vordere Teil von Gebäude g wurde wegen Überstrahlungen und Schatten durch einen Dachaufbau nicht segmentiert, während der hintere Teil dem größeren Segment 6 zugeschlagen wurde. Am Ort von Gebäude o befindet sich zwar ein entsprechendes Objekt 12, das Verhältnis der Schnittflächen ist aber zu gering. Das gefundene Objekt 9 ist falsch. Ein Vergleich mit der realen Gebäudereferenz (Abbildung 6.12c) führt zu analogen Ergebnissen, wobei noch vier fehlende Gebäude hinzukommen, die in den Bildern auch visuell kaum auszumachen sind. Weil diese weiteren fehlenden Gebäude verhältnismäßig klein sind, ergeben sich nur geringe Unterschiede beim Qualitätsmaß q_L .

Die reale Referenz wurde um das neue Gebäude p bzw. 13 erweitert, somit sind auch hier 8 Gebäude als korrekt zu bewerten. Die Höhe von Gebäude L ging nicht aus den Referenzdaten hervor. Die Bandbreite der Höhe der anderen Gebäude liegt zwischen 8 m und 17 m. Das günstigere Verhältnis von Gebäudefläche zur Höhe führte zu einer deutlich besseren mittleren Höhengenaugigkeit $\sigma_z = 3$ m als bei der Szene Karlsruhe. Die Schattenanalyse war zum Teil möglich. Sämtlichen Gebäuden wurde richtigerweise ein Flachdach zugewiesen.

	erf. Ref. G_E	reale Ref. G_R
Anzahl Referenz	12	16
Anzahl Ergebnis	13	13
korrekt	8	8
übersegmentiert	1	1
untersegmentiert	0	0
fehlt	3	7
falsch	1	1
q_L	0.7	0.65

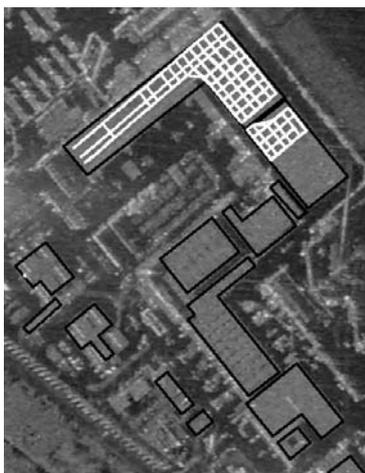
Tabelle 6.6: Bewertung der Detektion für die Szene Frankfurt

Gebäude, Höhe (m)	Fehler in Meter			Modell
	x	y	z	
$D, 13$	8	6	-2	✓
$E, 10$	4	4	+1	✓
$F, 18$	0.5	0.5	-3	✓
$H, 12$	3	3	-3	✓
$I, 8$	2.5	2.5	0	✓
$J, 17$	1	1	0	✓
$L, -$	1	1	-	✓
$N, 10$	4	4	-5	✓
$P, 10$	2	2	-5	✓
σ , Modell	3.6	3.2	3	9/9

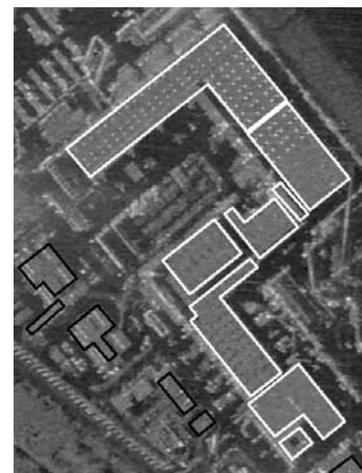
Tabelle 6.7: Bewertung der Rekonstruktion für die Szene Frankfurt

Gruppierung von Industriekomplexen

In Abschnitt 5.6.5 wurde ein Verfahren zur Rekonstruktion von Industriekomplexen anhand regelmäßiger Dachstrukturen vorgestellt. Abbildung 6.13a zeigt die Instanzen REIHE. Das Ergebnis ist ein weiterer Beleg für die Empfindlichkeit der SAR-Abbildung bezüglich der Aufnahmerichtung und leichter Variationen der Objektstruktur. Wie man am Orthophoto 6.11b sieht, finden sich vergleichbare Dachstrukturen auf dem ganzen Komplex. Aber nur im oberen Bereich prägen sie sich deutlich im Betragsbild aus. Die gruppierte Instanz I-GEBÄUDEKOMPLEX ist in Bild 6.13b hell dargestellt. Sie umfaßt alle detektierten Teilgebäude des Frachtzentrums.



a) Instanzen REIHE aus Dachaufbauten



b) Instanz I-GEBÄUDEKOMPLEX (hell)

Abbildung 6.13: Gruppierte Dachstrukturen und rekonstruierter Gebäudekomplex

Kapitel 7

Diskussion und Ausblick

Wie die Ergebnisse dieser Arbeit verdeutlichen, ist eine Detektion und Rekonstruktion von Gebäuden durch Analyse von SAR- und InSAR-Daten prinzipiell möglich. Wegen der inhärenten Schrägsicht bei SAR hängt die praktische Durchführbarkeit allerdings sehr von den Gegebenheiten der zu untersuchenden Szene ab. Die Aufnahmegeometrie hat zur Folge, daß Gebäude möglicherweise durch Verdeckung nicht in ein SAR-Bild abgebildet werden oder ihr Abbild durch das Signal anderer Objekte überlagert wird, wodurch sie im Bild nicht erkennbar sind. Die gezeigten geometrischen Zusammenhänge und die darauf basierenden Sichtbarkeitsanalysen ergaben, daß diese Problematik insbesondere bei dichter Bebauung und hohen Gebäuden auftritt.

Die in den Daten sichtbaren Gebäude konnten von den vorgestellten Verfahren weitgehend detektiert werden, zumindest was die größeren Gebäude anbelangt. Die beste Detektionsgüte ergab sich für die Szene Solothurn, die durch lockere Bebauung mit niedrigen Gebäuden gekennzeichnet ist. Am schlechtesten war das Ergebnis bei der Szene Karlsruhe. Hier erwies sich der Einfluß von Layover, verursacht auch von großen Bäumen, als problematisch. Im Falle der Szene Frankfurt Flughafen führten vor allem Überstrahlungen zur Nichtdetektion von Gebäuden. Bei den beiden letztgenannten Szenen ergaben sich beachtliche Abweichungen zwischen der erfaßbaren und der realen Gebäudereferenz. Das zeigt, wie schwierig die Erkennung von Gebäuden in SAR-Daten selbst für einen sachkundigen Menschen sein kann.

Eine Rekonstruktion der Dachform aus einer einzelnen SAR-Messung ist nur unter günstigen Umständen möglich, etwa bei freistehenden größeren Gebäuden und bei optimaler Beleuchtungsrichtung. Der Nutzen einer Auswertung mehrerer SAR-Ansichten zeigt sich am Beispiel der Szene Solothurn: Ein Gebäudedach wurde erst durch die kombinierte Auswertung richtig rekonstruiert. Dennoch sind auch mit einzelnen SAR-Bildern Einblicke in Art und Ausrichtung von Dachstrukturen möglich, wie das Beispiel Frankfurt zeigt. Eine Schattenanalyse ist bei dichter Bebauung in der Regel nicht durchführbar. Die Höhenbestimmung sollte in einem solchen Fall allein auf dem InSAR-DOM basieren. Mit zunehmender Gebäudehöhe führt Layover zu einer Störung der Höhenwerte immer größerer Dachflächen. Sobald das ganze Dach davon betroffen ist, hat dies eine Unterschätzung der Gebäudehöhe zur Folge. Diese Unterschätzung ist ohne die Schattenanalyse nicht korrigierbar, wie man an der Szene Karlsruhe sieht. Eine falsche Höhenschätzung hat dann auch einen Lagefehler bei der Georeferenzierung zur Folge. Die re-

konstruierte Position der sensornahen Gebäudewände ist wegen Layovereffekten fehleranfälliger als bei den an Schatten angrenzenden Wänden.

Als Fazit dieser Arbeit läßt sich feststellen: Die Qualität einer Gebäuderekonstruktion aus Radardaten reicht nicht an die Ergebnisse einer Analyse von LIDAR-Daten oder Stereo-Luftbildern heran. Für Aufgaben mit hohen Anforderungen an Genauigkeit und Vollständigkeit, wie zum Beispiel einer Kartierung städtischer Gebiete, sind die Resultate zu fehleranfällig und ungenau. Insbesondere eignet sich Radar nicht zur Analyse urbaner Zentren mit sehr hohen Gebäuden, wie etwa Frankfurt am Main oder gar New York. Denn dort sind sowohl die Höhenwerte durch Layover gestört, als auch die Schatten wegen dahinterliegender Bauten verkürzt.

Als Ergänzung zu anderen Sensordaten hat eine Rekonstruktion von Gebäuden aus SAR- und InSAR-Daten dennoch ihre Berechtigung. So können sich Dachstrukturen, die in Luftbildern kaum sichtbar sind, im SAR-Bild deutlich hervorheben. SAR bietet zudem die Möglichkeit, in kurzer Zeit große Flächen zu erfassen. Im Falle einer Naturkatastrophe zum Beispiel könnte eine denkbare Vorgehensweise in einer zweistufigen Gebäudeerfassung liegen. Zunächst wäre mit InSAR der gesamte betroffene Bereich aus möglichst vielen Richtungen abzudecken. In diesen Daten wäre eine erste Analyse durchzuführen. Hinweise auf Zerstörungen könnten anschließend lokal mit optischen Sensoren oder LIDAR genauer untersucht werden.

Wenn nur eine oder zwei SAR-Ansichten zur Verfügung stehen, sollte sich die Gebäudeerfassung vorzugsweise auf Gelände mit einer lockeren Bebauung beschränken. Je dichter die Bebauung ist, umso mehr Ansichten sind für ein zufriedenstellendes Analyseergebnis erforderlich. Die Simulationen am Beispiel der Szene Karlsruhe zeigen dies deutlich. Selbst bei optimaler Wahl der Beleuchtungsrichtung wären vier Messungen erforderlich, um mehr als 85% der Gebäudedächer sicher zu erfassen.

Da die Dachstruktur unter Umständen nicht aus den Daten bestimmbar ist, sollte man im Normalfall eine Rekonstruktion der Gebäude als prismatische Objekte vornehmen. Vielen Anwendungen genügt eine Modellierung der Szene mit diesem Detailgrad.

Auch in urbanem Umfeld ist, bei kurzweiligem Radar, mit einer Beeinträchtigung der Sichtbarkeit von künstlichen Objekten durch Bäume zu rechnen. Entsprechende SAR-Messungen sollten daher vorzugsweise in den Wintermonaten durchgeführt werden.

Ausblick

Über die hier vorgestellten Untersuchungen hinaus ergeben sich noch viele weitere interessante wissenschaftliche Fragestellungen hinsichtlich einer Analyse urbaner Gebiete mit SAR-Daten. In dieser Arbeit fand die Fusion von Ergebnissen aus unterschiedlichen Ansichten nach der Georeferenzierung auf der Objekthierarchieebene der Gebäude statt. Alternativ dazu könnten auch die Primitivobjekte in das Weltkoordinatensystem transformiert werden und die Fusion auf dieser Ebene erfolgen. Lohnend wäre ein Vergleich der beiden Ansätze bezüglich der Güte des Rekonstruktionsergebnisses.

Ein weiterer möglicher Untersuchungsgegenstand ist die Integration von Daten anderer Quellen in die Analyse. Besonders geeignet hierfür erscheinen Luftbilder des sichtbaren oder des nahen

Infrarotbereiches, die in Schrägsicht zeitgleich mit den SAR-Daten bei der Befliegung erfaßt werden. Dadurch könnten etwa zusätzliche Kanten in die Analyse einfließen und die Gebäude sicherer vom Bewuchs unterschieden werden. Ferner könnten diese zusätzlichen Bilddaten zur Texturierung für die Visualisierung der Rekonstruktionsergebnisse dienen. Eine solche kombinierte Datenakquisition wäre allerdings nur bei günstigen Wetterbedingungen durchführbar.

Eine Alternative dazu stellt die Verwendung von Orthophotos und Karten dar. Entsprechende Verfahren wurden in der Literatur vorgestellt. In Erweiterung der dort beschriebenen Ansätze wäre zu prüfen, ob auch hier eine iterative Analyse nützlich ist. Darüber hinaus ist von Interesse zu ergründen, welche Art zusätzlicher Information das größte Potential in sich birgt bezüglich einer Auswertung zusammen mit SAR- oder InSAR-Daten.

Ein anderer denkbarer Ansatz ist die Einbeziehung der SAR-Bildgenerierung oder sogar der SAR-Prozessierung in die iterative Analyse. Ein Beispiel für den ersten Fall ist die zur Erzeugung des InSAR-DOM erforderliche Phasenfortsetzung. Wegen vieler Störungen scheitern gängige Verfahren häufig gerade in urbanen Gebieten. Durch die Integration von Ergebnissen der Objekterkennung könnte die Zuverlässigkeit der Phasenfortsetzung erhöht werden. Dies könnte zum Beispiel erreicht werden, indem man Zwangsbruchkanten an Gebäudewänden einführt oder Wissen über die Dachstruktur auswertet. Hinsichtlich der SAR-Prozessierung wäre es denkbar, daß dort, wo Objektkanten im Bildmaterial erkannt wurden, in einer verfeinerten Prozessierung speziell auf Kantenobjekte optimierte Verfahren zum Einsatz kommen.

Die sich abzeichnende zunehmende Verbesserung der SAR-Auflösung neuer Sensorsysteme wird einerseits neue Möglichkeiten der Analyse urbaner Gebiete eröffnen und andererseits eine ganz neue Vorgehensweise bei der Bildanalyse erfordern. Die Anzahl der Streuer pro Auflösungszelle sinkt, im Extremfall findet sich nur noch einer darin. Die Ausrichtung dieses Streuers kann durch Analyse der polarimetrischen Streumatrix bestimmt werden. Zudem lassen sich anhand der Streumatrix Gebäude von benachbarten Bäumen und Sträuchern trennen. Es ist auch zu erwarten, daß der Speckle-Effekt verschwindet. Die Signaldynamik hingegen wird vermutlich sogar noch anwachsen.

Hinsichtlich der Genauigkeit der InSAR-Höhenmessung ist ein Gewinn weniger durch höhere Auflösung als vielmehr durch den Übergang von einer zu mehreren Basislinien zu erwarten. Dadurch läßt sich zum einen die Problematik der Phasenfortsetzung entschärfen und zum anderen können Fehler in Layoverbereichen kompensiert werden.

Anhang A

Statistische Modelle der SAR- und InSAR-Signale

A.1 SAR-Signale verteilter Ziele

Das SAR-Empfangssignal $u(r, t)$ eines einzelnen Punktziels wird durch die zweidimensionale Faltung der *komplexen Reflektivität* des Objektes $\gamma^o(r, t)$ mit der *SAR-Systemimpulsantwort* $s(r, t)$ [2] beschrieben:

$$u(r, t) = \gamma^o(r, t) *_r *_t s(r, t). \quad (\text{A.1})$$

Die Variablen r und t stehen für *Range* und *Time* (bzw. Azimut). Aufgrund der Rauigkeit natürlicher Flächen befindet sich im Normalfall eine große Anzahl *verteilter* Ziele in der Szene. Da die Auflösungszelle meist viel größer ist als die Wellenlänge und die Objektausdehnung, kommt es zur kohärenten Überlagerung der Rückstreuung vieler Objekte (Substreuer). Gemessen wird das Summensignal, wie in dem Zeigerdiagramm in Abbildung A.1 dargestellt ist.

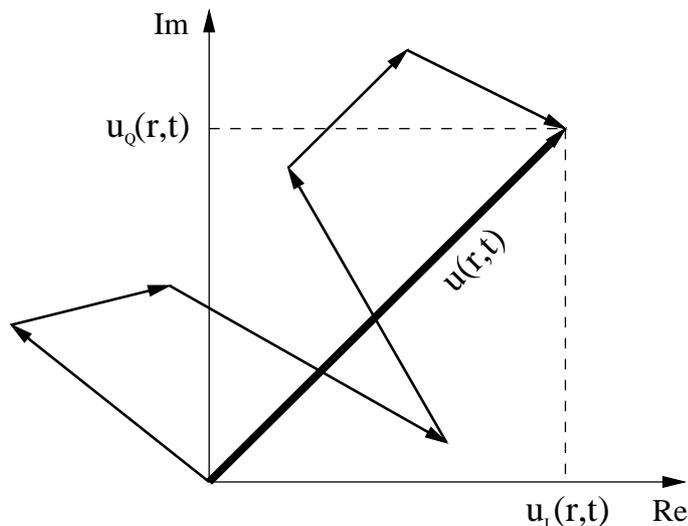


Abbildung A.1: Kohärente Addition der Streuung innerhalb der Auflösungszelle

Die Substreuer werden als wechselseitig unabhängige Punktstreuer mit zufälliger Anordnung und Ausrichtung betrachtet. Man geht von der Reflektivität des Einzelobjektes $\gamma^o(r, t)$ zum *Radarrückstreukoeffizienten* $\sigma_0(r, t)$ über, der ein Maß für den Erwartungswert der rückgestreuten Leistung ist [1]. Mathematisch handelt es sich um eine Autoregression mittelwertfreier *Zufallsprozesse*:

$$E \left[\gamma^o(r_1, t_1) \cdot \gamma^{o*}(r_2, t_2) \right] = \sigma_0(r, t) \cdot \delta(r_1 - r_2) \cdot \delta(t_1 - t_2). \quad (\text{A.2})$$

Da ein gegebenes $\sigma_0(r, t)$ durch beliebig viele verschiedene Anordnungen von Substreuern bewirkt werden kann, betrachtet man die Rückstreuung und damit das SAR-Bild ebenfalls als Zufallsprozesse. Wenn viele (N) Substreuer jeweils einen vergleichbaren Signalbeitrag leisten, läßt sich aufgrund des *zentralen Grenzwertsatzes der Wahrscheinlichkeitsrechnung* [14] das SAR-Empfangssignal $u(r, t)$ als zweidimensionaler, gaußverteilter Zufallsprozeß deuten [38]:

$$u(r, t) = a(r, t) \cdot e^{j\varphi(r, t)} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N a_n(r, t) \cdot e^{j\varphi_n(r, t)}. \quad (\text{A.3})$$

Für die statistischen Eigenschaften der elementaren Substreuer in Gleichung A.3 gilt (Der besseren Übersichtlichkeit halber werden die Funktionsvariablen (r, t) im Weiteren weggelassen):

- Die Amplituden a_n/\sqrt{N} und Phasen φ_n der N Substreuer sind voneinander unabhängig.
- Die stochastischen Prozesse a_n haben für alle n dieselbe Verteilung.
- Die Phasen φ_n sind *gleichverteilt* über $]-\pi, \pi]$.

Im Zuge der Empfangssignalverarbeitung [118] erfolgt die Demodulation des Empfangssignals u in zwei Empfangszweigen. Die Demodulation wird in einem Zweig mit dem unveränderten Referenzsignal durchgeführt und im anderen mit dem um 90° verzögerten Referenzsignal. Man erhält die sogenannten *Quadratur*signale u_i (*In-Phase-Anteil*) und u_q (*Quadratur-Anteil*):

$$\begin{aligned} u &= u_i + ju_q, \\ u_i &= \text{Re}\{u\} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N a_n \cdot \cos(\varphi_n), \\ u_q &= \text{Im}\{u\} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N a_n \cdot \sin(\varphi_n). \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

Die beiden Anteile dienen unter anderem zur Bestimmung des Vorzeichens der Dopplerverschiebung. Sie sind unkorreliert und mittelwertfrei gaußverteilt. Für die Varianzen gilt [63]:

$$\sigma_{u_i}^2 = \sigma_{u_q}^2 = \frac{1}{2} \cdot \sigma_u^2. \quad (\text{A.5})$$

Die Verteilungsdichtefunktion der verbundenen Verteilung $pdf(u)$ ist, wegen der statistischen Unabhängigkeit, das Produkt der Einzelverteilungen:

$$pdf(u) = pdf(u_i) \cdot pdf(u_q) = \frac{1}{\pi \cdot \sigma_u^2} \cdot e^{-\left(\frac{u_i^2 + u_q^2}{\sigma_u^2} \right)}. \quad (\text{A.6})$$

Konturen gleicher Wahrscheinlichkeit entsprechen konzentrischen Kreisen in der komplexen Ebene, daher bezeichnet man u auch als einen *zirkularen*, komplex gaußverteilten Zufallsprozeß. Im SAR-Betragsbild wird entweder die Amplitude a oder die Intensität i des Signals dargestellt. Für den Einheitswiderstand von 1 Ohm besteht ein direkter quadratischer Zusammenhang zwischen Amplitude und Intensität:

$$i = a^2 = u_i^2 + u_q^2. \quad (\text{A.7})$$

Mit den Gleichungen A.1 und A.7 läßt sich zeigen, daß der Erwartungswert \bar{I} der Pixelintensitäten i von der Radarrückstreuleistung abhängt:

$$\bar{I} = E[i] = E[u \cdot u^*] = \sigma_o *_{r} *_{t} |s|^2. \quad (\text{A.8})$$

Die Intensität i entspricht dem *Maximum-Likelihood-Schätzwert* des Radarrückstreukoeffizienten σ_0 [85]. Nach Übergang von den kartesischen Koordinaten zu Polarkoordinaten ($pdf(u_i, u_q) \Rightarrow pdf(I, \varphi)$ bzw. $pdf(A, \varphi)$) erhält man die Verteilungsdichtefunktionen der Beträge als Randverteilung im Polarkoordinatensystem. Im Falle von Intensitäten handelt es sich um eine *Exponentialverteilung*:

$$pdf(I) = \frac{1}{\sigma_u^2} \cdot e^{\left(\frac{-|u|^2}{\sigma_u^2}\right)} = \frac{1}{I} \cdot e^{\left(-\frac{I}{\bar{I}}\right)} \quad \text{für } I \geq 0, \quad (\text{A.9})$$

mit Standardabweichung $\sigma = \bar{I} = \sigma_u^2$. Standardabweichung und Erwartungswert sind also identisch. Amplitudenbilder werden durch eine *Rayleighverteilung* beschrieben:

$$pdf(A) = \frac{2 \cdot A}{\sigma_u^2} \cdot e^{\left(-\frac{A^2}{\sigma_u^2}\right)} \quad \text{für } A \geq 0, \quad (\text{A.10})$$

mit $\mu = \sqrt{\sigma_u^2 \cdot \pi/4}$ und $\sigma = \sqrt{\sigma_u^2 \cdot (1 - \pi/4)}$.

Die Phase ist in beiden Fällen als gleichverteilt modelliert. Bei einzelnen SAR-Bildern betrachtet man daher die Phase nicht. Erst bei kombinierter Analyse mehrerer SAR-Messungen kann die Phaseninformation ausgewertet werden, wie etwa bei interferometrischer SAR-Auswertung. Abbildung A.2a illustriert die beiden Kurvenverläufe, wie sie für eine homogene Fläche zu erwarten sind, wobei im Falle der Intensitätsbilder zwei Verteilungen mit verschiedenen Erwartungswerten $E = \bar{I}$ aufgetragen sind. Der Erwartungswert μ des Amplitudenbildes ist 100 (Abbildung A.2b).

Als Homogenitätsmaß eines SAR-Bildes wurde der *Variationskoeffizient* σ_v eingeführt [44]:

$$\sigma_v = \frac{\sigma}{\mu}. \quad (\text{A.11})$$

Das Intensitätsbild hat ein σ_v von 1. Amplitudenbilder weisen einen für Bildverarbeitungszwecke günstigeren Variationskoeffizienten $\sigma_v = 0.5227$ auf.

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Aussagen über die Natur der SAR-Signale wurden ursprünglich für ländliche Gebiete und Satelliten-Sensoren mit Auflösungen im Bereich 30 m und

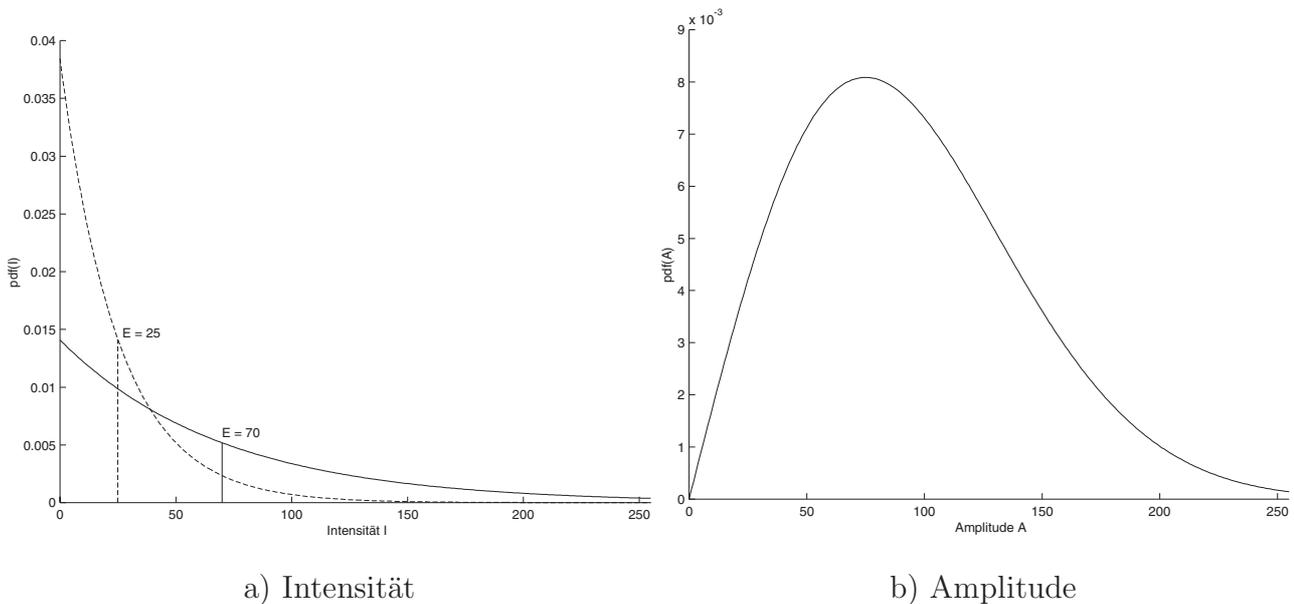


Abbildung A.2: SAR-Verteilungsdichtefunktionen (Singlelook), auf 256 Werte normiert

schlechter hergeleitet. Mit der Entwicklung hochauflösender SAR-Sensoren sinkt die Anzahl N der Substreuer pro Auflösungszelle. Falls nur noch ein oder wenige Streuer zum Signal beitragen, ist zu erwarten, daß man auch aus der Phase Information über die Struktur innerhalb der Auflösungszelle gewinnen kann. In urbanem Gebiet gelten die angesprochenen Annahmen ohnehin nur mit Einschränkungen, da dort häufig dominante Streuer vorkommen. Ob die getroffenen Annahmen gelten, ist im Einzelfall anhand der Signalstatistik zu prüfen.

A.1.1 Der Speckle-Effekt

Die Fluktuation der Pixelwerte, die durch die Verteilungsdichtefunktionen in den Gleichungen A.9 und A.10 beschrieben ist, nennt man auch *Speckle-Effekt*. In Abbildung A.2a erkennt man, warum der Speckle oft als multiplikatives Rauschen modelliert wird, denn die Variation der Intensität steigt mit dem Mittelwert an.

Der Speckle ist das Resultat der kohärenten Signalsummierung und darf nicht mit Rauschen verwechselt werden. Allerdings erscheinen dadurch SAR-Bilder sehr körnig, was vor allem bei homogenen Flächen störend wirkt. Mit zunehmender Verbesserung des Auflösungsvermögens künftiger Sensoren ist zu erwarten, daß sich der Speckle-Effekt verringert. Da durch den Speckle die Interpretation der Daten erschwert wird, versucht man, die Körnigkeit zu reduzieren oder zu beseitigen [39], [44], [70], [72]. Die Verfahren lassen sich grob in drei Gruppen einteilen:

Multilook-Prozessierung: Die verfügbare Bandbreite in Entfernung und/oder Azimut wird in N Subbänder aufgeteilt [63]. In jedem Subband erfolgt die Berechnung eines SAR-Bildes (*Look*). Die kleinere Bandbreite hat eine entsprechend reduzierte Ortsauflösung zur Folge. Der überlappungsfreie Anteil der Subbänder ist unkorreliert. Die einzelnen Looks werden addiert.

Nach Mittelwertbildung erhält man das *N-Look-Bild* (auch *Multilook-Bild*):

$$I_{ML} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_i. \quad (\text{A.12})$$

Verglichen mit dem SAR-Bild in voller Auflösung (*Singlelook-Bild*), reduziert sich die Standardabweichung σ_{ml} des Multilook-Bildes entsprechend der Wurzel der Zahl der voneinander unabhängigen (effektiven) Looks L_{eff} :

$$\sigma_{ml} = \frac{\sigma_{sl}}{\sqrt{L_{eff}}}. \quad (\text{A.13})$$

Da sich die N Subbänder meist überlappen, ist L_{eff} kleiner als N . Die Dichtefunktion eines Multilook-Intensitätsbildes entspricht einer χ^2 -Verteilung:

$$pdf_{ML}(I) = \frac{I^{(L_{eff}-1)}}{\left(\frac{\bar{I}}{L_{eff}}\right)^{L_{eff}} \cdot \Gamma(L_{eff})} \cdot e^{-\left(\frac{I \cdot L_{eff}}{\bar{I}}\right)}. \quad (\text{A.14})$$

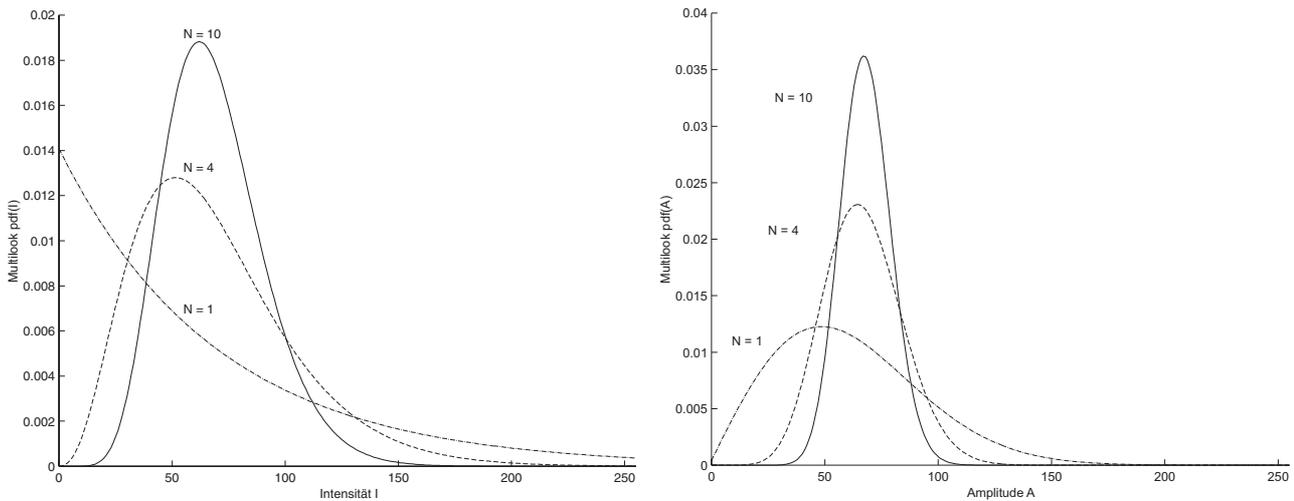
Multilook-Amplitudenbilder erzeugt man entweder durch Wurzelziehen der durch Gleichung A.12 gewonnen Bilder (*quadratisches Amplitudenbild*) oder durch Mittelwertbildung (*arithmetisches Amplitudenbild*). Ein quadratisches Amplitudenbild ist χ -verteilt [85]:

$$pdf_{ML}(A) = \frac{2 \cdot A^{(2 \cdot L_{eff}-1)}}{\left(\frac{\sigma_u^2}{L_{eff}}\right)^{L_{eff}} \cdot \Gamma(L_{eff})} \cdot e^{-\left(\frac{A^2 \cdot L_{eff}}{\sigma_u^2}\right)}. \quad (\text{A.15})$$

Die Dichtefunktion eines arithmetischen Amplitudenbildes ist nicht geschlossen darstellbar [44]. In den Abbildungen A.3a, b sind beide Kurvenverläufe für verschiedene Anzahlen N von Looks und einen Erwartungswert μ von 70 aufgetragen. Durch das Multilook-Verfahren verkleinert sich der Variationskoeffizient σ_v : Für ein 4-Look-Intensitätsbild gilt $\sigma_v = 0.5$, bei einem 4-Look-Amplitudenbild $\sigma_v = 0.2534$ [72]. Wegen des zentralen Grenzwertsatzes gilt auch hier, daß sich die Verteilungen mit zunehmendem N immer stärker einer Gaußverteilung annähern. Anhand synthetischer Daten ist in Abbildung A.3c der Glättungseffekt durch Multilook-Bildung für ein Intensitätsbild dargestellt.

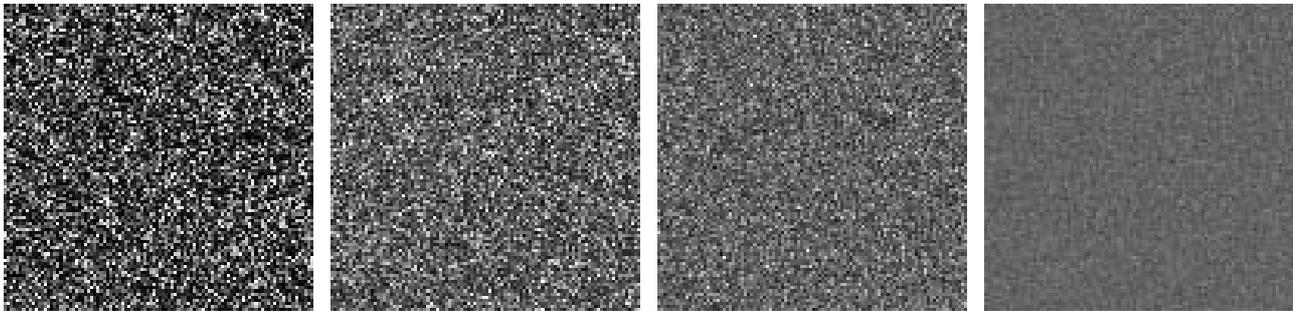
Räumliche Mittelwertbildung: Zunächst wird ein voll aufgelöstes Singlelook-Bild berechnet. Die Glättung erfolgt anschließend durch Tiefpaßfilterung, wodurch sich ebenfalls die Ortsauflösung verschlechtert. In Gleichung A.13 ist für L die Fenstergröße des Filters zu setzen. Wegen der Analogie sprechen manche Autoren auch in diesem Fall von Multilook-Bildung.

Spezielle Speckle-Filter: Da sich bei den beiden oben genannten Verfahren die Ortsauflösung verringert, wurden große Anstrengungen unternommen, spezielle Speckle-Filter zu entwickeln, die den Speckle entfernen und die Auflösung erhalten sollen [69], [70], [73]. Die Grundidee der meisten Filter ist, den Speckle aus homogenen Bildbereichen herauszufiltern, dabei



a) Intensitätsbilder

b) Amplitudenbilder



c) 1-Look-, 4-Look-, 10-Look- und 100-Look-Intensitätsbild

Abbildung A.3: a), b) Multilook-Verteilungsfunktionen, c) Multilook mit synthetischen Bildern

aber möglichst relevante Objektinformationen, wie etwa Kanten oder dominante Einzelstreuer, zu erhalten. Homogener Bereich ist so zu verstehen, daß die Signalvariation dort nur vom Speckle herrührt. Zur Segmentierung werden im Allgemeinen statistische Merkmale ausgewertet, zum Beispiel der Variationskoeffizient σ_v . In homogenen Bereichen erfolgt eine einfache Mittelwertbildung, starke Streuer bleiben unverändert. Im restlichen Bild wird eine spezielle Filterung durchgeführt, gesteuert von der lokalen Bildstatistik. Im einfachsten Fall kommen quadratische Fenster zum Einsatz [20]. Darüber hinaus finden anisotrope Filterverfahren Anwendung, die die Topographie besser widerspiegeln [44], [68]. Neuere Verfahren unterstellen, daß der inhomogene Teil der Szene durch Texturen gut modelliert werden kann. Man verwendet Markov-Random-Fields [98], um dort die ursprüngliche Textur anhand der Daten und eines Rauschmodells wiederherzustellen [126], [128].

A.2 Statistik der InSAR-Phase

Die stochastische Modellierung der interferometrischen Phase wurde unter anderem von *Bamler* [1] und *Lee* [71] hergeleitet. Im Folgenden werden die wesentlichen Resultate aufgeführt. Die Dichtefunktion der Phase des Singlelook-Interferogramms läßt sich als Funktion ihres Erwartungswerts Φ_0 und Kohärenzgrades $|\gamma|$ darstellen:

$$\begin{aligned} pdf_{SL}(\Phi) &= \frac{1 - |\gamma|^2}{2\pi} \frac{1}{1 - |\gamma|^2 \cos^2(\Phi - \Phi_0)} \\ &\times \left(1 + \frac{|\gamma| \cos(\Phi - \Phi_0) \arccos(-|\gamma| \cos(\Phi - \Phi_0))}{\sqrt{1 - |\gamma|^2 \cos^2(\Phi - \Phi_0)}} \right). \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

Um den Rauscheinfluß zu verringern, bietet sich auch hier die Mittelung über L unabhängige Interferogrammwerte an. Unter der Voraussetzung, daß die zur Mittelung herangezogenen Interferogrammwerte tatsächlich die gleiche unverfälschte Phase haben, ist der Mittelwert der *Maximum-Likelihood-Schätzwert* der Phase:

$$\hat{\Phi}_{MLE} = \arg \left\{ \sum_{n=1}^L v(n) \right\}. \quad (\text{A.17})$$

Die Verteilungsdichte der Phase, nach einem Multilook-Prozessierungsschritt in Abhängigkeit von der Anzahl der unabhängigen Stichproben L , ist

$$\begin{aligned} pdf_{ML}(\hat{\Phi}, L) &= \frac{\Gamma(L + 1/2)(1 - |\gamma|^2)^L |\gamma| \cos(\Phi - \Phi_0)}{2\sqrt{\pi}\Gamma(L)(1 - |\gamma|^2 \cos^2(\Phi - \Phi_0))^{L+1/2}} \\ &+ \frac{(1 - |\gamma|^2)^L}{2\pi} {}_2F_1 \left(L, 1; \frac{1}{2}; |\gamma|^2 \cos^2(\Phi - \Phi_0) \right), \end{aligned} \quad (\text{A.18})$$

mit der Gaußschen Hypergeometrischen Funktion ${}_2F_1$ [14]. Abbildung A.4 zeigt die Verteilungsdichten für verschiedene Anzahlen von Looks. Der auf der x-Achse aufgetragene Wert Ψ entspricht der Differenz der Messung zum Erwartungswert $\Phi_0 = 0$. Man erkennt deutlich die Verringerung des Rauschens mit zunehmender Anzahl von Looks.

Wie man zeigen kann, ist die Standardabweichung der Phase näherungsweise von der Anzahl der Looks und dem SNR abhängig [119]:

$$\sigma_\Phi \approx \frac{1}{\sqrt{SNR}} \cdot \frac{1}{\sqrt{L}}. \quad (\text{A.19})$$

Abbildung A.5 illustriert die Zusammenhänge. Für hohes SNR fällt der Rauscheinfluß also stärker ab als $1/\sqrt{L}$, was zu erwarten wäre bei der Mittelung gleichberechtigter unabhängiger Werte. Die Ursache dafür ist in der Korrelation von großer Signalleistung und geringem Rauscheinfluß zu suchen. Interferogrammwerte mit hoher Amplitude haben daher eine höhere Wahrscheinlichkeit für eine Phase nahe dem Idealwert Φ_0 .

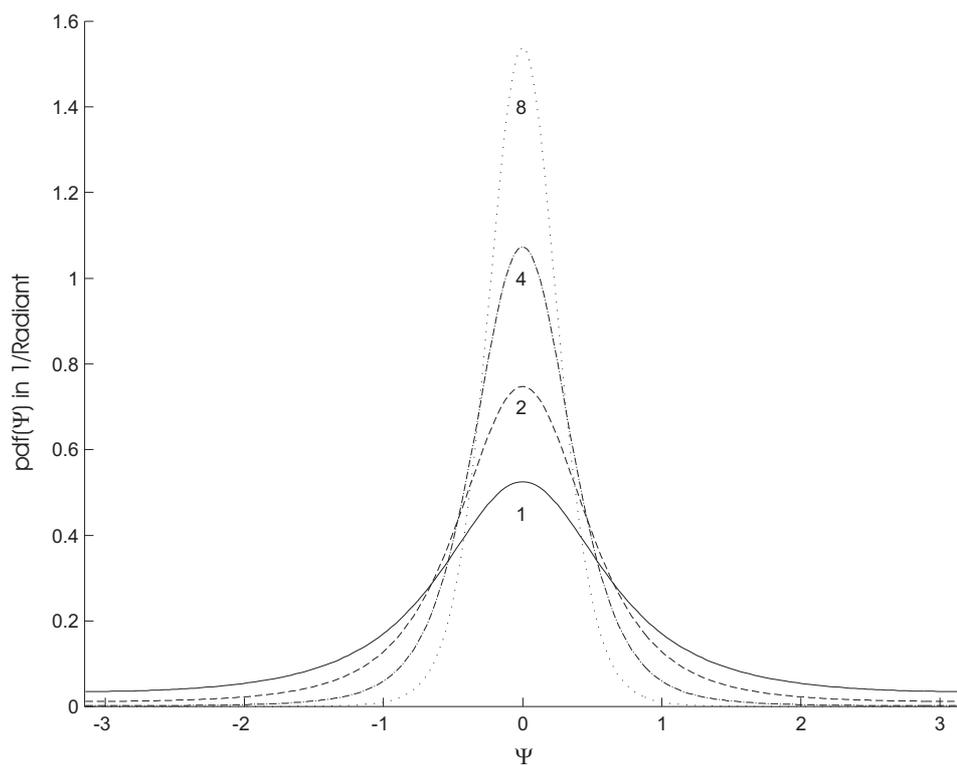


Abbildung A.4: Verteilungsdichtefunktion der Phase für 1,2,4,8 Looks bei $|\gamma| = 0.7$

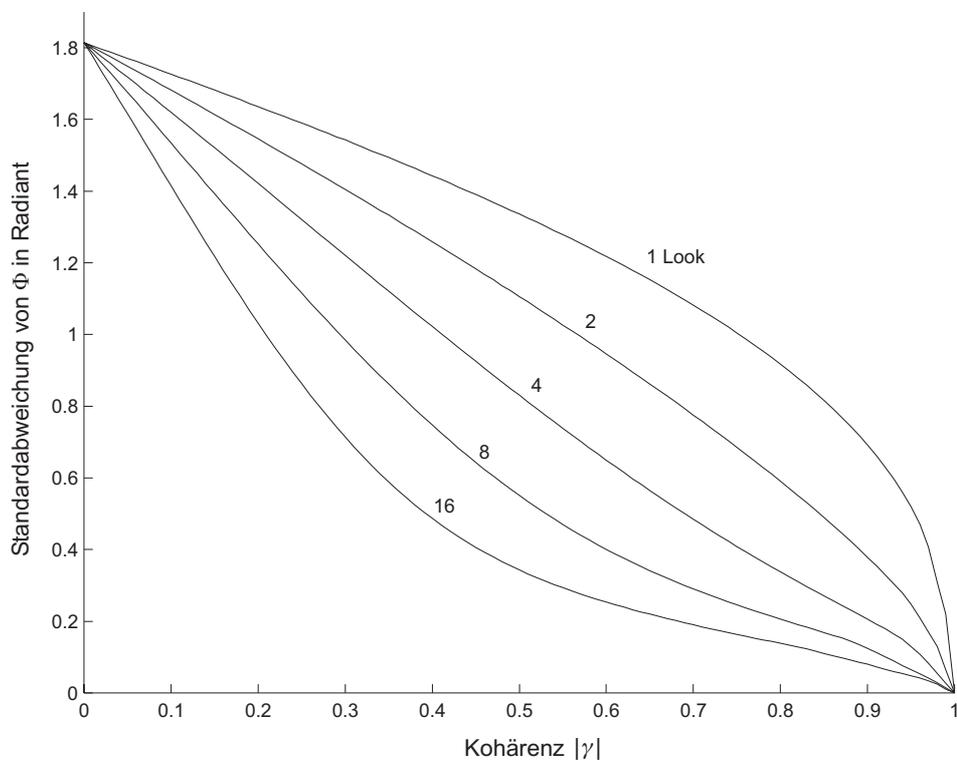


Abbildung A.5: Abhängigkeit der Standardabweichung der Phase von der Anzahl der Looks

Literaturverzeichnis

- [1] BAMLER R. und HARTL P.: “Synthetic Aperture Radar Interferometry”. In: *Inverse problems* Vol. 14, Nr. 4, 1998, S. 1–54.
- [2] BAMLER R. und SCHÄTTLER B.: “SAR Data Acquisition and Image Formation”. In: SCHREIER G.: *SAR Geocoding: Data and Systems*. Wichmann, Karlsruhe, 1993, S. 53–102.
- [3] BAYER T., MÜSCHEN B., OBERSTADLER R. und WINTER R.: “Airborne and Spaceborne SAR Application Studies”. In: SCHREIER G.: *SAR Geocoding: Data and Systems*. Wichmann, Karlsruhe, 1993, S. 271–298.
- [4] BERS K. H., BOEHMSDORFF S., BREHM T., ESSEN H. und JÄGER K.: “Detection of Urban Areas in Multispectral Data”. In: *IEEE/ISPRS Joint workshop on remote sensing and data fusion over urban areas, Urban 2001*, 2001, S. 100–104.
- [5] BILL R.: “*Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 2: Analysen, Anwendungen und neue Entwicklungen*”. Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1996.
- [6] BILL R. und FRITSCH D.: “*Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 1: Hardware, Software und Daten*”. Wichmann Verlag, Karlsruhe, 1991.
- [7] BOLTER R.: “Reconstruction of Man-Made Objects from High Resolution SAR Images”. In: *Proceedings of IEEE Aerospace Conference*, 2000. – Paper No. 6.0305, CDROM.
- [8] BOLTER R.: “*Buildings from SAR: Detection and Reconstruction of Buildings from Multiple View High Resolution Interferometric SAR Data*”, Institut für maschinelles Sehen und Darstellen, Technisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Universität Graz, Dissertation, 2001.
- [9] BOLTER R., GELAUTZ M. und LEBERL F.: “SAR Speckle Simulation”. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* Vol. 21, 1996, S. 20–25.
- [10] BOLTER R. und LEBERL F.: “Detection and Reconstruction of Human Scale Features from High Resolution Interferometric SAR Data”. In: *Proceedings of ICPR*, 2000, S. 291–294.
- [11] BOLTER R. und LEBERL F.: “Phenomenology-Based and Interferometry-Guided Building Reconstruction from Multiple SAR Images”. In: *Proceedings of EUSAR*, 2000, S. 687–690.

- [12] BOLTER R. und PINZ A.: “3D Exploitation of SAR Images”. In: *MAVRIC European Workshop, Kingston, UK*, 1999, S. 160–169.
- [13] BRENNER C.: “*Dreidimensionale Gebäuderekonstruktion aus digitalen Oberflächenmodellen und Grundrissen*”, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Stuttgart, Dissertation, 2000.
- [14] BRONSTEIN I. und SEMENDJAJEW K.: “*Taschenbuch der Mathematik*”. Verlag Harri Deutsch, 1985.
- [15] BURKHART G. R., BERGEN Z. und CARANDE R.: “Elevation Correction and Building Extraction from Interferometric SAR Imagery”. In: *Proceedings of IGARSS*, 1996, S. 659–661.
- [16] CANNY J.: “A Computational Approach to Edge Detection”. In: *IEEE Transactions of Pattern Analysis and Machine Intelligence* Vol. 8, Nr. 6, 1986, S. 679–698.
- [17] CARLOTTO M.: “Detecting Man-Made Features in SAR Imagery”. In: *Proceedings of IGARSS*, 1996, S. 34–36.
- [18] DATCU M. und PALUBINSKAS G.: “Multiscale Bayesian Terrain Height Estimation from SAR Interferometry”. In: *Proceedings of IGARSS*, 1998, S. 88–90.
- [19] DELL’ACQUA F., GAMBA P., SÖRGE U. und THÖNNESSEN U.: “Fully 3D and Joint 2D/3D Segmentation of InSAR Data over Urban Environments”. In: *IEEE/ISPRS Joint workshop on remote sensing and data fusion over urban areas, Urban*, 2001, S. 328–331.
- [20] DESNOS Y. L. und MATTEINI V.: “Review on Structure Detection and Speckle Filtering on ERS-1 Images”. In: *EARSeL Advances in Remote Sensing* Vol. 2, Nr. 2, 1993, S. 52–65.
- [21] DOBLER P.: “*Untersuchung zur wissensgesteuerten automatischen Klassifikation von rückstreuungsfreien SAR-Bildbereichen*”, Universität Karlsruhe, Diplomarbeit, 1991.
- [22] ECKSTEIN W. und MUNKELT O.: “Extracting Objects from Digital Terrain Models”. In: SCHENK T.: *Remote Sensing and Reconstruction for Three-Dimensional Objects and Scenes*, 1995 (Proc. Spie 2572), S. 222–231.
- [23] ENDER J. H. G.: “Experimental Results Achieved with the Airborne Multi-Channel SAR System AER-II”. In: *Proceedings of EUSAR*, 1998, S. 315–318.
- [24] ENDER J. H. G. und BRENNER A. R.: “PAMIR - A Wideband Phased Array SAR/MTI System”. In: *Proceedings of EUSAR*, 2002, S. 157–162.
- [25] FALLER N. P. und MEIER E. H.: “First Results with the Airborne Single-Pass DO-SAR Interferometer”. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* Vol. 33, Nr. 5, 1995, S. 1230–1237.

- [26] FEA M. und GUIGNARD J. P.: “The ERS-1 Mission and Ground Segment Processing”. In: SCHREIER G.: *SAR Geocoding: Data and Systems*. Wichmann, Karlsruhe, 1993, S. 103–134.
- [27] FERRETTI A., PRATI C. und ROCCA F.: “Permanent Scatterers in SAR Interferometry”. In: *Proceedings of IGARSS*, 1999, S. 1528–1530.
- [28] FRANCESCHETTI G., MIGLIACCIO M., RICCO D. und SCHRINZI G.: “SARAS: A Synthetic Aperture Radar (SAR) Raw Signal Simulator”. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* Vol. 30, Nr. 1, 1992, S. 110–123.
- [29] GAMBA P. und CASELLA V.: “Model Independent Object Extraction from Digital Surface Models”. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* Vol. 33, Nr. B3, 2000, S. 312–319.
- [30] GAMBA P. und HOUSHMAND B.: “Three Dimensional Urban Characterization by IFSAR Measurements”. In: *Proceedings of IGARSS*, 1999, S. 2401–2403.
- [31] GAMBA P. und HOUSHMAND B.: “Digital Surface Models and Building Extraction: A Comparison of IFSAR and LIDAR Data”. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* Vol. 38, Nr. 4, 2000, S. 1959–1968.
- [32] GAMBA P., HOUSHMAND B. und SACCINI M.: “Detection and Extraction of Buildings from Interferometric SAR Data”. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* Vol. 38, Nr. 1, 2000, S. 611–618.
- [33] GEIBEL R. und STILLA U.: “Segmentation of Laser Altimeter Data for Building Reconstruction: Different Procedures and Comparison”. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* Vol. 33, Nr. B3, 2000, S. 326–334.
- [34] GELAUTZ M., FRICK H., RAGGAM J., BURGSTALLER J. und LEBERL F.: “SAR Image Simulation and Analysis of Alpine Terrain”. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* Vol. 53, 1998, S. 17–38.
- [35] GENS R.: “*Quality Assessment of SAR Interferometric Data*”, Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Hannover, Dissertation, 1998.
- [36] GEUDTNER D.: “*Die interferometrische Verarbeitung von SAR-Daten des ERS-1*”, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Uni. Stuttgart, Dissertation, 1995.
- [37] GLAZER G.: “Morphological Image Processing in the KBVision System”. Amerinex Artificial Intelligence, Inc. 1993. – Forschungsbericht
- [38] GOLDSTEIN R., ZEBKER H. und WERNER C.: “Satellite Radar Interferometry: Two Dimensional Phase Unwrapping”. In: *Radio Science* Vol. 23, Nr. 4, 1988, S. 713–720.
- [39] GOODMAN J. W.: “*Statistical Optics*”. John Wiley & Sons, Inc, USA, 1985.
- [40] GOUINAUD C., TUPIN F. und MAÎTRE H.: “Potential and Use of Radar Images for Characterization and Detection of Urban Areas”. In: *Proc. of IGARSS*, 1996, S. 474–476.

- [41] GROWE S.: “*Wissensbasierte Interpretation multitemporaler Luftbilder*”, Universität Hannover, Dissertation, 2001. – Fortschrittsberichte VDI, Reihe 10, Nr. 656, VDI Verlag.
- [42] HAALA N.: “*Gebäuderekonstruktion durch Kombination von Bild und Höhendaten*”, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Stuttgart, Dissertation, 1996.
- [43] HABERÄCKER P.: “*Praxis der Digitalen Digitale Bildverarbeitung und Mustererkennung*”. Carl Hanser Verlag, München, 1987.
- [44] HAGG W.: “*Merkmalbasierte Klassifikation von SAR-Satellitenbilddaten*”, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF), Universität Karlsruhe, Dissertation, 1998. – Fortschrittsberichte VDI, Reihe 10, Nr. 568, Düsseldorf VDI Verlag.
- [45] HEIPKE C., KOCH A. und LOHMANN P.: “Analysis of SRTM DTM - Methodology and practical results”. In: *Journal of the Swedish Society for Photogrammetry and Remote Sensing* Vol. 1, 2002, S. 69–80.
- [46] HELLMANN M.: “*Classification of Fully polarimetric SAR Data for Cartographic Applications*”, Fakultät für Elektrotechnik, Technische Universität Dresden, Dissertation, 1999.
- [47] HELLWIG O.: “Basic Principles and Current Issues of SAR Interferometry”. In: *ISPRS Joint Workshop “Sensors and Mapping from Space 1999”, Hannover, 1999* (Publications of the Institute for Photogrammetry and Engineering Surveying of the University of Hannover 18). – CDROM.
- [48] HENRICSSON O.: “*Analysis of Image Structures using Color Attributes and Similarity Relations*”, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Dissertation, 1996.
- [49] HEPNER G. F., HOUSHMAND B., KULIKOV I. und BRYANT N.: “Investigation of the Potential for the Integration of AVIRIS and IFSAR for Urban Analysis”. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* Vol. 64, Nr. 8, 1998, S. 813–820.
- [50] HINZ S., BAUMGARTNER A. und EBNER H.: “Modeling Contextual Knowledge for Controlling Road Extraction in Urban Areas”. In: *IEEE/ISPRS Joint workshop on remote sensing and data fusion over urban areas, Urban 2001*. Rom, 2001, S. 40–44.
- [51] HOEPFNER K. B.: “Recovery of Building Structure from IFSAR-Derived Elevation Maps”. Amherst: University of Massachusetts, Computer Science Department, CMPSCI 99-16. 1999. – Forschungsbericht
- [52] HOLECZ F., MEIER E. und NÜESCH D.: “Postprocessing of Relief Induced Radiometric Distorted Spaceborne SAR Imagery”. In: SCHREIER G.: *SAR Geocoding: Data and Systems*. Wichmann, Karlsruhe, 1993, S. 299–352.
- [53] HOLECZ F., PASQUALI P., MOREIRA J., MEIER E. und NÜESCH D.: “Automatic Generation and Quality Assessment of Digital Surface Models generated from AeS-1 InSAR data”. In: *Proceedings of EUSAR*, 1998, S. 57–60.

- [54] HOOVER A., JEAN-BAPTISTE G., JIANG X., FLYNN P. J., BUNKE H., GOLDFOF D. B., BOWYER K., EGGERT D. W., FITZGIBBON A. und FISHER R. B.: “An Experimental Comparison of Range Image Segmentation Algorithms”. In: *IEEE Transactions of Pattern Analysis and Machine Intelligence* Vol. 18, Nr. 7, 1996, S. 673–689.
- [55] HOUSHMAND B. und GAMBA P.: “Interpretation of InSAR Mapping for Geometric Structures”. In: *IEEE/ISPRS Joint workshop on remote sensing and data fusion over urban areas, Urban 2001*. Rom, 2001, S. 309–311.
- [56] HUBER R.: “Information Extraction for Land-Cover Inventory and Change Detection from Air- and Spaceborne Interferometric SAR Sensors”. In: *Proc. of Retrieval of Bio- and Geo-Physical Parameters from SAR Data for Land Applications, Workshop*, 1998.
- [57] HUBER R.: “Information Fusion from Airborne InSAR Observations”. In: *Proceedings of ASPRS*, 2000.
- [58] HUERTAS A., KIM Z. und NEVATIA R.: “Multisensor Integration for Building Modeling”. In: *Proceedings of CVPR*, 2000.
- [59] JÄHNE B.: “*Digitale Bildverarbeitung*”. 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 1993.
- [60] JAYNES C. O., STOLLE F. R., SCHULTZ H., COLLINS R. T., HANSON A. R. und RISEMAN E. M.: “Three-Dimensional Grouping and Information Fusion for Site Modeling from Aerial Images”. In: *ARPA Image Understanding Workshop, Morgan Kaufmann*, 1996.
- [61] JIANG X. und BUNKE H.: “Fast Segmentation of Range Images into Planar Regions by Scan Line Grouping”. In: *Machine Vision and Applications* Vol. 7, Nr. 2, 1994, S. 115–122.
- [62] KIRSCHT M. und RINKE C.: “3D-Reconstruction of Buildings and Vegetation from Synthetic Aperture Radar (SAR) Images”. In: *MVA, IAPR Workshop*, 1998, S. 228–231.
- [63] KLAUSING H. und HOLPP W.: “*Radar mit realer und synthetischer Apertur*”. Oldenbourg Verlag München, 2000.
- [64] KOHNLE A., NEUWIRTH W., SCHUBERT W., STEIN K., HÖHN D. H., GABLER R., HOFMANN L. und EUING W.: “Evaluation of Essential Design Criteria for IRST Systems”. In: *76/SPIE Vol. 2020 Infrared Technology XIX*, 1993, S. 76–92.
- [65] KRAUS K.: “*Photogrammetrie. Band 2: Verfeinerte Methoden und Anwendungen*”. Dümmler Verlag, Bonn, 1996. – 3. Auflage.
- [66] KRAUS K.: “*Photogrammetrie. Band 1: Grundlagen und Standardverfahren*”. Dümmler Verlag, Bonn, 1997. – 6. Auflage.
- [67] LEBERL F. W.: “*Radargrammetric Image Processing*”. Artech House, 1990.
- [68] LEE J. S.: “Refined Filtering of Image Noise Using Local Statistics”. In: *Computer Graphics and Image Processing* Vol. 15, 1981, S. 380–389.

- [69] LEE J. S.: “Speckle Analysis and Smoothing of Synthetic Aperture Radar Image”. In: *Computer Graphics and Image Processing* Vol. 17, 1981, S. 24–32.
- [70] LEE J. S.: “Speckle Suppression and Analysis for Synthetic Aperture Radar Images”. In: *Optical Engineering* Vol. 25, Nr. 5, 1986, S. 636–643.
- [71] LEE J. S., HOPPEL K. W., MANGE S. A. und MILLER A. R.: “Intensity and Phase Statistics of Multilook Polarimetric and Interferometric SAR Imagery”. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* Vol. 32, Nr. 5, 1994, S. 1017–1028.
- [72] LEE J. S. und JURKEVICH I.: “Segmentation of SAR Images”. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* Vol. 27, Nr. 6, 1989, S. 674–680.
- [73] LEE J. S., JURKEVICH I., DEWAELE P., WAMBACQ P. und OOSTERLINC P.: “Speckle Filtering of Synthetic Aperture Radar Images: A Review”. In: *Remote Sensing Reviews* Vol. 8, 1994, S. 313–340.
- [74] LEE J. S., PAPATHANASIOU P., AINSWORTH T. L., GRUNES M. R. und REIGBER A.: “New Technique for Noise Filtering of SAR Interferometric Phase Images”. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* Vol. 36, Nr. 5, 1998, S. 1456–1465.
- [75] LEVINE M. D. und SHAHEEN S. I.: “Modular Computer Vision System for Picture Segmentation and Interpretation”. In: *IEEE Transactions of Pattern Analysis and Machine Intelligence* Vol. 3, Nr. 5, 1981, S. 540–554.
- [76] LEWIS A. J. und HENDERSON F. M.: “Radar Fundamentals: The Geoscience Perspective”. In: LEWIS A. J. und HENDERSON F. M.: *Principles & Applications of Imaging Radar, Manual of Remote Sensing, Third Edition, Volume 2*. John Wiley & Sons, Inc, USA, 1998, S. 131–176.
- [77] LIEDTKE C. E. und ENDER M.: “*Wissensbasierte Bildverarbeitung*”. Nachrichtentechnik 19, Springer-Verlag, Berlin, 1989.
- [78] LIPSCHUTZ S.: “*Wahrscheinlichkeitsrechnung*”. McGraw-Hill International (UK) Ltd., Maidenhead, England, 1999.
- [79] LOHR U.: “Laserscan DEM for various Applications”. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* Vol. 32, Nr. 4, 1998, S. 353–356.
- [80] MEIER E., FREI U. und NÜESCH D.: “Precise Terrain Corrected Geocoded Images”. In: SCHREIER G.: *SAR Geocoding: Data and Systems*. Wichmann, Karlsruhe, 1993, S. 173–185.
- [81] MEYER R. H. und ROY R. J.: “Algorithms for Interpreting SAR Imagery of Complex Building Scenes”. In: *Proceedings of SPIE, Vol. 4053, Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery*, ed. E. Zelnio. Orlando, USA, April 2000, S. 642–652.
- [82] MICHAELSEN E., SÖRGEL U. und STILLA U.: “Grouping Salient Scatterers in InSAR Data for Recognition of Industrial Buildings”. In: *Proceedings of ICPR*, 2002, S. 613–616.

- [83] MUHLEMANN D. O.: “Radar scattering from Venus and the Moon”. In: *Astronomical Journal* Vol. 69, 1964, S. 34–41.
- [84] NIEMANN H.: “*Pattern Analysis and Understanding*”. Springer-Verlag, Berlin, 1990.
- [85] OLIVER C.: “*Understanding Synthetic Aperture Radar Images*”. Artech House, 1998.
- [86] PAC R.: “X-SAR/SRTM Shuttle Radar Topography Mission”. DLR, Wessling. 1999. – Forschungsbericht
- [87] PIATER J. H. und RISEMAN E. M.: “Finding Planar Regions in Noisy 3D Grid Point Data”. Amherst: University of Massachusetts, Computer Science Department, CMPSCI 96-47. 1996. – Forschungsbericht
- [88] PINK T. H. und RAMATHAN U.: “Extraction of Height Information from Target Shadow for Applications in ATC”. In: *Proceedings of IGARSS*, 1999, S. 351–353.
- [89] QUARTULLI M. und DATCU M.: “Bayesian Model Based City Reconstruction from High Resolution ISAR Data”. In: *IEEE/ISPRS Joint workshop on remote sensing and data fusion over urban areas, Urban 2001*, 2001, S. 58–63.
- [90] RAGGAM J., STROBL D. und HUMMELBRUNNER W.: “Product Quality Enhancement and Quality Evaluation”. In: SCHREIER G.: *SAR Geocoding: Data and Systems*. Wichmann, Karlsruhe, 1993, S. 187–206.
- [91] REIGBER A. und MOREIRA A.: “First Demonstration of Airborne SAR Tomography Using Multibaseline L-Band Data”. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* Vol. 38, Nr. 5, 2000, S. 2142–2152.
- [92] RODRIGUEZ E. und MARTIN J.: “Theory and Design of Interferometric Synthetic Aperture Radar”. In: *IEEE Proceedings-F* Vol. 139, Nr. 2, 1992, S. 147–159.
- [93] RÖSSING L. und ENDER J. H. G.: “Advanced SAR Interferometry Techniques with AER-II”. In: *Internationales Radarsymposium der DGON, IRS*, 1998, S. 1261–1269.
- [94] RÖSSING L. und ENDER J. H. G.: “Multi-Antenna SAR Tomography Using Super Resolution Techniques”. In: *Proceedings of EUSAR*, 2000, S. 55–58.
- [95] ROTH A., CRAUBNER A. und HÜGEL T.: “Standard Geocoded Ellipsoid Corrected Images”. In: SCHREIER G.: *SAR Geocoding: Data and Systems*. Wichmann, Karlsruhe, 1993, S. 159–172.
- [96] SANTITAMNONT P.: “*Interferometric SAR Processing for Topographic Mapping*”, Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Hannover, Dissertation, 1998.
- [97] SCHREIER G.: “Geometrical Properties of SAR Images”. In: SCHREIER G.: *SAR Geocoding: Data and Systems*. Wichmann, Karlsruhe, 1993, S. 103–134.

- [98] SCHRÖDER M., REHRAUER H., SEIDEL K. und DATCU M.: “Spatial Information Retrieval from Remote-Sensing Images – Part II: Gibbs-Markov Random Fields”. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* Vol. 36, Nr. 5, 1998, S. 1446–1455.
- [99] SCHWÄBISCH M.: “Die SAR-Interferometrie zur Erzeugung digitaler Geländemodelle”, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Stuttgart, Dissertation, 1996.
- [100] SESTER M., SCHNEIDER W. und FRITSCH D.: “Results of the Test on Image Understanding of ISPRS Working Group III/3”. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* Vol. 31, Nr. B3, 1996, S. 768–773.
- [101] SÖRGE U., SCHULZ K. und THÖNNESEN U.: “Enhancement of Interferometric SAR Data Using Segmented Intensity Information in Urban Areas”. In: *Proceedings of IGARSS*, 2000. – CDROM
- [102] SÖRGE U., SCHULZ K. und THÖNNESEN U.: “Phenomenology-Based Segmentation of InSAR Data for Building Detection”. In: RADIG B. und FLORCZYK S.: *Pattern Recognition*. DAGM, Springer, 2001, S. 345–352.
- [103] SÖRGE U., SCHULZ K. und THÖNNESEN U.: “Segmentation of Interferometric SAR Data in Urban Areas”. In: ZELNIO E.: *Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery VIII, Aerosense, Proceedings of SPIE, vol. 4382*, 2001, S. 84–91.
- [104] SÖRGE U., SCHULZ K., THÖNNESEN U. und STILLA U.: “3D-Visualization of Interferometric SAR Data”. In: *Proceedings of EUSAR*, 2000, S. 305–312.
- [105] SÖRGE U., SCHULZ K., THÖNNESEN U. und STILLA U.: “Utilization of 2D and 3D Information for SAR Image Analysis in Dense Urban Areas”. In: *Proceedings of EUSAR*, 2002, S. 429–434.
- [106] SÖRGE U., THÖNNESEN U., GROSS H. und STILLA U.: “Segmentation of Interferometric SAR Data for Building Detection”. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* Vol. 33, Nr. B1, 2000, S. 328–335.
- [107] SÖRGE U., THÖNNESEN U. und STILLA U.: “Utilization of LIDAR for SAR Image Analysis in Dense Urban Areas”. In: *Proceedings of Photogrammetric Computer Vision, ISPRS Commission III Symposium*, 2002, S. 255–258.
- [108] SPECK R., HAGER M., GARCIA M. und SÜSS H.: “An end-to-end Simulator for Spaceborne SAR-Systems”. In: *Proceedings of EUSAR*, 2002, S. 237–239.
- [109] STEGER C.: “An Unbiased Detector of Curvilinear Structures”. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* Vol. 20, Nr. 2, 1998, S. 113–125.
- [110] STIES M. und HAGG W.: “Kontextgestützte Radarbildauswertung: Automatisierung der Landnutzungskartierung mit ERS-1/ERS-2 Radarbild- und Interferometriedaten in hochwassergefährdeten Gebieten”. Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF), Universität Karlsruhe. 1998. – Forschungsbericht

- [111] STILLA U.: “Map-Aided Structural Analysis of Aerial Images”. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* Vol. 50, Nr. 4, 1995, S. 3–10.
- [112] STILLA U., GEIBEL R., QUINT F. und STIES M.: “Analyse von Luft und Satellitenbildern zur automatischen Ermittlung der Bodenversiegelung städtischer Siedlungsgebiete”. Forschungsinstitut für Informationsverarbeitung und Mustererkennung (FGAN-FIM) und Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF), Universität Karlsruhe, DFG-Vorhaben, Abschlußbericht. 1998. – Forschungsbericht
- [113] STILLA U. und JURKIEWICZ K.: “Reconstruction of Building Models from Maps and Laser Altimeter Data”. In: AGOURIS P. und STEFANIDIS A.: *Integrated Spatial Databases: Digital Images and GIS*. Springer, Berlin, 1999, S. 39–46.
- [114] STILLA U., MICHAELSEN E. und LÜTJEN K.: “Automatic Extraction of Buildings from Aerial Images”. In: LEBERL F., KALLIANY R. und GRUBER M.: *Mapping Buildings, Roads and other Man-Made Structures from Images*. IAPR-TV7m, Oldenburg, Wien, 1995, S. 229–244.
- [115] STILLA U., QUINT F. und STIES M.: “Analyse von Luft und Satellitenbildern zur automatischen Ermittlung der Bodenversiegelung städtischer Siedlungsgebiete”. Forschungsinstitut für Informationsverarbeitung und Mustererkennung (FGAN-FIM) und Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF), Universität Karlsruhe, DFG-Vorhaben, Zwischenbericht II. 1995. – Forschungsbericht
- [116] STILLA U., SÖRGEL U. und THÖNNESEN U.: “Potential and Limits of InSAR Data for the Reconstruction of Buildings”. In: *IEEE/ISPRS Joint workshop on remote sensing and data fusion over urban areas, Urban 2001*, 2001, S. 64–68.
- [117] STILLA U., SÖRGEL U., THÖNNESEN U. und MICHAELSEN E.: “Segmentation of LIDAR and INSAR Elevation Data for Building Reconstruction”. In: BALTSAVIAS E. P., GRUEN A. und GOL L. V.: *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (III)*. Balkema, Lisse, Niederlande, 2001, S. 297–307.
- [118] STIMSON G.: “*Introduction to Airborne Radar*”. Institution Electrical Engineers, 1998.
- [119] SULLIVAN R. J.: “*Microwave Radar: Imaging and Advanced Concepts*”. Artech House, Inc, USA, 2000.
- [120] TAKEUCHI S., SUGA Y. und CHEN C. Y. A. J.: “Detection of Urban Disaster Using InSAR - A Case Study for the 1999 great Taiwan Earthquake”. In: *Proc. of IGARSS*, 2000. – CDROM.
- [121] TENNANT J. K. und COYNE T.: “STAR-3i Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR): Some Lessons learned on the Road to Commercialization”. In: *Proceedings of the 4th International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*, 1999.
- [122] TOUZI R., LOPES A., BRUNIQUEL J. und VACHON P. W.: “Coherence Estimation for SAR Imagery”. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* Vol. 37, Nr. 1, 1999, S. 135–149.

- [123] TUPIN F. und ROUX M.: “Markov Random Fields for Digital Terrain Model Extraction”. In: *IEEE/ISPRS Joint workshop on remote sensing and data fusion over urban areas, Urban 2001*. Rom, 2001, S. 95–99.
- [124] ULABY F. T., MOORE R. K. und FUNG A. K.: “*Microwave Remote Sensing*”. Addison-Wesley Publishing Company, Reading, USA, 1982.
- [125] ULANDER L. M. H. und HAGBERG J. O.: “Use of InSAR for Radiometric Calibration over Sloping Terrain”. In: *Proceedings of CEOS SAR Workshop*, 1993, S. 147–159.
- [126] WALESSA M.: “Texture Preserving Despeckling of SAR Images using GMRFs”. In: *Proceedings of IGARSS*, 1999, S. 1552–1554.
- [127] WALESSA M. und DATCU M.: “Enhancement of Interferometric DEMs by Spatially Adaptive Model-Based Filtering of Non-Stationary Noise”. In: *Proceedings of EUSAR*, 2000, S. 695–698.
- [128] WALESSA M. und DATCU M.: “Model-Based Despeckling and Information Extraction from SAR Images”. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* Vol. 38, Nr. 5, 2000, S. 2258–2269.
- [129] WEIDNER U.: “*Gebäudeerfassung aus Digitalen Oberflächenmodellen*”, Institut für Photogrammetrie, Universität Bonn, Dissertation, 1997. – Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 474.
- [130] WESSEL B., WIEDEMANN C. und HELLWICH O.: “Road Extraction from Multi-Frequency and Polarimetric SAR Imagery”. In: *Proceedings of EUSAR*, 2002, S. 287–290.
- [131] WILKINSON A. J.: “Synthetic Aperture Radar Interferometry: A Statistical Model for Layover Areas”. In: *Proceedings of IGARSS*, 1999, S. 2392–2394.
- [132] WILKINSON A. J. und DATCU M.: “Interferometric SAR Topographic Mapping, A Bayesian Model-Based Approach”. In: *Proceedings of COMSIG*, 1997, S. 83–88.
- [133] WINKLER G.: “*Image Analysis, Random Fields and Dynamic Monte Carlo Methodes*”. Springer Verlag, Berlin, 1995.
- [134] WRAY L. S., WILKINSON A. J. und INGGES M. R.: “Synthetic Aperture Radar Image Simulator for Interferometry”. In: *Proceedings of ISRSE*, 2000.
- [135] XIAO R., LESHER C. und WILSON B.: “Building Detection and Localization Using a Fusion of Interferometric Synthetic Aperture Radar and Multispectral Images”. In: *ARPA Image Understanding Workshop, Morgan Kaufmann*, 1998, S. 583–588.
- [136] ZENG Q. und OHKURA H.: “Observing the Ground Surface Deformation before and after Taiwan Chichi Earthquake by JERS 1 and ERS 2 Differential SAR Analysis”. In: *Proceedings of IGARSS*, 2000. – CDROM.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name Uwe Sörgel
Geburtstag und -ort 13.03.69 in Zell/Mosel
Familienstand verheiratet, ein Kind
Wohnort Kaiseralle 54
76185 Karlsruhe

Schulbildung

9/75 - 7/83 Grundschule und Rupprecht-Gymnasium in München.
9/83 - 6/88 Hardenberg-Gymnasium in Fürth, Abschluß: Abitur.

Bundeswehr

10/88 - 9/90 2 Jahre Zeitsoldat bei Logistiktruppenteilen der Bundeswehr in Nürnberg, Ulm und Bremen (Leutnant der Reserve).

Studium

seit 11/90 - 3/97 Studium der Elektrotechnik an der Universität Erlangen, Abschluß: Diplom.

Beruf

5/97 - 8/97 Wissenschaftliche Hilfskraft am Lehrstuhl für Nachrichtentechnik.
seit 9/97 Wissenschaftlicher Mitarbeiter beim Forschungsinstitut für Optronik und Mustererkennung (FGAN-FOM) in Ettlingen.