

Gebäuderekonstruktion
durch
Kombination von Bild- und Höhendaten

Bei der Fakultät für
Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
eingereichte Dissertation

Vorgelegt von
Dipl. Ing. Norbert Haala
wohnhaft in Stuttgart

Stuttgart 1996

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung in die Erfassung von 3D–Stadtmodellen	3
1.1	Einleitung	3
1.2	Objekterkennung	4
1.2.1	Extraktion von Bildbeschreibungen	5
1.2.2	Gruppierung	7
1.2.3	Objektmodelle	8
1.3	Beispiele für bestehende Verfahren zur Gebäuderekonstruktion	10
1.4	Kombination von Bild- und Höhendaten	12
1.5	Aufgabenstellung und Übersicht	13
2	Erfassung von Höhendaten für die Gebäuderekonstruktion	15
2.1	Automatische Stereobildzuordnung	16
2.1.1	Gebietsbasierte Verfahren	17
2.1.2	Merkmalsbasierte Verfahren	17
2.1.3	Stereobildzuordnung in bebauten Gebieten	18
2.2	Scannender Laser	20
3	Extraktion dreidimensionaler linearer Segmente	23
3.1	Stereozuordnung extrahierter Grauwertkanten	23
3.1.1	Extraktion gerader Grauwertkanten	23
3.1.2	Zusammenfassung kollinearer Geradenstücke	24
3.1.3	Stereozuordnung	25
3.2	Krümmungsanalyse von Höhendaten	27
3.3	Genauigkeit extrahierter Linien	29
3.3.1	Linien aus Stereobildpaaren	29
3.3.2	Linienextraktion nach Burns	29
3.3.3	Zusammenfassung extrahierter Linien	34
3.3.4	Stereozuordnung extrahierter Linien	35
3.3.5	Linien aus Höhendaten	40
4	Auswahl linearer Segmente	42
4.1	Gebäudedetektion durch die Analyse von Höhendaten	42
4.1.1	Segmentierung von Höhendaten	42
4.1.2	Morphologische Bearbeitung von Höhendaten	42
4.1.3	Bestimmung der Geländeoberfläche	44
4.2	Gruppierung linearer Segmente	45

5	Modellbildung	49
5.1	Erzeugung von Modellen	49
5.2	Repräsentationsformen	50
5.3	Gewählte Parametrisierung	51
6	Rekonstruktion der Gebäude	54
6.1	Definition möglicher Korrespondenzen	54
6.2	Parameterschätzung	55
6.3	Bewertung und Auswahl der Gebäuderekonstruktionen	56
7	Ergebnisse des Verfahrens	60
7.1	Rekonstruktion mit Grauwertkanten	60
7.2	Rekonstruktion mit DHM-Bruchkanten	72
7.3	Interpretation der Ergebnisse	77
7.3.1	Zuverlässigkeit des Verfahrens	77
7.3.2	Geometrische Genauigkeit des Verfahrens	79
7.3.3	Zeitvergleich manuelle und automatische Gebäudeerfassung	82
8	Mögliche Erweiterungen	83
8.1	Flächenbasierte Rekonstruktion	83
8.2	Integration vorhandener Grundrißdaten	84
9	Zusammenfassung und Diskussion	87

1 Einführung in die Erfassung von 3D–Stadtmodellen

1.1 Einleitung

Schon seit einigen Jahren zeichnet sich in der Photogrammetrie und in der Kartographie ein Übergang von analogen zu digitalen Systemen ab. Ein Grund dafür liegt darin, daß die Bearbeitung von Datenmengen, wie sie bei der Luftbildauswertung anfallen, durch die rasante Entwicklung der Computertechnologie im Grunde kein Problem mehr darstellt. Begünstigt durch die verbreitete Einführung von Geo–Informationssystemen (GIS) entstand zudem in den letzten Jahren ein starker Bedarf nach der Erfassung und Aktualisierung digitaler, raumbezogener Daten. Einen großen Bereich innerhalb dieser Geodaten nehmen dreidimensionale Stadtmodelle ein. Darunter wird allgemein eine geometrische Beschreibung eines bebauten Gebietes verstanden, in der Objekte wie die Geländeoberfläche, Gebäude, Straßen, Bäume, Versorgungseinrichtungen, usw. dreidimensional dargestellt sind. Solche Daten werden zunehmend für Planungsaufgaben von der öffentlichen Verwaltung oder privaten Institutionen eingesetzt.

Ein Hauptanwendungsbereich von 3D–Stadtmodellen sind **Simulationen**, die räumliche Strukturen berücksichtigen. Bei der Planung und Gestaltung von Verkehrswegen kann die Belastung umliegender Gebäude durch Lärm oder Abgase simuliert und dadurch in den Planungsprozeß einbezogen werden. Untersuchungen zur Stadtklimatologie benötigen für die zugrunde liegenden Strömungsmodelle dreidimensional strukturierte Daten. Durch solche Strömungsmodelle kann der Einfluß von Grünanlagen oder von geplanter Bebauung auf die Frischluftzufuhr innerhalb städtischer Gebiete simuliert werden. Hydrologische Untersuchungen benötigen zur Bestimmung der zeitlich auftretenden Abflußmenge bei Niederschlägen neben der Größe der versiegelten Fläche die Dachneigung der vorhandenen Gebäude. Die Wahl von Senderstandorten läßt sich durch Simulationen zur Ausbreitung elektromagnetischer Wellen optimieren. Anhand dreidimensionaler Stadtmodelle kann die Entstehung von Sende Schatten durch Gebäude vermieden und eine minimale Senderanzahl erreicht werden. Für geplante Einsätze des NAVSTAR Global Positioning Systems (GPS) bei der Positionsbestimmung in bebauten Gebieten kann vorab bestimmt werden, ob eine Messung durch Abschattung der Satelliten verhindert wird.

Auf der Grundlage dreidimensionaler Stadtmodelle können zudem durch Computeranimation photorealistische Darstellungen bebauter Gebiete als einzelne Bilder oder ganze Sequenzen für beliebige Standorte und Blickrichtungen erzeugt werden. Solche Animationen eignen sich sehr gut zur **Visualisierung** von Änderungen des Orts- und Landschaftsbildes durch geplante bauliche Maßnahmen. Diese Änderungen können dadurch den am Planungsprozeß beteiligten Personen plastisch veranschaulicht werden. Planungs- und Architekturbüros verwenden ca. 20% ihres Etats für die Darstellung ihrer Entwürfe, so daß für solche Anwendungen ein großer Markt besteht. Neben der Darstellung zukünftiger Bebauung ist die dreidimensionale Visualisierung historischer Stadtbilder zur Präsentation archäologischer Forschungsergebnisse eine weitere Anwendung. Realistische Darstellungen städtischer Szenen können durch die Schattierung der Objektoberflächen abhängig von ihrer Orientierung zu frei wählbaren Lichtquellen generiert werden. Um verschiedene Oberflächenmaterialien zu repräsentieren, kann zusätzlich Textur oder Farbe auf die Gebäudeoberflächen projiziert werden. Stehen Aufnahmen der Gebäudefassaden zur Verfügung, läßt sich durch die Projektion der entsprechenden Bildausschnitte auf die Oberflächen eine noch realistischere Visualisierung erreichen. Abbildung 1.1 zeigt ein Beispiel für eine solche Darstellung, zu deren Erzeugung ein manuell aus Luftbildern erhobenes 3D–Stadtmodell mit terrestrisch erfaßten Fassadenbildern kombiniert wurde. Schlagworte wie Virtual Reality oder Cyber Space stehen für den enormen Fortschritt und die wachsenden Einsatzbereiche solcher Visualisierungsanwendungen.

Die genannten Anwendungen stellen vielfach hohe Anforderungen an die Aktualität und Vollständigkeit des zu bearbeitenden Datenbestands, während die Anforderungen an den Detailreichtum und die geometrische Genauigkeit häufig nicht sehr hoch sind. Für eine realistische Visualisierung muß nicht unbedingt jeder Erker, Dachvorsprung oder Kamin modelliert werden. Das gleiche gilt für die meisten Simulationen, die 3D–Stadtmodelle benötigen. Die Datenerfassung für 3D–Stadtmodelle erfolgt üblicherweise durch die Analyse von Luftbildern. Traditionell erfordert deren Auswertung einen sehr hohen manuellen Arbeitsanteil, was sie sehr zeit- und kostenintensiv macht. Dies gilt in besonderem Maße für die dreidimensionale Erfassung von Gebäuden, die wichtigster Bestandteil der 3D–Stadtmodelle sind. Daher besteht ein großer Bedarf an automatischen oder semi–automatischen Verfahren, um diesen Prozeß zu unterstützen und damit zu beschleunigen.

Das Hauptproblem bei der Automatisierung von Verfahren zur Objekterkennung bzw. –rekonstruktion liegt nicht in dem eigentlichen Meßvorgang, d.h. in der Koordinatenbestimmung von Punkten, sondern in der Interpretation der Bilddaten. Zur Vereinfachung dieses Interpretationsprozesses werden in dieser Arbeit für die



Abbildung 1.1: Künstliche Perspektivansicht, berechnet aus 3D-Stadtmodell und terrestrischen Fassadenbildern (entnommen aus [Sinning-Meister et al. 1995]).

dreidimensionale Gebäuderekonstruktion neben digitalen Luftbildern auch Höhendaten in Form von Digitalen Höhenmodellen eingesetzt. Die Fusion beider Datentypen erlaubt dabei die Nutzung der jeweils spezifischen Vorteile, d.h. die relativ einfache Interpretation von Höhendaten durch deren Beschränkung auf geometrische Information und den hohen Informationsgehalt von Bilddaten für die Überprüfung und Erhöhung des Detailreichtums der Rekonstruktionen.

1.2 Objekterkennung

Die zentrale Aufgabe innerhalb des Interpretationsprozesses für die Rekonstruktion von Objekten besteht darin, eine aus dem Bild abgeleitete Beschreibung einem Modell des zugrunde liegenden Objekts zuzuordnen. Für die Erzeugung dieser Bildbeschreibung ist es zunächst erforderlich, aus dem digitalen Bild relevante Merkmale in Form einer symbolischen Bildbeschreibung abzuleiten. Insgesamt kann der Prozeß der Objekterkennung in vier Abschnitte unterteilt werden:

Modellierung von Wissen über den Prozeß der Bildentstehung. Da für die Objektrekonstruktion eine Invertierung des Abbildungsprozesses von 3D-Objekten in den 2D-Bildraum durchgeführt werden muß, ist eine Beschreibung der projektiven Geometrie des verwendeten Aufnahmesystems, wie sie z.B. durch die perspektiven Abbildungsgleichungen erfolgt, notwendig. Zusätzlich ist die Modellierung von Wissen über die Aufnahmesituation durch näherungsweise Kenntnis des Bildmaßstabs oder der Beleuchtung erforderlich. Dieser Schritt wird vielfach nicht explizit durchgeführt, in späteren Prozessierungsschritten aber implizit vorausgesetzt.

Erzeugung und Definition einer geeigneten Objektmodellierung. Für die Modellierung können nur solche Merkmale der zu rekonstruierenden Objekte verwendet werden, die innerhalb der zur Verfügung stehenden Bilddaten beobachtbar sind. In diesem Zusammenhang sind vor allem die Geometrie und die Reflexionseigenschaften der Objekte von Bedeutung. Die Modellierung der Reflexionseigenschaften ist immer dann implizit enthalten, wenn davon ausgegangen wird, daß ein Grauwertsprung durch die Abbildung einer Bruchkante oder Objektgrenze verursacht wird. Die Komponenten für die Beschreibung der

Objektgeometrie und deren Attribute sollen eine effektive Beschreibung im Hinblick auf eine schnelle und zuverlässige Zuordnung zu der in einem weiteren Schritt extrahierten Bildbeschreibung erlauben. Da auch sehr viel Objektinformation in der Topologie der verschiedenen Objektkomponenten enthalten ist, werden häufig Modelle verwendet, die diese Relationen beinhalten.

Erzeugung einer Bildbeschreibung. Dieser Extraktionsprozeß hängt sowohl vom modellierten Vorwissen über die Bildentstehung, als auch von der Art der Objektmodellierung ab. Nur bei einer Repräsentation, bei der sich Bild- und Objektbeschreibung auf gleichem Niveau befinden, d.h. gleiche Komponenten oder Primitive wie Punkte, Linien oder Flächen verwenden, ist eine Zuordnung durchführbar. Daneben sollte die Extraktion der Bildbeschreibung möglichst stabil, d.h. invariant gegenüber kleinen Änderungen des Aufnahmestandortes oder der Beleuchtung sein.

Zuordnung der Bildbeschreibung zum Objektmodell. Dazu müssen Korrespondenzen zwischen den extrahierten Bildkomponenten und den Komponenten der Objektbeschreibung durch ein geeignetes Zuordnungsverfahren gefunden werden. Die eingesetzten Verfahren hängen vom jeweiligen Abstraktionsgrad der Beschreibungen ab. Verwendet werden dabei beispielsweise einfache Merkmale wie Farbe oder komplexere, aggregierte Merkmale, wie Topologie.

Bildinterpretation setzt demnach voraus, daß dem visuellen System ein Modell der zu erkennenden Objekte und eine dazu passende Beschreibung des Bildes zur Verfügung steht. Die Objekterkennung kann dann als Zuordnungsproblem definiert werden, in dem Korrespondenzen zwischen den extrahierten Bildkomponenten und den Komponenten der Objektbeschreibung durch ein geeignetes Zuordnungsverfahren gesucht werden. Erkennen wird somit durch das Verknüpfen von Modellen und wahrgenommener Information ermöglicht. Die Objekt- und Bildinformation ist so zu repräsentieren, daß die Zuordnung der Primitive schnell und zuverlässig erfolgen kann, d.h. die Beschreibungen sollen eindeutige Zuordnungen bei möglichst geringem Zeitaufwand für die Suche erlauben [Burns 1992].

Ein Beispiel für ein Objekterkennungsverfahren, bei dem Bild und Modell auf der Pixelebene repräsentiert und zugeordnet werden, ist die Klassifizierung. Dabei werden die verschiedenen zu erkennenden Nutzungsarten durch ihre Reflexionseigenschaften modelliert. Bei bekannten Abbildungseigenschaften des verwendeten Sensors ist damit für jede Nutzungsart festgelegt, mit welchem Helligkeitswert sie abgebildet wird. Als Bildbeschreibung wird direkt der Wert jedes Pixels (häufig in verschiedenen Kanälen) verwendet, die Zuordnung findet ebenfalls pixelweise statt. Für viele Anwendungen der Objektrekonstruktion erfolgt die Zuordnung vom Bild zum Modell jedoch auf einer höheren Repräsentationsstufe. Bild und Objektmodell werden häufig durch geometrische Primitive wie Punkte, Linien und Regionen repräsentiert, die durch Attributwerte, z.B. für Linienlänge oder Fläche, weiter charakterisiert werden. Neben der Beschreibung der einzelnen Bestandteile durch geometrische Primitive wird auch die Topologie des Objekts und der extrahierten Bildbeschreibung durch Relationen der Primitive wie Winkel zwischen den Linien, Verknüpfungen zwischen Punkten und Linien oder Nachbarschaften von Regionen repräsentiert. Die Zuordnung von Objekt- und Bildbeschreibung kann in diesem Fall anhand ähnlicher Attributwerte korrespondierender Primitive sowie deren Relationen durchgeführt werden.

Nach dieser relativ allgemein gehaltenen Einführung sollen in den folgenden Abschnitten einzelne Schritte der Objekterkennung näher diskutiert werden.

1.2.1 Extraktion von Bildbeschreibungen

Üblicherweise wird für die Erzeugung einer Bildbeschreibung die beobachtete Bildinformation auf wesentliche Merkmale reduziert, um einen Übergang von der Low-Level Beschreibung des Bildes (Grauwerte oder Grauwertkanten) auf eine abstraktere, höherwertigere Repräsentation zu erreichen. Als Basiselemente für diese Bildbeschreibung werden Primitive wie Punkte, Linien und Regionen verwendet, die aus traditionellen Segmentierungsverfahren resultieren. Diese Verfahren lassen sich in zwei Klassen, gebiets- oder kantenbasierte Verfahren, einteilen. Eine Übersicht über kantenbasierte Verfahren geben Davis [1975] oder Bässmann & Besslich [1989]. Gebietsbasierte sowie hybride Verfahren werden von Haralick & Shapiro [1985] und Ballard & Brown [1982] beschrieben.

Gebietsbasierte Verfahren extrahieren zuerst zusammenhängende, homogene Bereiche eines Bildes, indem benachbarte Pixel, die ein bestimmtes Homogenitätskriterium (im allgemeinen ähnliche Grauwerte oder

Textur) erfüllen, zu Regionen zusammengefaßt werden. Linien ergeben sich dann aus den Grenzen dieser Gebiete. Punkte sind als Schnittpunkte dieser Linien definiert und entstehen, wenn drei oder mehr Gebiete zusammentreffen. Nachteil dieser Verfahren ist, daß bei gleichmäßiger Änderung beispielsweise der Helligkeit über größere Bereiche hinweg von gebietsbasierten Verfahren oft Grenzen an Stellen detektiert werden, die nur wenig Änderung aufweisen. Linien, die sich aus diesen Grenzen ergeben, haben häufig keine physikalische Ursache im Objektraum. Sie sind sehr instabil gegenüber Beleuchtungsänderungen und stimmen auch häufig nicht mit Bruchkanten von Oberflächen oder Objektgrenzen überein. Eine solche Beschreibung ist für eine weitere Merkmalsextraktion zur Generierung einer symbolischen Bildbeschreibung im Hinblick auf einen späteren Zuordnungsprozeß nicht geeignet.

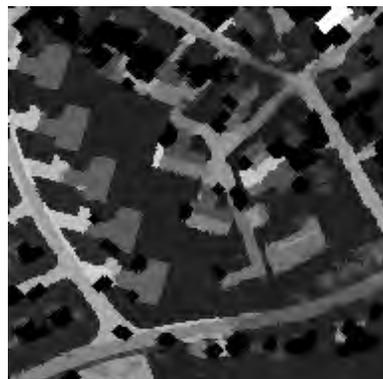
Kantenbasierte Verfahren detektieren zunächst durch lokale Operatoren Pixel an Grauwertkanten. Diese Kantenstücke werden entweder an Maxima der ersten Ableitung des Grauwerts oder an Stellen von Nulldurchgängen der zweiten Ableitung extrahiert. Konturverfolgungsalgorithmen verknüpfen anschließend diese Elemente zu zusammenhängenden Konturstücken. Punkte ergeben sich als Schnittpunkte dieser Linien oder aus Punktoperationen. Regionen sind definiert als Gebiete, die von Linienzügen umschlossen werden. Da die durch kantenbasierte Verfahren detektierten Linien den Grauwertkanten im Bild entsprechen, gehen diese Linien eher auf Oberflächenbruchkanten zurück als Linien aus gebietsbasierten Verfahren. Viele durch Linienverfolgungsalgorithmen gefundene Konturen werden allerdings durch Schattenwurf, Rauschen, Oberflächentextur, u.ä. verursacht. Zudem ergeben die im Bild gefundenen Linienzüge oftmals keine geschlossenen Polygonzüge. Da durch den Segmentierungsprozeß gerade solche Elemente (z.B. geschlossene Grauwertgebiete) detektiert werden sollen, die durch die Abbildung eines Objektelements (z.B. einer geschlossenen Fläche im Objektraum) verursacht werden, ist dies häufig ein Nachteil.



a: Original



b: kantenbasierte Segmentierung



c: gebietsbasierte Segmentierung

Abbildung 1.2: Beispiele für Segmentierungsverfahren.

Beispiele für die vorgestellten Segmentierungsverfahren sind in Abbildung 1.2 dargestellt. Abbildung 1.2.b wurde durch einen gebietsbasierten Segmentierungsalgorithmus [Vosselman 1989], Abbildung 1.2.c durch ein kantenbasiertes Verfahren [Bässmann & Besslich 1991] erzeugt. Obwohl die traditionellen Verfahren vereinfacht beschrieben wurden, treten die hier angesprochenen Probleme auch bei aufwendigeren Methoden auf, die auf den gleichen Prinzipien beruhen. Die grundsätzliche Problematik aller Segmentierungsalgorithmen liegt darin, daß Grauwertsprünge, die als Oberflächensprünge interpretiert werden, viele andere Ursachen wie Rauschen, Textur oder Schattenwurf haben können. Bei den traditionellen Verfahren findet der Übergang von den lokalen Elementen wie Grauwerten oder Grauwertsprüngen zu Bildsegmenten, die im folgenden Schritt Objekten oder Objektteilen zugeordnet werden sollen, ohne Zwischenschritte statt. Da während des Segmentierungsprozesses nur lokale Grauwertinformation und kein Hintergrund- oder Metawissen über die dargestellte Szene genutzt wird, ist dieser Prozeß im allgemeinen sehr fehleranfällig [Mohan & Nevatia 1988]. Ein Objektmodell und damit Wissen über die dargestellte Szene und die darin enthaltenen Objekte wird erst nach der Extraktion der Bildbeschreibung durch den Zuordnungsprozeß genutzt. Eine Möglichkeit diese Lücke zu schließen besteht in der Gruppierung von Einzelmerkmalen. Damit wird eine Organisation der wahrgenommenen Information angestrebt, um dadurch die Schwächen der traditionellen Segmentierungsverfahren zu überwinden.

1.2.2 Gruppierung

Zur Rekonstruktion eines Objekts muß die wahrgenommene Information in Zusammenhang mit einem Objektmodell gebracht werden. Dazu werden Elemente der Bildbeschreibung Elementen des Objektmodells zugeordnet. Eine solche Zuordnung findet anhand ähnlicher Merkmale statt, wie ähnliche Länge oder Orientierung zugeordneter Linien oder ähnliche Winkel an Schnittpunkten von Geraden. Da der Aufwand für den Zuordnungsprozeß exponentiell mit der Zahl möglicher Übereinstimmungen von Modellprimitiven und beobachteten Primitiven steigt, ist eine Untersuchung von allen möglichen Kombinationen ohne effektive Beschränkungen praktisch nicht durchführbar. Aus diesem Grund sollten durch die verwendeten Attribute der Primitive möglichst eindeutige Zuordnungen erreicht werden. Dies wird durch eine Beschreibung der beobachteten Information mit relativ wenig Primitiven ermöglicht, die einen hohen Informationsgehalt besitzen.

Eine Möglichkeit aus den durch die beschriebenen Segmentierungsverfahren extrahierten Primitiven (Punkte, Linien oder Regionen) höherwertigere Beschreibungen zu erzeugen ist die sogenannte *Gruppierung* oder *Perceptual Grouping*. Dabei wird durch Zusammenfassen oder Gruppieren von Basisprimitiven zu aggregierten Primitiven eine Selektion und Abstraktion der beobachteten Primitive erreicht. Die Gruppierung findet dabei aufgrund von geometrischen und topologischen Relationen wie Nachbarschaft, Ähnlichkeit oder Symmetrie statt. Die gruppierten Primitive beinhalten somit mehr Information als nur die Summe ihrer Teile, da auch ihre Relationen implizit enthalten sind.

Ziel der Gruppierung ist es, eine *abstrakte Beschreibung* des beobachteten Bildes zu erhalten. Die Bildbeschreibung soll durch wenige Primitive mit hohem Informationsgehalt erfolgen und gleichzeitig stabil, d.h. von geringen Änderungen der Beleuchtung oder des Aufnahmestandpunktes unabhängig sein. Den Primitiven, die durch Rauschen entstehen, liegt keine Struktur zugrunde. Da für solche Primitive eine Gruppierung zu höherwertigeren Strukturen nicht möglich ist, können sie verworfen werden. Dadurch ist eine *Auswahl von Primitiven* möglich. Zusätzlich kann die *Aufmerksamkeit (focus of attention)* des nachfolgenden Zuordnungsprozesses auf wichtige Elemente gelenkt werden, da die für die Gruppierung genutzten Strukturen im Bild in der Regel auf die Strukturen der abgebildeten Objekte zurückgehen. Die Grundidee des Einsatzes von Perceptual Grouping in der Bildverarbeitung ist, die Fähigkeit des menschlichen visuellen Systems zur sinnvollen Zusammenfassung von Bildelementen mittels Ansätzen der *Gestalttheorie* in den Low-Level Bildverarbeitungsbereich zu übertragen [Sommer 1992]. Dabei sollen durch die Organisation oder Gruppierung von Bildprimitiven (Punkten oder Kantenstücken), die üblicherweise aus Low-Level-Prozessen hervorgehen, Gruppen dieser Primitive erzeugt werden, die die strukturellen Relationen zwischen diesen Komponenten einbeziehen. Die Beschreibungen durch solche strukturellen Primitive sollen das mit lokalen Grauwertoperatoren bearbeitete Bild näher an eine für den Zuordnungsprozeß geeignete symbolische Bildbeschreibung führen.

Die Grundlagen der Gestalttheorie wurden in den 20er und 30er Jahren dieses Jahrhunderts von den Psychologen der *Gestaltsschule* entwickelt [Wertheimer 1923]. Durch psychologische Versuche wurden Beispiele zur Demonstration von Gruppierungsphänomenen erarbeitet und eine Einteilung der Gruppierungsprozesse aufgrund der verwendeten Beziehungen zwischen den Elementen durchgeführt. In Abbildung 1.3 sind einige dieser Phänomene dargestellt. Die Beziehungen zwischen den Elementen, die für den Gruppierungsprozeß verwendet werden, lassen sich einteilen in:

- a) Nachbarschaft
Elemente, die nahe beieinander liegen, werden häufig zusammengefaßt.
- b) Ähnlichkeit
Ähnliche Elemente werden gruppiert.
- c) Geschlossenheit
Bildelemente werden verbunden, wenn sich daraus ein geschlossenes Polygon ergibt.
- d) Kontinuität
Elemente, die entlang einer gemeinsamen Linie oder Kurve liegen, werden gruppiert.
- e) Symmetrie, Parallität
Symmetrische bzw. parallele Kurven und Linienzüge werden gruppiert.

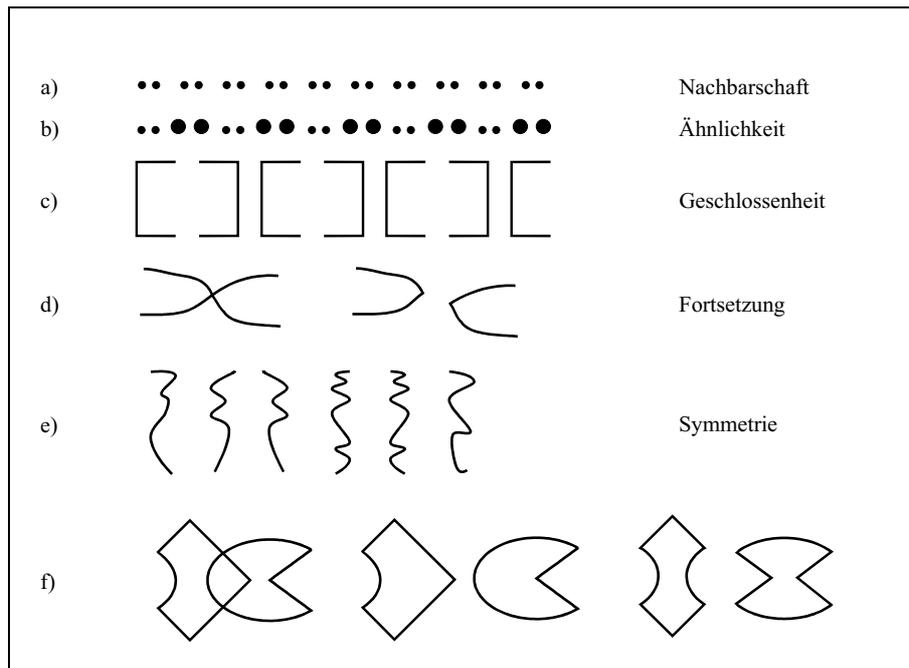


Abbildung 1.3: Einige Beispiele der Kategorien der Gruppierungsphänomene, entnommen aus [Lo85]. Beispiel f) zeigt, daß die Wahrnehmung fortgesetzter Konturen stärker wirkt als der Einfluß von Symmetrie.

f) Vertrautheit einer Form

Elemente werden zu vertrauten Formen zusammengefaßt. Dazu gehört auch die Gruppierung von Liniensegmenten zu Rechteckstrukturen, wie sie vor allem für künstliche Objekte typisch sind.

Die Form der Struktur, zu der die Primitive gruppiert werden, soll dabei möglichst *prägnant* im Sinne von treffend, knapp sein, wobei dieses Kriterium von den Gestaltisten nicht genauer formuliert bzw. definiert wurde. Später wurde die Prägnanz mit Hilfe der *Informationstheorie* quantifiziert, indem sie als *minimale Beschreibungslänge* (Minimum Description Length, MDL) einer Gruppierung definiert wurde [Fua & Hanson 1988].

Für die Gruppierung auf der Grundlage der Gestalttheorie wird kein explizites Vorwissen über den Bildinhalt benötigt; die Gestaltwahrnehmung erfolgt modellfrei in dem Sinn, daß die Zusammenfassung der Primitive ohne konkretes Vorwissen über die abgebildeten Objekte erfolgt. Eine solche modellfreie Gruppierung erfolgt auch bei Computer-Vision Verfahren, die auf eine Verbesserung der sehr lokal arbeitenden und rauschanfälligen traditionellen Segmentierungsalgorithmen zielen [Boldt, Weiss & Riseman 1989], [Sarkar & Boyer 1993], [McCafferty 1990]. Trotz der Berufung auf die Ideen der Gestaltsschule wird in vielen Arbeiten objektspezifisches Wissen verwendet, d.h. die zur Gruppierung genutzten geometrischen Beziehungen sind aus den Strukturen der Objektklassen abgeleitet, die zu detektieren sind. Objekten einer Kulturlandschaft (Gebäude, Felder, Straßen) liegt häufig eine symmetrische, rechteckige Struktur zugrunde. Von einem pragmatischen Standpunkt aus werden im Rahmen von Prozessen zur Gebäuderekonstruktion häufig Gruppierungsverfahren genutzt, um extrahierte Liniensegmente zu solchen Rechtecken zusammenzufassen [Mohan & Nevatia 1992], [Price & Huertas 1992]. Dadurch wird versucht, eine Bildbeschreibung zu erhalten, die möglichst gut für die anschließende Zuordnung zu Objektmodellen geeignet ist.

1.2.3 Objektmodelle

Da Bilder ein zweidimensionales Abbild einer dreidimensionalen Welt sind, können sie auch nur einen Teil der Information über die aufgenommenen Objekte liefern. Aufgrund von Verdeckungen durch andere Objekte, durch mangelnden Kontrast oder entsprechend der Perspektive fehlt immer Information über bestimmte Objektteile. Auf der anderen Seite enthalten Bilder Informationen über Details, die für die gestellte Aufgabe nicht relevant sind. Dinge überhaupt zu unterscheiden oder zu bewerten, was im jeweiligen Zusammenhang wichtig oder

unwichtig ist, setzt Vorwissen über die abgebildeten Objekte voraus. Nur durch Erfahrung und Vorstellungen über die reale Welt, die der Mensch beim Betrachten eines Bildes unbewußt nutzt, kann, bezogen auf die jeweilige Zielsetzung, wichtige Information herausgefiltert, beziehungsweise fehlende Information in der Vorstellung, also der gedanklichen Rekonstruktion eines Objekts, ergänzt werden. Ähnlich dem menschlichen visuellen System kann deshalb ein automatisches Verfahren der Bildinterpretation nicht ohne genaue Vorstellungen über die abgebildeten Objekte und deren Beziehungen in Form eines Objektmodells auskommen. Eine klassifizierende Einteilung der Modelle kann nach dem Grad ihrer Spezialisierung erreicht werden [Sester 1995].

Spezifische Modelle sind Beschreibungen, die ein einziges Objekt detailliert und vollständig repräsentieren. Solche Modelle werden vor allem im CAD (Computer Aided Design) und GIS-Bereich eingesetzt und charakterisieren alle Eigenschaften eines Objekts, die für eine bestimmte Aufgabe benötigt werden. Spezifische Beschreibungen ermöglichen es, individuelle Objekte eindeutig zu erkennen. In der Vergangenheit wurden im Bereich des maschinellen Sehens vor allem dort Erfolge erzielt, wo spezifische Modelle eingesetzt werden konnten. Dies trifft vor allem für Industrieranwendungen zu, für die zum einen die Art der Objekterkennung bekannt ist, und sich zum anderen Blickwinkel und Beleuchtungsverhältnisse gut beschreiben bzw. vorgeben lassen. Spezifische Modelle können auch eingesetzt werden, wenn Position und Orientierung eines vorher definierten Objekts relativ zum Aufnahmesystem bestimmt werden sollen. Beispiele hierfür sind das Erkennen und Lokalisieren topographischer Paßpunkte in Luftbildern wie die Erkennung von Straßenkreuzungen durch relationale Zuordnung [Haala & Vosselman 1992] oder die Lokalisierung bekannter Gebäude [Schickler 1992]. Für allgemeinere Aufgabenstellungen, wie das Erkennen und Lokalisieren unbekannter und unterschiedlicher Gebäude aus Luftbildern, ist die explizite Modellierung eines jeden Objekts nicht möglich, hier müssen generische Modelle verwendet werden.

Generische oder allgemeine Modelle gestatten, Wissen über die allgemeine Form der zu rekonstruierenden Objekte zu repräsentieren. Fua & Hanson [1987] definieren generische Formmodelle als das Gegenteil von spezifischen, schablonenhaften (template-like) Beschreibungen. Durch das Umgehen einer starren Beschreibung, die für jedes Objekt ein spezifisches Modell erfordert, können generische Modelle nicht nur *ein* bestimmtes, sondern ganze Klassen oder *Gruppen* gleichartiger Objekte beschreiben. Dazu werden die spezifischen Eigenschaften zu einer Klassenbeschreibung generalisiert. Generische Modelle können weiter in parametrische und strukturelle Modelle unterteilt werden.

Parametrische Modelle sind frei bezüglich ihrer Geometrie, ihre Topologie ist dagegen vorgegeben [Braun, Kolbe, Lang, Schickler, Steinhage, Kremers, Förstner & Plümmer 1995]. Parametrische Modelle enthalten so alle wesentlichen Merkmale einer Objektklasse, ohne jedoch bestimmte Parameter festzulegen. Länge, Breite und Höhe eines Objekts der Klasse Quader liegen als freie Größen nicht fest, dagegen ist die Anzahl der Teile und deren Relationen wie Parallelität von Linien oder Koplanarität von Punkten durch dieses parametrische Modell bereits vorgegeben. Ein Quader ist demnach ein generische Modell, das zur Repräsentation einer ganzen Gruppe von Objekten verwendet werden kann.

Strukturelle Modelle geben zwar noch vor, welche topologischen Beziehungen zwischen verschiedenen Objektprimitiven auftreten, die Anzahl der Elemente, aus der ein Objekt besteht ist jedoch im Gegensatz zu parametrischen Modellen frei. Ein strukturelles Modell liegt zugrunde, wenn eine beliebige Zahl extrahierter Kanten aufgrund von Relationen wie Kollinearität, Rechtwinkligkeit und Parallelität zu geschlossenen Polygonen verknüpft werden, die zur Repräsentation von Häusern oder Straßen dienen. Die Kombination von Grauwertkanten zu geschlossenen Formen führt zwar nicht unbedingt zu einer einzigen physikalischen Interpretation eines extrahierten Gebietes, die dadurch entstehenden aggregierten und abstrakten Primitive können jedoch für einen Zuordnungsprozeß verwendet werden und dabei den Suchraum sehr stark einschränken.

Für die Gebäuderekonstruktion ist vor allem die Beschreibung der dreidimensionalen Form von Interesse. Das Modell der zu rekonstruierenden Gebäude ist in diesem Fall rein geometrisch, das Ziel der Rekonstruktion ist die mathematische Beschreibung der Objektflächen. Das Hauptproblem der Objektmodellierung liegt vor allem darin, Modelle so allgemein zu definieren, daß möglichst viele Objekte durch das selbe Modell repräsentiert werden können und gleichzeitig genügend Zwänge und Bedingungen zu formulieren um für den Interpretationsprozeß eine eindeutige Lösung zu ermöglichen.

Durch eine Beschränkung auf ebene Flächen können Gebäude als Polyeder approximiert werden. Wegen des Bezugs von Bauwerken auf die Lotrichtung lassen sich teilweise noch weitere Bedingungen wie die Beschränkung

auf horizontale und vertikale Flächen einführen, um das Polyedermodell auf (reguläre) Prismen zu reduzieren. Der Beschreibung von Gebäuden durch allgemeine Polyeder oder Prismen liegt ein strukturelles Modell zugrunde, da die Art der Relationen (z.B. Inzidenzen, Kollinearitäten, rechte Winkel) gegeben, die Anzahl der Objektelemente (z.B. Flächenstücke) jedoch frei ist. Bestehende Verfahren zur automatischen Gebäuderekonstruktion verwenden häufig noch einfachere geometrische Körper wie Quader zur Beschreibung der Gebäude, da solche parametrischen Modelle – bei freier Objektgeometrie – zusätzliche Bedingungen für die Topologie und Anzahl der Objektelemente definieren. Die Verwendung von Modellen mit dieser relativ geringen Komplexität ist möglich, da die Anforderungen an die Detailliertheit von Gebäuden für 3D-Stadtmodelle häufig nur im Bereich einiger Dezimeter liegt, d.h. kleinere Details und Objektteile müssen in der Regel nicht erfaßt werden. Mit den existierenden Modellen lassen sich viele Gebäude nur vereinfacht beschreiben. Für die Rekonstruktion von Varianten und Mischformen oder für die Rekonstruktion in verschiedenen Detaillierungsgraden ist eine variabelere Objektmodellierung notwendig. In diesem Bereich ist jedoch noch ein großer Bedarf an Forschung gegeben.

Nachdem mit der Extraktion von Bildbeschreibungen und der Modellierung wichtige Aspekte der Objekt- bzw. Gebäuderekonstruktion eher allgemein vorgestellt wurden, soll im folgenden Abschnitt ein Überblick über bestehende Verfahren zur automatischen Rekonstruktion von Gebäuden gegeben werden.

1.3 Beispiele für bestehende Verfahren zur Gebäuderekonstruktion

Bei den meisten Verfahren zur vollautomatischen Gebäuderekonstruktion erfolgt der Übergang von den Bilddaten zur Objektstruktur in mehreren Stufen. In jeder Stufe wird zusätzliches Objektwissen verwendet, um bessere und damit eingeschränktere Hypothesen über das Objekt zu erhalten. Die Repräsentation der Bild- und Objektinformation wird dabei immer abstrakter und reichhaltiger [Förstner & Pallaske 1993]. Fast alle Verfahren zur automatischen Gebäuderekonstruktion verwenden gerade Kantenstücke als Elemente der Bildbeschreibung, die über gängige Verfahren aus dem digitalen Bild extrahiert werden. Dieser Prozeß nutzt das sehr allgemeine Wissen, daß Gebäude und andere künstliche Objekte eine Vielzahl gerader Raumkanten aufweisen, die sich im Bild als gerade Intensitäts- oder Farbkanten darstellen.

In einem nächsten Schritt werden die geraden Kanten – soweit möglich – zu geschlossenen Polygonen gruppiert, die in ihrem Inneren homogene Intensität aufweisen. Dieser **Segmentierung** liegt das Wissen zugrunde, daß die Oberflächen von Gebäuden meist eben sind und homogene Reflexionseigenschaften besitzen. Für die **Gruppierung** werden häufig Relationen wie Parallelität, Kontinuität, Nachbarschaft oder Symmetrie verwendet. Fua & Hanson [1988] verknüpfen gerade Kantenstücke aufgrund von Kollinearität, Rechtwinkligkeit und Parallelität zu sogenannten binären Kantenrelationen. Diese binären Relationen dienen zur Konstruktion geschlossener Graphen, die als Modelle zur Repräsentation von Häusern, Straßen und Bäumen verwendet werden. Während Fua & Hanson [1988] ein strukturelles Modell verwenden, bei der die Anzahl der Objektelemente frei ist, werden in vielen anderen Arbeiten die geraden Kanten zu Rechtecken gruppiert, d.h. die Objekttopologie wird stark eingeschränkt. Durch die Komplexität von Luftbildern und die große Anzahl von Objekten, die ebenfalls durch Rechtecke modelliert werden können (Felder, Plätze, Gebäudeschatten usw.), lassen sich viele Hypothesen für verschiedene Gruppierungen aufstellen. Eine Verifizierung, d.h. Bestätigung oder Zurückweisung der gebildeten Gruppierungen kann deshalb nur durch die Hinzunahme von weiterem Vorwissen in Form von Kontextannahmen oder Einschränkungen erfolgen. Da die geschlossenen Graphen Häuser repräsentieren sollen, dürfen sie sich nicht überlagern. Diese Bedingung läßt sich zur Auswahl der Gruppierungsergebnisse verwenden. Fua & Hanson [1988] wählen zur Gewinnung der Bildbeschreibung aus der Gesamtmenge der postulierten Modellzuweisungen die Teilmenge sich nicht überlappender Polygone aus, die zu einer optimalen Bildrepräsentation führt. Die Bewertung der postulierten Modellzuweisungen (z.B. geschlossene Graphen als Hausmodell) erfolgt mittels der Theorie der minimalen Beschreibungslänge. Die Effektivität einer Repräsentation wird dabei im Sinne der Informationstheorie bestimmt. Mohan & Nevatia [1992] kombinieren gerade Kantenstücke zu Rechtecken. Sie führen ebenfalls die Bedingung ein, daß sich die Graphen, – in diesem Fall Rechtecke – die Gebäude repräsentieren sollen, nicht überlagern dürfen. Rechtecke, die aus kontrastreichen Linien gebildet wurden, werden bei der Auswahl bevorzugt. Die wechselseitigen Abhängigkeiten der Gruppierungen werden durch ein Hopfield-Netz modelliert, das zur Suche nach einer optimalen und gleichzeitig global konsistenten Lösung dient.

Der Übergang zu einer **dreidimensionalen Darstellung** der Gebäude wird häufig durch die **Stereozuordnung** mit Elementen aus anderen Bildern erreicht. Dieser Schritt läßt sich mit einer **Verifizierung** und **Auswahl der Gruppierungsergebnisse** kombinieren. Häufig fließt in diesen Prozeß auch Vorwissen über die

gegenseitige Orientierung der Bilder mit ein. Mohan & Nevatia [1992] und Fua & Hanson [1988] führen eine Stereozuordnung der gruppierten Rechtecke bzw. Graphen durch und wählen anschließend diejenigen Gruppierungen aus, die sich im Stereobild zuordnen lassen und deren Parallaxen innerhalb eines vorgegebenen Bereichs liegen. Dieser Bereich wird durch die Geländeoberfläche, die durch eine Ebene approximiert wird, und durch die maximal erwartete Gebäudehöhe festgelegt. Eine Reihe von Autoren [Maitre & Luo 1992], [Dang, Jamet & Maitre 1994], [Kim & Mueller 1995] kombinieren die Erzeugung eines Parallaxenfeldes durch Stereobildzuordnung mit der Generierung von Gebäudehypothesen im Bild. Dazu werden durch eine Gruppierung Rechtecke detektiert, die potentielle Gebäudegrenzen festlegen. Innerhalb dieser Gebäudegrenzen wird getestet, ob das Parallaxenfeld genügend genau durch eine Ebene approximiert werden kann. Ist dies der Fall, werden die entsprechenden Gebäudegrenzen als Oberflächendiskontinuitäten in die Stereozuordnung eingeführt. Dadurch findet eine Auswahl der Gebäudehypothesen statt. Gleichzeitig wird durch die Einführung von Bruchkanten innerhalb eines bebauten Gebietes ein Digitales Höhenmodell mit hinreichender Genauigkeit berechnet. Eine andere Möglichkeit zur Verifizierung detektierter Gruppierungen und zur Erzeugung einer 3D-Beschreibung besteht in der Analyse der **Gebäudeschatten** [Irvin & McKeown 1989]. Voraussetzung für den Einsatz von Gebäudeschatten bei der Verifikation bzw. Höhenbestimmung ist, daß der Einfallswinkel der Sonne bekannt ist und daß die Gebäudeschatten auf offenes, ebenes Gelände fallen. Schatten, d.h. dunkle Gebiete, lassen sich durch einfache Bildverarbeitungsprozesse wie Glättung, Schwellwertoperationen und Bildung zusammenhängender Regionen relativ einfach extrahieren. Oftmals wird auch eine Kombination dieses Verfahrens mit der Stereozuordnung durchgeführt. Alle diese Verfahren repräsentieren die Dachflächen durch ebene Rechtecke. Das verwendete Dachmodell gilt nur für Flachdächer, da die Gebäude durch Quader beschrieben werden. Komplexere Gebäude oder Dachlandschaften lassen sich im Anschluß durch eine Kombination der extrahierten Quader über ein Reasoningverfahren erreichen [Mohan & Nevatia 1992].

Da die Gruppierung bei den bisher vorgestellten Verfahren im Bildraum erfolgt, wird die Hypothesengenerierung und die erste Auswahl der Gruppierungen (Rechtecke im Bild) für jedes Bild getrennt durchgeführt. Der Übergang zum Objektraum findet anschließend durch die Zuordnung der in den Stereobildern gefundenen Rechtecke statt. Dieses Vorgehen bietet den Vorteil, daß durch die Gruppierung relativ wenige Primitive gebildet werden, die sich durch ihre aussagekräftigen Attribute eindeutig im Stereobildpaar zuordnen lassen. Nachteil dieses Verfahrens ist, daß durch die Gruppierung zum Teil sehr viele Hypothesen gebildet werden, die sich erst später mit Hilfe der Stereozuordnung verifizieren bzw. verwerfen lassen. Dies führt zu einem großen, schwer zu handhabenden Lösungsraum. Eine andere Möglichkeit besteht darin, möglichst früh vom Bild- zum Objektraum überzugehen. Dazu werden Primitive des untersten Gruppierungsniveaus (z.B. Geraden) im Stereobild zugeordnet, um zu dreidimensional bestimmten Primitiven zu gelangen. Die Gruppierung zu einer höherwertigen Beschreibung wird anschließend im dreidimensionalen Objektraum durchgeführt. Ein großer Vorteil des frühen Übergangs vom Bild- zum Objektraum ist, daß die Stereoinformation schon während des Gruppierungsvorgangs genutzt werden kann, d.h. es wird von Anfang an eine bezüglich der Stereo- und eventuell vorhandenen Höheninformation konsistente Lösung gesucht. Ein solches Vorgehen wird von McKeown & McGlone [1993] vorgeschlagen. In dem Ansatz dieser Autoren werden zunächst im Bild zwei Geradenstücke zu Ecken kombiniert. Dem liegt die Annahme zugrunde, daß Gebäude aus geraden Kanten bestehen, die durch (annähernd) rechte Winkel verknüpft sind. Diese Ecken werden durch Stereozuordnung dreidimensional bestimmt und ausgewählt, d.h. nicht zugeordnete Ecken werden verworfen. Da die Orientierung des Stereobildpaares als bekannt vorausgesetzt wird, kann der Suchbereich auf Epipolarlinien beschränkt werden. Die Suche entlang der Epipolarlinien wird durch Annahmen über vernünftige Höhen (höher als die Geländeoberfläche, niedriger als eine maximale Gebäudehöhe) eingeschränkt. Die dreidimensional bestimmten Ecken werden zu Polygonen kombiniert, um anschließend daraus Hypothesen über Quader bzw. Polyeder abzuleiten. Diese Quader dienen auch bei diesem Verfahren zur Repräsentation der Gebäude in der Szene. Abschließend werden die einzelnen Quader aufgrund ihrer Größe und Linienintensitäten bewertet, um diejenigen auszuwählen, die am wahrscheinlichsten mit Gebäuden korrespondieren.

Bei der optischen Abbildung von 3D-Objekten auf eine 2D-Bildfläche geht die Information über eine Dimension verloren. Damit ist der Rückschluß von einem projizierten Objekt auf seine dreidimensionale Gestalt ein unterbestimmtes inverses Problem, das im allgemeinen unendlich viele Lösungen besitzt. Die dreidimensionale Gestalt eines Objektes läßt sich deshalb aus einem Einzelbild nur durch zusätzliche **objektspezifische Bedingungen** eindeutig erschließen. Ein solches Verfahren zur Bestimmung der räumlichen Form von Gebäuden durch Einzelbildinterpretation mittels inverser Perspektive wird von Braun [1993] vorgestellt. In diesem Verfahren werden die Gebäude durch Polyeder approximiert. Hypothesen über Eigenschaften und Beziehungen der Elemente

im Raum ergeben sich z.B. aus Inzidenzrelationen im Bild, aus denen auf entsprechende Inzidenzrelationen im Raum geschlossen werden kann, aus abgebildeten Dreibeinen, aus denen Richtungsvektoren der abgebildeten Objektkanten im Raum bestimmt werden können oder aus der Lokalisierung von Fluchtpunkten, die Gruppen von im Raum parallelen Geraden liefern. Die 2D-Bildbeschreibung wird bei diesem Verfahren manuell erfaßt.

Neben den Verfahren zur vollautomatischen Gebäudeerkennung werden von verschiedenen Autoren [Quam & Strat 1991], [Lang & Schickler 1993], [Mueller & Olson 1993] semi-automatische Verfahren vorgestellt. Bei diesen Verfahren wird von einem Operateur aus einer Bibliothek von Gebäudetypen ein passendes Modell ausgewählt und näherungsweise in das Bild eingepaßt. Die anschließende Feineinpassung und Koordinatenbestimmung erfolgt rechnergestützt. Weitere Ansätze unterstützen die manuelle Messung von Gebäudekanten im Bild durch aktive Konturmodelle (Snakes), die ebenfalls nur eine näherungsweise Vorgabe der Kanten erfordern [Neuenschwander, Fua, Szekely & Kübler 1995]. Der semi-automatischen Vorgehensweise liegt die Erfahrung zugrunde, daß das Erkennen von Objekten dem Menschen kaum Probleme bereitet, während die Automation dieser Aufgabe in vielen Fällen auf unüberwindbare Hindernisse stößt. Sind jedoch hinreichend genaue Näherungswerte vorhanden, kann der Meßprozeß relativ problemlos automatisiert werden.

1.4 Kombination von Bild- und Höhendaten

Ein großes Problem für Verfahren der automatischen Bildinterpretation ist die große Komplexität der Bilddaten. Die Grauwerte eines Bildes werden von der Geometrie der abgebildeten Objekte wie die Orientierung der Objektfläche bezüglich der Lichtquelle(n) und des Beobachtungsstandorts, aber auch von anderen Faktoren wie Beleuchtung (Schatten, Reflexionen), Oberflächenmaterial und Textur beeinflusst. Ziel einer Gebäuderekonstruktion ist die Extraktion einer geometrischen Beschreibung der beobachteten Gebäude. Im Prinzip sind für die automatische Gebäuderekonstruktion Luftbilder als alleinige Datengrundlage ausreichend. Der große Informationsgehalt von Bildern und die vielen Faktoren, durch die ein Grauwert beeinflusst wird, erschwert jedoch häufig die Trennung von irrelevanten Details und wichtiger Information, die für eine automatische Interpretation notwendig ist.

Da Höhendaten ausschließlich geometrische Information beinhalten und unabhängig von Beleuchtung, Oberflächenmaterial oder Textur sind, ist ihre Analyse häufig einfacher als die Analyse von Bilddaten. Der Einsatz von Höhendaten z.B. bei der Detektion von Objekten, die sich wie Gebäude durch ihre typische dreidimensionale Form von ihrer Umgebung abheben, ist deshalb von großem Nutzen. Auf der anderen Seite ist es häufig notwendig Bilddaten als (zusätzliche) Informationsquelle für Farbe oder Textur von Oberflächen zu verwenden. Flache, zweidimensionale Objekte wie Felder oder Straßen können nur aufgrund der unterschiedlichen Reflexionseigenschaften ihrer Oberflächenmaterialien getrennt werden. Zudem bereitet die genaue Lokalisierung von Bruchkanten in Höhendaten oft Probleme, da die dazu erforderliche hohe Meßpunktdichte – zumindest mit derzeit üblichen Meßverfahren – nur sehr aufwendig erreicht werden kann. Die Fusion oder Kombination von Bild- und Höhendaten, wie sie mit dem vorgestellten Verfahren zur Gebäuderekonstruktion betrieben wird, stellt deshalb eine sinnvolle Ergänzung beider Datentypen dar.

Ein Verfahren, bei dem ausschließlich DHM-Daten zur Rekonstruktion von Gebäuden verwendet werden, wird von Weidner & Förstner [1995] beschrieben. Dies ist auch mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren möglich [Haala 1995]. Da wegen des großen Aufwandes Höhendaten in der Regel im Vergleich zu Bilddaten mit relativ geringer Auflösung erfaßt werden, können durch die ausschließliche Nutzung von Höhendaten Probleme mit der eindeutigen Identifizierung bzw. Rekonstruktion von Gebäuden auftreten. Neben der hohen geometrischen Auflösung bringen Bilddaten noch zusätzliche Information wie Helligkeit, Farbe oder Textur mit ein. Die Integration von Bild- und Höhendaten für die automatische Rekonstruktion von Gebäuden, wie sie mit dem vorgestellten Verfahren betrieben wird, hat die Kombination der spezifischen Vorteile beider Datentypen zum Ziel. Innerhalb eines Verfahrens zur Gebäuderekonstruktion können Höhendaten sehr gut zur Detektion von Gebäuden genutzt werden [Haala 1994]. Die Höhendaten werden deshalb zunächst zur Suche nach Bereichen verwendet, in denen Gebäude erwartet werden. Eingeschränkt auf diese Suchbereiche erfolgt anschließend die Rekonstruktion der Gebäudeform durch Grauwertkanten, die aus einem Stereobildpaar extrahiert wurden. Beschreiben die Höhendaten die Oberfläche der Gebäude bzw. des Geländes mit ausreichender Dichte und Genauigkeit, wird zusätzlich die Gebäudeform aus diesen Daten bestimmt und als Näherungsinformation für die anschließende Rekonstruktion aus Bildkanten genutzt.

Die Vorteile der unterschiedlichen Datenquellen – relativ einfache Interpretation der Höhendaten auf der einen Seite, großer Informationsgehalt, Detailreichtum und Genauigkeit der Bilddaten auf der anderen Seite – können auch durch andere Verfahren kombiniert werden. Neben der in dieser Arbeit durchgeführten Kombination auf der obersten Ebene, bei der die Rekonstruktion aus Höhendaten Vorinformation für die verfeinerte Rekonstruktion aus Bilddaten liefert, ist eine Datenfusion auch auf dem Low- und Mid-Level möglich. Auf der untersten Ebene kann durch die Fusion von Bild- und Höhendaten zunächst eine dichte, präzise und zuverlässige Oberflächenbeschreibung innerhalb eines bebauten Gebietes abgeleitet werden, die anschließend für weitere Schritte wie die Merkmalsextraktion zur Verfügung steht. Auf der mittleren Ebene ist eine gemeinsame Segmentierung der Bild- und Höhendaten denkbar, um geometrisch genaue Primitive mit hohem Informationsgehalt zu erhalten.

1.5 Aufgabenstellung und Übersicht

Der Ablauf des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Verfahrens zur automatischen Gebäuderekonstruktion ist schematisch in Abbildung 1.4 dargestellt.

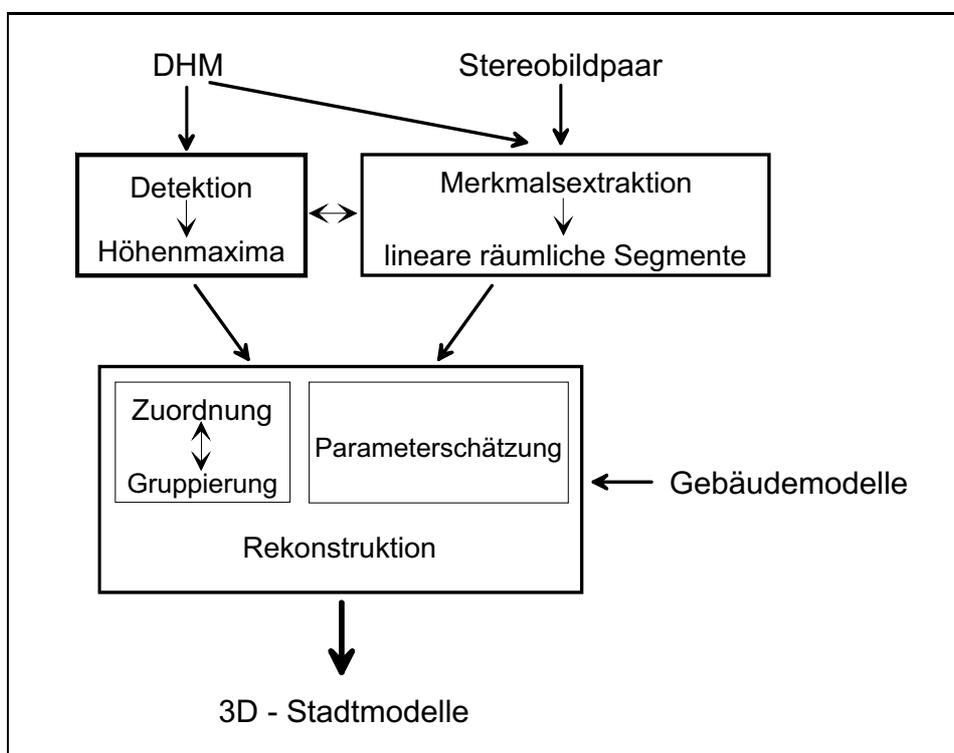


Abbildung 1.4: Ablauf des implementierten Verfahrens.

Als Ausgangsdaten für die Gebäuderekonstruktion werden **Stereobildpaare** mit bekannter äußerer Orientierung verwendet. Da sich automatische Verfahren zur Bestimmung der äußeren Orientierung [Schenk, Li & Toth 1991], [Tsingas 1991] in den letzten Jahren zum Standard an digitalen photogrammetrischen Arbeitsstationen entwickelt haben, kann davon ausgegangen werden, daß die Ergebnisse dieser Verfahren in der Regel zur Verfügung stehen. Daneben kommen Digitale Höhenmodelle (**DHM**) zum Einsatz, die durch ein kommerzielles Programmpaket zur automatischen Stereobildzuordnung [Ackermann & Krzystek 1991] bestimmt werden. In diesem Sinne können Bild- und Höhendaten nicht als unabhängig betrachtet werden. Da es sich dabei jedoch um unterschiedliche Datentypen handelt, werden sie als getrennte Informationsquellen behandelt. Alternativ zur Stereobildzuordnung kann auch eine direkte, bildunabhängige Bestimmung des DHM durch Messungen mit einem Laserscanner während eines Bildflugs erfolgen [Kilian 1994]. Die verwendeten Methoden zur räumlichen Erfassung von Geländeoberflächen werden unter besonderer Berücksichtigung der Probleme in bebauten Gebieten in Kapitel 2 erläutert.

Der Gebäuderekonstruktion gehen zwei Verarbeitungsschritte voraus: die **Detektion** von Gebäudehypothesen und die **Merkmalsextraktion**. Zur Rekonstruktion der Gebäude werden dreidimensional bestimmte Gera-

denstücke verwendet, die potentiell Objektgrenzen bzw. Bruchkanten von Oberflächen definieren. Bruchkanten stellen sich im Bild als Grauwertkanten dar und können durch geeignete Verfahren extrahiert werden. Zur dreidimensionalen Festlegung dieser **linearen Segmente** wird eine Stereozuordnung durchgeführt, wobei das zur Verfügung stehende DHM zur Beschaffung von näherungsweise Parallaxen dient. Da Grauwertkanten auch durch Textur oder Schatten verursacht werden, sowie durch unvermeidliche Fehler bei der Stereozuordnung der linearen Segmente, entsteht eine Vielzahl räumlicher Segmente, die nicht auf Oberflächenbruchkanten zurückgehen. Sind die Höhendaten zuverlässig und dicht genug erfaßt, kann alternativ eine Extraktion der Bruchkanten durch eine Krümmungsanalyse aus dem DHM erfolgen. Die Extraktion der linearen Segmente ist Thema des 3. Kapitels. Da für die Rekonstruktion Bruchkanten der Gebäudeoberflächen verwendet werden, müssen durch die nachfolgenden Verfahrensschritte aus den extrahierten linearen Segmenten solche Kanten ausgewählt werden. Um zunächst weitere Bearbeitungsschritte auf Regionen einzuschränken, in denen Gebäude zu erwarten sind, werden anschließend **Höhenmaxima** begrenzter Ausdehnung im DHM gesucht. Die Detektion dieser Gebäudehypothesen nutzt das Wissen, daß Häuser aus der Geländeoberfläche herausragen. Dadurch wird eine Selektion der Geradensegmente (Kapitel 4) möglich, d.h. nachfolgende Untersuchungen innerhalb dieser Maxima können auf solche Geradensegmente beschränkt werden, die mit großer Wahrscheinlichkeit Bruchkanten von Dächern darstellen. Eine weitere Auswahl und Abstraktion wird durch die Gruppierung der linearen Segmente zu rechteckigen Strukturen erreicht, da diese Strukturen typisch für die Präsenz von Gebäuden sind. Dazu werden die linearen Segmente aufgrund von Relationen wie Nachbarschaft, Parallität, Symmetrie und Rechtwinkligkeit zusammengefaßt.

Die **Rekonstruktion** bedingt eine Zuordnung von beobachteter Information zu Modellen der abgebildeten Objekte. Aus diesem Grund müssen zunächst durch die Modellbildung (Kapitel 5) geeignete **Gebäudemodelle** zur Verfügung gestellt werden. Neben der Vorstellung des gewählten parametrischen Gebäudemodells werden in diesem Kapitel die Möglichkeiten zur Erzeugung von Modellen sowie Verfahren zur dreidimensionalen Objektrepräsentation diskutiert. Die eigentliche Rekonstruktion der Gebäude (Kapitel 6) besteht aus zwei Schritten: der Zuordnung der extrahierten linearen Segmente zu den Linien des Gebäudemodells und der anschließenden Schätzung der Gebäudeparameter. Ohne Vorwissen kann im Prinzip jedes extrahierte lineare Segment jeder beliebigen Modelllinie zugeordnet werden. Dies führt zu einem nicht mehr handhabbaren Lösungsraum. Durch eine **Gruppierung** kann nicht nur eine Auswahl der linearen Segmente durchgeführt werden, die detektierten rechteckigen Strukturen liefern auch Information über die mögliche Form und Lage des zugrunde liegenden Gebäudes. Dieses Vorwissen wird für die **Zuordnung** der linearen Segmente zu dem Gebäudemodell genutzt. Nach der erfolgten Zuordnung werden nach der Methode der kleinsten Quadrate die Gebäudeparameter so geschätzt, daß der Abstand der Modelllinien zu den beobachteten linearen Segmenten minimal wird. Anhand der **Parameterschätzung** wird auch eine Bewertung der gewonnenen Rekonstruktionen möglich, die ein Maß liefert, wie gut die beobachteten linearen Segmente in das gewählte Gebäudemodell eingepaßt werden können. Die Ergebnisse des Verfahrens, angewandt auf reale Testdatensätze werden in Kapitel 7 vorgestellt. Im Ausblick (Kapitel 8) wird die Kombination des Verfahrens mit existierenden (zweidimensionalen) Datenbeständen bereits erfaßter Gebäude diskutiert; eine Zusammenfassung (Kapitel 9) bildet schließlich den Abschluß der Arbeit.

2 Erfassung von Höhendaten für die Gebäuderekonstruktion

Die Grundidee des beschriebenen Verfahrens zur automatischen Gebäuderekonstruktion ist die kombinierte Nutzung von Bild- und Höhendaten. Es wird davon ausgegangen, daß durch die verwendeten Höhendaten die Geometrie der Geländeoberfläche bzw. die Geometrie der Oberfläche der aus dem Gelände herausragenden Objekte beschrieben wird. Für solche flächenhafte Beschreibungen des Geländes bzw. des Geländes und der sich darauf befindenden Objekte werden in der Literatur verschiedene, zum Teil widersprüchliche Begriffe verwendet. Aus diesem Grund erfolgt an dieser Stelle zunächst eine Definition der Begriffe, wie sie in dieser Arbeit Verwendung finden. Anschließend werden verschiedene Verfahren erörtert, die eine solche geometrische Erfassung der Topographie ermöglichen, wobei insbesondere auf die automatische Stereobildzuordnung und die direkte Höhenmessung durch scannende Laser näher eingegangen wird.

Üblicherweise erfolgt die Beschreibung der Geländeoberfläche durch räumliche Koordinaten x, y, z einer Menge von Flächenpunkten zur Definition von Stützinformation, zusammen mit einer Interpolationsvorschrift, die sich aus den Krümmungseigenschaften der Fläche ergibt. Diese Form der Darstellung des Geländes wird allgemein durch den Begriff *Digitales Geländemodell* (DGM) bezeichnet [Hake 1982]. Ein *Digitales Höhenmodell* (DHM) stellt nach der Definition von Ackermann [1979] einen Sonderfall bzw. eine Erweiterung des Digitalen Geländemodells dar. Als DHM wird nach dieser Definition eine Beschreibung der Geländeoberfläche bezeichnet, in der neben dem DGM auch Bruchkanten, Strukturlinien und ausgezeichnete Punkte des Geländes enthalten sind. Dagegen definiert Dorrer [1975] das digitale Geländemodell (DGM) als Summe des digitalen Höhenmodells (DHM) und des *Digitalen Situationsmodells* (DGM = DHM + DSM). Das DHM liefert nach dieser Definition die z -Koordinaten zu den vorgegebenen Lagekoordinaten von Punkten an der Erdoberfläche, während das digitale Situationsmodell (DSM) Lageinformation bereit hält. Das DSM beschreibt dabei die Lage topographischer Objekte wie Straßen, Gebäude, Bewuchs, Gewässer, etc. durch die x -, y -Koordinaten – bei Bedarf auch durch z -Koordinaten – von Punkten des Objektgrundrisses. Zusätzlich erfolgen Angaben zur Objektart z.B. durch Zahlenkodierung nach einem Objektschlüsselkatalog [Hake 1982]. Die einzelnen Definitionen sind in der Literatur jedoch nicht einheitlich; teilweise werden die Begriffe DHM und DGM auch synonym für geometrische Beschreibungen der Geländeoberfläche verwendet [Fritsch 1991]. Häufig werden durch die verschiedenen Meßverfahren zur geometrischen Erfassung des Geländes Daten geliefert, in denen neben der Geländeoberfläche auch Objekte wie Häuser, Bäume oder Fahrzeuge, die aus dem Gelände herausragen, als Störobjekte enthalten sind. In dieser Arbeit wird für eine solche Repräsentation – im Widerspruch zu anderen Definitionen in der Literatur – der Begriff *Digitales Höhenmodell* (DHM) verwendet. Dies geschieht, um zu verdeutlichen, daß es sich bei diesen Daten nicht um eine reine Beschreibung des Geländes handelt. Um Widersprüche mit der Definition des DHM anderer Autoren zu vermeiden, könnte für solche Beschreibungen alternativ der Begriff *Digitales Oberflächenmodell* eingeführt werden, der z.B. von Förstner [1985] oder Baltsavias, Mason & Stallmann [1995] verwendet wird. Darauf wurde jedoch – auch im Hinblick auf die in der Literatur uneinheitlichen Begriffsverwendungen – verzichtet. Eine Oberflächenbeschreibung, in der die Störobjekte eliminiert sind, d.h. die ausschließlich die Geländeoberfläche repräsentiert, wird in dieser Arbeit analog zur Literatur als *Digitales Geländemodell* (DGM) bezeichnet.

In einem DHM bzw. einem DGM ist die Höhe z als von den Flächenkoordinaten x, y abhängige Variable definiert, d.h. die Geländeoberfläche und die sich auf ihr befindenden Objekte werden durch eine kontinuierliche Funktion $z = z(x, y)$ der planimetrischen Koordinaten x, y beschrieben. Eine solche Repräsentation wird im allgemeinen als *zweieinhalbdimensional* (2.5 D) bezeichnet, da die Höhe zwar als Attribut vorhanden ist, die Repräsentation $z = z(x, y)$ aber keine wirklich dreidimensionale Beschreibung darstellt. Analog dazu bezeichnet man ein Geo-Informationssystem als zweieinhalbdimensional bezüglich seiner Geometrie, wenn zu den Punkten des Grundrisses topographischer Objekte die Höhe z als Attribut gespeichert ist. Die Geometrie der Objekte wird demnach durch die Koordinaten x, y, z dreidimensional, die Topologie der geometrischen Primitive (Punkte, Linien, Flächen) dagegen nur zweidimensional repräsentiert [Bill & Fritsch 1991].

Zur Datenerfassung für digitale Geländemodelle bzw. digitale Höhenmodelle lassen sich verschiedene Verfahren einsetzen, die jedoch im Hinblick auf ihre Verwendung für die automatische Gebäuderekonstruktion unterschiedlich gut geeignet sind. Insgesamt lassen sich vier gängige Verfahren für die Erfassung von Höhendaten unterscheiden.

Erfassung durch tachymetrische Geländeaufnahme. Das wesentliche Kennzeichen der Tachymetrie ist das direkte, punktweise Erfassen topographischer Objekte bzw. der Geländeoberfläche durch polare Be-

stimmung. Neben den bei topographischen Aufnahmen allgemein üblichen Tachymetern, die zur Streckenmessung eine Signalisierung der Zielpunkte durch Reflektoren voraussetzen, existieren zur Bestimmung schwer zugänglicher Objektpunkte z.B. auf Dächern auch reflektorlos messende Aufnahmesysteme. Die für die Winkel- und Streckenmessung eingesetzten registrierenden Tachymeter erlauben eine objektkodierte Datengewinnung, d.h. den im Feld registrierten Punkten wird ein entsprechender Objektidentifikator (Objektcode) zugewiesen. Im Hinblick auf eine mögliche Automatisierung und aufgrund des sehr hohen Arbeitsaufwandes scheidet die Tachymetrie als Erfassungsmethode für die automatische Gebäuderekonstruktion aus. Allerdings erfordert bei der tachymetrischen Erfassung die Interpretation (z.B. Trennung von Geländepunkten und Punkten auf Gebäuden, Auswahl wichtiger Punkte, zusätzliche Registrierung der Topologie gemessener Punkte) während der Messung durch die objektkodierte Aufnahme kaum zusätzlichen Aufwand. Eine Automatisierung des Interpretationsprozesses ist aus diesem Grund für eine Rationalisierung der tachymetrischen Aufnahmen nicht notwendig.

Erfassung aus topographischen Karten. Bei der sogenannten Kartometrie erfolgt die Bestimmung der Geländehöhen durch die Digitalisierung von Höhenlinien bzw. Höhenpunkten aus vorhandenen Karten. Die Digitalisierung kann dabei manuell oder automatisch erfolgen; ein Verfahren, bei dem aus Punktehöhen einer Landeskarte der Schweiz im Maßstab 1 : 25 000 automatisch ein DGM erzeugt wird, stellt Stengele [1995] vor. Da die Höhendaten für die Gebäuderekonstruktion verwendet werden sollen, ist es wichtig, daß neben den reinen Geländehöhen auch Information über Gebäudehöhen vorhanden ist. Höhenlinien in Karten repräsentieren nur die Geländeoberfläche; dreidimensionale Information über Gebäude ist in Plänen oder Karten nicht oder nur sehr unvollständig z.B. über die Zahl der Stockwerke in Plänen enthalten. Aus diesem Grund scheidet die Kartometrie für die Erfassung von Höhendaten für die Gebäuderekonstruktion ebenfalls aus.

Erfassung aus photogrammetrischen Stereomodellen. Mittels photogrammetrischer Verfahren kann effektiv Information über die Geometrie der Geländeoberfläche und der sich darauf befindlichen Objekte abgeleitet werden. Die geometrische Erfassung aus photogrammetrischen Stereomodellen kann dabei manuell, semiautomatisch oder vollautomatisch erfolgen. Bei den manuellen Verfahren erfolgt sowohl die Punktauswahl als auch die Parallaxenmessung zur Höhenbestimmung durch einen Operateur. Neuere Ansätze verfolgen eine semi-automatische Punktmessung, bei der die Auswahl der zu messenden Punkte noch durch den Operateur erfolgt, während die Parallaxenmessung automatisch durch Bildzuordnungsverfahren durchgeführt wird. Die gezielte Auswahl und Indizierung der zu messenden Punkte z.B. auf Dachbruchkanten ermöglicht eine Übernahme des Interpretationsprozesses durch einen Operateur ohne nennenswerten Mehraufwand. Da jedoch als Zielsetzung die Automatisierung der Gebäuderekonstruktion vorgegeben ist, sind für die nähere Betrachtung nur die automatischen Bildmeßverfahren von Interesse.

Erfassung durch Laserscanner. Die Messung mit scannenden Lasern ist eine weitere Methode, durch die eine geometrische Erfassung der Topographie ermöglicht wird. Ähnlich wie bei der tachymetrischen Geländeaufnahme werden durch polare Bestimmung flächenhaft verteilt dreidimensionale Punktkoordinaten im Gelände gemessen. Die Messung kann entweder terrestrisch z.B. von einem Fahrzeug aus [Niemeier & Wild 1995] oder flugzeugzeuggetragen [Lohr & Eibert 1995] durchgeführt werden. Die Auswahl der Punkte erfolgt unqualifiziert, d.h. sie ist durch die Parameter des Scanners bzw. seine Bewegungsdynamik vorgegeben und erfolgt unabhängig von der vorgefundenen topographischen Situation. Da es sich bei der Messung mit Laserscannern um ein vollautomatisches Verfahren zur genauen und – vor allem bei flugzeuggetragenen Systemen – schnellen und flächendeckenden Erfassung von Höhendaten handelt, wird auch auf diese Methode innerhalb dieses Kapitels näher eingegangen.

2.1 Automatische Stereobildzuordnung

Verfahren der automatischen Stereobildzuordnung [Haralick & Shapiro 1993] haben sich in den letzten Jahren vor allem im Bereich offenen Geländes als Standardmethoden zur photogrammetrischen Bestimmung von Geländeoberflächen bewährt. Üblicherweise werden diese Bildzuordnungsalgorithmen in gebietsbasierte und merkmalsbasierte Verfahren unterteilt, die im folgenden vorgestellt werden sollen.

2.1.1 Gebietsbasierte Verfahren

Bei gebiets- oder grauwertbasierten Bildzuordnungsverfahren werden die Koordinaten korrespondierender Bildpunkte um einen kleinen Fehler in der angenommenen geometrischen Transformation und die Grauwerte der Punkte um einen kleinen Fehler in der angenommenen radiometrischen Transformation korrigiert. Dabei ist eine häufig verwendete Zielfunktion die Minimierung der Quadratsumme der Grauwertdifferenzen korrespondierender Punkte in einem Stereobildpaar. Üblicherweise wird von einer glatten Objektoberfläche ausgegangen, die durch eine geneigte Ebene approximiert werden kann. Die geometrische Transformation zweier korrespondierender Bildausschnitte kann in diesem Fall in guter Näherung durch eine Affintransformation beschrieben werden.

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

Neben den sechs Parametern der geometrischen Affintransformation werden für die Transformation der Grauwertmatrizen zwei Parameter für die radiometrische Transformation verwendet.

$$g_1 = r_1 \cdot g + r_0 \quad (2-2)$$

Aus den Grauwert-Differenzen Δg_i jedes Pixelpaars i ergeben sich die linearisierten Verbesserungsgleichungen

$$\begin{aligned} \Delta g_i + v_i = & g_{x_i} \cdot da_0 + x_i \cdot g_{x_i} \cdot da_1 + y_i \cdot g_{x_i} \cdot da_2 + \\ & g_{y_i} \cdot db_0 + x_i \cdot g_{y_i} \cdot db_1 + y_i \cdot g_{y_i} \cdot db_2 + dr_0 + g_i \cdot dr_1 \end{aligned} \quad (2-3)$$

Dabei sind da_0, \dots, db_2 die sechs geometrischen, dr_0, dr_1 die zwei radiometrischen Transformationsparameter. Ihre Koeffizienten sind durch den Grauwert g_{1_i} bzw. die Grauwertgradienten g_{x_i} und g_{y_i} sowie die Koordinaten x_i, y_i der Bezugsgrauwertmatrix g_i gegeben. Die Lösung der acht Parameter kann durch einen linearisierten Kleinst-Quadrat-Ansatz erfolgen, durch den die Quadratsumme der Grauwertdifferenzen beider Bildausschnitte minimal werden.

Zur Berechnung eines DHM unterteilt Rosenholm [1987] das linke Bild in kleine rechteckige Gebiete und setzt ein bilineares Transformationsmodell für jedes Gebiet an. Dazu wird die Bedingung eingeführt, daß das Parallaxenfeld an den Gebietsgrenzen kontinuierlich ist. Zudem wird eine Glattheitsbedingung für die Krümmung des Parallaxenfeldes verwendet, um die Transformationsparameter in Gebieten mit wenig Textur bestimmen zu können. Wrobel [1987] und unabhängig davon Helava [1988] und Ebner, Fritsch, Gillissen & Heipke [1987] definieren ähnliche finite Elemente im Objektraum und bestimmen dadurch direkt die Parameter der (Gelände)oberfläche. Im Vergleich zu merkmalsbasierten Verfahren ist die gebietsbasierte Zuordnung in Gebieten mit guter Textur am genauesten, erfordert jedoch relativ gute Näherungswerte im Bereich von 2 - 3 Pixel. Diese Näherungswertbeschaffung erfolgt bei den automatischen Bildzuordnungsverfahren häufig über Pyramidentechniken [Ackermann & Hahn 1991]. Aufgrund ihrer hohen Empfindlichkeit gegenüber Verdeckungen haben gebietsbasierte Verfahren große Probleme in solchen Bereichen sowie bei der Lokalisierung von Höhendiskontinuitäten.

2.1.2 Merkmalsbasierte Verfahren

Das Prinzip dieser Verfahren ist die Extraktion und anschließende Zuordnung markanter Punkte, Konturpunkt-ketten, Linien- oder Flächenstücke. Beispiele für die Zuordnung von Liniensegmenten geben Horaud & Skordas [1989] und Faugeras & Fua [1991]. Förstner [1986] beschreibt ein Zuordnungsverfahren, das markante, gut meßbare Punkte – sogenannte Interestpunkte – extrahiert und zuordnet. Die Interestpunkte definieren dabei solche Bereiche, für die mit der zuvor beschriebenen gebietsbasierten Zuordnung die höchste Genauigkeit zu erwarten ist. Nach der Punktauswahl wird eine Liste potentiell korrespondierender Punkte erstellt. Eine Korrespondenz zweier Punkte kann angenommen werden, wenn der Korrelationskoeffizient der Grauwerte im Bereich der Interestpunkte groß genug ist. Analog zu den gebietsbasierten Verfahren wird bei den merkmalsbasierten Verfahren von einer lokalen Glattheitsbedingung ausgegangen, die eine Finite-Elemente Beschreibung der Zuordnungsfunktion durch eine Affintransformation zwischen korrespondierenden Bildausschnitten erlaubt. Durch diese Bedingung lassen sich Mehrdeutigkeiten in der Zuordnung extrahierter Primitive vermeiden. Für jedes Punktepaar (i) ergeben sich demnach die folgenden beiden Verbesserungsgleichungen:

$$\begin{bmatrix} x_R^i - x_L^i + v_x^i \\ y_R^i - y_L^i + v_y^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_L^i \\ y_L^i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_0 \\ b_0 \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

Da merkmalsbasierte Verfahren nur an den Stellen Höheninformation liefern, an denen Primitive extrahiert wurden, muß zwischen diesen Punkten interpoliert werden, um eine komplette Beschreibung der Oberfläche durch ein DHM zu erhalten. Dies bedingt ebenfalls die Annahme einer kontinuierlichen Oberfläche ohne Bruchkanten. Aus diesen Gründen liefern merkmalsbasierte Verfahren im offenen Gelände gute Ergebnisse, haben aber – wenn auch in geringerem Ausmaß als die gebietsbasierten Verfahren – Schwierigkeiten im Bereich bebauter Gebiete, da dort eine Grundvoraussetzung – stetige Oberflächen ohne Bruchkanten – nicht erfüllt wird. Probleme treten vor allem bei fehlender Textur auf den Gebäudedächern oder bei schwachem Kontrast zwischen Dach- und Geländeoberfläche auf [Price & Huertas 1992]. Sind in der Nähe des Übergangs vom Dach zur Geländeoberfläche wenig markante Punkte für die Zuordnung vorhanden, entsteht ein flacher Übergang statt einer abrupten Höhenänderung. Die Bruchkante zwischen Dach- und Geländeoberfläche ist dann sehr schlecht definiert. Merkmalsbasierte Verfahren sind mit einer Genauigkeit der Zuordnung von 0.3 bis 0.5 Pixel gegenüber den gebietsbasierten Verfahren, die eine Genauigkeit von 0.1 Pixel erreichen, etwas ungenauer, benötigen aber weniger präzise Näherungswerte. Die Lokalisierung von Diskontinuitäten der Oberfläche ist bei merkmalsbasierten Verfahren etwas besser, Probleme treten an solchen Stellen jedoch wegen der Annahme kontinuierlicher Oberflächen bei allen Bildzuordnungsverfahren auf.

2.1.3 Stereobildzuordnung in bebauten Gebieten

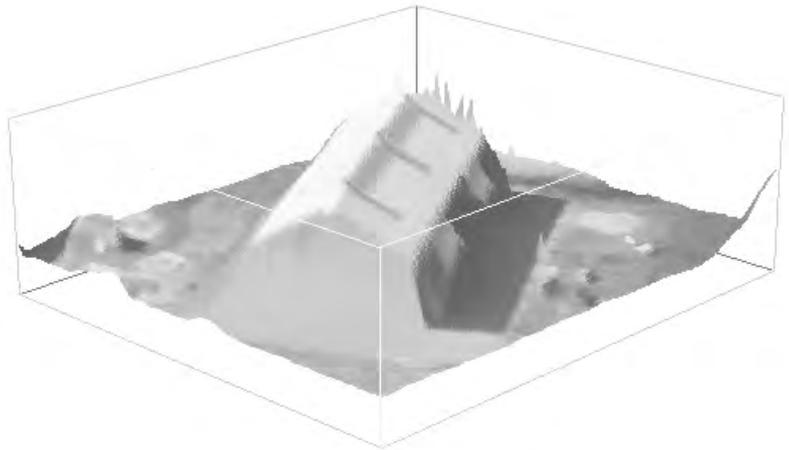


Abbildung 2.1: Beispiel 1 für die DHM-Qualität aus automatischer Stereobildzuordnung. Bildausschnitt und DHM aus merkmalsbasierter Zuordnung überlagert mit Bilddaten.

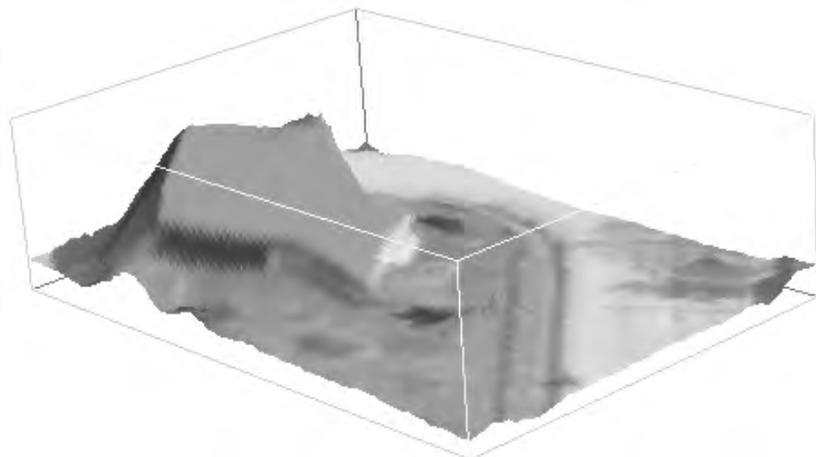


Abbildung 2.2: Beispiel 2 für die DHM-Qualität aus automatischer Stereobildzuordnung. Bildausschnitt und DHM aus merkmalsbasierter Zuordnung überlagert mit Bilddaten.

Um die Schwierigkeiten der Bildzuordnungsverfahren in bebauten Gebieten zu verdeutlichen, wurden für verschiedene Ausschnitte einem DHM, das durch eine merkmalsbasierte Stereobildzuordnung mit dem kommerziellen Softwarepaket MATCH-T [Ackermann & Krzystek 1991] erzeugt wurde, die zugehörigen Bilddaten überlagert. Abbildung 2.1 und 2.2 zeigen auf der linken Seite den ursprünglichen Bildausschnitt, auf der rechten Seite das mit den Bilddaten überlagerte DHM. Obwohl beide Ausschnitte aus demselben Stereobildpaar berechnet wurden, zeigen sich deutliche Qualitätsunterschiede für beide Beispiele. In dem in Abbildung 2.1 dargestellten DHM-Ausschnitt ist die Form des Gebäudes sehr gut durch das berechnete DHM beschrieben. Dagegen erlaubt das DHM für den Ausschnitt in Abbildung 2.2 keine Rückschlüsse auf die Gebäudeform. Dies liegt an der in diesem Ausschnitt mangelnden Textur des Gebäudedaches bzw. dem schwachen Kontrast zwischen Dach und Geländeoberfläche.

Durch die Modifizierung der bekannten Stereozuordnungsverfahren kann die Qualität automatisch erzeugter digitaler Höhenmodelle innerhalb bebauter Gebiete verbessert werden. Lotti & Giraudon [1994] stellen einen Algorithmus vor, der für die gebietsbasierte Zuordnung eines Stereobildpaars adaptive Fenstergrößen verwendet. Die Grenzen der Fenster werden dabei durch Grauwertkanten im Bild festgelegt, die häufig Oberflächenbruchkanten definieren. Dies ermöglicht die Wahl maximal möglicher Fenstergrößen, d.h. die Fenstergröße wird während des Zuordnungsprozesses optimiert. Zu kleine Fenster enthalten zu wenig Textur, um eine stabile Parameterschätzung durchführen zu können, zu große Fenster verursachen Probleme in der Nähe von Diskontinuitäten oder Verdeckungen. Durch die Wahl adaptiver Fenstergrößen lassen sich Oberflächendiskontinuitäten erheblich besser lokalisieren als bei Standardverfahren, die häufig dazu tendieren, solche Bruchkanten zu glätten. Die Einbeziehung möglicher (Gebäude-)Bruchkanten in den Prozeß der automatischen Parallaxenmessung ist auch der Grundgedanke von Verfahren, die im Bild zunächst rechteckige Strukturen als Hinweise für die Präsenz von Gebäuden detektieren [Maitre & Luo 1992], [Dang et al. 1994], [Kim & Mueller 1995]. An diesen potentiellen Bruchkanten wird während der Bildzuordnung die sonst geltende Annahme einer kontinuierlichen Oberfläche aufgehoben, um eine Glättung dieser Bruchkanten zu vermeiden.

Im Zentrum eines Stereomodells sind hauptsächlich Bodenpunkte zwischen den Häusern sichtbar, während am Rand die dem Beobachtungspunkt zugewandten, vertikalen Wände beobachtet werden können. Um innerhalb bebauter Gebiete so viel Information über die Oberfläche wie möglich zu erhalten, sollten innerhalb der verwendeten Bilddatensätze sowohl die vertikalen Gebäudeseiten als auch die Flächen zwischen den Gebäuden abgebildet sein. Im Gegensatz zu manuellen Parallaxenmessungen durch einen Operateur, der sich durch sein vorgegebenes visuelles System auf die gleichzeitige Beobachtung von zwei Bildern beschränken muß, stellt der Übergang auf Mehrbildzuordnungen für automatische Systeme kein grundsätzliches Problem dar. Zur Vermeidung von Problemen durch Verdeckungen und um so viel Information wie möglich zu erhalten, können deshalb automatische Verfahren die Bildzuordnung zur DHM-Generierung innerhalb bebauter Gebiete vom Stereo zum Mehrbildfall erweitern und dadurch in diesen Bereichen die DHM-Qualität verbessern [Berthod, Gabet, Giraudon & Lotti 1995], [Collins, Hanson, Riseman & Schultz 1995]. Dies macht natürlich eine aufwendigere Befliegung mit großen Längs- und Querüberdeckungen sowie aufwendigere Zuordnungsverfahren notwendig.

Neben den Verfahren zur Stereo- bzw. Mehrbildzuordnung existieren eine Reihe anderer Verfahren zur Rekonstruktion von Oberflächen aus Bildern. Diese Verfahren werden häufig als *shape-from-X* bezeichnet, wobei 'X' für verschiedene Informationsquellen wie Stereo, Schattierung, Textur oder geometrische Bedingungen steht. Fua [1995] schlägt ein Verfahren vor, das die Probleme der Stereobildzuordnung (*shape-from-stereo*) in Gebieten mit schwacher Textur durch eine Kombination mit einem *shape-from-shading* Verfahren behebt. In der Praxis haben sich bis jetzt jedoch nur die Verfahren der Stereobildzuordnung für die Bestimmung von Geländehöhen auf breiterer Basis durchsetzen können.

Die Genauigkeit der gemessenen Parallaxen liegt bei merkmalsbasierten Verfahren bei 0.3 bis 0.5 Pixel für einen zugeordneten markanten Punkt. Durch intensitätsbasierte Verfahren lassen sich bei ausreichender Textur Genauigkeiten von 0.1 Pixel für zugeordnete Fenster erreichen. Für offenes Gelände ergeben sich dadurch bei üblichen Flugparametern Genauigkeiten des DHM von 0.01 % der Flughöhe. Dies gilt jedoch nur dann, wenn gleichmäßig verteilt genügend Parallaxenmessungen möglich sind. Je bewegter die zu rekonstruierende Oberfläche ist, umso dichter muß auch eine Parallaxenmessung möglich sein. Die starke Abhängigkeit des Zuordnungsergebnisses von der Existenz von Textur auf den Dächern führt häufig zu Schwierigkeiten bei der DHM-Bestimmung in bebauten Gebieten. Insbesondere die – vor allem mit kommerziellen Standardverfahren erreichbare – zum Teil stark schwankende Qualität des berechneten DHM in solchen Bereichen kann für weitere Verarbeitungsschritte Probleme verursachen.

Eine Alternative, unabhängig von solchen Einflüssen in bebauten Gebieten eine DHM-Bestimmung durchzuführen, besteht in der Verwendung von scannenden Lasern, die im folgenden Abschnitt behandelt wird.

2.2 Scannender Laser

Durch die in den letzten Jahren erfolgte Entwicklung integrierter Sensorsysteme ist neben der indirekten Methode zur Bestimmung Digitaler Höhenmodelle aus Luftbildern die direkte Messung der Geometrie von (Gelände-)Oberflächen vom Flugzeug aus möglich geworden [Kilian 1994], [Lohr & Eibert 1995]. Solche integrierten Systeme bestehen aus einem Laserscanner, der Distanzmessungen vom Flugzeug zum Boden mit einer sehr hohen Frequenz erlaubt, sowie einem oder mehreren GPS Empfängern, kombiniert mit einem inertialen Navigationssystem für die direkte Messung der äußeren Orientierungsparameter des Sensorsystems. Der Laserscanner ermöglicht während eines Bildfluges die dichte Messung von Geländepunkten durch Polaraufnahme. Dabei werden Laufzeitmessungen von Lichtimpulsen, die mit einer Frequenz im nahen Infrarotbereich ausgesendet und von der Geländeoberfläche reflektiert werden, zur Bestimmung der Entfernung vom Flugzeug zu den jeweiligen Punkten genutzt. Zusammen mit der Bewegung des Scanners in Flugrichtung ermöglicht die periodische Ablenkung des Laserstrahls quer zur Flugrichtung eine flächenhafte Abtastung des Geländes. Die derzeit erhältlichen Laserscanner lassen sich in die zwei folgenden Grundtypen einteilen.

Systeme mit beweglicher Optik, bei denen der Laserstrahl periodisch durch einen beweglichen Spiegel abgelenkt wird. Möglich sind pendelnde oder rotierende Spiegel. Ein Beispiel ist das System der Firma Optech. Der Öffnungswinkel des Systems, der sich durch die Kippung des Spiegels erreichen läßt, kann zwischen 0 Grad und 40 Grad (Gesamtwinkel) frei gewählt werden. Der Frequenzbereich, mit dem der Spiegel gekippt werden kann, liegt zwischen 0 und 30 Hz. Die maximale Pulsfrequenz des scannenden Lasers und die damit maximal mögliche Meßfrequenz liegt im Bereich von 2000 Hz. Die derzeit maximal erreichbare Reichweite, d.h. die maximal mögliche Flughöhe, die mit diesen Systemen erreichbar ist, liegt in der Größenordnung von 2000 m. Die interne Genauigkeit der Entfernungsmessungen bewegt sich im Bereich von 0.1 - 0.2 m.

Systeme mit multiplen Laserelementen, die durch das Anbringen mehrerer Glasfaserdioden auf einer gekrümmten Oberfläche eine stabilere Geometrie des Systems erreichen. Dadurch geht allerdings die Variabilität des Öffnungswinkels verloren. Ein Beispiel ist das System der Firma TopoSys [Lohr & Eibert 1995]. Hier werden 127 Laserdioden so angebracht, daß jedes Element quer zur Flugrichtung eine um 0.5° andere Meßrichtung besitzt. Dieses Winkelinkrement zwischen den einzelnen Dioden ergibt einen gesamten Öffnungswinkel des Systems von $\pm 15^\circ$. Die Dioden werden sequentiell durch einen leistungsstarken Laser im Multiplex-Verfahren angesteuert und können somit virtuell als *Pushbroom-Meßsystem* gesehen werden, das ähnlich wie eine Zeilenkamera die streifenförmige Abtastung des Geländes ermöglicht. Die Zeilenabtastfrequenz beträgt bei diesem System 300 Hz, die innere Genauigkeit der gemessenen Entfernungen werden mit 80 cm angegeben, die maximale Reichweite liegt bei 300 m. Zur Zeit sind Sensoren mit verbesserten Spezifikationen in der Entwicklung, wobei besonders an der Erhöhung der maximalen Reichweite und der Vergrößerung der Diodenzahl gearbeitet wird.

Zur Umrechnung der Entfernungen in Geländekoordinaten werden Position und Orientierung des Laserscanners zum Zeitpunkt der Messung benötigt. Für die Bestimmung dieser Positionen bzw. der Neigungen und Orientierungen des Scanners zum Zeitpunkt der Distanzmessungen können entweder mehrere GPS Antennen auf dem Rumpf bzw. den Flügeln des Flugzeugs oder aber inertielle Navigationssysteme (INS) verwendet werden [Schade, Fritsch & Kilian 1994]. Zusammen mit der gemessenen Entfernung des Scanners liefern die Messungen der Positionen und Orientierungen dieses integrierten Systems gerichtete Vektoren mit bekannter Länge, d.h. aus den Orientierungsparametern werden die 3D-Koordinaten der gemessenen Bodenpunkte berechnet. Derzeit werden bei einer Flughöhe von 1000 m Genauigkeiten der Lagekoordinaten gemessener Punkte im Bereich von 20 cm angestrebt. Ähnlich wie bei einem konventionellen photogrammetrischen Block stehen nach der Befliegung Streifen zur Verfügung, die über ein Zuordnungsverfahren verknüpft werden [Fritsch & Kilian 1994]. Aus dem DHM-Matching überlappender Streifen lassen sich auch systematische Fehler wie Driften des Trägheitsnavigationssystems oder nicht korrekt gelöste Phasenmehrdeutigkeiten des GPS bestimmen. Nach dem DHM-Matching können Ausschnitte aus bekannten DHM oder bekannte Gebäudegrundrisse als Paßpunkte eingeführt werden. Die Schätzung aller Kalibrierungsparameter durch die gemeinsame Ausgleichung aller gemessenen DHM-

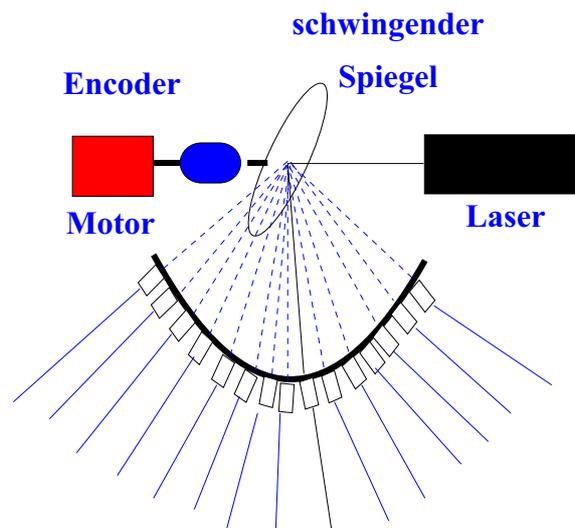


Abbildung 2.3: Grundprinzip eines Laserscanners.

Streifen, ähnlich einer Bündelblockausgleichung bei der Aerotriangulation photogrammetrischer Blöcke, liefert schließlich über größere Bereiche homogen verteilt dreidimensional bestimmte Geländepunkte.

Durch Messungen mit einem Laserscanner werden die Geländepunkte unregelmäßig verteilt erfaßt. Um einen schnelleren und bequemeren Zugriff zu ermöglichen, wird zwischen den gemessenen Laserpunkten ein DHM abgeleitet. Durch eine Delaunay–Triangulation kann z.B. für die gemessenen Punkte eine Vermaschung, d.h. eine Verknüpfung benachbarter Punkte durchgeführt werden. Alternativ dazu kann zwischen den gemessenen Punkten auch ein quadratisches Gitter interpoliert werden, um so ein rasterförmiges DHM zu generieren. Abbildung 2.4 zeigt die Perspektivansicht eines DHM, das durch Messungen mit einem Laserscannersystem mit multiplen Laserelementen gewonnen wurde. Für die Distanzmessungen wurde der Scanner der Firma Dornier verwendet. Das DHM stellt einen Bereich der Innenstadt Hannovers dar, die Flughöhe betrug bei den Messungen 300 m. Die Punktabstände betrugen bei dieser Messung 2 - 3 m quer zur, bzw. 30 cm in Flugrichtung.

Im Gegensatz zu Bildzuordnungsverfahren liefern Messungen mit scannenden Lasern über das ganze Gebiet verteilt gleichmäßige Meßpunktdichten. Dies führt dazu, daß die Größenordnung des Fehlers, der durch die Interpolation zwischen tatsächlich gemessenen Punkten entsteht, annähernd gleich bleibt. Bei Höhenmodellen aus automatischer Stereobildzuordnung führen dagegen die zum Teil stark unterschiedlichen Punktabstände zwischen tatsächlich gemessenen Parallaxen zu stark unterschiedlichen Interpolationsfehlern. Dadurch ist insgesamt die Qualität eines aus Lasermessungen abgeleiteten Höhenmodells homogener als die Qualität eines durch automatische Bildzuordnungsverfahren berechneten DHM. Generelle Aussagen zu Qualitätsunterschieden zwischen Höhenmodellen aus verschiedenen Datenquellen und Verfahren sind jedoch unter Vorbehalt zu betrachten, da die Weiterentwicklung dieser Methoden zur Verbesserung der Ergebnisse insbesondere in bebauten Gebieten Gegenstand intensiver Forschungen ist. Deshalb ist es derzeit kaum möglich, eine abschließende Bewertung durchzuführen.

Sowohl automatische Bildzuordnungsverfahren als auch Messungen mit scannenden Lasern liefern geometrische Beschreibungen der Oberfläche des Geländes einschließlich der sich darauf befindenden Objekte. Im Prinzip reicht für viele Anwendungen dreidimensionaler Stadtmodelle eine Repräsentation der Objektoberflächen durch eine dichte Verteilung gemessener Punkte aus. In den meisten Fällen wird jedoch – auch wenn die gemessenen Punkte die Oberfläche genau und dicht beschreiben – eine weitere Interpretation der Daten unumgänglich sein. Für Bereiche, die im Stereobildpaar verdeckt sind, kann keine Parallaxenbestimmung und damit Höhenmessung erfolgen. Bei der direkten Messung mit Laserscannern werden bestimmte Bereiche ebenfalls verdeckt und damit nicht erfaßt. Eine Ergänzung der fehlenden Information erfordert jedoch eine Einbeziehung von Modellwissen, d.h. die Interpretation der gemessenen Daten. Zudem werden Anwendungen wie Simulationen oder Visualisierungen durch die Beschreibung der Objektoberflächen anhand einer unqualifizierten, d.h. unabhängig von der Objektgeometrie verteilten, dichten Punktmenge extrem rechenintensiv. Aus diesem Grund ist eine Abstraktion



Abbildung 2.4: Perspektivansicht eines DHM aus Laserdaten, überlagert mit Bilddaten (entnommen aus [Lohr & Eibert 1995]).

der Daten notwendig, was ebenfalls eine Interpretation bedingt. Sowohl die automatische Stereobildzuordnung als auch die Messung mit einem Laserscanner liefert eine 2.5 dimensionale Randbeschreibung einer Fläche, in der neben der Geländeoberfläche auch Objekte wie Häuser oder Bäume, die aus dem Gelände herausragen, enthalten sind. Innerhalb eines 3D-Stadtmodells wird jedoch eine Beschreibung benötigt, in der Objekte wie Häuser, Bäume oder Brücken getrennt von der Geländeoberfläche repräsentiert werden. Dazu müssen diese Störobjekte innerhalb des gemessenen Datensatzes erkannt und nach der Trennung von der Geländeoberfläche als echte dreidimensionale Objekte z.B. in der Form von CAD-Modellen repräsentiert werden.

Digitale Höhenmodelle liefern wertvolle Information für die Erzeugung dreidimensionaler Stadtmodelle. Die Trennung der Gebäude und anderer Objekte von der Geländeoberfläche zur Erzeugung eines Digitalen Gelände-modells, die Ergänzung fehlender Information in verdeckten Bereichen und die Erzeugung dreidimensionaler Beschreibungen der im Datensatz enthaltenen Gebäude machen eine weitere Bearbeitung der gemessenen Höhen-daten notwendig. Die Bestimmung Digitaler Höhenmodelle stellt deshalb nur einen ersten Schritt auf dem Weg zur Erzeugung dreidimensionaler Stadtmodelle dar, der durch die anschließende Anwendung spezifischerer Verfahren erweitert werden muß. In dem vorgestellten Verfahren werden die gemessenen Höhendaten neben der Erzeugung eines DGM vor allem verwendet, um in Kombination mit Bilddaten eine Extraktion und Selektion geometrischer Primitive durchzuführen, die für die Gebäuderekonstruktion verwendet werden. Die Extraktion dieser Primitive ist Thema des folgenden Kapitels.

3 Extraktion dreidimensionaler linearer Segmente

Ein wichtiger Vorverarbeitungsschritt für die Objektrekonstruktion ist die Abstraktion der beobachteten Bild- und Höhendaten durch die Extraktion geeigneter Merkmale. Die verwendeten Merkmale (z.B. geometrische Primitive wie Punkte, Linien und Flächen) und deren Attribute sollten sowohl aus den beobachteten Daten extrahierbar, als auch als Elemente für die Rekonstruktion der Gebäude geeignet sein. Gebäude und andere künstliche Objekte weisen eine Vielzahl gerader Raumkanten auf, die Bruchkanten ihrer Objektfläche definieren. Da solche dreidimensionalen linearen Segmente auch aus dem zur Verfügung stehenden Datenmaterial (Luftbilder mit bekannter äußerer Orientierung und Höhendaten in Form digitaler Geländemodelle) extrahiert werden können, sind sie als Primitive zur Gebäuderekonstruktion gut geeignet. Die Extraktion zweidimensionaler linearer Segmente aus Bildern mit anschließender Stereozuordnung für die 3D-Bestimmung (Abschnitt 3.1) und die Extraktion von 3D-Segmenten aus einem DHM (Abschnitt 3.2) ist zusammen mit der Fehlerbetrachtung der Linienextraktion (Abschnitt 3.3) Thema dieses Kapitels.

Bruchkanten von Oberflächen stellen sich in Bildern als Intensitäts- bzw. Farbkanten dar, die durch gängige Verfahren der digitalen Bildverarbeitung extrahiert werden können. Die zunächst nur zweidimensional definierten Bildkanten lassen sich anschließend durch eine Stereozuordnung dreidimensional bestimmen. Bei der Stereozuordnung wird das zur Verfügung stehende Digitale Höhenmodell zur Berechnung von Näherungsparallaxen eingesetzt. Unter der Voraussetzung, daß die Höhendaten in genügender Genauigkeit und Dichte zur Verfügung stehen, können alternativ dazu solche Oberflächenbruchkanten durch eine Krümmungsanalyse direkt aus dem gemessenen DHM gewonnen werden. Neuere Verfahren, wie die im vorigen Kapitel beschriebene direkte Höhenmessung durch einen scannenden Laser, aber auch die Verbesserung der Methoden zur automatischen Stereobildzuordnung in bebauten Gebieten lassen eine Genauigkeitssteigerung der Höhendaten erwarten, so daß deren Einsatz für die Merkmalsextraktion zunehmend interessanter wird. Die Verfahren zur Merkmalsextraktion aus Bild- bzw. Höhendaten erfolgt zunächst qualitativ anhand einiger Beispiele, bevor im letzten Abschnitt des Kapitels im Rahmen der Genauigkeitsbetrachtung eine mathematisch fundiertere Darstellung der Verfahren erfolgt.

3.1 Stereozuordnung extrahierter Grauwertkanten

Objektgrenzen oder Bruchkanten von Oberflächen werden in Bildern als Intensitätskanten, d.h. als lokale Diskontinuitäten im Grauwert abgebildet. Diese Kanten können durch Standardverfahren der digitalen Bildverarbeitung extrahiert werden. Innerhalb des verwendeten Algorithmus werden in einem zweiten Schritt benachbarte, parallele Linien zusammengefaßt, um eine Datenreduktion zu erreichen, bevor abschließend durch eine Stereozuordnung dreidimensional bestimmte Linien berechnet werden.

3.1.1 Extraktion gerader Grauwertkanten

Eine Grauwertkante kann idealisiert als Stufe im Intensitätsgebirge betrachtet werden. Üblicherweise treten solche idealen Stufen in Bildern nicht auf, da sich die Intensitätsänderung aufgrund der Bildunschärfe immer auf einen Bereich von einigen Pixeln verteilt. Dadurch entsteht eine Art Rampe im Intensitätsgebirge, wie sie in den Abbildung 3.1 und 3.2 dargestellt ist. Die schwarze Linie, die dem linken Bild überlagert ist, definiert dabei das rechts abgebildete Grauwertprofil.

Die Entwicklung geeigneter Operatoren zur Detektion und Lokalisierung von Grauwertkanten war in den letzten Jahren und Jahrzehnten Gegenstand intensiver Forschungsarbeiten. Gängige Verfahren wie die von Marr & Hildreth [1980] oder Canny [1986] entwickelten Operatoren bestimmen die Diskontinuitäten durch die Suche nach lokalen Maxima in der ersten Ableitung oder durch die Suche nach einem Nulldurchgang in der zweiten Ableitung. Die detektierten Kantenpixel können anschließend durch Verfahren wie Hough-Transformation, Konturpunktverfolgung und -approximation, dynamische Programmierung oder andere Verfahren zu geraden Linien aggregiert werden. Eine ausführliche Übersicht und Beschreibung dieser konturorientierten Verfahren stellen z.B. Bässmann & Besslich [1989] vor.

In dieser Arbeit wurden die Geradensegmente nach dem Verfahren von Burns, Hansen & Riseman [1986] extrahiert. Durch das Zusammenfassen von Pixeln mit gleicher Gradientenrichtung wird bei diesem Verfahren



Abbildung 3.1: Bildausschnitt mit extrahierten Kanten (weiß) und abgegriffene Profillinie (schwarz).

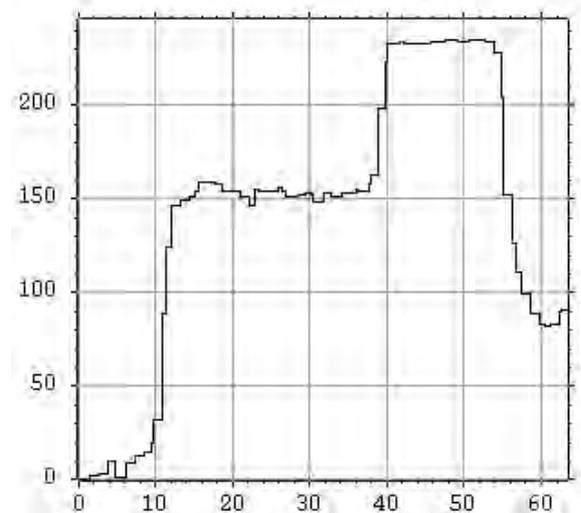


Abbildung 3.2: Grauwerte der abgegriffenen Profillinie.

zunächst das Gradientenbild segmentiert. Die segmentierten Gebiete definieren eine Rampe im Intensitätsbild, die durch eine Ebene approximiert werden kann. Die Parameter der Ebene werden durch eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate aus den Intensitätswerten innerhalb des segmentierten Gebietes berechnet. Zur Bestimmung der Geraden wird anschließend eine zweite, horizontale Ebene durch den mittleren Intensitätswert innerhalb des segmentierten Gebietes definiert. Das extrahierte Geradensegment kann dann durch den Schnitt beider Ebenen festgelegt werden. Die dadurch gewonnenen Segmente sind im linken Bild der Abbildung 3.1 als weiße Linien dargestellt. Die mathematischen Grundlagen des Verfahrens werden im Rahmen der Fehlerbetrachtung in Abschnitt 3.3 vorgestellt.

3.1.2 Zusammenfassung kollinear Geradenstücke

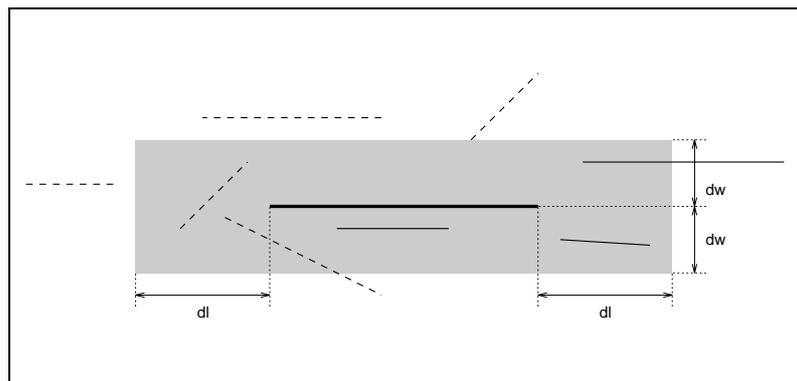


Abbildung 3.3: Suchfenster zur Zusammenfassung von Geradenstücken.

Algorithmen zur Kantenextraktion wie das Verfahren nach Burns erzeugen Linien die zum Teil sehr nahe beieinander liegen. Um für die weitere Bearbeitung die Anzahl der Linien zu reduzieren, werden deshalb benachbarte, kollineare Liniensegmente zusammengefaßt [Boldt et al. 1989], [Mohan & Nevatia 1989a]. Im implementierten Verfahren werden zur Ermittlung möglicher Linienkombinationen um jedes Geradenstück Suchfenster gelegt, in denen nach benachbarten, parallelen Liniensegmenten gesucht wird. Abbildung 3.3 stellt ein solches Suchfenster dar, das durch die als dicke Linie dargestellte Startlinie definiert wird. Eine Linie wird als benachbart und kollinear zu dieser Startlinie angesehen, wenn mindestens ein Endpunkt innerhalb des Suchfensters liegt und der mit der Startlinie eingeschlossene Winkel klein genug ist. Existieren solche Linien (in Abbildung 3.3 als

durchgezogene Linien dargestellt), lassen sich diese zu einem neuen Linienstück zusammenfassen, indem durch alle gefundenen Linienendpunkte eine ausgleichende Gerade gelegt wird. Die Endpunkte der neuen Linie ergeben sich aus dem Minimum bzw. Maximum der projizierten Endpunkte auf die ausgleichende Gerade. Der Suchvorgang wird einschließlich der neu zusammengefaßten Linien für alle Linienelemente so lange iteriert, bis sich keine Änderungen mehr ergeben. Unerwünschte Effekte wie die rekursive Zusammenfassung von bogenförmig angeordneten Linienstücken lassen sich durch die Einführung einer maximalen Abweichung aller kombinierten Elemente zur ausgleichenden Geraden vermeiden.

Die Größe der Suchfläche und die damit zugelassenen Toleranzen werden durch die Endpunkte des Ausgangssegments und die Parameter d_l und d_w festgelegt. Der Parameter d_l beeinflusst die Fenstergröße in Linienrichtung. Dadurch wird die maximale Größe der Lücken zwischen den zu kombinierenden Linienelementen festgelegt, die übersprungen werden können. Der Parameter d_w definiert die Breite des Suchfensters. Die Wahl der Parameter für d_l und d_w ergibt sich einerseits aus der Forderung, eine möglichst starke Reduktion der Anzahl von Linien zu erreichen, d.h. durch ein großes Suchfenster die Zusammenfassung möglichst vieler Linien zu erreichen. Andererseits soll nicht zu viel Detailinformation verlorengehen. In diesem Fall ist vor allem die Breite d_w des Suchfensters entscheidend. Durch die Kombination paralleler, benachbarter Linien wird z.B. die linke und rechte Begrenzungslinie schmaler Objekte (Dachrinne, Kamin, o.ä.) zu einem Objekt zusammengefaßt. Dadurch geht semantische Information verloren und die Identifizierung der ursprünglichen Objektgrenzen ist nicht mehr möglich. Die Anforderungen an den Grad der dadurch verursachten *Erfassungsgeneralisierung* (Objektgeneralisierung) [Hake 1982] richtet sich nach dem angestrebten Detailreichtum der Gebäuderekonstruktion, der für die meisten Anwendungen nicht sehr hoch ist. Kleinere Gebäudeteile mit einer Breite im Bereich weniger Dezimeter wie Dachrinnen müssen häufig nicht erfaßt werden. Bei dem für diese Arbeit verwendeten Bildmaterial betrug die räumliche Auflösung eines Pixels am Boden ca. 25 cm. Da dies einen guten Kompromiß zwischen dem erforderlichen Detailreichtum und der zu bearbeitenden Datenmenge darstellt, kann eine solche Auflösung als typisch für Bilder betrachtet werden, die für die Gebäuderekonstruktion verwendet werden. Als Wert für die Objektgeneralisierung bei der Linienextraktion wurde $d_w = 50$ cm gewählt, was zu einer Zusammenfassung von Grenzen schmalere Objekte führt. Die Länge des Suchfensters in Geradenrichtung wurde auf $d_l = 2$ m festgelegt, um Lücken zwischen Linien in dieser Größe schließen zu können.

3.1.3 Stereozuordnung

Zur dreidimensionalen Bestimmung der extrahierten linearen Segmente wird eine Stereozuordnung durchgeführt. Da die Bilder in Epipolargeometrie vorliegen und aus den Höhendaten näherungsweise Parallaxen berechnet werden können, ist es möglich, den Suchbereich im Stereobild so weit einzuschränken, daß bei der Zuordnung der Geradenstücke relativ wenig Mehrfachzuordnungen entstehen. Beispiele für die Stereozuordnung von Geraden geben Horaud & Skordas [1989] oder Faugeras & Fua [1991]. Die Attribute, die in diesen Arbeiten für die Zuordnung verglichen werden, sind Orientierung, Länge und Grauwertgradient der Geraden. Probleme bei der Zuordnung können sich aus den sehr ungenauen Parallaxen bei Geraden ergeben, die mit den Epipolarlinien einen kleinen Winkel einschließen. Für Linien, die parallel zu den Epipolarlinien liegen, ist eine Höhenbestimmung nicht möglich. Aus diesem Grund verwenden Sherman & Peleg [1990] für ihr Konturmatching nur Linien, die zu den Epipolarlinien einen Winkel größer als 30° aufweisen, während Faugeras & Fua [1991] mit drei Kameras arbeiten, die zu einem gleichseitigen Dreieck angeordnet sind.

Grauwertkanten im Bild, die durch spiegelnde Reflexionen o.ä. verursacht werden, sind im allgemeinen stark vom jeweiligen Beobachtungsstandpunkt abhängig. Dagegen bleiben Grauwertkanten, die durch die Abbildung einer Objektgrenze oder einer Bruchkante entstehen, bei geringfügiger Änderung des Aufnahmestandpunktes oder der Orientierung erhalten. Aus diesem Grund hat die Stereozuordnung extrahierter Grauwertkanten auch eine Art Filterfunktion, da für die Objekterkennung wichtige Grauwertkanten von unwichtigen getrennt werden. Kanten, die durch die Abbildung von Objektgrenzen verursacht werden, sind in beiden Bildern zu sehen und können folglich zugeordnet werden. Kanten, die durch andere Effekte wie z.B. spiegelnde Reflexionen entstehen, treten nur in einem Bild auf. Falls der Suchraum durch Näherungsinformation entsprechend stark eingeschränkt wird, findet für solche Linien keine Stereozuordnung statt. Dadurch können diese Linien eliminiert werden.

Als Vorverarbeitungsschritt zur Näherungswertbeschaffung für die Zuordnung der extrahierten Linien werden zunächst die Rasterpunkte des Digitalen Höhenmodells über die bekannten äußeren Orientierungsparameter in Bildkoordinaten mit den zugehörigen Parallaxen umgerechnet. Bei der Transformation des DHM-Rasters

in Bildkoordinaten entsteht aufgrund der Neigung des Bildes gegenüber der Geländeoberfläche und der unterschiedlichen Geländehöhen eine Verteilung der berechneten Punkte, die nur noch grob einem regelmäßigen Raster entspricht. Das resultierende Parallaxenfeld wird deshalb wieder auf ein regelmäßiges Raster interpoliert. Dadurch ist innerhalb des entstandenen Parallaxenbildes ein schneller und bequemer Zugriff möglich. Abbildung

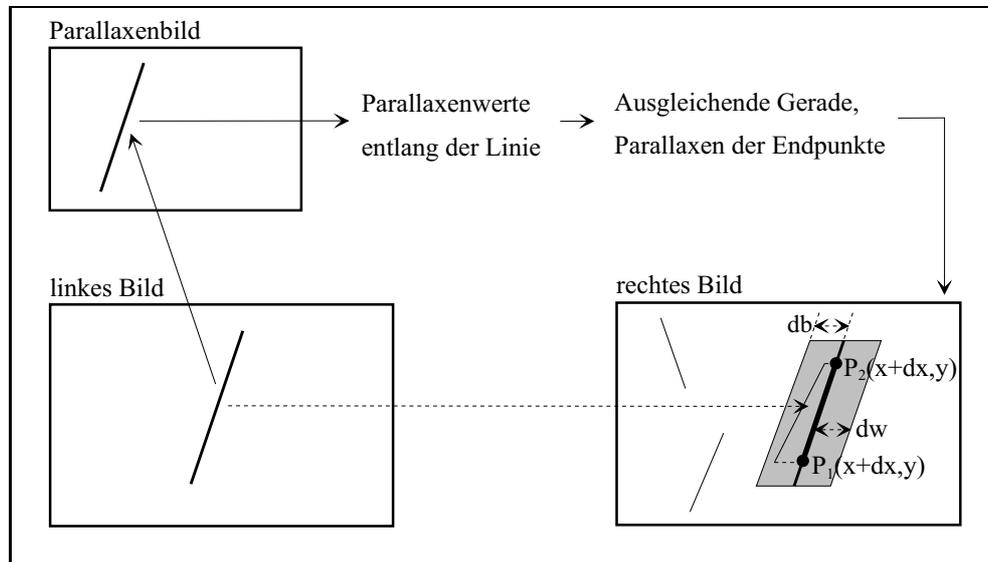


Abbildung 3.4: Ablaufdiagramm der Stereozuordnung von Grauwertkanten.

3.4 zeigt das Ablaufdiagramm der Stereozuordnung extrahierter Linien. Entlang jeder Linie des linken Bildes werden die Parallaxen aus dem Parallaxenbild abgegriffen. Anhand dieser Verschiebung d_x kann die Linie ins rechte Bild projiziert werden. Um diese projizierte Linie wird ein Suchfenster mit variabler Breite db gelegt. Die Breite des Suchfensters hängt von dem mittleren Gradienten des Parallaxenbildes entlang der Linie ab. In flachen Gebieten sind die Näherungsparallaxen sehr gut zu bestimmen, so daß das Suchfenster schmal gewählt werden kann. An DHM- bzw. Parallaxen-Bruchkanten sind die Näherungswerte unzuverlässig, was zur Folge hat, daß der Suchbereich erweitert werden muß. Liegt eine Linie des rechten Bildes innerhalb des Suchbereichs, und ist deren Orientierungsdifferenz zu der projizierten Linie geringer als ein bestimmter Schwellwert, wird eine Zuordnung durchgeführt. Bei der Stereozuordnung sind Mehrfachzuordnungen zugelassen, darum muß in weiteren Verfahrensschritten mit Fehlzuordnungen gerechnet werden. Eine Korrelation oder ein sonstiger Vergleich der Grauwerte in der Umgebung der zugeordneten Linien ist nur dann sinnvoll, wenn an diesen Stellen keine Verdeckungen auftreten. Da das Verfahren zur Stereozuordnung der Linien in bebauten Gebieten eingesetzt werden soll, in denen solche Verdeckungen sehr häufig vorkommen, wird dies oft der Fall sein. Aus diesem Grund wird keine Korrelation eingesetzt.

Abbildung 3.5 zeigt das Ergebnis der Merkmalsextraktion durch Stereozuordnung extrahierter Grauwertkanten anhand eines Ausschnitts aus einem Stereobildpaar. Die schwarz eingezeichneten Linien wurden an geraden Grauwertkanten durch den Algorithmus nach Burns et al. [1986] extrahiert. Mit diesen Linien wurde anschließend eine Stereozuordnung durchgeführt. Lineare Segmente, die zugeordnet und damit dreidimensional bestimmt werden konnten, sind weiß dargestellt. Anhand der bekannten äußeren Orientierungsparameter der Luftbilder können die dreidimensional bestimmten linearen Segmente vom Bild- in das übergeordnete Geländekoordinatensystem transformiert werden.

Mit Hilfe der in diesem Kapitel beschriebenen Verfahren zur Liniensextraktion sollen aus den beobachteten Bild- bzw. Höhendaten Raumkanten extrahiert werden, die auf Bruchkanten oder Grenzen von Gebäuden zurückgehen. Ein Nachteil der Verwendung von Grauwertkanten ist, daß jeder lokale Grauwert eines Bildes nicht nur von der Form bzw. Orientierung der abgebildeten Oberfläche bestimmt, sondern zusätzlich noch von Faktoren wie Beleuchtung, Reflexionseigenschaften, Standpunkt, usw. beeinflusst wird. Die grundsätzliche Problematik aller Segmentierungsalgorithmen liegt deshalb darin, daß Grauwertsprünge, die als Oberflächensprünge (z.B. Dachbruchkanten) interpretiert werden, viele andere Ursachen wie Textur oder Schattenwurf haben können. Zudem kann schwacher Kontrast zwischen Objektgrenzen dazu führen, daß solche Kanten nicht detektiert wer-

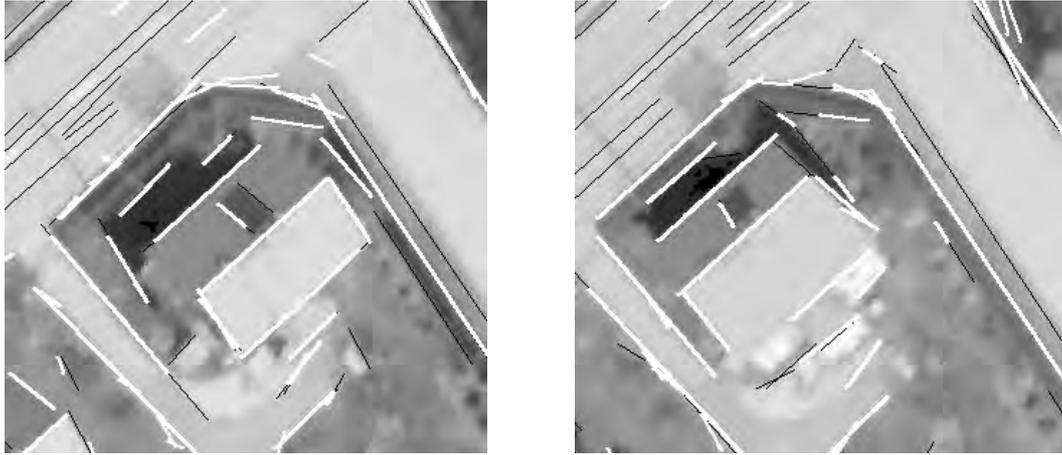


Abbildung 3.5: Linker und rechter Bildausschnitt mit extrahierten Linien (alle Linien) und zugeordneten Linien (weiße Linien).

den. Für den Fall, daß Höhendaten in ausreichender Qualität und Dichte zur Verfügung stehen, ist deshalb zur Bestimmung der Raumkanten die Verwendung eines Digitalen Höhenmodells vorzuziehen, da aus einem DHM nur tatsächliche Oberflächenbruchkanten extrahiert werden. Dies gilt jedoch nur, wenn die Objektoberfläche genügend genau durch das DHM approximiert wird.

3.2 Krümmungsanalyse von Höhendaten

Ziel der Merkmalsextraktion ist die Bestimmung dreidimensionaler Geradensegmente, die auf die Abbildung von Raumkanten eines Gebäudes zurückgehen. Als Datengrundlage können alternativ zu den Stereobildpaaren auch Digitale Höhenmodelle eingesetzt werden, da diese neben einer geometrischen Beschreibung des Geländes auch Information über die Oberfläche von Objekten beinhalten, die wie z.B. Gebäude aus dem Gelände herausragen. Die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Verfahren zur Erfassung von Höhendaten (siehe Kapitel 2) liefern eine Randwertbeschreibung mit Höhenwerten für ein regelmäßiges Raster. Da digitalisierte Bilder mathematisch in der gleichen Form vorliegen, können Verfahren der digitalen Bildverarbeitung zur Bearbeitung des DHM zur Anwendung kommen. Aus diesem Grund konnte der Algorithmus nach Burns et al. [1986] in modifizierter Form auch zur Extraktion von Geradensegmenten entlang von DHM-Bruchkanten eingesetzt werden. Diese Bruchkanten sind im DHM als Stellen maximaler Krümmung definiert. Im Gegensatz zur Extraktion von Grauwertkanten, bei der nach den Maxima der ersten Ableitung gesucht wird, muß bei der Extraktion von DHM-Bruchkanten nach den Maxima der zweiten Ableitung gesucht werden. Der Algorithmus nach Burns et al. [1986] wurde deshalb so modifiziert, daß nicht mehr Pixel mit gleicher *Gradientenrichtung*,

$$\varphi = \arctan \left(\frac{\partial I}{\partial y} / \frac{\partial I}{\partial x} \right) \quad (3-1)$$

sondern Pixel mit gleicher *Krümmungsrichtung*

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2 \frac{\partial Z}{\partial x} \frac{\partial Z}{\partial y}}{\frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2}} \right) \quad (3-2)$$

zu Regionen zusammengefaßt werden, d.h. die segmentierten Regionen definieren in diesem Fall Flächen gleicher Neigungsänderung. Zur Bestimmung der Geraden wird eine zweite, horizontale Ebene durch die mittlere Höhenänderung innerhalb der segmentierten Region definiert. Der Schnitt der Neigungsrampe mit dieser Ebene definiert anschließend das gesuchte Geradensegment entlang einer DHM-Bruchkante.

Die innerhalb des DHM detektierten Bruchkanten können sowohl konvex als auch konkav sein, d.h. die Krümmung in Normalenrichtung der Linie ist entweder positiv oder negativ. Kanten an Dachfirst, -giebel und -trauf haben

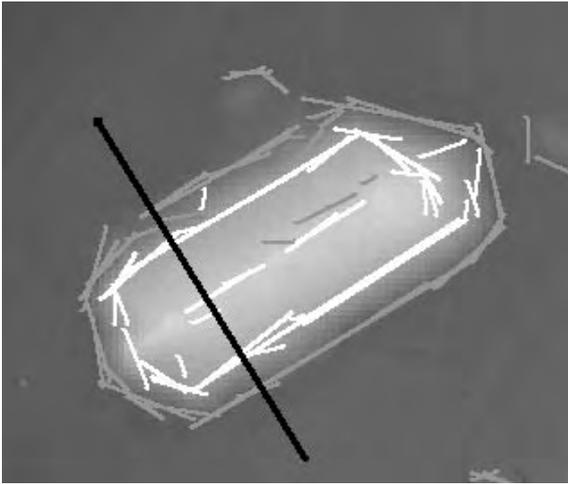


Abbildung 3.6: DHM in Grauwertdarstellung mit detektierten Bruchkanten (konvexe Kanten weiß, konkave Kanten grau, abgegriffenes Profil schwarz).



Abbildung 3.7: Bildausschnitt mit projizierten konvexen DHM-Bruchkanten.

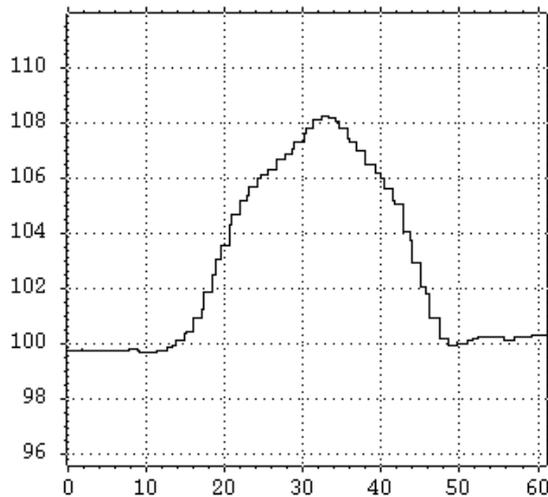


Abbildung 3.8: Höhenwerte des abgegriffenen DHM-Profiles.

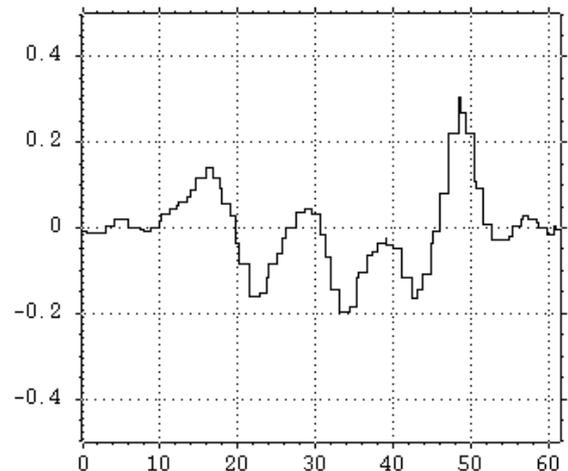


Abbildung 3.9: Krümmung des abgegriffenen DHM-Profiles.

immer konvexe Krümmung; Bruchkanten am Übergang von der Hauswand zur Geländeoberfläche sind dagegen immer konkav gekrümmt. Die Abbildungen 3.6 bis 3.9 sollen diese Situation veranschaulichen. In der Abbildung 3.6 sind einem Ausschnitt des DHM die extrahierten linearen Segmente überlagert, wobei Bruchkanten mit negativer Krümmung weiß und Bruchkanten mit positiver Krümmung grau dargestellt sind. Zur Veranschaulichung der dabei erreichten Genauigkeit ist rechts der zugehörige Bildausschnitt abgebildet, in den Bruchkanten mit negativer Krümmung projiziert wurden. Abbildung 3.8 zeigt eine aus dem DHM abgegriffene Profillinie, die in Abbildung 3.6 als schwarze Linie dargestellt ist. Das Neigungsbild des DHM wurde durch einen Laplaceoperator berechnet. Für Abbildung 3.9 wurde die Profillinie aus diesem Neigungsbild des DHM abgegriffen. In dieser Funktion sind die negativen Maxima an den Traufkanten bzw. der Firstlinie des Daches deutlich sichtbar. Da die Extraktion der DHM-Bruchkanten analog zur Extraktion von Grauwertkanten häufig kollineare, benachbarte Liniensegmente ergibt, werden diese, wie schon in Abschnitt 3.1.2 beschrieben, in einem weiteren Verarbeitungsschritt zu einer Linie zusammengefaßt.

3.3 Genauigkeit extrahierter Linien

Da die dreidimensionalen Linien für die Gebäuderekonstruktion verwendet werden, haben ihre Genauigkeiten direkten Einfluß auf die Genauigkeit des Rekonstruktionsergebnisses. In diesem Abschnitt werden sowohl die mathematischen Grundlagen für die Berechnung der mittleren Fehler von Raumkanten aus der Stereozuordnung extrahierter Grauwertkanten als auch für die Berechnung der mittleren Fehler von Raumkanten aus der Krümmungsanalyse von Höhendaten vorgestellt.

3.3.1 Linien aus Stereobildpaaren

Die Genauigkeit der dreidimensionalen Linien durch die Stereozuordnung von Grauwertkanten wird durch

- die Extraktion der Linien im Bild,
- die Zusammenfassung benachbarter, paralleler Linien im Bild und
- die Stereozuordnung

beeinflußt. Im folgenden werden die Einflüsse dieser drei Verfahrensschritte auf die Genauigkeit der extrahierten Raumkanten betrachtet.

3.3.2 Linienextraktion nach Burns

Durch den Algorithmus nach Burns et al. [1986] werden zunächst innerhalb des Intensitätsbildes $I(x, y)$ Regionen von Pixeln in 4er-Nachbarschaften gebildet, deren Gradientenrichtung

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\partial I}{\partial y} / \frac{\partial I}{\partial x}\right) \quad (3-3)$$

innerhalb eines bestimmten Bereichs (z.B. $\pm 22.5^\circ$) gleich ist. Der Gradient wird in diesem Fall durch einen 2×2 -Operator mit

$$\frac{\partial I}{\partial x} = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad \frac{\partial I}{\partial y} = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

berechnet. Regionen gleicher Gradientenrichtung definieren Rampen im Intensitätsgebirge $I(x, y)$, die zur Linienextraktion verwendet werden. Das Verfahren nach Burns approximiert die Intensitätsrampen durch ausgleichende Ebenen. Dazu wird durch eine kleinste Quadrate Schätzung diejenige Ebene bestimmt, für die der senkrechte Abstand der beteiligten Punkte einer segmentierten Region minimal wird. Jeder Punkt $P_i = [x_i \ y_i \ I_i(x, y)]^T$ der segmentierten Region dient zur Formulierung einer Beobachtungsgleichung, das Gewicht p_i jeder Beobachtung ergibt sich aus dem Gradientenbetrag der beteiligten Punkte P_i zu

$$p_i = \sqrt{\left(\frac{\partial I_i}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial I_i}{\partial y}\right)^2}. \quad (3-5)$$

Die Gewichtung der Punkte bewirkt, daß Bildpunkte mit starker Intensitätsänderung mehr zur Bestimmung der Ebenenparameter beitragen, als Punkte am Rand des segmentierten Gebietes, bei denen der Gradient häufig relativ klein ist.

Die zu bestimmende Ebene π kann in der Hesse'schen Normalform

$$\pi : ax + by + cz - 1 = 0 \quad (3-6)$$

repräsentiert werden, wobei die z -Komponente in diesem Fall der Intensität $I(x, y)$ entspricht. Für den Normalenvektor $[a \ b \ c]^T$ der Ebene π gilt die Bedingung $a^2 + b^2 + c^2 \neq 0$, der Abstand d des Koordinatenursprungs zur Ebene ergibt sich aus

$$d = \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}. \quad (3-7)$$

Zur Fehlerbetrachtung dieser Ebene soll ihre Fehlerfläche bestimmt werden, d.h. die Fläche die sich aus den Standardabweichungen der Ebenenpunkte in Normalenrichtung ergibt [Förstner 1992]. Zunächst wird davon ausgegangen, daß nur die Richtung des Normalenvektors der Ebene fehlerbehaftet ist. Die gesuchte Fehlerfläche resultiert demnach aus der fehlerbehafteten Richtung des Normalenvektors, d.h. dem Neigungsfehler der Ebene. Zur Bestimmung dieser Fläche wird zunächst die Richtung des Normalenvektors $[a \ b \ c]^T$ durch sphärische Koordinaten mit der Länge Λ und der Breite Φ dargestellt. Für die Beziehungen zwischen den Elementen des Normalenvektor und den sphärischen Koordinaten gilt:

$$a = d \cdot \cos \Phi \cos \Lambda \quad (3-8)$$

$$b = d \cdot \cos \Phi \sin \Lambda \quad (3-9)$$

$$c = d \cdot \sin \Phi \quad (3-10)$$

Die sphärischen Koordinaten Λ und Φ können auch als Gauß'sche Flächenparameter aufgefaßt werden, d.h. durch diese Parameter wird ein Punkt auf einer Kugelfläche mit Radius d definiert. Der Neigungsfehler der Ebene π , d.h. der Fehler der Richtungen Λ und Φ kann durch eine Fehlerellipse auf der Gauß'schen Kugelfläche dargestellt werden. Diese Fehlerellipse wird durch drei Parameter festgelegt: das Azimut α der Hauptachsrichtung der Fehlerellipse auf der Kugelfläche, die der Richtung des maximalen Neigungsfehlers entspricht, sowie die Standardabweichungen der Neigung σ_α in dieser Richtung und σ_β senkrecht dazu. σ_α und σ_β bestimmen die beiden Hauptachsen der Fehlerellipse. Der Wert σ_α definiert den maximalen, σ_β den minimalen Neigungsfehler der Ebene. Für den Fall, daß nur die Neigung der Ebene fehlerbehaftet ist, wird diese Fehlerfläche durch einen elliptischen Kegel festgelegt. Ist der Richtungsfehler des Normalenvektors in alle Richtungen gleich groß, wird die Fehlerellipse auf der Kugelfläche rund, der Kegel wird zum Kreiskegel. Die Spitze des Kegels (x_0, y_0, z_0) entspricht dem (gewogenen) Schwerpunkt der Punktwolke $P_i = [x_i \ y_i \ I_i(x, y)]^T$, die zur Bestimmung der ausgleichenden Ebene verwendet wurde. Für den Schwerpunkt oder Mittelpunkt der ausgleichenden Ebene wird die Standardabweichung in Normalenrichtung, die durch den Neigungsfehler der Ebene entsteht, zu Null.

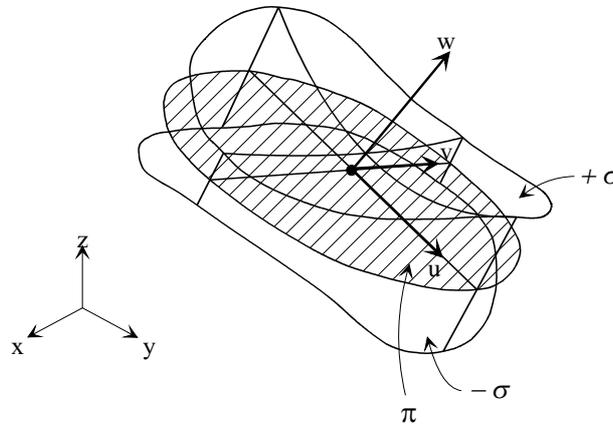


Abbildung 3.10: Fehlerflächen einer ausgleichenden Ebene, definiert durch die $\pm\sigma$ Intervalle aller Ebenenpunkte (nach [Förstner 1992]).

Der Kegel kann zur Definition eines lokalen (u, v, w) -Koordinatensystems auf der ausgleichenden Ebene verwendet werden, wobei der Koordinatenursprung dieses Systems durch den Schwerpunkt (x_0, y_0, z_0) definiert ist. Die u -Achse ist in der Richtung α der maximalen Neigungsunsicherheit σ_α , die v -Achse senkrecht dazu in Richtung der minimalen Neigungsunsicherheit σ_β definiert. Die w -Achse entspricht der Normalenrichtung der Ebene. Ist zusätzlich zur Neigung der Ebene der senkrechte Abstand d zum Ursprung des übergeordneten (x, y, z) -Koordinatensystem mit dem Fehler σ_d behaftet, so ergibt sich eine Fehlerfläche, die durch ein elliptisches, zweischaliges Hyperboloid (Abbildung 3.10) gebildet wird. In dem lokalen (u, v, w) -Koordinatensystem wird dieses Hyperboloid durch

$$w^2 = \sigma_w^2 = \sigma_d^2 + \sigma_\alpha^2 u^2 + \sigma_\beta^2 v^2 \quad (3-11)$$

definiert. Eine ausgleichende Ebene wird somit durch ihren Schwerpunkt (x_0, y_0, z_0) , den Normalenvektor (a, b, c) , den maximalen und minimalen Neigungsfehler der Ebene (σ_α und σ_β), sowie den Fehler σ_d des Ebenenschwerpunkts in Normalenrichtung repräsentiert.

Die Erwartungswerte der Ebenenparameter sowie deren Varianz-Kovarianz-Matrix ergeben sich aus den 1. und 2. Momenten der Menge der beteiligten Punkte P_i der segmentierten Region. Die 1. Momente sind durch

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n p_i} \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n x_i p_i \\ \sum_{i=1}^n y_i p_i \\ \sum_{i=1}^n z_i p_i \end{pmatrix}, \quad (3-12)$$

die Matrix \mathbf{M} der 2. Momente durch

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2 p_i & \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)(y_i - y_0) p_i & \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)(z_i - z_0) p_i \\ \sum_{i=1}^n (y_i - y_0)(x_i - x_0) p_i & \sum_{i=1}^n (y_i - y_0)^2 p_i & \sum_{i=1}^n (y_i - y_0)(z_i - z_0) p_i \\ \sum_{i=1}^n (z_i - z_0)(x_i - x_0) p_i & \sum_{i=1}^n (z_i - z_0)(y_i - y_0) p_i & \sum_{i=1}^n (z_i - z_0)^2 p_i \end{pmatrix} \quad (3-13)$$

gegeben. Die Gewichtung p_i der Punkte P_i ergibt sich nach Gleichung 3-5 aus ihrem Gradientenbetrag.

Die Matrix der zweiten zentralen Momente \mathbf{M} legt ein zweischaliges Hyperboloid fest, durch das die Fehlerfläche der Ebene definiert wird. Der maximale bzw. minimale Neigungsfehler der Ebene σ_α bzw. σ_β sowie ihr Nullpunktfehler σ_d ergeben sich aus den Eigenwerten μ_1, μ_2, μ_3 von \mathbf{M} zu:

$$\sigma_\alpha^2 = \frac{\mu_3}{\mu_1 (n-3)} \quad (3-14)$$

$$\sigma_\beta^2 = \frac{\mu_3}{\mu_2 (n-3)} \quad (3-15)$$

$$\sigma_d^2 = \frac{\mu_3}{(n-3)} \quad (3-16)$$

Der Normalenvektor $[a \ b \ c]^T$ der Ebene ist identisch mit der Mittelachse des Hyperboloids und ergibt sich aus dem zum Eigenwert μ_3 gehörigen Eigenvektor.

Nach der Bestimmung der ausgleichenden Ebene wird in dem Verfahren nach Burns zur Bestimmung der Grauwertkante die ausgleichende Ebene mit einer zweiten Ebene geschnitten, die parallel zur x, y -Ebene liegt. Die extrahierte Linie soll durch

$$l : (x - x_0) \cos \phi + (y - y_0) \sin \phi - D = 0 \quad (3-17)$$

parametrisiert werden, wobei ϕ dem Steigungswinkel und D dem Nullpunktabstand entsprechen. Die Parameter x_0 und y_0 definieren den Schwerpunkt der Linie. In Analogie zur ausgleichenden Ebene wird für diesen Punkt die Standardabweichung in Normalenrichtung, die durch den Orientierungsfehler σ_ϕ entsteht, zu Null.

Die z -Koordinate der Ebene parallel zur x, y -Ebene, mit der die ausgleichende Ebene geschnitten wird, ist durch das gewogene Mittel der Intensitäten

$$I_0 = \frac{\sum_{i=1}^n I_i p_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (3-18)$$

der beteiligten Punkte P_i einer segmentierten Region definiert. Die mittlere Intensität I_0 ist mit der Schwerpunktkoordinate z_0 der in den Gleichungen 3-12 und 3-13 definierten ausgleichenden Ebene identisch. Aus diesem Grund ist der Schwerpunkt (x_0, y_0) der gesuchten Schnittlinie (Gleichung 3-17) identisch mit dem Schwerpunkt (x_0, y_0) der ausgleichenden Ebene.

Das zweischalige Hyperboloid, das die Fehlerfläche der ausgleichenden Ebene festlegt, kann durch eine Gleichung zweiten Grades

$$m_{11}x^2 + m_{22}y^2 + m_{33}z^2 + 2m_{12}xy + 2m_{13}xz + 2m_{23}yz + 2m_1x + 2m_2y + 2m_3z + k_1 = 0 \quad (3-19)$$

beschrieben werden. Die Matrix \mathbf{M} der zweiten Momente der Punkte P_i (Gleichung 3-13) definiert die Fehlerfläche der ausgleichenden Ebene in einem lokalen (x', y', z') -System, das durch die Verschiebung des übergeordneten (x, y, z) -Koordinatensystems entsteht. Nach der Verschiebung des Koordinatensystems mit

$$x = x' + x_0 \quad (3-20)$$

$$y = y' + y_0 \quad (3-21)$$

$$z = z' + z_0 \quad (3-22)$$

werden die Koeffizienten m_1 , m_2 und m_3 der in Gleichung 3-19 beschriebenen Fläche zweiter Ordnung zu Null. In dem lokalen (x', y', z') -Koordinatensystem ist das Hyperboloid darum von der Form

$$m_{11}x'^2 + 2m_{12}x'y' + 2m_{13}x'z' + m_{22}y'^2 + 2m_{23}y'z' + m_{33}z'^2 + k_2 = 0. \quad (3-23)$$

Die Koeffizienten m_{ij} entsprechen in diesem Fall den Elementen der Matrix \mathbf{M} (Gleichung 3-13). Gleichung 3-23 legt damit die Fehlerfläche der ausgleichenden Ebene fest, durch die im Verfahren nach Burns eine im Intensitätsbild segmentierte Rampe approximiert wird. Zur Bestimmung der Genauigkeit der nach Burns extrahierten Grauwertkanten ist die Standardabweichung der Linie gesucht, die sich aus dem Schnitt der ausgleichenden Ebene mit der Ebene $z = z_0$ ergibt. Im lokalen Koordinatensystem gilt für diese Ebene $z' = 0$. Durch Einsetzen in Gleichung 3-23 ergibt sich ein Hyperbelpaar mit

$$m_{11}x'^2 + 2m_{12}x'y' + m_{22}y'^2 + k_3 = 0 \quad (3-24)$$

Dieses Hyperbelpaar (Abbildung 3.11) definiert die Standardabweichung σ_v von Punkten der Geraden in Normalenrichtung, die durch die Orientierungsunsicherheit σ_ϕ und den Nullpunktfehler σ_D entstehen. Die Koeffizienten

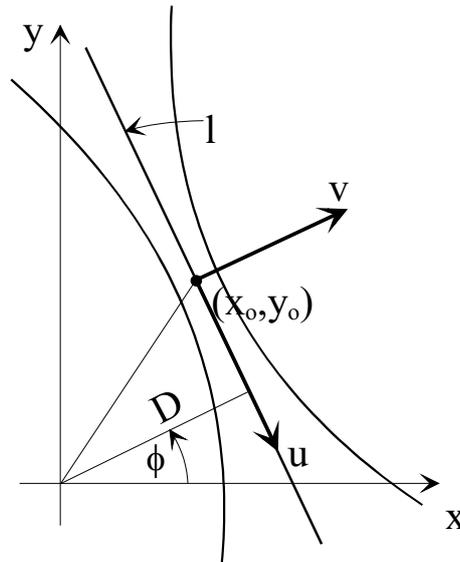


Abbildung 3.11: Fehlerfunktion einer ausgleichenden Geraden, nach [Förstner 1992].

$m_{i,j}$ dieser Gleichung ergeben sich nach 3-13 mit $z_0 = 0$ zu

$$\mathbf{M}_{\text{Gerade}} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2 p_i & \sum_{i=1}^n (x_i - x_0) (y_i - y_0) p_i \\ \sum_{i=1}^n (y_i - y_0) (x_i - x_0) p_i & \sum_{i=1}^n (y_i - y_0)^2 p_i \end{pmatrix} \quad (3-25)$$

Dies entspricht der Varianz-Kovarianz einer ausgleichenden Geraden. Der Algorithmus nach Burns kann damit durch die Bestimmung einer ausgleichenden Geraden durch die Punkte P_i von segmentierten Regionen gleicher Gradientenrichtung approximiert werden. Aus den Elementen der Matrix $\mathbf{M}_{\text{Gerade}}$ lassen sich sowohl die Parameter ϕ , D als auch die Standardabweichungen σ_ϕ und σ_D der nach Burns berechneten Linien bestimmen. Die Steigung ϕ der Geraden ergibt sich aus der Richtung der Hauptachse von $\mathbf{M}_{\text{Gerade}}$ zu

$$\tan 2\phi = \frac{2 \cdot m_{12}}{m_{11} - m_{22}}, \quad (3-26)$$

der Nullpunkt Abstand D ist durch

$$D = x_0 \cos \phi + y_0 \sin \phi \quad (3-27)$$

definiert. Unter der Annahme, daß der Fehler der Richtung ϕ klein ist ($< 15^\circ$), erhält man die Standardabweichung σ_ϕ der Richtung aus dem Verhältnis der Eigenwerte [Förstner 1992].

$$\sigma_\phi = \sqrt{\frac{1}{n-2} \cdot \frac{\mu_2}{\mu_1}} \quad (3-28)$$

Aus dem kleineren Eigenwert μ_2 ergibt sich die Standardabweichung σ_D mit

$$\sigma_D = \sqrt{\frac{\mu_2}{n-2}} = \sigma_\phi \cdot \sqrt{\mu_1}. \quad (3-29)$$

Dieser Wert entspricht der Standardabweichung des Geradenschwerpunktes (x_0, y_0) in Normalenrichtung. In dem lokalen Koordinatensystem (u, v) mit dem Koordinatenursprung im Schwerpunkt (x_0, y_0) , der u -Achse in Geradenrichtung und der v -Achse orthogonal dazu (siehe Abbildung 3.11) ergibt die Standardabweichung von Geradenpunkten in Normalenrichtung eine Hyperbel der Form

$$v^2 = \sigma_v^2 = \sigma_{D(u,v)}^2 + u^2 \sigma_\phi^2. \quad (3-30)$$

In diesem lokalen Koordinatensystem sind D und ϕ unkorreliert. Die Endpunkte der extrahierten Liniensegmente, deren u -Koordinaten der halben Linielänge len entsprechen, besitzen demnach mit $u = 0.5 \cdot len$ eine Varianz in Normalenrichtung von

$$\sigma_v^2 = \sigma_D^2 + 0.25 \cdot len^2 \cdot \sigma_\phi^2. \quad (3-31)$$

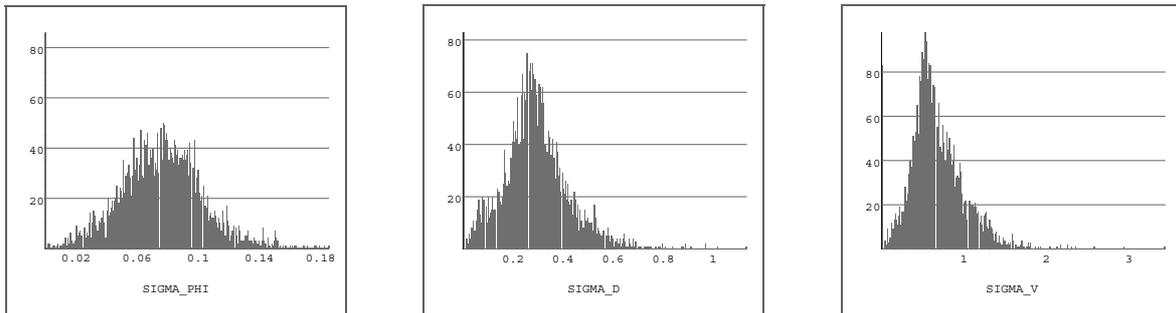


Abbildung 3.12: Häufigkeitsverteilungen der mittleren Fehler der Orientierung σ_ϕ [rad], des Nullpunkt Abstands σ_D [pel] und der Linienendpunkte σ_v [pel] der nach Burns extrahierten Linien.

Abbildung 3.12 zeigt die Verteilung der Standardabweichungen extrahierter Linien. Die Linien wurden aus einem Bildausschnitt extrahiert, der im Rahmen der Arbeit als Testdatensatz verwendet wurde (siehe Kapitel 7, Abbildung 7.1). Das linke Schaubild zeigt den Fehler der Orientierung in [rad], das mittlere Schaubild die Standardabweichung des Nullpunkt Abstands σ_D in Pixel und das rechte Schaubild den Fehler σ_v der Linienendpunkte in Normalenrichtung in Pixel. Als Mittelwerte für alle extrahierten Linien ergaben sich

$$\begin{aligned} \sigma_D &= 0.292 \text{ [pel]} \\ \sigma_\phi &= 4.39^\circ \\ \sigma_v &= 0.676 \text{ [pel]} \end{aligned}$$

Die Standardabweichung der Linienendpunkte in Geradenrichtung u ergibt sich aus dem Rundungsfehler der Pixelpositionen. Dieser ergibt sich aus der Tatsache, daß für die Pixelpositionen nur Integerwerte zur Verfügung stehen. Der Rundungsfehler wird durch die Varianz einer Gleichverteilung $f(x) = \frac{1}{b-a}$ mit

$$\sigma_u = \int_a^b \left(u - \left(\frac{a+b}{2} \right) \right)^2 \frac{1}{b-a} du = \frac{(b-a)^2}{12} \quad (3-32)$$

festgelegt. Für das Intervall von ± 0.5 beträgt der Rundungsfehler demnach $\sigma_u = 0.289$ [pel]. Üblicherweise wird die Standardabweichung eines Linienendpunktes in Geradenrichtung nicht nur durch den Rundungsfehler, sondern vor allem durch das Verhalten des angewandten Extraktionsverfahrens beeinflusst. Segmentierungsverfahren tendieren dazu, häufig zu kurze, seltener zu lange Linien zu extrahieren [Fuchs & Förstner 1994]. Die Standardabweichungen $\sigma_u = 0.289$ [pel] in Geradenrichtung muß deshalb im Hinblick auf weitere Verfahrensschritte unter Vorbehalt betrachtet werden.

Im nächsten Schritt soll die Varianz-Kovarianz-Matrix der Linienendpunkte der extrahierten Bildkanten

$$\mathbf{D}(k(u, v)) = \begin{bmatrix} \sigma_u^2 & \sigma_{uv} \\ \sigma_{vu} & \sigma_v^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_u^2 & 0 \\ 0 & \sigma_v^2 \end{bmatrix} \quad (3-33)$$

von dem lokalen (u, v) -Koordinatensystems in das (x, y) -Bildkoordinatensystem überführt werden. Dies geschieht durch Rotation mit der Matrix

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}. \quad (3-34)$$

Für die Varianz-Kovarianz-Matrix der Linienendpunkte im (x, y) -Bildkoordinatensystem gilt:

$$\begin{aligned} \mathbf{D}(k(x, y)) &= \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y^2 \end{bmatrix} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{D}(k(u, v)) \cdot \mathbf{R}^T = \\ &= \begin{bmatrix} \sigma_u^2 \cos^2 \phi + \sigma_v^2 \sin^2 \phi & (\sigma_v^2 - \sigma_u^2) \sin \phi \cos \phi \\ (\sigma_v^2 - \sigma_u^2) \sin \phi \cos \phi & \sigma_u^2 \sin^2 \phi + \sigma_v^2 \cos^2 \phi \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (3-35)$$

Allgemein hängt die Genauigkeit extrahierter Linien aus Grauwertbildern von Faktoren wie dem Rauschen σ_0 der Grauwerte, der Anzahl n der Pixel, die zur Definition der Kanten verwendet wurden, sowie dem Kontrast, d.h. dem Gradienten der extrahierten Kante ab. Verfahren, die zunächst durch Filteroperationen Pixel auf einer Grauwertkante extrahieren, die dann verknüpft werden, optimieren nur die Position der Linien in Normalenrichtung. Der Algorithmus nach Burns maximiert durch die Bildung von Kantenregionen die Anzahl n der beteiligten Pixel, die zur Berechnung von Lage und Orientierung einer Grauwertkante beitragen. Dadurch wird sowohl die Unsicherheit der Linienposition als auch die Unsicherheit der Linienorientierung minimiert.

3.3.3 Zusammenfassung extrahierter Linien

Nach der Extraktion der geraden Linien im Bild werden, wie in Abschnitt 3.1.2 beschrieben, benachbarte, kollineare Segmente zusammengefaßt. Die Regressionsgerade, die aus den zusammengefaßten Linien entsteht, kann wie in Gleichung 3-17 in der Form

$$(x - x_0) \cdot \cos \phi + (y - y_0) \cdot \sin \phi - D = 0 \quad (3-36)$$

repräsentiert werden. Für die Berechnung der Regressionsgeraden soll der senkrechte Abstand der Linienendpunkte beteiligter Geradensegmente minimal werden. Als Verbesserungsgleichung ergibt sich

$$v_i = (x_i - x_0) \cdot \cos \phi + (y_i - y_0) \cdot \sin \phi - D. \quad (3-37)$$

Die Parameter D , ϕ , x_0 und y_0 der ausgleichenden Gerade lassen sich für diese Aufgabe nach den Gleichungen 3-26 und 3-27 aus den 1. und 2. zentralen Momenten der beteiligten Linienendpunkte x_i und y_i bestimmen.

$$\begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n p_i} \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n x_i p_i \\ \sum_{i=1}^n y_i p_i \end{pmatrix} \quad (3-38)$$

und

$$\mathbf{M}_{\text{Gerade}} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2 p_i & \sum_{i=1}^n (x_i - x_0) (y_i - y_0) p_i \\ \sum_{i=1}^n (y_i - y_0) (x_i - x_0) p_i & \sum_{i=1}^n (y_i - y_0)^2 p_i \end{pmatrix} \quad (3-39)$$

Das Gewicht p_i kann nur verwendet werden, wenn die beteiligten Punkte in x und y gleich genau und unkorreliert sind, d.h. wenn die Bedingungen $\sigma_{x_i} = \sigma_{y_i}$ und $\sigma_{x_i y_i} = 0$ erfüllt sind. Nach der im vorherigen Abschnitt hergeleiteten Gleichung 3-35 ergibt sich jedoch für die Varianz–Kovarianz–Matrix der Endpunkte der nach Burns extrahierten Linien:

$$\mathbf{D}(k(x, y)) = \begin{bmatrix} \sigma_u^2 \cos^2 \phi + \sigma_v^2 \sin^2 \phi & (\sigma_v^2 - \sigma_u^2) \sin \phi \cos \phi \\ (\sigma_v^2 - \sigma_u^2) \sin \phi \cos \phi & \sigma_u^2 \sin^2 \phi + \sigma_v^2 \cos^2 \phi \end{bmatrix}. \quad (3-40)$$

Die geforderten Voraussetzungen sind demnach nicht erfüllt. Deshalb werden zur Bestimmung der Regressionsgeraden aus gruppierten Linien für die Aufstellung der Matrizen der 1. und 2. zentralen Momente nicht nur die Endpunkte beteiligter Linien, sondern alle Punkte $P_i = [x_i \ y_i \ I_i(x, y)]^T$ der zu den zusammengefaßten Linien gehörigen Unterstützungsbereiche, d.h. der segmentierten Regionen gleicher Gradientenrichtung benötigt. Die Berechnung der Geradensegmente erfolgt im Prinzip wie beim im vorigen Abschnitt beschriebenen Verfahren der Linienextraktion nach Burns mit dem Unterschied, daß sich die beteiligten Punkte aus den segmentierten Regionen mehrerer Linien ergeben. Die Orientierung ϕ der Geraden, deren Standardabweichung σ_ϕ , der Nullpunktabstand D und seine Standardabweichung σ_D ergeben sich wie im vorigen Abschnitt analog zu den Gleichungen 3-26 bis 3-31 aus der Matrix $\mathbf{M}_{\text{Gerade}}$ der 2. Momente. Die Varianz–Kovarianz–Matrix der Endpunkte der ausgleichenden Geraden im (x, y) –Bildkoordinatensystem erhält man wiederum durch Rotation des lokalen (u, v) –Koordinatensystems.

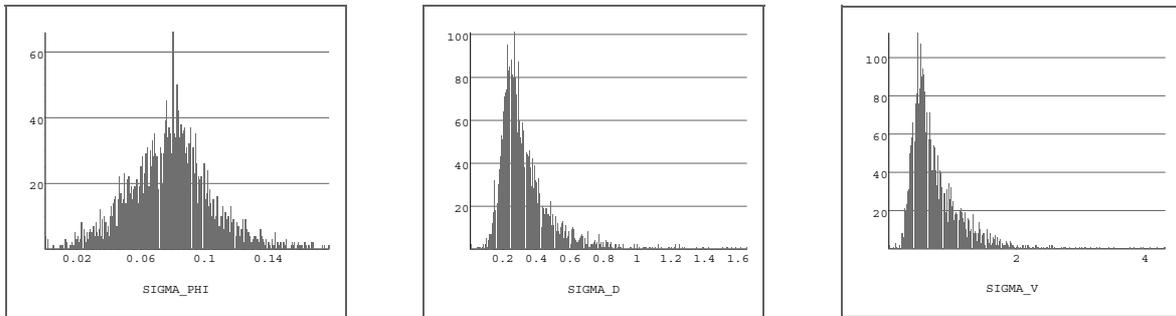


Abbildung 3.13: Häufigkeitsverteilung der mittleren Fehler σ_ϕ [rad], σ_D [pel], σ_v [pel] gruppiert-er Linien.

Abbildung 3.13 zeigt die berechneten Standardabweichungen der gruppierten Linien für die Orientierung in [rad], für den Nullpunktabstand in Pixel und für die Linienendpunkte in Normalenrichtung in Pixel. Für alle gruppierten Grauwertkanten ergeben sich mittlere Standardabweichungen von

$$\begin{aligned} \sigma_D &= 0.332 \text{ [pel]} \\ \sigma_\phi &= 4.47^\circ \\ \sigma_v &= 0.742 \text{ [pel]} \end{aligned}$$

Gegenüber den ursprünglichen Linien (Abbildung 3.12) bedeutet dies nur einen unwesentlichen Genauigkeitsverlust.

3.3.4 Stereozuordnung extrahierter Linien

Als letzter Schritt zur Bestimmung von Raumkanten aus Bildern wird eine Stereozuordnung der extrahierten und gruppierten Grauwertkanten durchgeführt. Nach der Stereozuordnung können die Parameter $\phi_l, D_l, x_{0_l}, y_{0_l}, \phi_r, D_r, x_{0_r}, y_{0_r}$ korrespondierender Linien im linken und rechten Bild als bekannt vorausgesetzt werden. Gesucht sind zunächst die Bildkoordinaten x_l, y_l, x_r und y_r der Endpunkte korrespondierender Linien. Aufgrund der Epipolargeometrie des Stereobildpaars sind die y –Koordinaten der Linienendpunkte im linken und rechten Bild identisch, es gilt $y_l = y_r$. Zur Bestimmung der Bildkoordinaten (x_r, y_r) wird der Endpunkt (x_l, y_l) der Linie im linken Bild in Richtung der x –Achse auf die korrespondierende Linie im rechten Bild projiziert. Der Wert für x_r ergibt sich durch Einsetzen in die Geradengleichung 3-17 der rechten Linie

$$l : (x_r - x_{0_r}) \cdot \cos \phi_r + (y_r - y_{0_r}) \cdot \sin \phi_r - D_r = 0. \quad (3-41)$$

Entspricht der Ursprung des Koordinatensystems dem Schwerpunkt (x_{0_r}, y_{0_r}) der Linie, wird der Nullpunktstand D_r zu Null und es gilt mit $y_l = y_r$

$$(x_r - x_{0_r}) \cdot \cos \phi_r + (y_l - y_{0_r}) \cdot \sin \phi_r = 0. \quad (3-42)$$

Aufgelöst nach x_r ergibt sich so für die Koordinate des korrespondierenden Linienpunktes im rechten Bild

$$x_r = x_{0_r} - (y_l - y_{0_r}) \cdot \tan \phi_r \quad (3-43)$$

Zunächst wird zur Aufstellung der Jacobi-Matrix \mathbf{A} die Gleichung 3-43 nach den fehlerbehafteten Größen ϕ_r , d_r und y_l abgeleitet.

$$\frac{\partial x_r}{\partial \phi_r} = -\frac{y_l - y_{0_r}}{\cos^2 \phi_r} \quad (3-44)$$

$$\frac{\partial x_r}{\partial D_r} = \frac{1}{\cos \phi_r} \quad (3-45)$$

$$\frac{\partial x_r}{\partial y_l} = \sin \phi_r \quad (3-46)$$

Durch die Schwerpunktreduktion mit $x' = x - x_0$ bzw. $y' = y - y_0$ sind ϕ_r und D_r unkorreliert, es gilt $\sigma_{D\phi} = 0$. Die Varianz $\sigma_{x_r}^2$ des Endpunktes einer korrespondierenden Linie ergibt sich aus

$$\begin{aligned} \sigma_{x_r}^2 &= \mathbf{A} \cdot D(k(\phi_r, D_r, y_l)) \cdot \mathbf{A}^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_r}{\partial \phi_r} & \frac{\partial x_r}{\partial D_r} & \frac{\partial x_r}{\partial y_l} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{\phi_r}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{D_r}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{y_l}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial x_r}{\partial \phi_r} & \frac{\partial x_r}{\partial D_r} & \frac{\partial x_r}{\partial y_l} \end{bmatrix}^T \\ &= \frac{(y_l - y_{0_r})^2}{\cos^4 \phi_r} \cdot \sigma_{\phi_r}^2 + \frac{1}{\cos^2 \phi_r} \cdot \sigma_{D_r}^2 + \sin^2 \phi_r \cdot \sigma_{y_l}^2 \end{aligned} \quad (3-47)$$

Der für die Varianz $\sigma_{x_r}^2$ entscheidende Faktor ist der Term $\frac{1}{\cos^2 \phi}$. Für Linien, die kleine Winkel mit den Epipolarlinien einschließen, d.h. für die der Winkel ϕ im Bereich von 90° liegt, wird demnach eine Parallaxenbestimmung sehr ungenau.

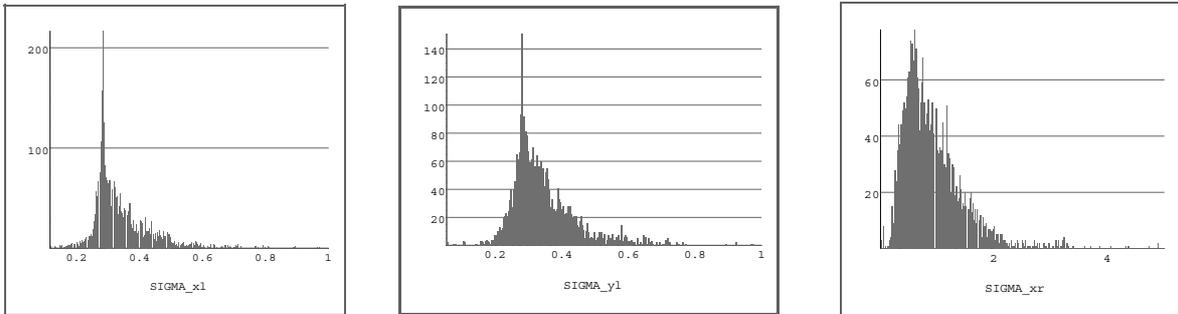


Abbildung 3.14: Häufigkeitsverteilungen der Standardabweichungen σ_{x_l} [pel], σ_{y_l} [pel], σ_{x_r} [pel] der Endpunkte korrespondierender Linien in Bildkoordinaten.

Abbildung 3.14 zeigt die Verteilung der Standardabweichungen korrespondierender Linien in Bildkoordinaten. Im Mittel ergaben sich

$$\sigma_{x_l} = 0.34 \text{ [pel]}$$

$$\sigma_{y_l} = 0.34 \text{ [pel]}$$

$$\sigma_{x_r} = 0.96 \text{ [pel]}$$

Nach der Parallaxenbestimmung der Linien werden die Koordinaten der extrahierten und zugeordneten Linien vom Bild- in das Geländekoordinatensystem transformiert. Da die innere und äußere Orientierung der beiden Bilder als bekannt vorausgesetzt wird, erfolgt diese Berechnung durch einen räumlichen Vorwärtsschnitt. Üblicherweise stehen für den räumlichen Vorwärtsschnitt pro Bild je zwei gemessene Bildkoordinaten zur Bestimmung

der Koordinaten X, Y, Z eines Geländepunktes zur Verfügung. Dieses überbestimmte Problem wird durch eine Ausgleichung nach kleinsten Quadraten gelöst. Da für die Berechnung der Endpunkte korrespondierender Linien im Stereobildpaar von der Bedingung $y_l = y_r$ ausgegangen wurde, stehen als Beobachtungen nur die *drei* Koordinaten x_l, y_l, x_r zur Verfügung. Da das Problem in diesem Fall nicht mehr überbestimmt ist, können die *drei* Geländekoordinaten (X, Y, Z) durch eine direkte Lösung berechnet werden. Um Geländekoordinaten aus den homologen Bildpunktpaaren zu bestimmen, werden beide Bildstrahlen im Geländekoordinatensystem geschnitten. Dazu läßt sich der durch die Bildkoordinaten festgelegte gerichtete Vektor des linken Bildes $[x_l \ y_l \ -c]^T$ bzw. des rechten Bildes $[x_r \ y_r \ -c]^T$ durch die bekannten perspektiven Abbildungsgleichungen mit der Rotationsmatrix

$$\mathbf{R}(\omega, \phi, \kappa) = \begin{bmatrix} \cos \kappa \cos \omega & \cos \kappa \sin \omega + \sin \omega \sin \phi \cos \kappa & \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \phi \cos \kappa \\ -\cos \phi \sin \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \phi \sin \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \phi \sin \kappa \\ \sin \phi & -\sin \omega \cos \phi & \cos \omega \cos \phi \end{bmatrix} \quad (3-48)$$

in das Geländekoordinatensystem rotieren. Der Parameter c entspricht der Brennweite der Kamera. Die Vektoren der in das Geländekoordinatensystem transformierten Bildstrahlen \mathbf{x}_{rot}^l und \mathbf{x}_{rot}^r ergeben sich durch:

$$\begin{bmatrix} X_0^l \\ Y_0^l \\ Z_0^l \end{bmatrix} + s \cdot \begin{bmatrix} x_{rot}^l \\ y_{rot}^l \\ z_{rot}^l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0^l \\ Y_0^l \\ Z_0^l \end{bmatrix} + s \cdot \begin{bmatrix} a_{11}^l & a_{12}^l & a_{13}^l \\ a_{21}^l & a_{22}^l & a_{23}^l \\ a_{31}^l & a_{32}^l & a_{33}^l \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x^l \\ y^l \\ -c \end{bmatrix} \quad (3-49)$$

und

$$\begin{bmatrix} X_0^r \\ Y_0^r \\ Z_0^r \end{bmatrix} + m \cdot \begin{bmatrix} x_{rot}^r \\ y_{rot}^r \\ z_{rot}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0^r \\ Y_0^r \\ Z_0^r \end{bmatrix} + m \cdot \begin{bmatrix} a_{11}^r & a_{12}^r & a_{13}^r \\ a_{21}^r & a_{22}^r & a_{23}^r \\ a_{31}^r & a_{32}^r & a_{33}^r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x^r \\ y^r \\ -c \end{bmatrix} \quad (3-50)$$

Dabei sind $[X_0^l \ Y_0^l \ Z_0^l]^T$ und $[X_0^r \ Y_0^r \ Z_0^r]^T$ die Geländekoordinaten des linken bzw. des rechten Projektionszentrums der Kamera. Um die Stereozuordnung der Bildlinien zu erleichtern, wurden Bildausschnitte verwendet, die in Epipolargeometrie vorlagen. Während der Transformation der Bildausschnitte in Epipolargeometrie wurden die Bilder in Nadiraufnahmen transformiert. Dadurch vereinfachen sich die Rotationsmatrizen zu

$$\begin{bmatrix} a_{11}^r & a_{12}^r & a_{13}^r \\ a_{21}^r & a_{22}^r & a_{23}^r \\ a_{31}^r & a_{32}^r & a_{33}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^l & a_{12}^l & a_{13}^l \\ a_{21}^l & a_{22}^l & a_{23}^l \\ a_{31}^l & a_{32}^l & a_{33}^l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-51)$$

Für die in Epipolargeometrie transformierten Bilder gilt zudem $Z_0^r = Z_0^l$ sowie $x_{0l} = y_{0l} = x_{0r} = y_{0r} = 0$. Aus dem Schnitt beider Bildstrahlen ergeben sich nach Kraus [1991] für die Koordinaten X, Y, Z eines Punktes folgende Beziehungen

$$X = X_{0l} + (Z - Z_{0l}) k_{xl} \quad (3-52)$$

$$X = X_{0r} + (Z - Z_{0r}) k_{xr} \quad (3-53)$$

$$Y = Y_{0l} + (Z - Z_{0l}) k_{yl} \quad (3-54)$$

Die Größen k werden durch die bekannten Elementen der inneren und äußeren Orientierung sowie die gemessenen Bildkoordinaten festgelegt. Nach Gleichung 3-51 ergeben sich zudem folgende Vereinfachungen

$$k_{xl} = \frac{a_{11}^l \cdot (x_l - x_{0l}) + a_{12}^l \cdot (y_l - y_{0l}) + a_{13}^l \cdot -c}{a_{31}^l \cdot (x_l - x_{0l}) + a_{32}^l \cdot (y_l - y_{0l}) + a_{33}^l \cdot -c} = \frac{x_l}{-c} \quad (3-55)$$

$$k_{yl} = \frac{a_{21}^l \cdot (x_l - x_{0l}) + a_{22}^l \cdot (y_l - y_{0l}) + a_{23}^l \cdot -c}{a_{31}^l \cdot (x_l - x_{0l}) + a_{32}^l \cdot (y_l - y_{0l}) + a_{33}^l \cdot -c} = \frac{y_l}{-c} \quad (3-56)$$

$$k_{xr} = \frac{a_{11}^r \cdot (x_r - x_{0r}) + a_{12}^r \cdot (y_r - y_{0r}) + a_{13}^r \cdot -c}{a_{31}^r \cdot (x_r - x_{0r}) + a_{32}^r \cdot (y_r - y_{0r}) + a_{33}^r \cdot -c} = \frac{x_r}{-c} \quad (3-57)$$

Aus Gleichung 3-52 und 3-53 berechnet sich die Höhe Z zu

$$Z = \frac{X_{0r} - X_{0l} + Z_{0l}k_{xl} - Z_{0r}k_{xr}}{k_{xl} - k_{xr}} = \frac{(X_{0r} - X_{0l}) \cdot c + Z_{0r}x_r - Z_{0l}x_l}{x_r - x_l} \quad (3-58)$$

Eingesetzt in Gleichung 3-52) ergibt sich die Koordinate X

$$\begin{aligned} X &= X_{0l} + (Z - Z_{0l}) k_{xl} = X_{0l} - (Z - Z_{0l}) \cdot \frac{x_l}{c} \\ &= X_{0l} - \frac{(X_{0r} - X_{0l}) \cdot c + Z_{0r} \cdot x_r - Z_{0l} \cdot x_l}{x_r - x_l} \cdot \frac{x_l}{c} + \frac{Z_{0l} \cdot x_l}{c} \end{aligned} \quad (3-59)$$

und entsprechend aus Gleichung 3-54 die Koordinate Y

$$\begin{aligned} Y &= Y_{0l} + (Z - Z_{0l}) k_{yl} = Y_{0l} - (Z - Z_{0l}) \frac{y_l}{c} \\ &= Y_{0l} - \frac{(X_{0r} - X_{0l}) \cdot c + Z_{0r} \cdot x_r - Z_{0l} \cdot x_l}{x_r - x_l} \cdot \frac{y_l}{c} + \frac{Z_{0l} \cdot y_l}{c}. \end{aligned} \quad (3-60)$$

Die Fehler berechneter Koordinaten, die durch die Aerotriangulation und somit durch die fehlerbehafteten äußeren Orientierungsparameter $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa$ entstehen, liegen im Bild im Bereich von $\sigma_{xy} = \pm 5 \mu\text{m}$ für die Lage bzw. bei $\sigma_z = \pm 0.005\%$ der Aufnahmeentfernung für die Höhe [Ackermann 1979], [Kraus 1991]. Damit sind die Einflüsse der Aerotriangulation auf den Fehler der Geländekoordinaten von Linienendpunkten vernachlässigbar. Durch die Linienextraktion treten bereits Standardabweichungen im Bereich von 0.3 bis 0.4 Pixel auf (siehe Abbildung 3.14), was bei der verwendeten Auflösung von $60 \mu\text{m}$ einen Fehler der Linienendpunkte von $20 \mu\text{m}$ ergibt. Für die Fehlerrechnung des Schnittpunktes der Bildstrahlen im Geländekoordinatensystem wird deshalb davon ausgegangen, daß die Parameter der äußeren Orientierung fehlerfrei gegeben sind. Zunächst sollen die Werte der Varianz-Kovarianz-Matrix

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \sigma_{x_l}^2 & \sigma_{x_l y_l} & \sigma_{x_l x_r} \\ \sigma_{y_l x_l} & \sigma_{y_l}^2 & \sigma_{y_l x_r} \\ \sigma_{x_r x_l} & \sigma_{x_r y_l} & \sigma_{x_r}^2 \end{bmatrix} \quad (3-61)$$

der Bildkoordinaten x_l, y_l, x_r bestimmt werden, die zur Berechnung der Standardabweichungen σ_X, σ_Y und σ_Z heranzuziehen sind. Die Werte $\sigma_{x_l}^2, \sigma_{x_l y_l}$ und $\sigma_{y_l}^2$ ergeben sich nach Gleichung 3-35 zu:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{x_l}^2 & \sigma_{x_l y_l} \\ \sigma_{y_l x_l} & \sigma_{y_l}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{u_l}^2 \cos^2 \phi_l + \sigma_{v_l}^2 \sin^2 \phi_l & (\sigma_{v_l}^2 - \sigma_{u_l}^2) \sin \phi_l \cos \phi_l \\ (\sigma_{v_l}^2 - \sigma_{u_l}^2) \sin \phi_l \cos \phi_l & \sigma_{u_l}^2 \sin^2 \phi_l + \sigma_{v_l}^2 \cos^2 \phi_l \end{bmatrix} \quad (3-62)$$

Die Varianz $\sigma_{x_r}^2$ wird nach Gleichung 3-47 durch

$$\sigma_{x_r}^2 = \frac{(y_l - y_{0r})^2}{\cos^4 \phi_r} \cdot \sigma_{\phi_r}^2 + \frac{1}{\cos^2 \phi_r} \cdot \sigma_{D_r}^2 + \sin^2 \phi_r \cdot \sigma_{y_l}^2 \quad (3-63)$$

berechnet. Da x_l und x_r unkorreliert sind, gilt

$$\sigma_{x_l x_r} = \sigma_{x_r x_l} = 0. \quad (3-64)$$

Nach Gleichung 3-43 sind x_r und y_l linear voneinander abhängig, der Korrelationskoeffizient ergibt sich zu $\rho_{x_r y_l} = -1$. Die Kovarianz $\sigma_{x_r y_l}$ ist somit

$$\sigma_{x_r y_l} = -\sigma_{x_r} \sigma_{y_l}. \quad (3-65)$$

Die Jacobi-Matrix $\mathbf{A} = \left[\frac{\partial Z}{\partial x_l} \quad \frac{\partial Z}{\partial y_l} \quad \frac{\partial Z}{\partial x_r} \right]$ für die Berechnung der Standardabweichung σ_Z ergibt sich durch Ableitung der Gleichung 3-58 zu

$$\frac{\partial Z}{\partial x_l} = \frac{Z_{0l} (x_l - x_r) \cdot (X_{0r} - X_{0l} + Z_{0l} x_l - Z_{0r} x_r)}{(x_l - x_r)^2} \quad (3-66)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial x_r} = \frac{-Z_{0r} (x_l - x_r) \cdot (X_{0l} - X_{0r} - Z_{0l} x_l + Z_{0r} x_r)}{(x_l - x_r)^2} \quad (3-67)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial y_l} = 0. \quad (3-68)$$

Die Varianz σ_Z^2 läßt sich durch Fehlerfortpflanzung mit $\mathbf{A} \cdot \mathbf{Q} \cdot \mathbf{A}^T$ wie folgt berechnen

$$\sigma_Z^2 = \left(\frac{\partial Z}{\partial x_l} \right)^2 \sigma_{x_l}^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial x_r} \right)^2 \sigma_{x_r}^2. \quad (3-69)$$

Analog dazu werden die Elemente der Jacobi-Matrix für die Berechnung der Standardabweichung σ_X durch partielle Ableitung der Gleichung 3-59 gebildet.

$$\frac{\partial X}{\partial x_l} = -\frac{\partial Z}{\partial x_l} \cdot \frac{x_l}{c} + \frac{Z - Z_{0l}}{c} \quad (3-70)$$

$$\frac{\partial X}{\partial x_r} = -\frac{\partial Z}{\partial x_r} \cdot \frac{x_l}{c} \quad (3-71)$$

$$\frac{\partial X}{\partial y_l} = 0 \quad (3-72)$$

Die Varianz der Geländeordinate X berechnet sich demnach aus

$$\sigma_X^2 = \left(\frac{\partial X}{\partial x_l}\right)^2 \sigma_{x_l}^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial x_r}\right)^2 \sigma_{x_r}^2 = \left(\frac{\partial Z}{\partial x_l} \cdot \frac{x_l}{c} + \frac{Z - Z_{0l}}{c}\right)^2 \sigma_{x_l}^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial x_r} \cdot \frac{x_l}{c}\right)^2 \sigma_{x_r}^2. \quad (3-73)$$

Entsprechend ergibt sich aus den partiellen Ableitungen

$$\frac{\partial Y}{\partial x_l} = -\frac{\partial Z}{\partial x_l} \cdot \frac{y_l}{c} + \frac{Z - Z_{0l}}{c} \quad (3-74)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial x_r} = -\frac{\partial Z}{\partial x_r} \cdot \frac{y_l}{c} \quad (3-75)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial y_l} = \frac{Z - Z_{0l}}{c} \quad (3-76)$$

der Gleichung 3-60 für die Varianz der Y -Koordinate

$$\begin{aligned} \sigma_Y^2 &= \left(\frac{\partial Y}{\partial x_l}\right)^2 \cdot \sigma_{x_l}^2 + 2 \cdot \frac{\partial Y}{\partial x_l} \frac{\partial Y}{\partial x_r} \sigma_{x_l y_l} + \left(\frac{\partial Y}{\partial x_r}\right)^2 \sigma_{x_r}^2 + 2 \cdot \frac{\partial Y}{\partial x_r} \frac{\partial Y}{\partial y_l} \sigma_{x_r y_l} + \left(\frac{\partial Y}{\partial y_l}\right)^2 \sigma_{y_l}^2 \\ &= \left(\frac{\partial Z}{\partial x_l} \cdot \frac{y_l}{c} + \frac{Z - Z_{0l}}{c}\right)^2 \cdot \sigma_{x_l}^2 + 2 \left(\frac{\partial Z}{\partial x_l} \cdot \frac{y_l}{c} + \frac{Z - Z_{0l}}{c}\right) \left(\frac{\partial Z}{\partial x_r} \cdot \frac{y_l}{c}\right) \cdot \sigma_{x_l y_l} \\ &+ \left(\frac{\partial Z}{\partial x_r} \cdot \frac{y_l}{c}\right)^2 \sigma_{x_r}^2 - 2 \left(\frac{\partial Z}{\partial x_r} \cdot \frac{y_l}{c}\right) \left(\frac{Z - Z_{0l}}{c}\right) \sigma_{x_r y_l} + \left(\frac{Z - Z_{0l}}{c}\right)^2 \sigma_{y_l}^2. \end{aligned} \quad (3-77)$$

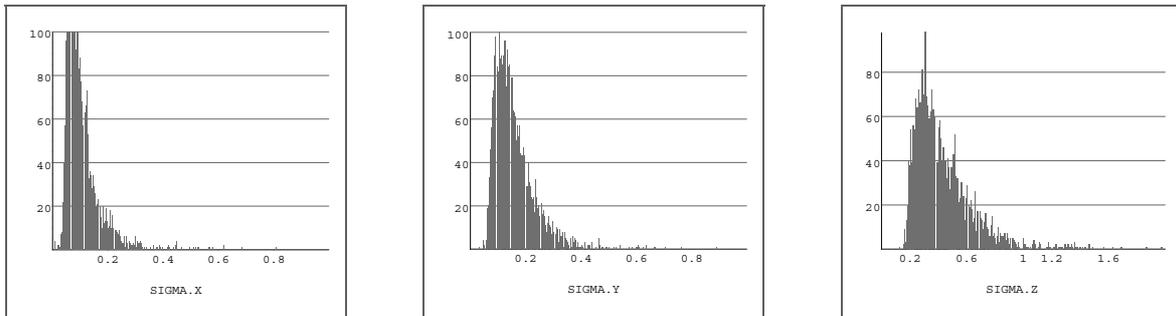


Abbildung 3.15: Häufigkeitsverteilungen der Standardabweichungen der Geländekoordinaten σ_X [m], σ_Y [m], σ_Z [m] von Linienendpunkten aus einem Stereobildpaar.

Abbildung 3.15 zeigt für einen in dieser Arbeit verwendeten Bildausschnitt die berechneten Standardabweichungen der Endpunkte von Raumkanten aus der Stereozuordnung von Grauwertkanten. Die Bildbasis des Stereobildpaares betrug 344 m, die Brennweite der eingesetzten Kamera war 0.153 m und die Pixelgröße am Boden lag im Bereich von 50 cm. Im Mittel betrug die Standardabweichungen

$$\sigma_X = 0.105 \text{ [m]}$$

$$\sigma_Y = 0.156 \text{ [m]}$$

$$\sigma_Z = 0.435 \text{ [m]}$$

Die Genauigkeit von Raumkanten, die durch eine Stereozuordnung extrahierter Bildkanten bestimmt werden, hängt von ihrem Winkel zu den Epipolarlinien ab; Raumkanten, die in einer Epipolarebene liegen, können durch

Stereozuordnung nicht bestimmt werden. Wird eine Befliegung mit 60% Längs- und 60% Querüberdeckung durchgeführt, existiert für jedes Bild ein Stereopartner in zwei Richtungen, die senkrecht zueinander liegen. In diesem Fall kann z.B. eine Zuordnung abhängig von der Orientierung der Bildkanten wahlweise in Rechts- oder Hoch-Richtung durchgeführt werden. Dadurch wird eine relativ genaue Bestimmung aller Raumkanten möglich. Eine solche Mehrfachüberdeckung stand im Rahmen der Arbeit nicht zur Verfügung. Es zeigte sich aber, daß die geometrische Genauigkeit der Linien aus einem Stereobildpaar vor allem im Hinblick auf die angestrebte Detailliertheit der Gebäuderekonstruktion den Anforderungen genügt.

3.3.5 Linien aus Höhendaten

Als Datengrundlage für die Extraktion von Raumkanten können neben Stereobildpaaren auch digitale Höhenmodelle (DHM), d.h. geometrische Beschreibungen der Geländeoberfläche und der sich darauf befindenden Objekte verwendet werden. Da die Höhendaten $Z(x, y)$ ebenso wie die Bilddaten in Rasterform vorliegen, reicht es für die Extraktion von DHM-Bruchkanten aus, die bestehenden Algorithmen zur Extraktion von Grauwertkanten aus Bildern geringfügig anzupassen. Zur Bestimmung von DHM-Bruchkanten ließ sich das Verfahren von Burns so modifizieren, daß Linien nicht an Neigungsmaxima, sondern an Krümmungsmaxima extrahiert wurden. Für die Berechnung des Richtungsbildes, das als Grundlage für die Segmentierung von Einflußbereichen für extrahierte Linien dient, wurde nicht mehr die Gradienten- sondern die Krümmungsrichtung des DHM-'Bildes' verwendet. Für die Segmentierung werden Regionen von Pixeln in 4er-Nachbarschaften gebildet, deren Krümmungsrichtung

$$\varphi = 0.5 \cdot \arctan \left(\frac{2 \frac{\partial Z}{\partial x} \frac{\partial Z}{\partial y}}{\frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2}} \right) \quad (3-78)$$

mit

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 2 & -4 & 2 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ -2 & -4 & -2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-79)$$

innerhalb eines Bereichs von $\pm 22.5^\circ$ gleich ist. Die ausgleichende Ebene wird wiederum durch eine kleinste Quadrate Schätzung bestimmt, die den senkrechten Abstand der beteiligten Punkte $P_i = [x_i \ y_i \ Z_i(x, y)]^T$ einer segmentierten Region minimiert. Das Gewicht p_i der einzelnen Punkte ergibt sich bei der Extraktion von DHM-Bruchkanten aus dem Betrag der Krümmung

$$p_i = \left| \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2} \right|. \quad (3-80)$$

Bis auf die unterschiedliche Berechnung des Richtungsbildes und des Gewichts der einzelnen Punkte, ist die Linienextraktion identisch zur Extraktion der Grauwertkanten. Zunächst werden Linien an den Krümmungsmaxima durch das modifizierte Verfahren nach Burns extrahiert, anschließend werden benachbarte, parallele Linien zusammengefaßt.

Der Fehler σ_v in Normalenrichtung ergibt sich analog zur Gleichung 3-31 mit der Linienlänge len der Linien zu

$$\sigma_v^2 = \sigma_D^2 + 0.25 \cdot len^2 \cdot \sigma_\phi^2. \quad (3-81)$$

Die Standardabweichungen σ_D des Nullpunktabstands und σ_ϕ der Orientierung werden entsprechend den Gleichungen 3-29 und 3-28 aus den Eigenwerten der Matrix der 2. zentralen Momente bestimmt.

$$\mathbf{M}_{\text{Gerade}} = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2 p_i & \sum_{i=1}^n (x_i - x_0) (y_i - y_0) p_i \\ \sum_{i=1}^n (y_i - y_0) (x_i - x_0) p_i & \sum_{i=1}^n (y_i - y_0)^2 p_i \end{pmatrix} \quad (3-82)$$

Entsprechend dem Fehler der Grauwertkanten in Geradenrichtung läßt sich der Fehler $\sigma_u = 0.283 [pel]$ einer DHM-Bruchkante in Geradenrichtung nach Gleichung 3-32 aus dem Rundungsfehler der Pixelposition berechnen, der durch die diskrete Rasterung des digitalen Höhenmodells entsteht.

Analog zu den gruppierten Bildlinien ergibt sich die Varianz–Kovarianz–Matrix der Linienendpunkte nach Gleichung 3-35 zu

$$\begin{bmatrix} \sigma_X^2 & \sigma_{XY} \\ \sigma_{YX} & \sigma_Y^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_u^2 \cos^2 \phi + \sigma_v^2 \sin^2 \phi & (\sigma_v^2 - \sigma_u^2) \sin \phi \cos \phi \\ (\sigma_v^2 - \sigma_u^2) \sin \phi \cos \phi & \sigma_u^2 \sin^2 \phi + \sigma_v^2 \cos^2 \phi \end{bmatrix}. \quad (3-83)$$

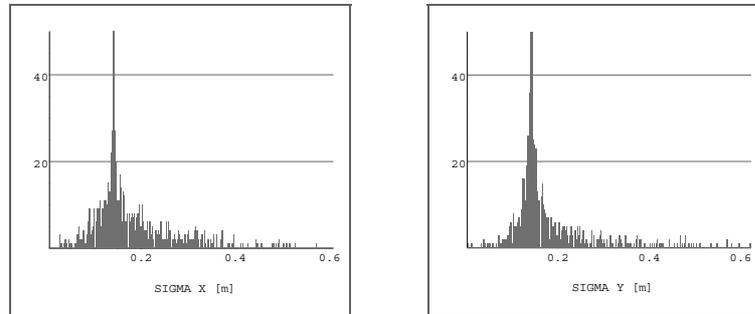


Abbildung 3.16: Häufigkeitsverteilungen der Standardabweichungen σ_X [m], σ_Y [m] extrahierter DHM–Bruchkanten.

Die Extraktion der DHM–Bruchkanten basiert auf Höhendaten, die durch eine automatische Stereobildzuordnung berechnet wurden. Das DHM erstreckt sich über bebauten Gebiet und besitzt eine Rasterweite von 0.5 m. Die Standardabweichungen σ_X [m] und σ_Y [m] der Endpunkte extrahierter und gruppiertes DHM–Bruchkanten sind in Abbildung 3.16 dargestellt. Im Mittel ergaben sich die Standardabweichungen zu

$$\begin{aligned} \sigma_X &= 0.177 \text{ [m]} \\ \sigma_Y &= 0.178 \text{ [m]}. \end{aligned}$$

Die berechneten Standardabweichungen werden analog zum Fehler der Linienextraktion aus Bildern vor allem durch den Rundungsfehler der Pixelpositionen, d.h. in diesem Fall der Rasterpunkte des DHM, bestimmt. Werden Linien aus dem DHM extrahiert, kann die Höhe Z der Linienendpunkte direkt abgegriffen werden. Die Standardabweichung $\sigma_Z = 0.061$ m ergibt sich deshalb aus der theoretischen Höhengenaugkeit des DHM. Die Genauigkeit von Höhen aus der Stereobildauswertung wird bei Überweitwinkelaufnahmen 0.01 % der Aufnahmeentfernung angegeben [Kraus 1991]. Durch die – im Vergleich zu Bilddaten – geringere Meßpunktdichte eines DHM ist die theoretische Genauigkeit der Linien aus Höhendaten nur geringfügig ungenauer als die Genauigkeit der Linien aus Bilddaten.

Die tatsächliche Genauigkeit der DHM–Bruchkanten hängt jedoch vor allem davon ab, wie gut die Oberfläche des Geländes und der darauf befindlichen Objekte von dem DHM beschrieben wird. Fehler, die durch die eigentliche Linienextraktion entstehen, sind häufig von untergeordneter Bedeutung. Das angegebene Genauigkeitsmaß von 0.01 % der Flughöhe gilt innerhalb eines DHM nur für Bereiche, in denen die Glattheitsannahme für die berechnete Oberfläche nicht verletzt wird und in denen ausreichend Textur vorhanden ist. Aufgrund der – vor allem bei der DHM–Generierung durch automatische Stereobildzuordnung – in bebauten Gebieten auftretenden Probleme, sind die Linien aus der Krümmungsanalyse des DHM allgemein weniger genau als lineare Segmente aus der Stereozuordnung extrahierter Bildkanten. Der Vorteil der DHM–Bruchkanten liegt vor allem darin, daß sie mit größerer Wahrscheinlichkeit Dachbruchkanten darstellen als Linien aus der Stereozuordnung, da Grauwertkanten auch durch Schatten oder Textur entstehen können. Eine tiefergehende Untersuchung des Potentials beider Extraktionsverfahren für die Gebäuderekonstruktion wird anhand realer Testdatensätze in Kapitel 7.2 durchgeführt. Zunächst wird im folgenden Kapitel die weitere Auswahl der extrahierten linearen Segmente vorgestellt, durch die für die Gebäuderekonstruktion wichtige Linien herausgefiltert werden sollen.

4 Auswahl linearer Segmente

Ziel der Merkmalsextraktion ist es, aus den zur Verfügung stehenden Bild- und Höhendaten dreidimensionale lineare Segmente zu extrahieren, die eine nachfolgende Rekonstruktion der Gebäude ermöglichen. Lineare Segmente, die mit Hilfe der in Kapitel 3 beschriebenen Verfahren bestimmt werden, gehen bei der Krümmungsanalyse von Höhendaten auf Bruchkanten von Oberflächen beziehungsweise bei der Stereozuordnung extrahierter Grauwertkanten auf Objektgrenzen, Bruchkanten, Schatten, Reflexionen oder Fehlzuordnungen zurück. Um den Aufwand für die weitere Bearbeitung zu verringern, ist es notwendig, aus der zum Teil sehr großen Menge von linearen Segmenten durch einfache und schnelle Verfahren solche Elemente zu selektieren, die mit relativ großer Wahrscheinlichkeit auf Bruchkanten oder Grenzen eines Gebäudes zurückzuführen sind.

Eine Möglichkeit, dieses Ziel zu erreichen, besteht in der Analyse der Höhendaten. Gebäude sind zusammenhängende Objekte mit einer begrenzten räumlichen Ausdehnung, die aus der Geländeoberfläche herausragen. Sie bilden sich demnach in einem DHM als lokal begrenzte Höhenmaxima ab. Obwohl dieses Gebäudemodell sehr allgemein ist und damit auch für viele andere Objekte gilt, kann es zur Festlegung von Suchbereichen genutzt werden. Dadurch lassen sich weitere Bearbeitungsschritte auf solche linearen Segmente beschränken, die innerhalb dieser ausgewählten Regionen liegen.

Neben der Analyse der Höhendaten erfolgt durch die Suche nach gebäudetypischen Strukturen eine zusätzliche Auswahl linearer Segmente. Aus der Luft sind vor allem die Dächer der Gebäude zu beobachten, die häufig rechteckige, ebene Flächen im Objektraum definieren. Aus diesem Grund können Rechtecke als typische Strukturen für die Präsenz von Gebäuden in Luftbildern oder DHM betrachtet werden. Die Suche nach diesen Strukturen erfolgt durch die Gruppierung der extrahierten linearen Segmente, die in Abschnitt 4.2 beschrieben wird. Die Gruppierung lenkt dadurch die Aufmerksamkeit (focus of attention) des anschließenden Zuordnungsprozesses auf solche Kombinationen linearer Segmente, denen mit relativ großer Wahrscheinlichkeit ein Gebäude zugrunde liegt. Neben der reinen Filterung der Primitive dient die Gruppierung auch dazu, solche Elemente zusammenzufassen, die zu *einem* Gebäude gehören. In den nachfolgenden Schritten können diese Elemente dann demselben Gebäudemodell zugeordnet werden. Die Gruppierung stellt deshalb einen sehr wichtigen Vorverarbeitungsschritt für den Rekonstruktionsprozeß dar.

4.1 Gebäudedetektion durch die Analyse von Höhendaten

Der Ansatz der Gebäudedetektion aus Höhendaten basiert auf der simplen Annahme, daß Gebäude höher als die sie umgebende topographische Geländeoberfläche sind. Durch die Detektion von Höhendiskontinuitäten, deren Ausdehnung ungefähr der erwarteten Größe und Kompaktheit von Gebäuden entspricht, können somit relativ sichere Hinweise auf die Präsenz von Gebäuden gewonnen werden.

4.1.1 Segmentierung von Höhendaten

Eine Möglichkeit, lokale Höhenmaxima zu detektieren, besteht in der Verwendung von Höhenlinien [Haala 1994]. Die Ableitung der Höhenlinien aus dem DHM kann dabei durch Standardprogrammpakete erfolgen. Jede geschlossene Höhenlinie definiert im DHM ein Gebiet, dessen Umringspolygon eine konstante Höhe besitzt. Diese Linien sind in Abbildung 4.1 dem DHM als schwarze Polygone überlagert. Für jedes dieser Gebiete werden Formmerkmale wie *Fläche* und *Kompaktheit*¹ berechnet. Um zu bestimmen, ob es sich um ein lokales Höhenmaximum oder -minimum handelt, wird die Differenz der mittleren Höhe im umschlossenen Gebiet zu der Höhe des Umringspolygons bestimmt. Anhand dieser Werte werden solche Gebiete ausgewählt, deren Fläche den erwarteten Gebäudegrößen entsprechen, die kompakt sind und die ein lokales Höhenmaximum repräsentieren. Die resultierenden Regionen, d.h. die ausgewählten Isolinien, sind in dem Höhenbild der Abbildung 4.1 als schwarze Linien dargestellt. Um das Ergebnis des Verfahrens besser beurteilen zu können, wurden die detektierten Regionen anschließend in den zugehörigen Bildausschnitt projiziert (Abbildung 4.2).

4.1.2 Morphologische Bearbeitung von Höhendaten

¹ $\kappa = 16 \cdot \frac{\text{Fläche}}{\text{Umfang}^2}$

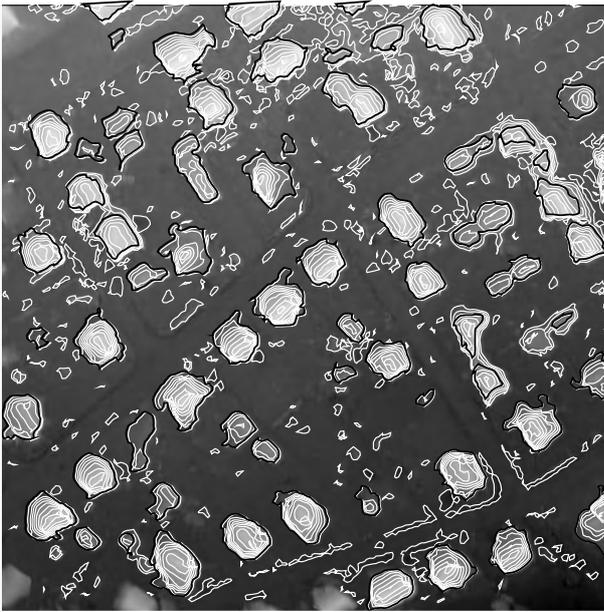


Abbildung 4.1: DHM mit berechneten Isolinien (weiß) und ausgewählten Isolinien (schwarz).



Abbildung 4.2: Bildausschnitt mit detektierten Gebäudehypothesen.

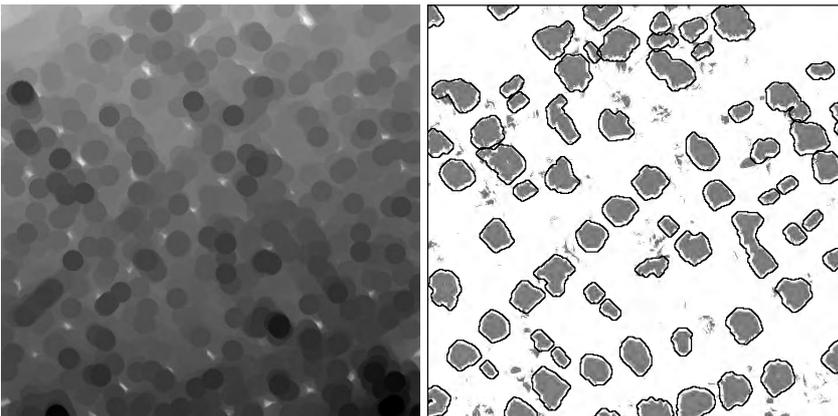


Abbildung 4.3: DHM nach morphologischem Opening
 $\bar{z} = z \circ k$.

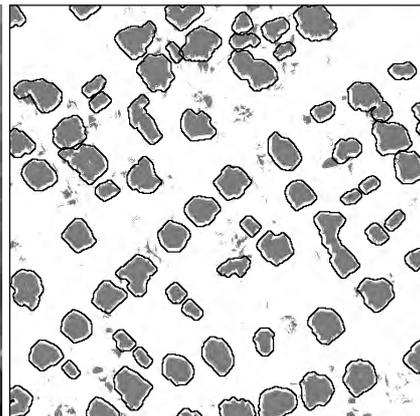


Abbildung 4.4: Binarisiertes Differenzbild $z - \bar{z}$ mit ausgewählten Gebieten.



Abbildung 4.5: Bildausschnitt mit detektierten Gebäudehypothesen.

Die Suche nach lokalen Höhenmaxima zur Detektion von Gebäuden kann alternativ durch eine morphologische Bearbeitung des DHM erfolgen [Weidner & Förstner 1995]. Hier werden Verfahren der mathematischen Morphologie für Grauwertbilder auf das Höhenbild angewendet, um aus dem gemessenen DHM die Geländeoberfläche bzw. lokale Maxima zu extrahieren. Die morphologische Verarbeitung von Grauwertbildern (in diesem Fall von Digitalen Höhenmodellen) wird durch die Erweiterung der binären morphologischen Operationen Dilatation, Erosion, Opening und Closing mit Minimum und Maximum Operationen ermöglicht [Haralick, Sternberg & Zhuang 1987]. Für die Bestimmung der Geländeoberfläche werden durch eine morphologische Erosion

$$\bar{z} = z \ominus k = \min z(x, y), k(x, y)$$

gefolgt von einer morphologischen Dilatation

$$\bar{\bar{z}} = \bar{z} \oplus k = \max z(x, y), k(x, y)$$

lokale Maxima im DHM abgetragen. Die Kombination beider Schritte definiert ein Opening

$$\bar{\bar{z}} = z \circ k.$$

Die Größe der strukturierenden Funktion k , d.h. des morphologischen Operators, der für dieses Opening verwendet wird, richtet sich nach der erwarteten maximalen Größe der Gebäude. Um durch das Opening die Gebäude aus dem DHM zu eliminieren, muß sichergestellt werden, daß der morphologische Operator nicht komplett in den Gebäudeumriß paßt. Abbildung 4.3 zeigt das ursprüngliche DHM (siehe Abbildung 4.1), das dazu mit einem kreisförmigen Operator mit einem Durchmesser von 10 m bearbeitet wurde. Lokale Erhöhungen mit einer geringeren Breite als 10 m sind in dieser Fläche eliminiert, d.h. unter der Annahme, daß die Geländeoberfläche glatter als das gemessene DHM (d.h. die Geländeoberfläche einschließlich der Gebäude) ist, ergeben sich aus der Differenz des gemessenen DHM (Abbildung 4.1) und des morphologischen bearbeiteten DHM (Abbildung 4.3) die auf einer ebenen Fläche aufgesetzten Gebäude. Abbildung 4.4 zeigt dieses Differenzbild, das mit einem Schwellwert für die angenommene minimale Gebäudehöhe von 3 m binarisiert wurde. Kleinräumige Störungen, verursacht durch Objekte geringer Größe, die aus der Geländeoberfläche ragen, sind in diesem Differenzbild ebenfalls enthalten. Um diese kleinen Bereiche durch einen Schwellwert² für die Fläche zu eliminieren, werden in dem Binärbild die Pixel zu Regionen zusammengefaßt. Die verbleibenden Regionen definieren dann Gebiete, in denen Gebäude erwartet werden. Um eine Art Sicherheitsbereich zu schaffen, können die ursprünglichen Gebietsgrenzen des Binärbildes vergrößert werden. Diese Regionen sind in den Abbildungen 4.4 und 4.5 als schwarze bzw. weiße Polygone dargestellt.

4.1.3 Bestimmung der Geländeoberfläche

Aus der Luft sind vor allem die Dächer der Gebäude zu beobachten. In Folge dessen sind aus Bild- bzw. Höhendaten extrahierte dreidimensionale lineare Segmente, die auf die Abbildung von Gebäuden zurückgehen, in den meisten Fällen Bruchkanten der Dächer. Steht eine Beschreibung der Geländeoberfläche zur Verfügung, kann aus dem Wissen, daß Dachkanten oberhalb des Geländes liegen müssen, eine weitere Auswahl erfolgen.

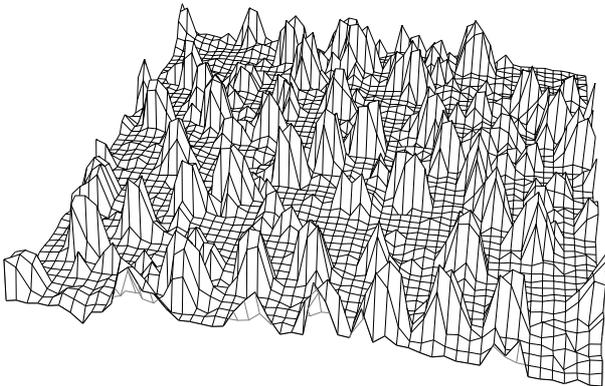


Abbildung 4.6: Gemessenes DHM.

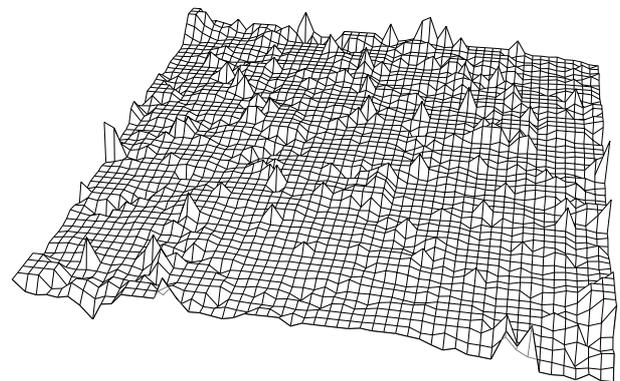


Abbildung 4.7: Abgeleitete Geländeoberfläche (DGM).

Die morphologische Bearbeitung des gemessenen DHM zur Gebäudedetektion liefert bereits näherungsweise die Geländeoberfläche als Zwischenergebnis. Erfolgt die Gebäudedetektion durch die Analyse von Höhenlinien (Abschnitt 4.1.1), müssen zur Bestimmung des Digitalen Geländemodells die detektierten lokalen Höhenmaxima eliminiert werden. Dazu werden die Höhen innerhalb der lokalen Höhenmaxima auf den Höhenwert ihres Umringspolygons gesetzt. Abbildung 4.6 zeigt eine Perspektivansicht des DHM, das bereits in Abbildung 4.1 als Grauwertrepräsentation dargestellt ist. Abbildung 4.7 stellt das daraus abgeleitete DGM dar, das durch die Elimination der lokalen Höhenmaxima berechnet wurde. In diesem Fall erfolgte die Bestimmung der lokalen Erhebungen durch die Analyse der Höhenlinien. Kleinere Störungen des DHM z.B. durch Bäume oder Büsche, die wegen ihrer geringen Größe nicht als potentielle Gebäude detektiert wurden, sind in dem abgeleiteten DGM noch enthalten. Durch geeignete Filteroperationen werden diese Störungen ebenfalls eliminiert.

Nach der näherungsweisen Bestimmung der Geländeoberfläche können alle dreidimensionalen linearen Segmente, die sich nicht über der berechneten Geländeoberfläche befinden eliminiert werden, um solche Segmente

²Fläche < 10 m²

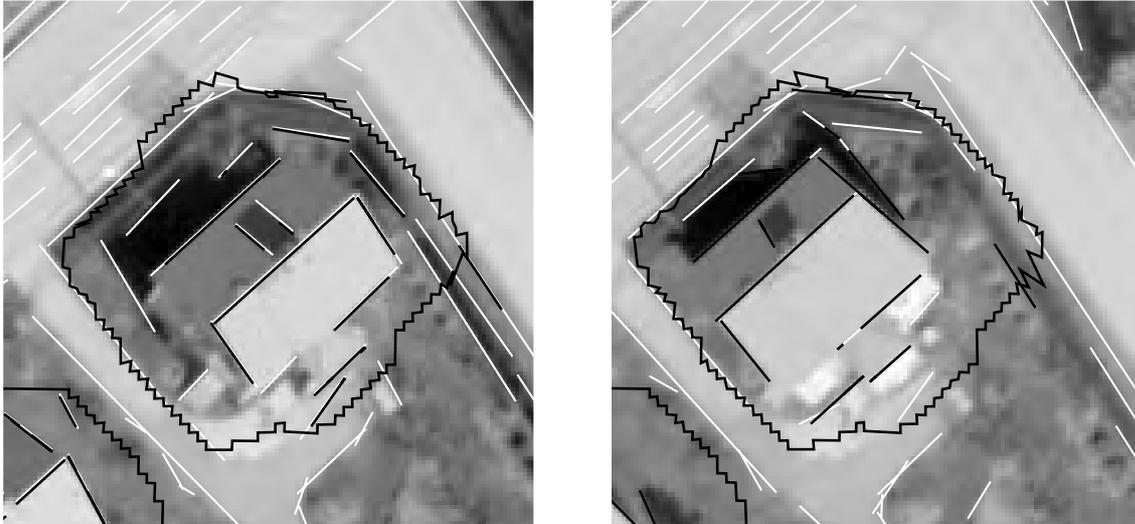


Abbildung 4.8: Stereobildpaar mit extrahierten Bildkanten (weiß), detektierter Gebäudehypothese (schwarz), zugeordneten und ausgewählten Raumkanten (schwarz).

auszuwählen, die auf dem Höhenniveau von Dachkanten liegen. Abbildung 4.8 demonstriert an einem Ausschnitt eines Stereobildpaars das Ergebnis der Selektion linearer Segmente durch die Analyse von Höhendaten. Die Region, in der wegen eines detektierten lokalen Höhenmaximums ein Gebäude erwartet wird, ist durch ein schwarzes Polygon repräsentiert. Zunächst werden durch das in Abschnitt 3.1 beschriebene Verfahren gerade Grauwertkanten extrahiert (weiße Linien) und durch eine Stereozuordnung dreidimensional bestimmt. Anschließend werden diejenigen linearen Segmente selektiert, die innerhalb der nach Abschnitt 4.1.1 detektierten Region liegen und die höher liegen als die Höhenlinie, die diese Region definiert. Diese Linien sind in Abbildung 4.8 durch die schwarzen Linien dargestellt.

Um eine übersichtliche Gliederung zu erhalten, wurde in dieser Arbeit zunächst die Extraktion linearer Segmente aus Bild- bzw. Höhendaten beschrieben und die Auswahl dieser Elemente durch die Suche nach lokale Höhenmaxima im Anschluß daran vorgestellt. Aus Gründen der Effizienz wird in dem implementierten Algorithmus jedoch der umgekehrte Weg gewählt. Zunächst werden durch die Analyse der Höhendaten innerhalb des DHM bzw. des Stereobildpaars Regionen detektiert, in denen Gebäude zu erwarten sind. Die anschließende Extraktion der linearen Segmente wird dann auf diese Bereiche beschränkt.

Für die Detektion der Gebäude wurden durch die Analyse von Höhendaten Objekte gefunden, die aus der Geländeoberfläche herausragen. Dadurch war in den bearbeiteten Datensätzen eine zuverlässige Detektion aller Gebäude möglich. Mit dem eingesetzten Verfahren kann jedoch nicht sicher festgestellt werden, ob ein detektiertes Gebiet tatsächlich auf ein Gebäude zurückgeht oder ob es durch die Abbildung eines anderen Objekts ähnlicher Ausdehnung und Höhe, wie z.B. einer Baumgruppe verursacht wurde. Deshalb sind in der Menge der detektierten Regionen teilweise nicht nur Gebäude enthalten. Zudem wird der Gebäudeumriß mit den vorgestellten Verfahren nur sehr grob erfaßt, d.h. neben einer weiteren Bewertung und Auswahl detektierter Regionen muß auch noch eine genauere Lokalisierung der Gebäude durch weitere Verfahrensschritte erfolgen.

4.2 Gruppierung linearer Segmente

In Kapitel 1.2 wurde bereits die Bedeutung der Gruppierung innerhalb eines visuellen Systems für die Erzeugung stabiler und abstrakter Bildbeschreibungen diskutiert. Der Einsatz von Gruppierungsprozessen soll dabei zu einer Abstraktion der extrahierten Bildbeschreibungen und einer Auswahl der Primitive führen.

Durch die Gruppierung wird schon bei der Extraktion der Bildbeschreibung die Aufmerksamkeit auf bestimmte, für die spätere Objekterkennung wichtige Strukturen gelenkt. Für den Prozeß der Objekterkennung bedeutet dies, daß schon bei der Extraktion der Bildbeschreibung in gewissem Maße Wissen über erwartete Bildinhalte mit eingeht. Verwendete Beziehungen zwischen den zu gruppierenden Bildelementen sind Ähnlichkeit,

Geschlossenheit, Kontinuität und Symmetrie. Häufig gilt, daß Bildelemente, die sich aufgrund der verwendeten Relationen zu größeren Strukturen zusammenfassen lassen, durch die Abbildung eines gleichfalls strukturierten Objekts verursacht werden. Folglich verwirft ein Gruppierungsprozeß einen Großteil der Primitive, die durch Einflüsse wie Reflexionen oder Rauschen entstanden sind, da sich solche Bildelemente wegen der nicht vorhandenen zugrundeliegenden Struktur nicht gruppieren lassen. Die Gruppierung von durch Low-Level Operationen extrahierten Geradenstücken wird somit genutzt, um die Wichtigkeit dieser Primitive hinsichtlich einer späteren Objekterkennung zu beurteilen [Lowe 1985].

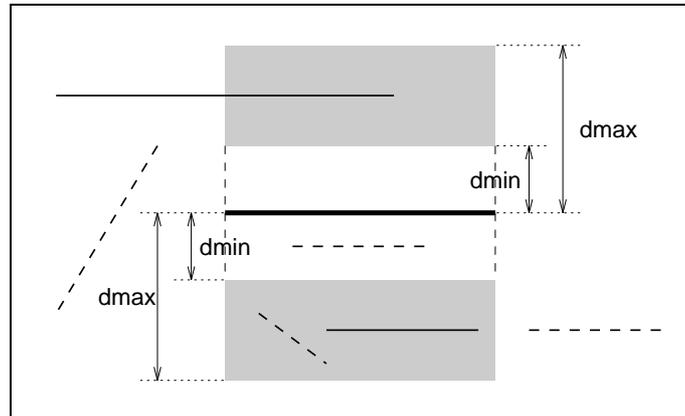


Abbildung 4.9: Suchfläche zur Bildung von Parallelen.



Abbildung 4.10: Extrahierte Geradensegmente (dünne Linien) und detektierte Parallelen (breite Linien).

Objekte oder Objektteile einer Kulturlandschaft (Gebäude, Felder) haben häufig eine symmetrische, rechteckige Struktur und bestehen aus parallelen Linien. Dieses Vorwissen über die allgemeine Form der gesuchten Objekte wird in dem implementierten Gruppierungsverfahren genutzt, um die extrahierten linearen Segmente aufgrund bestimmter geometrischer Relationen zu eben diesen höherwertigen Strukturen zusammenzufassen, um dadurch eine weitere Auswahl durchzuführen. Für die Gruppierung werden die extrahierten linearen Segmente aufgrund der Relationen Kollinearität, Parallelität, Symmetrie und Nachbarschaft kombiniert. Zur Überprüfung der Relationen werden die Koordinaten der linearen Segmente im Geländekoordinatensystem verwendet. Durch die perspektive Abbildungsgeometrie stellen sich die rechteckigen Dachflächen im Bild als Parallelogramme dar; die Abweichungen der Innenwinkel des Parallelogramms von einem rechten Winkel hängen von der Neigung des Daches und seiner Lage in Bezug auf den Bildhauptpunkt ab. Durch die Verwendung von Geländekoordinaten

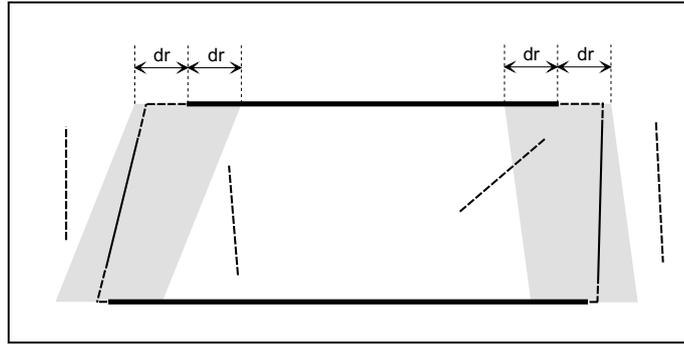


Abbildung 4.11: Suchfläche zur Bildung Rechtecken.

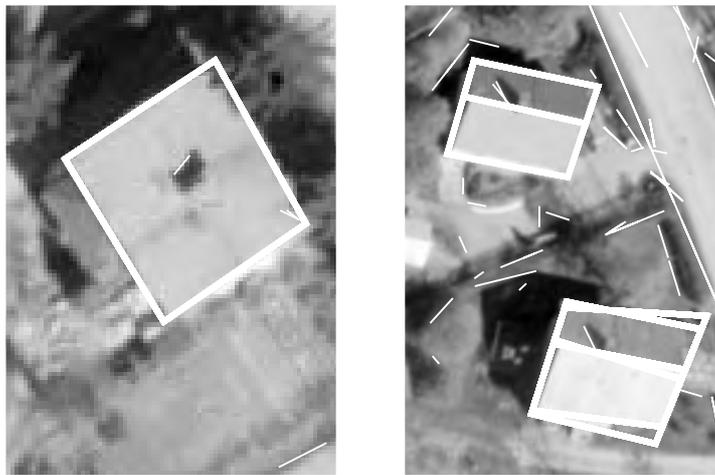


Abbildung 4.12: Extrahierte Geradensegmente (dünne Linien) und gruppierte Parallelogramme (breite Linien).

werden die Dachlinien wie bei einem Orthophoto in Parallelprojektion abgebildet, die Winkel zwischen den Linien sind damit unabhängig von ihrer Position im Bild. Im Geländekoordinatensystem lassen sich zudem die Abstandsmaße zur Bestimmung der Relation Nachbarschaft in Meter und damit nachvollziehbarer als in Pixel angeben. Die Definition, bis zu welchem Grad Linien als parallel, benachbart oder rechtwinklig gelten, hängt von den verwendeten Schwellwerten ab. Diese werden relativ großzügig gewählt, um zu vermeiden, daß korrekte Gruppierungen durch eine zu strikte Festlegung eliminiert werden. Bedingungen, die sich aus den Höhen und Neigungen der linearen Segmente ergeben, werden zu diesem Zeitpunkt nicht genutzt, die Gruppierung erfolgt zweidimensional.

Im ersten Schritt der Gruppierung wird eine Suche nach parallelen Linien durchgeführt. Dazu werden um jede Linie in vorgegebenem Abstand zwei Suchfenster definiert (Abbildung 4.9). Der Abstand und die Größe der Suchfenster richtet sich nach der Größe der zu detektierenden Objekte. Ziel des Gruppierungsprozesses ist die Detektion von Strukturen, die auf die Abbildung von Dächern zurückgehen. Unter der Annahme, daß die Seitenlänge von Dachflächen zwischen 4 m und 30 m liegt, ergeben sich die Parameter $d_{min} = 4$ m und $d_{max} = 30$ m. Falls in diesen Fenstern Linien gefunden werden, deren Orientierungsdifferenz zur Startlinie unterhalb einer bestimmten Schwelle (z.B. 12°) liegt, wird eine Parallel-Struktur gebildet. Dieser Schwellwert orientiert sich an dem Wert $2 \cdot \sigma_\Delta$ der Standardabweichung $\sigma_\Delta = \sqrt{2} \cdot \sigma_\phi$ des Horizontalwinkels zweier linearer Segmente. Ein Beispiel für die Detektion von Parallel-Strukturen ist in Abbildung 4.10 dargestellt. Die untersuchten linearen Segmente sind durch die dünnen, weißen Linien repräsentiert. Lineare Segmente, für die eine Parallele gefunden wurde, sind als breite Linien dargestellt.

Aus einer Parallel-Struktur werden durch Linien, mit denen die Enden der Parallelen verbunden werden können Rechtecke bzw. Parallelogramme gebildet. Zwischen die Parallelenenden werden deshalb Fenster gelegt, in denen nach Geraden senkrecht zu den Parallelen gesucht wird (siehe Abbildung 4.11). Der Schwellwert für die Abweichung der Linien von einem rechten Winkel beträgt wiederum 12° . Abbildung 4.12 zeigt das Ergebnis der Gruppierung zu Parallelogrammen für die gewählten Bildausschnitte. Lineare Segmente sind wiederum durch dünne, weiße Linien dargestellt. Die Parallelogramme (breite Linien) wurden aus jeweils vier gruppierten, linearen Segmenten gebildet.

Durch die Kombination der linearen Segmente zu Parallelogrammen wird näherungsweise der Grundriß bzw. ein Teil des Grundrisses des Gebäudes festgelegt, das möglicherweise diesen beobachteten Primitiven zugrunde liegt. Da das verwendete Rechteckmodell auch für andere Objekte wie Schatten oder sonstige rechteckige Plätze gilt, werden auch solche Strukturen gebildet, die nicht auf Gebäude zurückgehen. Um eine bessere Bewertung und damit Auswahl der durch die Gruppierung erzeugten Gebäudehypothesen zu ermöglichen, muß ein verfeinertes Gebäudemodell verwendet werden. Das für die Gruppierung verwendete Modell *Rechteck* bzw. *Parallelogramm* ist zweidimensional. Ziel des Rekonstruktionsprozesses ist jedoch die Ableitung einer dreidimensionalen Beschreibung eines abgebildeten Gebäudes. Darum wird auch ein dreidimensionales Modell benötigt. Die Definition eines solchen Modells und seine Verwendung für die Rekonstruktion unter Einbeziehung der durch die Gruppierung gewonnenen Vorinformation ist Thema des folgenden Kapitels.

5 Modellbildung

Ein System zur dreidimensionalen Objektrekonstruktion benötigt neben einer Beschreibung der beobachteten Daten ein Modell der zu rekonstruierenden Objekte. Nachdem die Extraktion und Selektion dreidimensionaler linearer Segmente zur Gewinnung geeigneter Repräsentationen der beobachteten Bild- und Höhendaten in den vorigen Kapiteln behandelt wurden, soll an dieser Stelle auf die Modellierung der Gebäude eingegangen werden.

5.1 Erzeugung von Modellen

Das Ziel einer Modellierung besteht darin, für die Rekonstruktion eine möglichst allgemeine Beschreibung zu erfassender Objekte zu ermitteln. Zusätzlich sollten Objektmodelle eine effektive Beschreibung, Bearbeitung und Speicherung der dargestellten Objekte erlauben und sich für die Zuordnung zu den extrahierten Beschreibungen der Bild- und Höhendaten eignen, d.h. die Modellkomponenten sollten beobachtbar sein. Die Modellierung ist dabei ein Prozeß, bei dem häufig implizit gegebenes Wissen über die wahrgenommenen Objekte in eine explizite Form überführt wird. Für die Erzeugung von Modellen für die Bildanalyse bestehen prinzipiell drei Möglichkeiten [Flynn & Jain 1991]:

Manuelle Modellierung: Das Objektmodell wird bei dieser Methode von Hand durch einen Operateur erstellt. Die manuelle Konstruktion von Objektmodellen ist sehr zeitintensiv und benötigt darüber hinaus detaillierte Kenntnisse der internen Struktur des Objekterkennungssystems.

Modellierung durch Lernen aus Beispielen: Dabei ermittelt ein automatisches Lernsystem aus Beispielen zu erfassender Objekte zunächst die wichtigen Objektmerkmale und versucht anschließend die innere Struktur zwischen diesen Merkmalen zu bestimmen.

Adaption existierender Modelle: Für viele, vor allem industrielle Anwendungen existieren bereits Modelle der zu rekonstruierenden Objekte. Diese Modelle wurden beispielsweise während der Konstruktionsphase für andere Zielsetzungen entwickelt und müssen daher für die Bildanalyse adaptiert, erweitert oder restrukturiert werden.

Konzeptionell ist sicherlich die Modellierung durch Lernen aus Beispielen bzw. die Adaption existierender Modelle die interessanteste Methode. Da sich die Lösung dieses Aufgabengebiets noch im Forschungsstadium befindet und derzeit keine einfachen, allgemein gültigen Verfahren existieren, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine manuelle Modellierung durchgeführt.

Als erster Schritt der Modellierung muß zunächst entschieden werden, welche Art von Information repräsentiert werden soll. Dies beinhaltet auch die Auswahl geeigneter Merkmale für die Beschreibung des Objekts. So können nur solche Merkmale der zu beschreibenden Objekte genutzt werden, die aus den zur Verfügung stehenden Daten extrahiert werden können bzw. aus anderen Quellen bekannt sind. Zusätzlich hängt die Art der Modellierung vom Ziel der gestellten Aufgabe ab. Steht die Rekonstruktion der Objektgeometrie im Vordergrund, ist es sinnvoll, für die Modellierung geometrische Primitive wie Punkte, Linien und Flächen zu verwenden. Ein weiteres Argument für diese geometrischen Merkmale ist, daß sie relativ einfach durch geeignete Verfahren aus den Bild- bzw. Höhendaten extrahiert werden können.

Für die Objektrekonstruktion müssen die extrahierten Primitive den korrespondierenden Elementen des Objektmodells zugeordnet werden. Dies kann aufgrund ähnlicher Merkmale wie Länge und Form von Linien oder Größe von Regionen geschehen. Viele Objekte lassen sich jedoch erst oder gerade durch strukturelle Information, d.h. durch die Relationen zwischen ihren Elementen eindeutig definieren und damit rekonstruieren. Deshalb reicht eine rein merkmalsbasierte Beschreibung häufig nicht aus; neben den Merkmalen einzelner Primitive müssen zusätzlich die Relationen zwischen den Elementen des Objektmodells beschrieben und für die Zuordnung verwendet werden.

Speziell in der Bildverarbeitung ist zudem zu klären, in welcher Dimension die Objektmodelle bereitzustellen sind. Für 3D-Objekte können entweder verschiedene Ansichten des Objekts in der jeweiligen Projektion modelliert oder eine komplette 3D-Beschreibung vorgegeben werden. In dem vorgestellten Verfahren werden dreidimensionale Liniensegmente aus einem Stereobildpaar bzw. einem DHM extrahiert. Deshalb ist es sinnvoll,

ein 3D-Gebäudemodell zu verwenden. Für Anwendungen mit mehr als zwei Bildern, beispielsweise bei Bildflügen mit großer Quer- und Längsüberdeckung, wird die dreidimensionale Repräsentation extrahierter und in einer unterschiedlichen Anzahl von Bildern zugeordneter Primitive komplexer als im Stereofall. In diesem Fall ist es häufig günstiger, verschiedene Ansichten des Objekts in der jeweiligen Projektion zu modellieren und für die Bild-Modell Zuordnung zunächst die jeweiligen Bildkoordinaten zu verwenden.

5.2 Repräsentationsformen

Da mit dem Verfahren zur Gebäuderekonstruktion nicht *ein* spezifisches, vorher bekanntes Objekt, sondern eine Klasse von Objekten rekonstruiert werden soll, ist es notwendig, Repräsentationen zur Verfügung zu stellen, die eine Beschreibung ähnlicher Gebäude anhand *eines* generischen, allgemeinen Modells erlauben. Solche generischen Modelle lassen sich als Zwischenstufe auf dem Weg zu spezifischen Objektmodellen ansehen. Sie enthalten alle wesentlichen Merkmale einer Objektklasse, ohne dabei bestimmte Ausprägungen eines Objektes festzulegen. Sie geben vor, über welche Teile und Merkmale ein Objekt einer bestimmten Klasse verfügt, die realen Werte der Objektmerkmale ergeben sich jedoch erst im Moment der Interpretation, wenn dieses Modell mit einer aus Beobachtungen extrahierten Repräsentation verglichen und instantiiert wird.

Ziel des vorgestellten Verfahrens ist die Rekonstruktion der dreidimensionalen Form von Gebäuden. Zu diesem Zweck muß ein Modell definiert werden, das es erlaubt, die Geometrie und Topologie eines Gebäudes dreidimensional zu beschreiben. Der Bedarf dreidimensionale Objekte zu modellieren, hat im Bereich des CAD/CAM (Computer Aided Design, rechnergestützte Konstruktion / Computer Aided Manufacturing, rechnergestützte Fertigung) bereits zu einer Vielfalt unterschiedlicher Ansätze geführt. Gebräuchliche Repräsentationsformen aus diesem Bereich sind [Fellner 1988], [Meier 1986]:

Enumerationsverfahren (spatial occupancy enumeration): Dabei wird das Objekt in ein Referenzkoordinatensystem transformiert und durch eine Menge von Raumzellen (sogenannte Voxel) beschrieben. Die meisten volumetrischen Beschreibungen verwenden würfelförmige Volumenelemente. Vor allem wenn nur eine Würfelgröße verwendet wird, kann der Bedarf an Speicherplatz im Hinblick auf eine gute Approximation sehr groß werden. Eine exakte Repräsentation ist zudem nur für wenige Objekte möglich. Ein typischer Anwendungsbereich von Enumerationsverfahren ist die Computertomographie. Steht jedoch wie bei der Gebäuderekonstruktion die Beschreibung geometrisch relativ einfacher Objektflächen im Vordergrund, ist der Aufwand der Enumerationsverfahren hinsichtlich des Speicherbedarfs oder der Rechenzeit bei Objekttransformationen wie Translation oder Rotation im Vergleich zu anderen Verfahren zu hoch.

Drahtmodell (wire-frame): Ein Drahtmodell repräsentiert ein Objekt durch einen Graphen, dessen Knoten durch ausgewählte dreidimensionale Punkte auf der Objektfläche (typischerweise Ecken) definiert werden. Die Linien des Graphen repräsentieren eine physikalische Kante des Objekts und erfüllen damit die Bedingung, daß Modellelemente im Bild beobachtbar sein müssen. Drahtmodelle enthalten in ihrer Grundform keine Informationen über Flächen oder Volumen des Körpers und können deshalb für Anwendungen wie Schnittbildungen oder Sichtbarkeitsanalysen nicht verwendet werden. Da solche Analysen für die Zuordnung zu den beobachteten Bild- und Höhendaten große Bedeutung besitzen, sind Drahtmodelle in ihrer Grundform für die Gebäuderekonstruktion nur bedingt geeignet.

Randdarstellung (boundary representation): Die Randdarstellung definiert räumliche Objekte durch ihre Begrenzungselemente. Dies sind analytische Flächen (Standard-, Rotations-, Translations- oder Regelflächen) sowie approximierende Flächen wie Bezier- oder Splineflächen. Eckpunkte und Linien ergeben sich aus dem Schnitt der Begrenzungsflächen. Neben der metrischen Information durch (Punkt)koordinaten enthält die Randdarstellung auch topologische Information durch die Beschreibung der Relationen zwischen den einzelnen Begrenzungselementen. Randdarstellungen erlauben einfache Sichtbarkeitsüberprüfungen, so daß diese Darstellungen vor allem im Bereich der Visualisierung zum Einsatz kommen. Durch eine Randbeschreibung wird unter anderem die Anzahl der Objektkanten, -ecken und -flächen sowie Relationen wie Verknüpfungen oder Parallelität zwischen diesen Merkmalen definiert. Während die Werte von Merkmalen wie Punktkoordinaten oder Linielängen häufig für jedes Gebäude unterschiedlich sind, gelten verschiedene Relationen wie Parallelitäten von Linien und Flächen, Kollinearitäten oder Zwänge,

daß Linien vertikal oder horizontal sind, häufig für eine ganze Klasse von Gebäuden. Eine Randbeschreibung, die zunächst nur die Topologie eines Objektes festlegt und für die Werte der Merkmale Platzhalter zur Verfügung stellt, kann demnach als generisches Modell interpretiert werden. Die Werte der einzelnen Merkmale (z.B. Punktkoordinaten) ergeben sich nach der Zuordnung des Modells zu den Beobachtungen; dieser Schritt stellt dann die eigentliche Rekonstruktion dar.

Konstruktion mit Raumprimitiven (constructive solid geometry – CSG): Bei der Konstruktion mit Raumprimitiven wird ein räumliches Objekt durch mengentheoretische Methoden wie Vereinigung, Differenz oder Durchschnitt aus einer Menge von Grundprimitiven z.B. Quader, Kugel, Zylinder, Kegel, Torus oder Halbraum konstruiert. Jedes Objekt ist so als binärer Baum oder Konstruktionsbaum darstellbar, wobei die Blätter Primitivkörper repräsentieren und die Knoten für Operationen und Transformationen stehen. Die Konstruktion mit Raumprimitiven resultiert immer in gültigen dreidimensionalen Objekten, d.h. im Gegensatz zur Randdarstellung muß keine Überprüfung der Topologie durchgeführt werden, um z.B. die Geschlossenheit von Objektflächen zu garantieren [Hoffmann 1989]. Ein weiterer Vorteil ist die sehr kompakte Darstellung, die durch CSG ermöglicht wird.

Wird für die Parameter der Grundprimitive (z.B. Länge, Breite und Höhe eines Quaders) keine Wertzuweisung durchgeführt, kann eine CSG-Darstellung ebenfalls als generisches Modell betrachtet werden. Die CSG-Darstellung liefert in diesem Fall eine leere Hülle, die erste nach der Zuordnung des Modells zu den Beobachtungen gefüllt wird.

Parametrisierte Darstellung (primitive instancing): Ähnlich zur CSG erfolgt bei dieser Darstellung die Objektbeschreibung durch räumliche Primitive. Unterschiedliche Objekttypen werden jedoch nicht durch verschiedene Kombinationen einfacher Grundprimitive, sondern durch die Erzeugung *eines* komplexeren Primitivs definiert. In dieser Darstellungsform erfolgt demnach die Repräsentation von Objekten desselben Typs anhand eines festgelegten minimalen Satzes von Formparametern. Die topologisch-geometrischen Bedingungen zwischen den geometrischen Elementen (Punkte, Linien, Flächen) des Objekts wie Rechtwinkligkeit oder Parallelität von Linien werden bei dieser Darstellung nicht wie bei einer Randbeschreibung explizit formuliert, sie ergeben sich vielmehr implizit durch die gewählten Formparameter. Sind die Werte der Formparameter frei, so kann eine parametrisierte Darstellung analog zur CSG-Darstellung als generisches Modell betrachtet werden, jedes Element einer Gruppe ist durch eine fixe Anzahl von Parametern charakterisiert, die einzelnen Objekte unterscheiden sich nur in den Werten für diese Parameter. Die Bestimmung der Parameterwerte erfolgt wiederum durch die Verknüpfung des Modells mit den beobachteten Daten. Gegenüber den CSG-Darstellungen bietet die parametrisierten Darstellung durch die Redundanzfreiheit des minimalen Parametersatzes einen zusätzlichen Vorteil.

Die Aufgabe der Modellierung besteht darin, möglichst allgemeine Objektbeschreibungen zu ermitteln, die für die Zuordnung zu den aus beobachteten Daten extrahierten Beschreibungen geeignet sind. Solche Objektbeschreibungen sind mit der Randdarstellung, der parametrisierten Darstellung und der Konstruktion mit Raumprimitiven möglich. Diese Darstellungsarten erlauben zum einen die Repräsentation einer Gruppe ähnlicher Gebäude anhand eines generischen Modells, zum anderen sind in diesen Beschreibungen explizit oder implizit Relationen zwischen den Linien des Objektmodells für die Einschränkung möglicher Zuordnungen zu dreidimensionalen linearen Segmenten enthalten.

Durch den Einsatz hybrider Modelle können die Vorteile der unterschiedlichen Darstellungsarten kombiniert werden. Während eine Konstruktion mit Raumprimitiven oder eine parametrisierte Darstellung in eine Randdarstellung transformiert werden kann, existieren für die Umwandlung in umgekehrter Richtung keine vollständigen Lösungen. Aus diesem Grund ist es günstig, entweder eine Konstruktion mit Raumprimitiven oder eine parametrisierte Darstellung als Primärrepräsentation zu nutzen und die Randdarstellung bei Bedarf als zusätzliche Datenstruktur für die Visualisierung und Analyse zu verwenden. Bei komplexen Objekten kann die Definition des Parametersatzes bei der parametrisierten Darstellung extrem aufwendig werden. Da für das vorgestellte Verfahren zur Gebäuderekonstruktion jedoch nur relativ einfache geometrische Körper zu repräsentieren sind, wurde im Hinblick auf die kompakte, redundanzfreie und einfache Beschreibung eine solche Darstellung der Gebäude verwendet.

5.3 Gewählte Parametrisierung

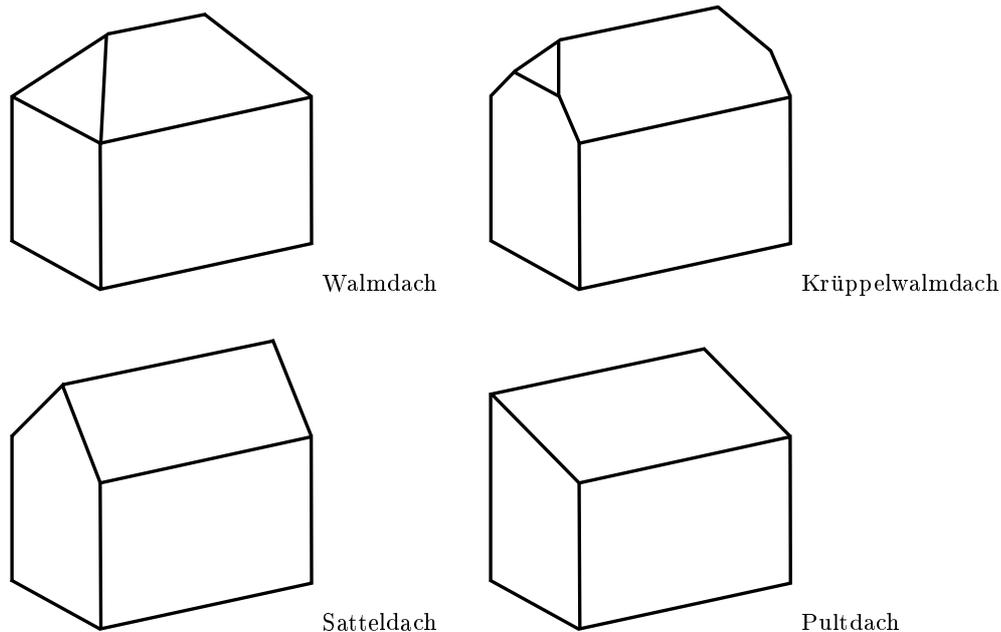


Abbildung 5.1: Mögliche Dachformen für Gebäude mit rechteckigem Grundriß.

Die Gebäuderepräsentation durch eine parametrisierte Darstellung wird in diesem Abschnitt exemplarisch für rechteckige Gebäude mit Satteldach durchgeführt, da dieser Typ sehr häufig verbreitet ist. Die Rekonstruktion erfolgt im Augenblick nur für diesen speziellen Gebäudetyp. Gebäude mit anderen Dachformen, wie in Abbildung 5.1 dargestellt oder Gebäude mit anderem, beispielsweise L-förmigen Grundriß können jedoch auf ähnliche Weise repräsentiert und rekonstruiert werden. Ein rechteckiges Gebäude mit einem Satteldach, wie es Abbildung 5.2 zeigt, besteht aus zwei jeweils gleich großen, vertikalen und rechteckigen Seitenwänden, zwei vertikalen fünfeckigen Stirnwänden, zwei rechteckigen Dachflächen, die um den gleichen Betrag gegeneinander geneigt sind und einem waagrechten, rechteckigen Fußboden. Die Parametrisierung eines solchen Gebäudes ist durch einen Satz von vier Form- und vier Lageparameter möglich [Sester & Förstner 1989], [Mueller & Olson 1993].

Wie aus den Abbildungen 5.2 ersichtlich ist, sind dies die Formparameter

- Länge des Gebäudes (*Länge*),
- Breite des Gebäudes (*Breite*),
- Neigungswinkel der Dachflächen (α),
- Höhe des Gebäudes (*Höhe*), hier als Abstand des Dachtraufs zur Geländeoberfläche definiert,

sowie die Lageparameter

- Position X_0, Y_0, Z_0 eines ausgewählten Punktes im übergeordneten Geländekoordinatensystem, dabei werden X_0 und Y_0 durch den Giebelpunkt definiert, der näher am Ursprung des Geländekoordinatensystems liegt. Z_0 ergibt sich aus der *Höhe* des Dachtraufs.
- Orientierung ϕ einer ausgewählten Gebäudelinie, hier der Firstlinie im übergeordneten Geländekoordinatensystem.

Aus der parametrisierten Darstellung können Koordinaten für die Eckpunkte des Gebäudes einfach abgeleitet werden. Dazu werden zunächst durch Anwendung der folgenden Gleichungen aus den Parametern *Länge*, *Breite* und Dachneigung α die 10 Eckpunkte des Gebäudes in einem lokalen Koordinatensystem berechnet.

$$\begin{array}{lll}
 x_{Haus}^1 = 0 & x_{Haus}^2 = 0.5 \cdot \textit{Breite} & x_{Haus}^3 = 0.5 \cdot \textit{Breite} \\
 y_{Haus}^1 = 0 & y_{Haus}^2 = 0 & y_{Haus}^3 = \textit{Länge} \\
 z_{Haus}^1 = 0.5 \cdot \tan \alpha \cdot \textit{Breite} & z_{Haus}^2 = 0 & z_{Haus}^3 = 0
 \end{array}$$

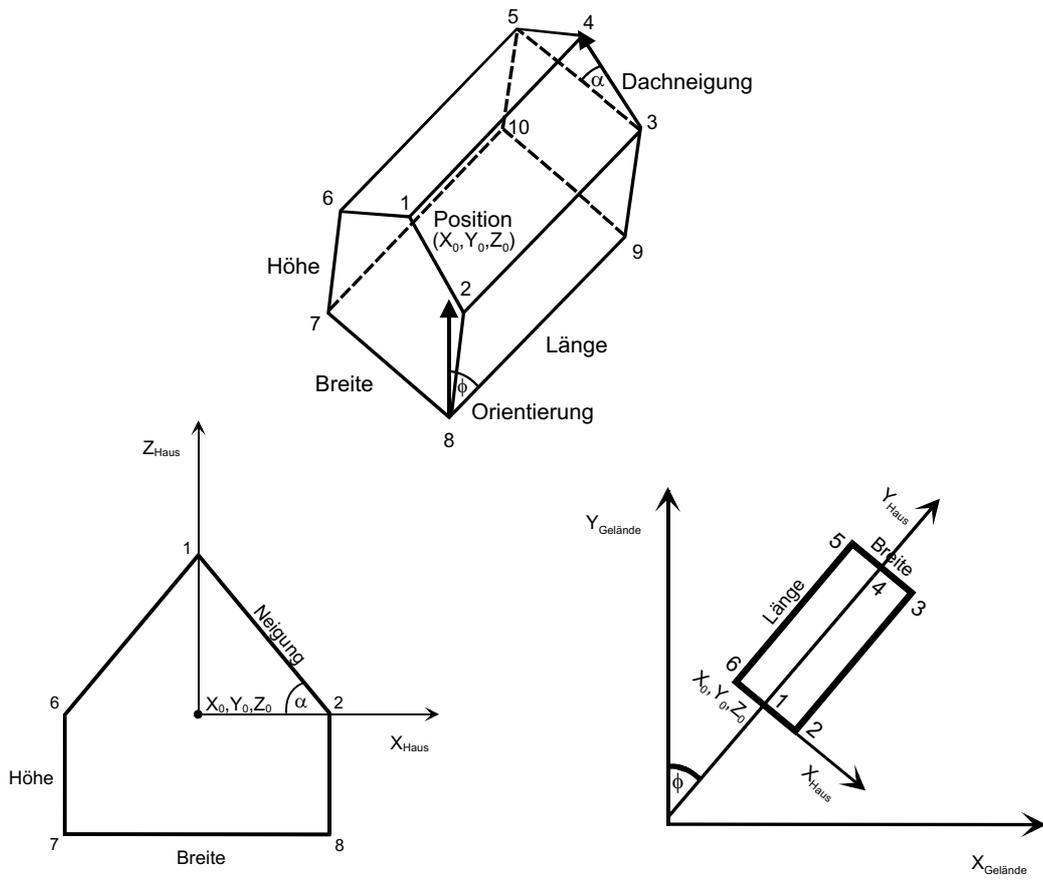


Abbildung 5.2: Parametrisierung eines Gebäudes mit Satteldach.

$$x_{Haus}^4 = 0$$

$$y_{Haus}^4 = \text{Länge}$$

$$z_{Haus}^4 = 0.5 \cdot \tan \alpha \cdot \text{Breite}$$

$$x_{Haus}^5 = -0.5 \cdot \text{Breite}$$

$$y_{Haus}^5 = \text{Länge}$$

$$z_{Haus}^5 = 0$$

$$x_{Haus}^6 = -0.5 \cdot \text{Breite}$$

$$y_{Haus}^6 = 0$$

$$z_{Haus}^6 = 0$$

$$x_{Haus}^7 = -0.5 \cdot \text{Breite}$$

$$y_{Haus}^7 = 0$$

$$z_{Haus}^7 = -\text{Höhe}$$

$$x_{Haus}^8 = 0.5 \cdot \text{Breite}$$

$$y_{Haus}^8 = 0$$

$$z_{Haus}^8 = -\text{Höhe}$$

$$x_{Haus}^9 = 0.5 \cdot \text{Breite}$$

$$y_{Haus}^9 = \text{Länge}$$

$$z_{Haus}^9 = 0$$

$$x_{Haus}^{10} = -0.5 \cdot \text{Breite}$$

$$y_{Haus}^{10} = \text{Länge}$$

$$z_{Haus}^{10} = 0$$

Durch eine Translation mit dem Vektor \vec{X}_0 und eine Rotation um die Z -Achse mit dem Orientierungswinkel ϕ werden diese Koordinaten in das übergeordnete Geländekoordinatensystem transformiert.

$$\begin{bmatrix} X_{Gelände} \\ Y_{Gelände} \\ Z_{Gelände} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{Haus} + X_0 \\ Y_{Haus} + Y_0 \\ Z_{Haus} + Z_0 \end{bmatrix}$$

Nach der Bestimmung des Gebäudemodells ist für die Objektrekonstruktion eine Verknüpfung dieses Modells mit der aus den beobachteten Daten extrahierten Repräsentation notwendig. Diese Verknüpfung, d.h. die Zuordnung der beiden Repräsentationen für die Rekonstruktion der beobachteten Gebäude ist Thema des folgenden Kapitels.

6 Rekonstruktion der Gebäude

Für die Rekonstruktion der Gebäude muß eine Zuordnung der aus den beobachteten Daten extrahierten Beschreibung zu dem im vorigen Kapitel definierten Objektmodell erfolgen. Die Rekonstruktion der Gebäudeparameter läßt sich in drei Schritte unterteilen. Zunächst müssen mögliche Korrespondenzen zwischen den extrahierten linearen Segmenten und den Linien des Objektmodells definiert werden. Im zweiten Schritt werden durch eine Ausgleichung nach kleinsten Quadraten die Gebäudeparameter so geschätzt, daß die Differenzen zwischen den Modelllinien und den zugeordneten beobachteten Linien minimal werden. Der resultierende Fehler der Parameterschätzung definiert dann, wie gut bestimmte Linienkombinationen in das gewählte Gebäudemodell eingepaßt werden können. Das Ergebnis der Parameterschätzung erlaubt dadurch eine Verifizierung der Zuordnungshypothesen und die Bewertung und Auswahl der berechneten Gebäuderekonstruktionen, was den letzten Schritt der Rekonstruktion darstellt. Unter der Annahme, daß Dächer in Luftbildern homogene Grauwerte aufweisen, kann die Grauwertvarianz der Dachflächen zusätzlich zur Auswahl verwendet werden. Neben den geometrischen Bedingungen, die im Rahmen der Parameterschätzung überprüft werden, ist so durch die Radiometrie rekonstruierter Dachflächen eine weitere Möglichkeit zur Selektion gegeben.

In Luftbildern bzw. in Distanzdaten, die durch einen flugzeuggetragenen Laserscanner aufgenommen wurden, ist in vielen Fällen nur das Dach eines Gebäudes komplett abgebildet; die Außenwände sind dagegen häufig ganz oder teilweise verdeckt. Folglich können aus diesen Daten nur potentielle Dachkanten abgeleitet werden. Die extrahierten linearen Segmente werden deshalb den Modelllinien des Satteldaches zugeordnet, so daß zunächst nur die 7 Dachparameter (Position X_0 , Y_0 , Z_0 , Orientierung ϕ , Länge und Breite des Gebäudes, Dachneigung α) rekonstruiert werden. Die Gebäudehöhe wird anschließend bestimmt, indem die Geländehöhen an den Eckpunkten des rekonstruierten Daches aus dem Digitalen Geländemodell (siehe Abschnitt 4.1.3) abgegriffen werden.

6.1 Definition möglicher Korrespondenzen

Für die Suche nach möglichen Korrespondenzen von beobachteten linearen Segmenten zu Linien des Gebäude-modells wird das Ergebnis der Gruppierung verwendet. Durch die Gruppierung wurden jeweils vier lineare Segmente kombiniert, die zur Rekonstruktion desselben Gebäudes verwendet werden können. Jede Seite eines gruppierten Rechtecks wird durch ein lineares Segment definiert. Liegen diesen linearen Segmenten Dachbruchkanten zugrunde, kann aus dem Rechteck der Gebäudegrundriß abgeleitet werden; Position, Orientierung, Länge und Breite des Daches lassen sich näherungsweise berechnen. Anhand dieser Näherungswerte und der relativen Positionen der gruppierten linearen Segmente kann die Zuordnung zu den Modelllinien eindeutig erfolgen, d.h. für jede beobachtete Linie wird der Typ (Trauffinie, Firstlinie, Giebellinie) festgelegt.

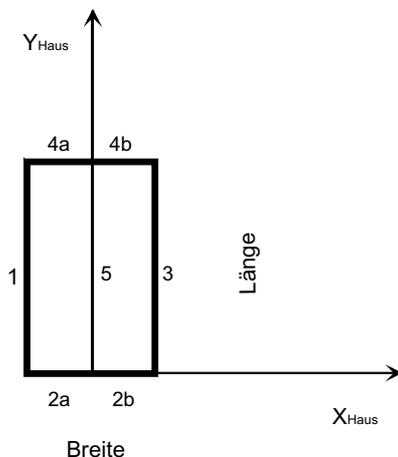


Abbildung 6.1: Mögliche Linientypen eines Satteldaches.

Abbildung 6.1 stellt das Dach des gewählten Gebäudemodells im Grundriß dar, wobei die möglichen Typen der Dachlinien durch die Ziffern 1 bis 5 bezeichnet sind. Die vier Linien einer Gruppierung bestehen jeweils aus einem Paar gegenüberliegender Giebellinien (Typ 2 und 4) und aus einem Paar gegenüberliegender Traufflinien (Typ 1 und 3), oder aus einem Paar gegenüberliegender Giebellinien (Typ 2 und 4) und einer Kombination von

Trauf- und Firstlinie (Typ 1 und 5, Typ 3 und 5). Trauf- und Firstlinien liegen parallel zur Horizontalebene und sind in Gebäuderichtung ϕ orientiert. Die Traufe ist die untere, der First die obere Begrenzung einer Dachfläche. Die Giebellinien liegen an den Stirnseiten des Gebäudes und sind um den Winkel α gegenüber der Horizontalen geneigt. In die X - Y -Ebene projizierte Giebellinien verlaufen senkrecht zur Orientierung ϕ des Gebäudes.

Zur Bestimmung der Korrespondenzen zwischen den gruppierten Linien und den Linien des Gebäudemodells wird zunächst das Parallelenpaar, das stärker gegenüber der Horizontalebene geneigt ist, als Giebellinien (Typ 2 und 4) definiert. Dadurch ist die Orientierung ϕ des Gebäudes und die Dachneigung α näherungsweise festgelegt. Diejenige Linie, die näher an der X -Achse des Koordinatensystems liegt, ist vom Typ 2, die andere vom Typ 4. Die Endpunkte der Linie vom Typ 2 legen die Translation Y_0 näherungsweise fest, die Hauslänge $Länge$ ergibt sich aus dem Abstand der beiden Giebellinien. Die verbleibenden beiden Linien besitzen den Typ 1, 3 oder 5. Liegen beide Linien tiefer als die Giebellinien, handelt es sich um Traufflinien (Typ 1 und 3). Liegt eine Linie höher als die Giebellinien, handelt es sich um eine Firstlinie (Typ 5). Aus den First- bzw. Traufflinien werden Näherungswerte für die Parameter X_0 , Z_0 sowie die Hausbreite $Breite$ bestimmt. Nach der Definition korrespondierender Linien und der näherungsweisen Bestimmung der Gebäudeparameter wird zur endgültigen Festlegung der (überbestimmten) Form und Lage des Gebäudes eine Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate durchgeführt.

6.2 Parameterschätzung

Ziel der Parameterschätzung ist die Minimierung des Abstands extrahierter linearer Segmente zu den Linien des rekonstruierten Gebäudes. Als Beobachtungen werden die Endpunktkoordinaten der linearen Segmente genutzt. Der Abstand dieser Raumpunkte zu den Modelllinien wird in eine Komponente in Z -Richtung und eine Komponente in der Geländeebene aufgespalten, so daß sich für jeden Linienendpunkt zwei Beobachtungsgleichungen ergeben. Für Linien vom Typ 2 und 4 liegt die Komponente in der Geländeebene in Richtung der Y -Achse des lokalen Hauskoordinatensystems, für Linien vom Typ 1, 3 und 5 in Richtung der X -Achse des Hauskoordinatensystems. Zur einfachen Aufstellung der Beobachtungsgleichungen werden die Geländekoordinaten der Linienendpunkte gemäß der Gleichung

$$\begin{bmatrix} X_{Haus} \\ Y_{Haus} \\ Z_{Haus} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_{Gel} \\ Y_{Gel} \\ Z_{Gel} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (6-1)$$

in das lokale Koordinatensystem transformiert. Je nach Linientyp wird dann die Komponente X_{Haus} bzw. Y_{Haus} sowie Z_{Haus} für die Aufstellung der Beobachtungsgleichung genutzt. Als Beobachtungsgleichungen erhält man somit für die verschiedenen Linientypen:

Typ 1 (Traufflinie links)

$$\begin{aligned} X_{Haus} + Breite/2 &= \\ \cos \phi \cdot X_{Gel} + \sin \phi \cdot Y_{Gel} - X_0 + Breite/2 &= v_i \end{aligned} \quad (6-2)$$

$$Z_{Gel} - Z_0 = v_j \quad (6-3)$$

Typ 3 (Traufflinie rechts)

$$\begin{aligned} X_{Haus} - Breite/2 &= \\ \cos \phi \cdot X_{Gel} + \sin \phi \cdot Y_{Gel} - X_0 - Breite/2 &= v_k \end{aligned} \quad (6-4)$$

$$Z_{Gel} - Z_0 = v_l \quad (6-5)$$

Typ 2 (Giebellinie unten)

$$\begin{aligned} Y_{Haus} &= \\ -\sin \phi \cdot X_{Gel} + \cos \phi \cdot Y_{Gel} - Y_0 &= v_m \end{aligned} \quad (6-6)$$

$$(Breite/2 - |X_{Haus}|) \cdot \sin \alpha + (Z_0 - Z_{Gel}) \cdot \cos \alpha =$$

$$(\text{Breite}/2 - |\cos \phi \cdot X_{Gel} + \sin \phi \cdot Y_{Gel} - X_0|) \cdot \sin \alpha + (Z_0 - Z_{Gel}) \cdot \cos \alpha = v_n \quad (6-7)$$

Typ 4 (Giebellinie oben)

$$Y_{Haus} - \text{Länge} = -\sin \phi \cdot X_{Gel} + \cos \phi \cdot Y_{Gel} - Y_0 - \text{Länge} = v_o \quad (6-8)$$

$$(\text{Breite}/2 - |X_{Haus}|) \cdot \sin \alpha + (Z_0 - Z_{Gel}) \cdot \cos \alpha =$$

$$(\text{Breite}/2 - |\cos \phi \cdot X_{Gel} + \sin \phi \cdot Y_{Gel} - X_0|) \cdot \sin \alpha + (Z_0 - Z_{Gel}) \cdot \cos \alpha = v_p \quad (6-9)$$

Typ 5 (Firstlinie)

$$X_{Haus} =$$

$$\cos \phi \cdot X_{Gel} + \sin \phi \cdot Y_{Gel} - X_0 = v_q \quad (6-10)$$

$$Z_0 + \tan \alpha \cdot \text{Breite}/2 - Z_{Gel} = v_r \quad (6-11)$$

Mit X_{Gel} , Y_{Gel} und Z_{Gel} sind die gemessenen Endpunktkoordinaten der extrahierten Linien im übergeordneten Geländekoordinatensystem bezeichnet, die als Beobachtungen zur Verfügung stehen. Bei der Aufstellung der Beobachtungsgleichungen wird nicht unterschieden, ob die Giebellinien (Typ 2 und 4) links oder rechts vom First liegen (Typ 2a und 2b bzw. 4a und 4b), da dies unerheblich ist. Die Gewichtung der einzelnen Beobachtungen ergibt sich aus den in Kapitel 3.3 berechneten Varianz-Kovarianz-Matrizen für die beobachteten Geländekoordinaten X_{Gel} , Y_{Gel} und Z_{Gel} .

6.3 Bewertung und Auswahl der Gebäuderekonstruktionen

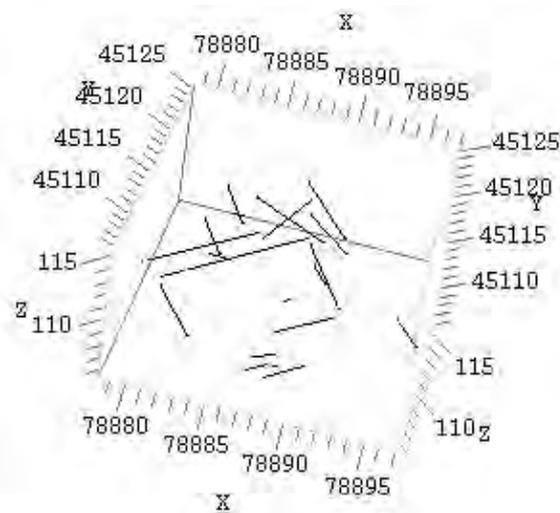


Abbildung 6.2: Extrahierte lineare Segmente in Perspektivdarstellung.



Abbildung 6.3: Orthophotoausschnitt mit Gebäudehypothese (schwarzes Polygon), linearen Segmenten (schwarz) und gruppierten Parallelogrammen (weiß).

Die Gruppierung der linearen Segmente führt zu einer Menge sich überlagernder Rechtecke, aus der eine Anzahl sich überlagernder und damit widersprüchlicher Gebäuderekonstruktionen hervorgeht. Zur Bestimmung einer widerspruchsfreien Rekonstruktion ist eine Bewertung und Auswahl der berechneten Rekonstruktionen notwendig. Abbildung 6.3 zeigt einen Orthophotoausschnitt, in den der Suchbereich für ein Gebäude projiziert wurde (schwarzes Polygon). Dieser Suchbereich wird durch ein detektiertes lokales Höhenmaximum im DHM definiert. Die extrahierten linearen Segmente (schwarze Linien) wurden durch die in Kapitel 1.2.2 beschriebene

Gruppierung zu Parallelogrammen (weiße Linien) kombiniert. Für dieses Beispiel enthält der Suchbereich 20 lineare Segmente (siehe auch Perspektivdarstellung dieser Linien in Abbildung 6.2). Die Liniensegmente wurden durch die Gruppierung zu insgesamt 338 Parallelogrammen kombiniert. Jede dieser Gruppierungen legt näherungsweise einen möglichen Grundriß des detektierten Gebäudes fest, so daß für jede dieser Kombinationen eine Bestimmung der Gebäudeparameter durchgeführt werden muß. Dadurch entstehen an der Stelle einer Gebäudehypothese mehrere sich überlagernde und damit konkurrierende Dachrekonstruktionen.

Jedes detektierte lokale Höhenmaximum steht für *eine* Gebäudehypothese. Um zu einer eindeutigen Repräsentation zu gelangen, muß folglich für jedes Höhenmaximum *eine* Rekonstruktion ausgewählt werden. Im Prinzip sind die Werte für die 7 Dachparameter völlig frei. Zur Einsparung von Rechenzeit bei der Bewertung und Auswahl der Gebäuderekonstruktionen kann dennoch eine gewisse Einschränkung durchgeführt werden, um zunächst 'unmögliche' Gebäude schnell zu eliminieren. Dazu wurden für bestimmte Parameter verschiedene Wertebereiche festgelegt. Dies sind:

- zulässiger Wertebereich für die Gebäudelänge beträgt $3 \text{ m} \leq \text{Länge} \leq 100 \text{ m}$.
- zulässiger Wertebereich für die Gebäudebreite beträgt $3 \text{ m} \leq \text{Breite} \leq 100 \text{ m}$.
- Verhältnis $\frac{\text{Gebäudelänge}}{\text{Gebäudebreite}} > 0.9$.
- zulässiger Wertebereich für die Dachneigung beträgt $0^\circ \leq \alpha \leq 80^\circ$.

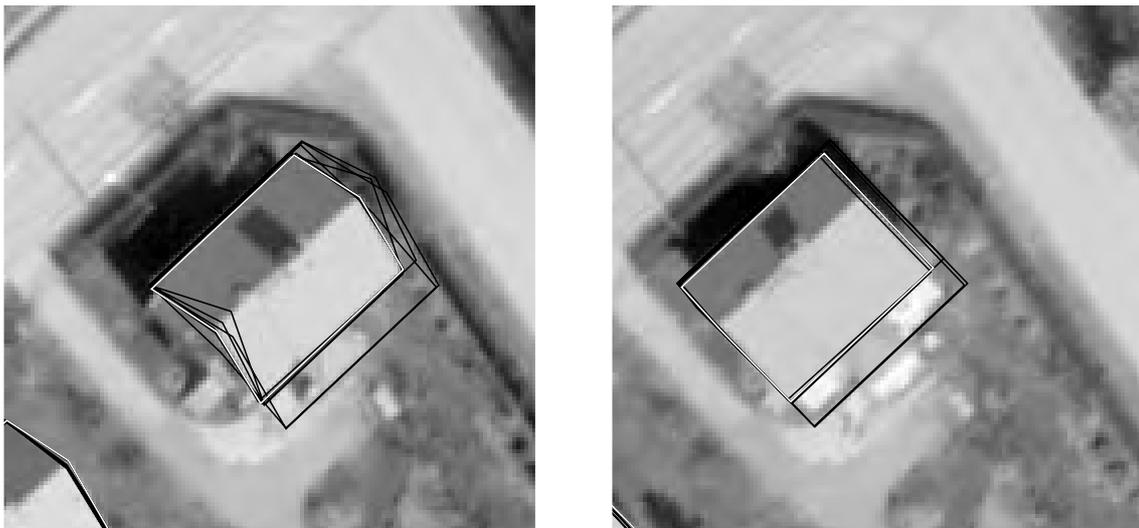


Abbildung 6.4: Rekonstruierte Dächer mit geringstem Fehler (schwarz) und rekonstruiertes Dach mit geringster Grauwertvarianz (weiß).

Um während des Gruppierungsprozesses die Bedingung *Parallelität* oder *Rechtwinkligkeit* zweier Geradensegmente zu überprüfen, muß ein Wertebereich festgelegt werden, den der Winkel der Geraden einnehmen darf. Die Festlegung des Schwellwerts, der diesen Bereich definiert, ist relativ willkürlich. Da nach der Parameterschätzung eine schnelle, zuverlässige und theoretisch fundierte Auswahl möglicher Kombinationen durchgeführt werden kann, wurden innerhalb des Gruppierungsprozesses zunächst große Wertebereiche definiert, um die Eliminierung einer korrekten Gruppierung zu vermeiden. Zudem wurde auf die Einführung von Schwellwerten verzichtet, die sich auf Höhenunterschiede oder Neigungsdifferenzen der Liniensegmente beziehen. Insgesamt sollte damit eine Beeinflussung des Endergebnisses durch im Grunde genommen willkürlich gewählte Schwellwertparameter verhindert werden.

Durch die gewählte Parametrisierung werden topologisch-geometrische Bedingungen zwischen den Linien des Gebäudes implizit repräsentiert. Durch die Parameterschätzung kann deshalb überprüft werden, wie gut die implizit definierten Zwänge wie die Parallelität von Linien im Objektraum durch die gruppierten linearen Segmente erfüllt werden, d.h. der mittlere Fehler der Gewichtseinheit $\hat{\sigma}_0$ a posteriori aus der Parameterschätzung liefert

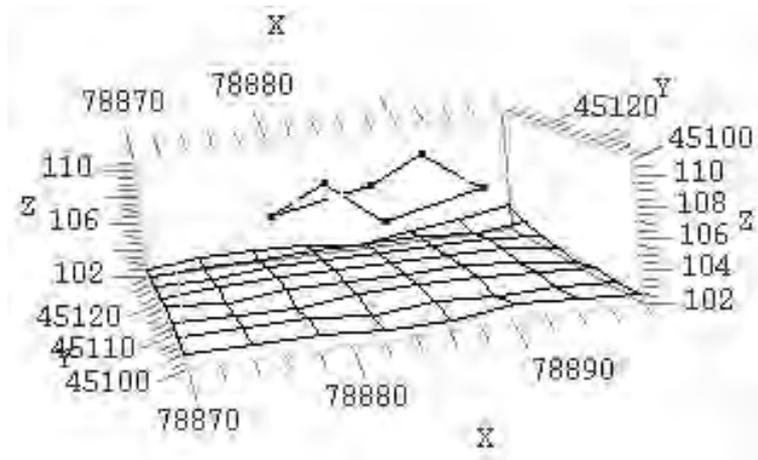


Abbildung 6.5: Ausgewähltes Dach über bereinigtem DHM.

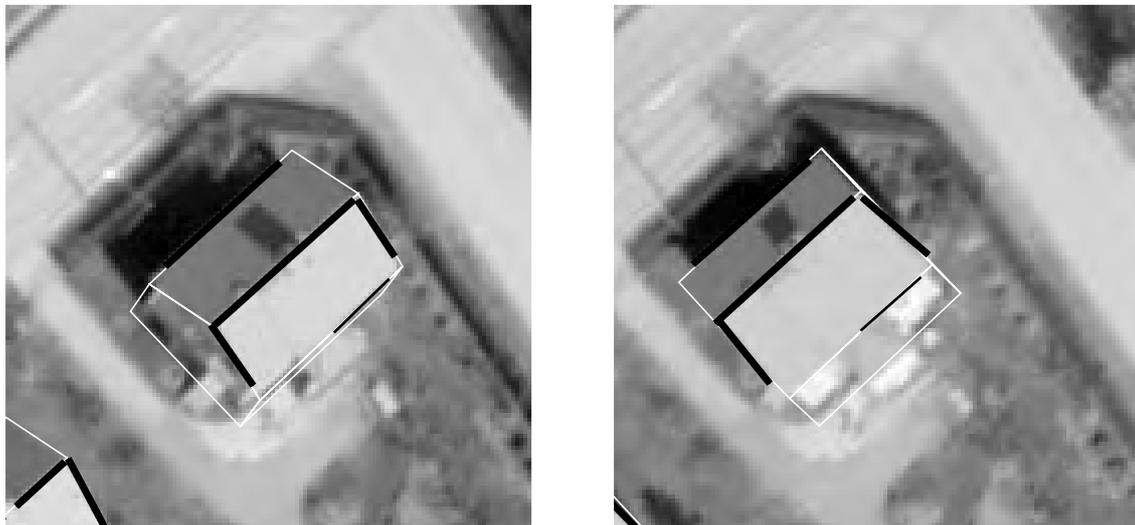


Abbildung 6.6: Rekonstruiertes Gebäude mit Linien, die zur Rekonstruktion verwendet wurden.

ein Maß, wie gut bestimmte Linienkombinationen in das Gebäudemodell eingepaßt werden können. Konvergiert der Algorithmus zur Ausgleichung nach kleinsten Quadraten nicht oder ist der mittlere Fehler sehr groß, kann dies als sicheres Zeichen gewertet werden, daß die genutzten Beobachtungen nicht zum gewählten Modell passen und die geforderten Relationen zwischen den beobachteten linearen Segmenten nicht erfüllt werden. Solche Linienkombinationen sind zu verwerfen.

Anhand des mittleren Fehlers $\hat{\sigma}_0$ wird im implementierten Verfahren zunächst für jede Gebäudehypothese eine bestimmte Anzahl von Dachrekonstruktionen mit geringem Fehler ausgewählt. In Abbildung 6.4 sind die 5 besten Dächer, die auf diese Weise selektiert wurden, dargestellt. Zur endgültigen Auswahl der besten Rekonstruktion werden diese Dächer in das Stereobildpaar projiziert, um dort die Grauwertvarianzen der Dachflächen zu bestimmen. Da Dächer in Luftbildern fast immer homogene Grauwerte aufweisen, wird das Dach mit der geringsten Grauwertvarianz als die beste Rekonstruktion definiert. Diese Dachfläche ist in Abbildung 6.4 durch ein weißes Polygon repräsentiert. Eine solche Kombination geometrischer und radiometrischer Bedingungen wird beispielsweise auch von Fua & Hanson [1988] durchgeführt, wobei in dieser Arbeit Geometrie und Radiometrie segmentierter Strukturen durch die Effektivität der extrahierten Beschreibungen im Sinne einer minimalen Beschreibungslänge bewertet werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Bewertung der Rekonstruktionen besteht darin, die Höhen des gemessenen DHM mit den Höhen des rekonstruierten Daches an den entsprechenden Stellen zu vergleichen. Da das zur Verfügung stehende DHM durch Stereobildzuordnung bestimmt wurde und deshalb relativ unzuverlässig ist, wurde dieses Verfahren nicht eingesetzt. Ein solches Vorgehen ist vor allem dann sinnvoll, wenn aus Messungen mit

einem Laserscanner zuverlässige Höhenmessungen zur Verfügung stehen. Abbildung 6.5 stellt die ausgewählte Dachrekonstruktion über dem bereinigten DHM als Perspektivansicht dar. Zur vollständigen Rekonstruktion des Gebäudes wird abschließend der Abstand des Daches zu dem bereinigten DHM berechnet, um den noch fehlenden Parameter der Gebäude*höhe* zu bestimmen.

Die Parameter eines Daches werden zunächst aus den vier Linien einer Gruppierung bestimmt. Aus den beobachteten Bild- und Höhendaten werden jedoch für ein Dach häufig mehr als vier lineare Segmente extrahiert. Zusätzliche Elemente, die in der ursprünglichen Gruppierung nicht enthalten waren, können in einem zweiten Schritt zur Stützung und Verbesserung der geschätzten Dachparameter genutzt werden. Dazu wird nach der Bestimmung der Dachparameter aus vier Liniensegmenten in der Nähe von Modelllinien des rekonstruierten Daches nach weiteren linearen Segmenten gesucht. Falls diese zusätzlichen Linien zu einer Verbesserung des Ausgleichungsergebnisses, d.h. zu einer Verringerung von $\hat{\sigma}_0$ führen, werden sie in die Parameterschätzung mit einbezogen. Abbildung 6.6 zeigt ein rekonstruiertes Gebäude, das für diese Darstellung in das Stereobildpaar projiziert wurde. Die für die Rekonstruktion verwendeten linearen Segmente werden durch die schwarzen Linien repräsentiert. Die im zweiten Schritt hinzugenommenen Linien sind etwas dünner dargestellt.

7 Ergebnisse des Verfahrens

Um das Potential des vorgestellten Verfahrens zu demonstrieren, wurde es auf zwei Testdatensätze angewendet, die von der Arbeitsgruppe III/3 *Semantic Modelling and Image Understanding* der ISPRS im Rahmen des *Test on Image Understanding* zur Verfügung gestellt wurden [Fritsch, Sester & Schenk 1994]. Die Bildbeispiele, die in den vorigen Kapiteln zur Illustration der einzelnen Verfahrensschritte dienten, stellen ebenfalls Ausschnitte aus diesem Datenmaterial dar. Der ursprüngliche Maßstab der analogen Luftbilder betrug 1:4000. In den Testdatensätzen waren neben den Bildern auch Digitale Höhenmodelle mit einer Rasterweite von $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ enthalten, die mit Hilfe des kommerziellen Programmpakets MATCH-T zur automatischen Stereobildzuordnung [Ackermann & Krzystek 1991] erzeugt wurden. Um diese geringe DHM-Rasterweite zu ermöglichen, wurden für die Stereobildzuordnung die analogen Luftbilder mit einer Auflösung von $15 \mu\text{m}$, d.h. 6 cm Pixelgröße am Boden digitalisiert. Für die automatische Gebäuderekonstruktion aus Grauwertkanten und für die Erzeugung aller Abbildungen in dieser Arbeit wurde dagegen eine Bildauflösung von $60 \mu\text{m}$, d.h. eine Pixelgröße am Boden von 24 cm verwendet. Beide Datensätze überdecken jeweils quadratische Gebiete mit einer Seitenlänge von 250 m. Im Testdatensatz *Vorort* herrscht lockere Bebauung mit Einfamilienhäusern vor, insgesamt sind 38 Häuser enthalten. In dem zweiten Datensatz *Hochhaus* treten hauptsächlich größere Wohnblöcke auf, hier sind 18 Gebäude abgebildet.

Für beide Datensätze wurde zunächst eine Gebäuderekonstruktion mit extrahierten Grauwertkanten durchgeführt, die Höhendaten wurden in diesem (Standard-)Verfahren nur zur Detektion der Gebäude eingesetzt. Zur Visualisierung wurden die extrahierten und selektierten linearen Segmente und die Rekonstruktionsergebnisse in die vorhandenen Stereobildpaare projiziert; diese Abbildungen sind zusammen mit einer Beschreibung der Ergebnisse in Abschnitt 7.1 enthalten. Daneben wird in diesem Abschnitt die Verbesserung der Geometrie der rekonstruierten Gebäude- bzw. Geländeoberfläche durch die Gebäuderekonstruktion am Beispiel der Erzeugung von Orthophotos demonstriert.

Eine erweiterte Fusion der Bild- und Höhendaten durch die Kombination von Linien aus der Krümmungsanalyse des DHM mit Linien aus der Stereozuordnung extrahierter Bildkanten wird in Abschnitt 7.2 vorgestellt. Die Rekonstruktion aus DHM-Bruchkanten dient dabei zur Beschaffung von Näherungswerten für die anschließende verfeinerte Rekonstruktion aus Grauwertkanten. Dies ermöglicht eine erhebliche Beschleunigung des Verfahrens ohne Verlust an geometrischer Genauigkeit. Die Verwendung von DHM-Bruchkanten für die Gebäuderekonstruktion erfordert eine relativ hohe Qualität der zugrunde liegenden Höhendaten. Da diese Qualität nur für den Datensatz *Hochhaus* zur Verfügung stand, wurde das Verfahren nur für dieses Beispiel angewendet.

Die Interpretation der Ergebnisse, insbesondere eine Analyse der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der mit dem implementierten Verfahren bestimmten Gebäuderekonstruktionen ist Thema des Abschnitts 7.3.1. Dabei werden die durch Fehlzuordnungen, Modellierungsfehler oder geometrische Ungenauigkeit der extrahierten linearen Segmente entstehenden Differenzen zwischen der rekonstruierten und der wahren Gebäudegeometrie diskutiert. Unter anderem wird in diesem Abschnitt zur Abschätzung der externen Genauigkeit des Verfahrens ein Vergleich automatisch rekonstruierter Gebäude mit manuell an einer Stereoworkstation bestimmten Gebäudeparametern durchgeführt.

7.1 Rekonstruktion mit Grauwertkanten

Eine Möglichkeit zur gemeinsamen Nutzung der Bild- und Höhendaten besteht darin, durch die Analyse der Höhendaten Suchbereiche für Gebäude zu detektieren, innerhalb dieser Bereiche aus dem Bildpaar Grauwertkanten zu extrahieren und diese durch Stereozuordnung dreidimensional zu bestimmen. In den Abbildungen 7.1 und 7.2 bzw. 7.5 und 7.6 sind die Stereobildpaare der Testdatensätze *Vorort* bzw. *Hochhaus* zusammen mit dem Ergebnis der in den Kapiteln 3 und 4 beschriebenen Extraktion und Selektion linearer Segmente dargestellt. Innerhalb der durch Analyse von Höhenlinien detektierten lokalen Höhenmaxima (weiße Polygone) wurden in den Bildpaaren Grauwertkanten extrahiert und durch Stereozuordnung dreidimensional bestimmt (schwarze Linien). Als Datengrundlage für die Gebäudedetektion wurden dabei die in Abbildung 7.9 bzw. 7.10 dargestellten DHM aus einer automatischen Stereobildzuordnung verwendet.

Das Resultat der automatischen Gebäuderekonstruktion ist für den Datensatz *Vorort* in den Abbildungen 7.3 und 7.4 bzw. für den Datensatz *Hochhaus* in den Abbildungen 7.7 und 7.8 dargestellt. Aus den Parametern der



Abbildung 7.1: Gebäudehypothesen (lokale Höhenmaxima) und extrahierte lineare Segmente für den Datensatz *Vorort* (linkes Bild).



Abbildung 7.2: Gebäudehypothesen (lokale Höhenmaxima) und extrahierte lineare Segmente für den Datensatz *Vorort* (rechtes Bild).



Abbildung 7.3: Stereobildpaar mit den rekonstruierten Gebäuden als Drahtmodelle und den genutzten linearen Segmenten für den Datensatz *Vorort* (linkes Bild).



Abbildung 7.4: Stereobildpaar mit den rekonstruierten Gebäuden als Drahtmodelle und den genutzten linearen Segmenten für den Datensatz *Vorort* (rechtes Bild).



Abbildung 7.5: Gebäudehypothesen (lokale Höhenmaxima) und extrahierte lineare Segmente für den Datensatz *Hochhaus* (linkes Bild).



Abbildung 7.6: Gebäudehypothesen (lokale Höhenmaxima) und extrahierte lineare Segmente für den Datensatz *Hochhaus* (rechtes Bild).



Abbildung 7.7: Stereobildpaar mit den rekonstruierten Gebäuden als Drahtmodelle und den genutzten linearen Segmenten für den Datensatz *Hochhaus* (linkes Bild).



Abbildung 7.8: Stereobildpaar mit den rekonstruierten Gebäuden als Drahtmodelle und den genutzten linearen Segmenten für den Datensatz *Hochhaus* (rechtes Bild).

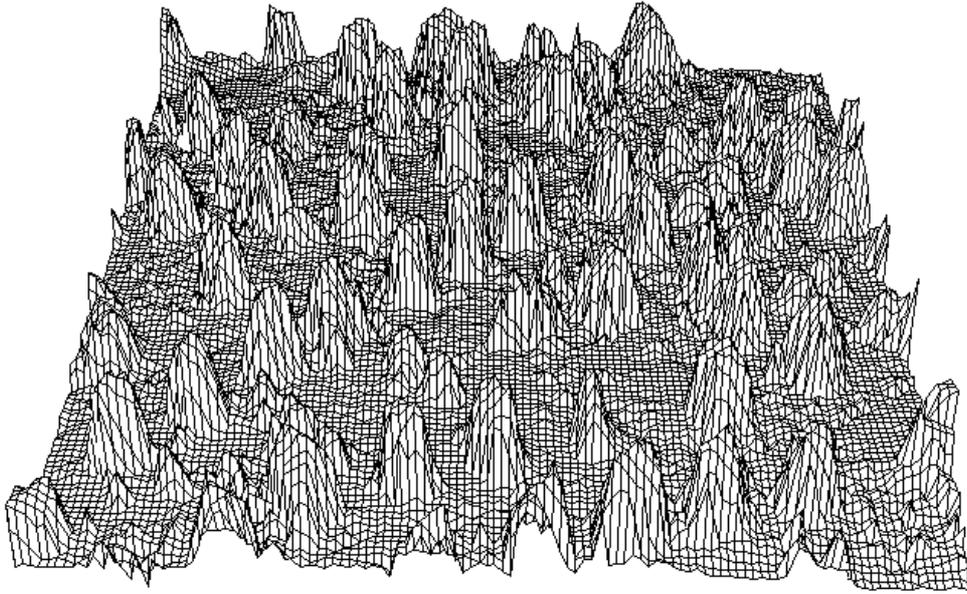


Abbildung 7.9: DHM des Datensatzes *Vorort*.

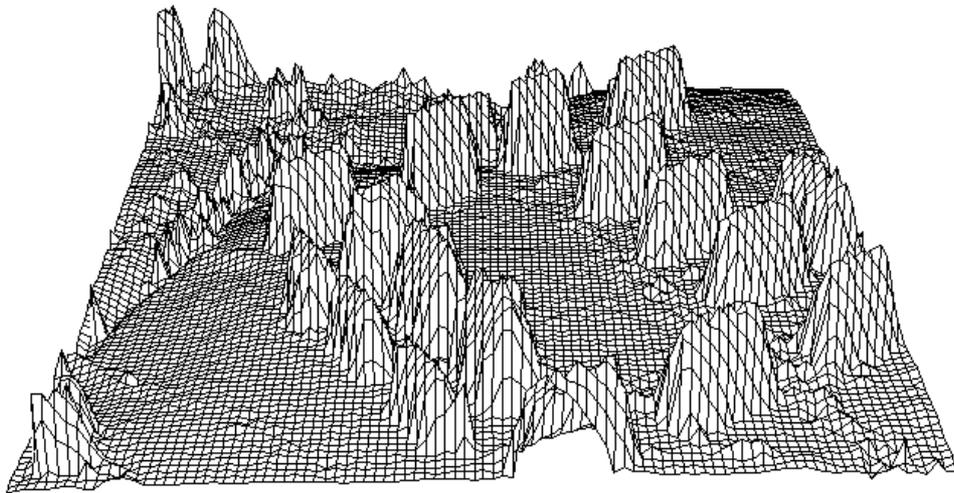


Abbildung 7.10: DHM des Datensatzes *Hochhaus*.



Abbildung 7.11: Rekonstruierte Perspektivansicht des Datensatzes *Vorort*.



Abbildung 7.12: Rekonstruierte Perspektivansicht des Datensatzes *Hochhaus*.

rekonstruierten Gebäude (Position, Orientierung, Länge, Breite und Dachneigung) wurden zur Visualisierung dreidimensionale Drahtmodelle berechnet und unter Berücksichtigung verdeckter Flächen in das zugehörige Stereobildpaar projiziert (schwarze Polygone). Die linearen Segmente, die zur Rekonstruktion verwendet wurden, entsprechen in diesen Abbildungen den weißen Linien. Auf diese Weise können die Ergebnisse der Gebäuderekonstruktion auch an einer digitalen photogrammetrischen Arbeitsstation dreidimensional dargestellt und durch einen Operateur überprüft werden. Eine sehr anschauliche Darstellung der Ergebnisse des Rekonstruktionsprozesses ist durch die Generierung von künstlichen Perspektivansichten (Abbildung 7.11 bzw. Abbildung 7.12) möglich. Zur Erzeugung der Perspektivdarstellungen wurden die Gebäudeseiten abhängig von ihrer Orientierung bezüglich einer künstlichen Lichtquelle schattiert. Durch die Elimination der detektierten lokalen Höhenmaxima wurden aus den gemessenen DHM Beschreibungen der Geländeoberfläche durch Digitale Geländemodelle abgeleitet (siehe Abschnitt 4.1.3). Diesen Geländemodellen wurden für die Erzeugung der Perspektivdarstellungen die vorhandenen Bilddaten überlagert. Die Diskussion der abgebildeten Ergebnisse hinsichtlich der erreichten geometrischen Genauigkeit und Zuverlässigkeit erfolgt in Abschnitt 7.3.

Erzeugung von Orthophotos



Abbildung 7.13: Orthophoto aus DHM.



Abbildung 7.14: Orthophoto aus DGM.

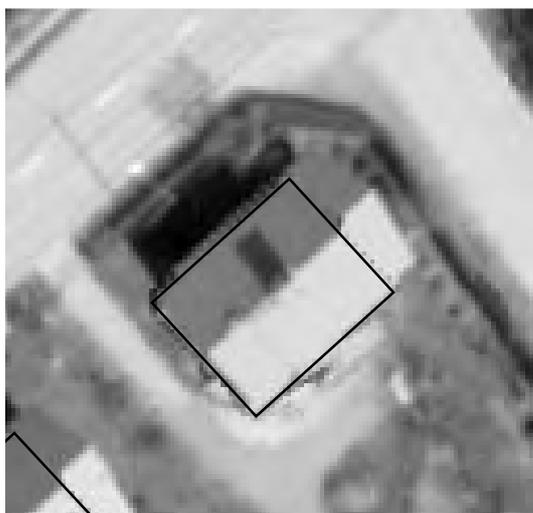


Abbildung 7.15: Orthophoto aus DGM und 3D-Gebäudemodell, linkes Bild überlagert.

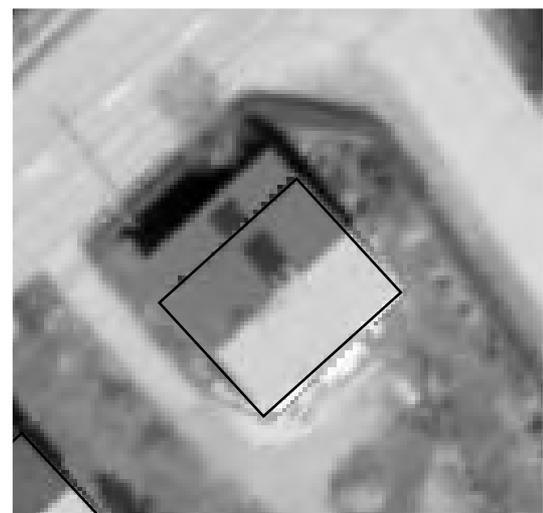


Abbildung 7.16: Orthophoto aus DGM und 3D-Gebäudemodell, rechtes Bild überlagert.

Neben den dargestellten Perspektivansichten können aus den Ergebnissen der Gebäuderekonstruktion auch kor-

rigierte Orthophotos erzeugt werden. Um das Potential des Rekonstruktionsverfahrens durch die Verbesserung der Oberflächenbeschreibungen für solche Anwendungen zu demonstrieren, soll an dieser Stelle kurz auf die Herstellung von Orthophotos in bebauten Gebieten eingegangen werden.

Orthophotos erlauben eine einfache Kombination von Bilddaten mit anderen geokodierten Daten wie Straßen, Grundstücksgrenzen oder Versorgungseinrichtungen, die innerhalb eines Geo-Informationssystems vorliegen. Aus diesem Grund ist die Produktion von Orthophotos ein wichtiger Anwendungsbereich der photogrammetrischen Bildverarbeitung. Innerhalb bebauter Gebiete treten bei der Orthophotoproduktion jedoch Probleme auf, die aus der unzureichenden Beschreibung der aufgenommenen Oberflächen durch die vorhandenen Höhendaten resultieren. Die Abbildungen 7.13 bis 7.16 stellen für einen identischen Bildausschnitt verschieden Orthophotos dar; für die Herstellung dieser Orthophotos wurden jeweils unterschiedliche Höhendaten verwendet. Dem in Abbildung 7.13 gezeigten Orthophoto liegt das durch Stereobildzuordnung gemessene DHM zugrunde. Wie dieses Beispiel illustriert, wird durch die unzureichende Beschreibung der Oberflächengeometrie durch das DHM das abgebildete Gebäude verzerrt abgebildet. Wird für die Erzeugung eines Orthophotos ein DGM, d.h. eine Repräsentation der Geländeoberfläche verwendet, liegt das Gebäude auf der Geländeoberfläche, die Dachfläche ist durch die Reliefversetzung gegenüber dem Gebäudegrundriß versetzt (Abbildung 7.14).

Durch das implementierte Verfahren zur Gebäuderekonstruktion wurde aus dem gemessenen DHM ein DGM berechnet; die Gebäude werden getrennt davon als dreidimensionale CAD-Objekte repräsentiert. Aus dem DGM und den dreidimensionalen Beschreibungen der Gebäude kann so die Geometrie der aufgenommenen Oberflächen gut rekonstruiert werden. Dadurch ist, wie in Abbildung 7.15 und 7.16 zu sehen, die Korrektur der Reliefversetzungen von Gebäudedächern problemlos möglich. Zur besseren Visualisierung wurde bei diesen Abbildungen der Grundriß des rekonstruierten Gebäudes als schwarzer Polygonzug dargestellt. Die verbleibenden Fehler resultieren aus Verdeckungen der Geländeoberfläche durch das Gebäude innerhalb der verwendeten Luftbilder. Für die Erzeugung der Abbildung 7.15 wurde das linke Bild, für die Herstellung der Abbildung 7.16 das rechte Bild des Stereopaars verwendet. Im Prinzip ist eine Korrektur dieser Verdeckungen durch eine weitere geometrische Analyse der Aufnahmegeometrie, des DGM und der rekonstruierten Gebäude sowie durch die simultane Verwendung beider Bilder möglich. Weitere radiometrische Korrekturen wie die Elimination der Gebäudeschatten durch Einbeziehen des berechneten Sonnenstandes können ebenfalls durchgeführt werden [Gruber, Pasko & Leberl 1995].

7.2 Rekonstruktion mit DHM-Bruchkanten

Dreidimensionale lineare Segmente können nicht nur durch Stereozuordnung von Grauwertkanten sondern auch – falls Höhendaten in ausreichender Genauigkeit verfügbar sind – durch eine Krümmungsanalyse des DHM bestimmt werden (Abschnitt 3.2). Werden für einen gemeinsamen Bereich beide Verfahren zur Extraktion der Linien genutzt, können durch die Kombination der extrahierten Primitive die spezifischen Vorteile der jeweiligen Datenquellen genutzt werden.

Grauwertkanten werden nicht nur durch Bruchkanten oder Objektgrenzen, sondern auch durch Beleuchtung (Schatten, Reflexionen), Änderung des Oberflächenmaterials oder Textur verursacht. Die grundsätzliche Problematik aller Segmentierungsalgorithmen liegt somit darin, daß Grauwertsprünge, die für die weitere Bearbeitung als potentielle Bruchkanten und Objektgrenzen interpretiert werden, viele andere Ursachen haben können. Zusätzlich entstehen nach der Extraktion der Linien aus dem Bildpaar im weiteren Verarbeitungsschritt der Stereozuordnung durch Fehlzuordnungen viele willkürliche Linien. Dadurch werden aus Stereobildpaaren häufig lineare Segmente extrahiert, die nicht auf Bruchkanten von Dächern zurückgehen (siehe Abbildung 6.2). Da auch ein gewisser Anteil dieser Linien gruppiert und erst nach der Parameterschätzung verworfen werden kann, ist eine Gebäuderekonstruktion mit linearen Segmenten aus einem Stereobildpaar teilweise sehr zeitaufwendig. Dagegen sind Linien, die aus einem DHM extrahiert wurden, in jedem Fall Bruchkanten von Oberflächen. Deshalb gehen diese Linien mit größerer Wahrscheinlichkeit auf Dachkanten zurück. Aus diesem Grund müssen bei der Verwendung von DHM-Bruchkanten für die Gebäuderekonstruktion insgesamt weniger Linien überprüft werden.

Abbildung 7.17 zeigt einen DHM-Ausschnitt, der typisch für die Qualität des Datensatzes *Vorort* ist. Aufgrund der geringen Größe der Gebäude, dem Fehlen von ausreichender Textur auf den Dächern und dem teilweise schwachen Kontrast zwischen Dach- und Geländeoberfläche ist die Qualität der Höhendaten relativ schlecht. Eine sinnvolle Extraktion dreidimensionaler linearer Segmente aus diesem DHM-Ausschnitt ist nicht möglich.

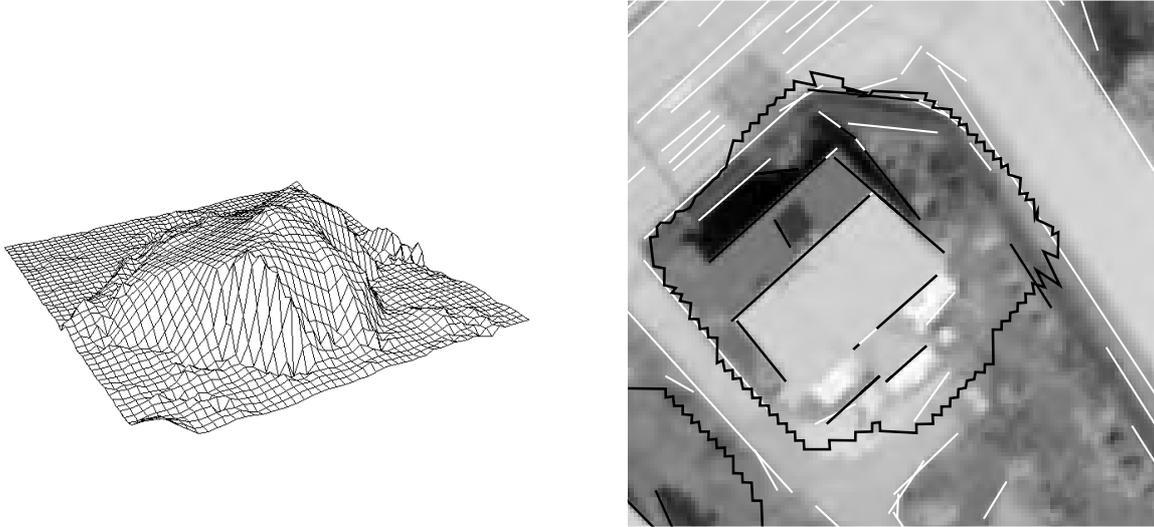


Abbildung 7.17: DHM-Ausschnitt und korrespondierender Bildausschnitt mit dem Ergebnis der Linienextraktion aus Bildern für den Testdatensatz *Vorort*.

Die Höhendaten wurden deshalb für diesen Testdatensatz nur zur Detektion von Suchbereichen (schwarzes Polygon) verwendet, auf die die nachfolgenden Prozessierungsschritte beschränkt werden konnten. Die eigentliche Rekonstruktion erfolgte mit linearen Segmenten, die aus dem Stereobildpaar extrahiert wurden.

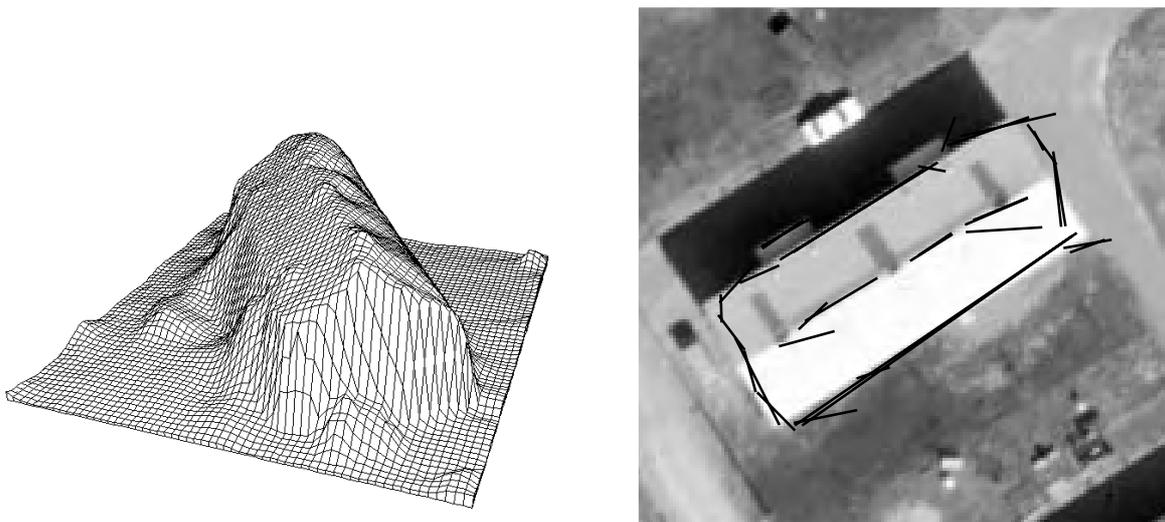


Abbildung 7.18: Ausschnitt aus dem DHM und korrespondierender Bildausschnitt mit extrahierten DHM-Bruchkanten für den Testdatensatz *Hochhaus*.

Der zweite Testdatensatz *Hochhaus* beinhaltet einzeln stehende, große Gebäude. Abbildung 7.18 (links) zeigt einen typischen Ausschnitt aus den Höhendaten, die für diesen Datensatz zur Verfügung standen. Die gute Qualität der Höhendaten dieses Datensatzes ermöglichte eine Extraktion von DHM-Bruchkanten nach dem in Abschnitt 3.2 beschriebenen Verfahren. Diese entsprechen den in den korrespondierenden Bildausschnitt projizierten schwarzen Linien (Abbildung 7.18 rechts). Für den gesamten Datensatz *Hochhaus* wurden zunächst lokale Höhenmaxima detektiert. Diese Suchbereiche sind in Abbildung 7.19 dem DHM bzw. dem linken Bild des Stereopaars als weiße Polygone überlagert. Innerhalb dieser Regionen wurden lineare Segmente nach dem in Abschnitt 4 beschriebenen Verfahren an DHM-Bruchkanten extrahiert. Die Liniensegmente sind in Abbildung 7.19 als schwarze Linien dargestellt.

Das Ergebnis der Rekonstruktion mit den extrahierten DHM-Bruchkanten ist in Abbildung 7.20 dargestellt.

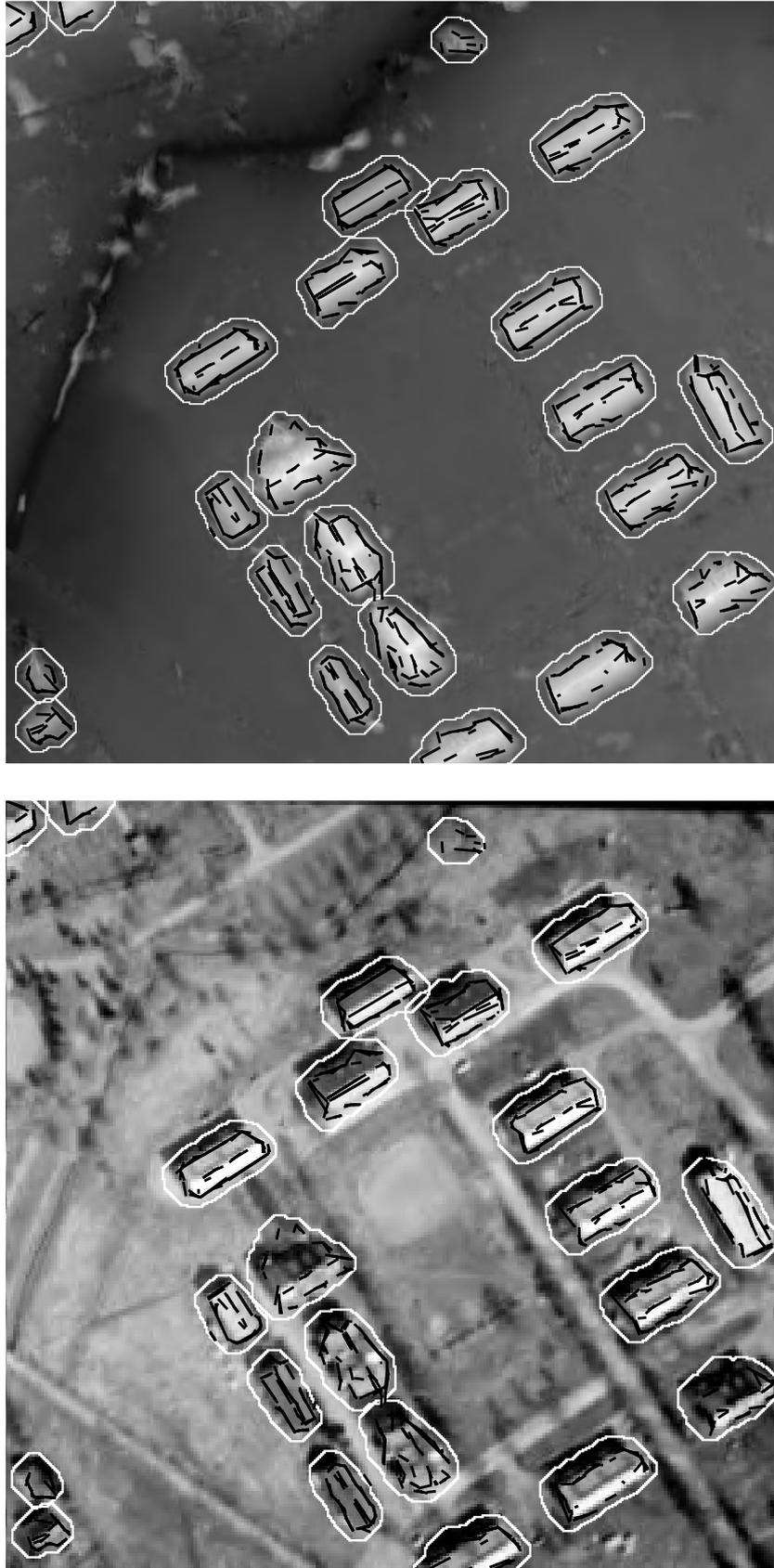


Abbildung 7.19: DHM mit zugehörigem Bildausschnitt, extrahierten lokalen Maxima (weiß) und DHM-Bruchkanten (schwarz) für den Datensatz *Hochhaus*.



Abbildung 7.20: Rekonstruktion durch extrahierte DHM-Bruchkanten für den Datensatz *Hochhaus*.

Innerhalb des Datensatzes *Hochhaus* konnte ein Gebäude nicht aus den vorhandenen DHM-Bruchkanten rekonstruiert werden, da an dieser Stelle ein direkt neben dem Gebäude stehender Baum ebenfalls in der berechneten DHM-Oberfläche enthalten ist (siehe auch Abbildung 7.19), so daß in diesem Bereich die Qualität des DHM für die Extraktion der Dachbruchkanten nicht ausreichend war.

Ein Nachteil bei der ausschließlichen Verwendung von Höhendaten liegt in der – verglichen mit Luftbildern – geringen Meßpunktdichte, was zu einer relativ geringen Lagegenauigkeit der extrahierten Bruchkanten führt. Bruchkanten von Oberflächen ergeben sich aus Maxima der zweiten Ableitung eines DHM, Grauwertkanten sind Maxima der ersten Ableitung des Bildes. Da durch Differenzieren der Effekt von Rauschen verstärkt wird, führt dies – neben den generellen Problemen der DHM-Generierung in bebauten Gebieten – zusätzlich zu einer geringeren Genauigkeit von linearen Segmenten aus DHM-Bruchkanten. Um die Vorteile beider Extraktionsverfahren, d.h. die größere *Zuverlässigkeit* der Geradenstücke bei der Verwendung eines DHM und die größere *Genauigkeit* der Segmente bei der Verwendung von Bilddaten zu nutzen, werden die extrahierten Primitive kombiniert.



Abbildung 7.21: Rekonstruktionsergebnis mit DHM-Bruchkanten.



Abbildung 7.22: Verbessertes Rekonstruktionsergebnis mit aus dem Stereobild extrahierten Linien.

In Abbildung 7.21 ist ein Ausschnitt aus dem Datensatz *Hochhaus* mit dem aus DHM-Bruchkanten rekonstruierten Gebäude dargestellt. Dieses Rekonstruktionsergebnis kann mit linearen Segmenten aus der Stereozuordnung extrahierter Grauwertkanten, die eine höhere geometrische Genauigkeit besitzen, verbessert werden. Dazu wird in der Nähe der Modelllinien der vorläufigen Rekonstruktion nach dreidimensional bestimmten Grauwertkanten gesucht. Abbildung 7.22 zeigt die verbesserten Rekonstruktionen mit den verwendeten linearen Segmenten. Für den Datensatz *Hochhaus* wurden durch die Gruppierung (Abschnitt 4.2) aus den extrahierten DHM-Bruchkanten insgesamt 1026 Kombinationen von jeweils vier linearen Segmenten detektiert und durch eine Parameterschätzung überprüft. Für den Fall, daß – wie in Abschnitt 7.1 vorgestellt – ausschließlich aus dem Stereobildpaar extrahierte lineare Segmente verwendet werden, ergeben sich für diesen Datensatz 30886 mögliche Kombinationen zur weiteren Bearbeitung. Die Fusion der linearen Segmente aus Höhendaten mit linearen Segmenten aus zugeordneten Grauwertkanten ermöglicht demnach – ohne einen Verlust an geometrischer Qualität hinnehmen zu müssen – eine erhebliche Ersparnis an Rechenzeit.

Die Fusion von Bild- und Höhendaten wurde hier auf der obersten Ebene des Interpretationsprozesses durchgeführt, d.h. die Rekonstruktion aus DHM-Bruchkanten dient als Näherungsinformation für die Rekonstruktion aus Grauwertkanten. Denkbar ist eine Fusion jedoch auch auf der mittleren Ebene, bei der extrahierte DHM-Bruchkanten die Suche nach Grauwertkanten im Stereobildpaar auslösen oder auf der untersten Ebene, bei der Grauwertkanten als potentielle Bruchkanten in die Erzeugung des DHM einbezogen werden.

7.3 Interpretation der Ergebnisse

7.3.1 Zuverlässigkeit des Verfahrens

Um eine Rekonstruktion mit dem implementierten Verfahren durchführen zu können, müssen für jedes Gebäude mindestens vier lineare Segmente als Beobachtungen zur Verfügung stehen; zwei gegenüberliegende Firstlinien und zwei gegenüberliegende Trauflinien bzw. zwei gegenüberliegende Firstlinien, eine Trauflinie und eine Giebellinie. In den Abbildungen 7.1 und 7.2 bzw. 7.5 und 7.6 sind für die Datensätze *Vorort* bzw. *Hochhaus* alle linearen Segmente in das Stereobildpaar projiziert, die für die Rekonstruktion zur Verfügung standen. Aus dem Ergebnis des Verfahrens (Abbildungen 7.3 und 7.4 bzw. 7.7 und 7.8) ist ersichtlich, daß eine Rekonstruktion nicht durchgeführt werden kann, wenn für eine oder mehrere Gebäudeseiten keine linearen Segmente vorhanden sind. Dies ist bei der Verwendung von Grauwertkanten dann der Fall, wenn zwischen einer Dachkante und der Geländeoberfläche sehr geringer Kontrast besteht, oder wenn eine Dachkante durch ein anderes Objekt beispielsweise einen Baum, komplett verdeckt wird.

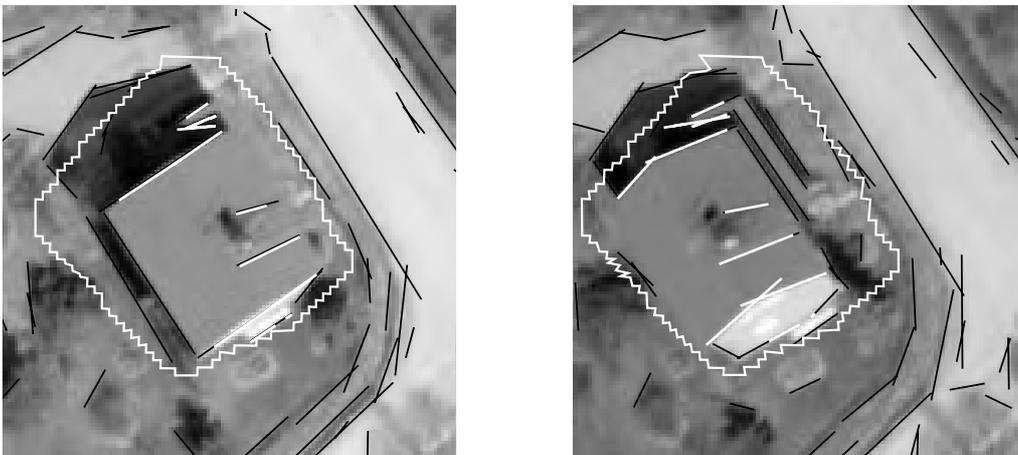


Abbildung 7.23: Beispiel für eine mißlungene Rekonstruktion aufgrund fehlender Linien.

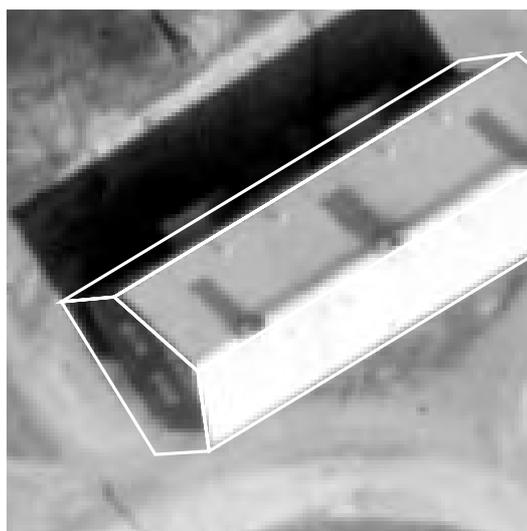


Abbildung 7.24: Beispiel für eine falsche Rekonstruktion durch Fehlzuordnungen extrahierter Linien.

Abbildung 7.23 verdeutlicht anhand eines kleineren Bildausschnittes die Ursachen einer mißlungenen Rekonstruktion. Das Gebäude wurde zwar durch die Analyse des DHM detektiert (weißes Polygon), die extrahierten Bildkanten (schwarze Linien) reichen jedoch nicht für eine Rekonstruktion aus. Aufgrund des schwachen Kontrasts wurden weder entlang der Firstlinie noch entlang der linken oder rechten Dachtraufe in beiden Bildern des



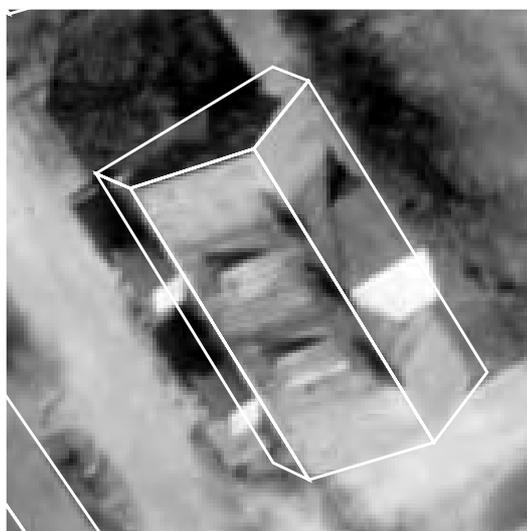
a) fehlender Anbau



b) nicht erfaßter Dachüberstand



c) fehlender Anbau



d) fehlende Erker

Abbildung 7.25: Beispiele für unzureichende Modellierung.

Stereopaars Linien extrahiert. Da mit den daraus abgeleiteten dreidimensional definierten linearen Segmenten (weiße Linien) die Hausbreite nicht bestimmt werden kann, ist an dieser Stelle die Rekonstruktion des Gebäudes nicht möglich. Eine Verbesserung des Kontrastes zwischen Dach- und Geländeflächen kann unter Umständen durch die Verwendung des roten Kanals bei Aufnahmen im nahen Infrarotbereich erreicht werden, die Probleme des Verfahrens bei sehr schwachem Kontrast bleiben jedoch prinzipiell erhalten. Schwierigkeiten mit geringem Kontrast können natürlich umgangen werden, wenn Höhendaten aus Messungen mit einem scannenden Laser verwendet werden; aus diesen Daten ist eine zuverlässigere Rekonstruktion zu erwarten.

Insgesamt sind im Datensatz *Vorort* 38 Gebäude sichtbar. Bei dieser Zählung wurden Nebengebäude, Garagen oder kleinere Schuppen nicht berücksichtigt. Von diesen Gebäuden wurden 30 rekonstruiert, wobei die Rekonstruktion eines am oberen Bildrand nicht mehr komplett sichtbaren Gebäudes grob falsch war. Dies ergibt eine Erfassungsrate von 76% an korrekten Rekonstruktionen. Unter der Annahme einer Binomialverteilung beträgt die berechnete Standardabweichung dieser Quote 6.4%³

Im Testdatensatz *Hochhaus* sind 17 größere und 1 kleineres Gebäude komplett enthalten. Die Rekonstruktion mit Grauwertkanten wurde für alle 17 größeren Gebäude erfolgreich durchgeführt, aufgrund des schwachen Kon-

³ $\sigma_{Quote} = \sqrt{npq} = \sqrt{37 \cdot \frac{30}{37} \cdot \frac{7}{37}} = 2.4$

trastes wurde das kleinere Gebäude in der linken unteren Ecke nicht erfaßt. Dies entspricht einer Erfolgsquote von 94% mit $\sigma_{Quote} = 5.7\%$. Für den Datensatz *Hochhaus* konnte auch eine Rekonstruktion mit DHM-Bruchkanten durchgeführt werden (Abschnitt 7.2). Dabei konnte ebenfalls ein – in diesem Fall anderes – Gebäude nicht rekonstruiert werden, d.h. auch bei diesem Verfahren lag die Erfassungsrate bei 94%.

Bei dem implementierten Verfahren können verschiedene Ursachen für Differenzen zwischen wahrer Objektgeometrie und der extrahierten Objektbeschreibung auftreten. Grobe Fehler entstehen vor allem durch Fehlzuordnungen, d.h. es werden lineare Segmente für die Rekonstruktion verwendet, die nicht auf die Abbildung von Dachkanten zurückgehen. Abbildung 7.24 zeigt ein Gebäude, auf dessen Dach durch Schattenwurf ein lineares Segment extrahiert wurde, das parallel zu einer Giebellinie liegt. Dieses Segment kann für die Rekonstruktion verwendet werden, ohne daß der mittlere Fehler der Ausgleichung signifikant gegenüber einer Rekonstruktion mit den wahren Giebellinien verändert wird. Die Elimination einer solchen Rekonstruktion ist nur durch die Verwendung zusätzlicher Heuristiken möglich. Da das fehlerhaft rekonstruierte Dach eine kleinere Fläche einnimmt als die korrekte Lösung, kann eine Auswahl durch die Berechnung der Überlappung mit dem detektierten Bereich durchgeführt werden, in dem aufgrund der Analyse der Höhendaten ein Gebäude erwartet wird. Liegen mehrere Rekonstruktionen mit ähnlichem mittleren Fehler vor, kann diejenige gewählt werden, die den größeren Überlappungsgrad besitzt. Sind, wie in Abbildung 7.24 zu sehen, die beobachteten linearen Segmente länger als die zugehörigen Modelllinien des rekonstruierten Gebäudes, ist dies ebenfalls ein sehr zuverlässiger Hinweis auf erfolgte Fehlzuordnungen.

Differenzen zwischen wahrer und rekonstruierter Objektgeometrie treten auch in Fällen auf, für die das zu rekonstruierende Gebäude nicht oder nur unzureichend repräsentiert werden kann. Abbildung 7.25 zeigt einige Beispiele aus den bearbeiteten Datensätzen *Vorort* (Bildausschnitte a, c, d) und *Hochhaus* (Bildausschnitt b), für die vorhandene Anbauten, Erker oder Dachgauben nicht rekonstruiert werden konnten, da das verwendete Gebäudemodell deren Repräsentation nicht vorsieht. Ähnlich verhält es sich mit dem Dachüberstand der Gebäude, der ebenfalls nicht modelliert und dadurch auch nicht erfaßt wird.

7.3.2 Geometrische Genauigkeit des Verfahrens

Unter den Voraussetzungen, daß das abgebildete Gebäude durch das verwendete Modell repräsentiert werden kann und daß eine korrekte Zuordnung der extrahierten linearen Segmente zu den Modelllinien erfolgte, entstehen Differenzen zwischen wahrer und rekonstruierter Objektgeometrie nur noch durch die fehlerbehafteten Positionen der beobachteten linearen Segmente. Die Bestimmung der theoretischen Lage- und Höhengenaugigkeiten der aus dem Stereobildpaar bzw. DHM extrahierten linearen Segmente wurde bereits in Abschnitt 3.3 durchgeführt. Für die verwendeten Datensätze *Vorort* und *Hochhaus* beträgt die berechnete Standardabweichung der Linienendpunkte aus der Stereozuordnung extrahierter Grauwertkanten im Mittel

$$\begin{aligned} \text{Lage: } \sigma_{X,Y} &= 13.0 \text{ cm} \\ \text{Höhe: } \sigma_Z &= 43.5 \text{ cm} . \end{aligned}$$

Eine sinnvolle Extraktion von DHM-Bruchkanten war nur für den Datensatz *Hochhaus* möglich (siehe Abschnitt 7.2); für diese DHM-Bruchkanten ergibt sich im Mittel ein Fehler von

$$\text{Lage: } \sigma_{X,Y} = 17.5 \text{ cm} .$$

Die theoretische Höhengenaugigkeit dieser Linien ergibt sich aus der angenommenen Genauigkeit des DHM von 0.01% der Flughöhe zu

$$\text{Höhe: } \sigma_Z = 6.1 \text{ cm} .$$

Während des Schätzprozesses zur Berechnung der Gebäudeparameter nach der Methode der kleinsten Quadrate werden auch die Standardabweichungen der Unbekannten bestimmt. Diese interne Genauigkeit der Parameterschätzung liefert ein Maß, wie gut die beobachteten linearen Segmente an das Gebäudemodell angepaßt werden können. Die berechneten Werte sind in Tabelle 7.1 für die Rekonstruktion aus extrahierten Grauwertkanten (Datensätze *Vorort* und *Hochhaus*) und für die Rekonstruktion aus DHM-Bruchkanten (Datensatz *Hochhaus*)

Datensatz		X_0 [cm]	Y_0 [cm]	Z_0 [cm]	Länge [cm]	Breite [cm]	Neigung [°]
<i>Vorort</i> (Grauwert- kanten)	Minimum	1.5	1.0	7.5	2.5	4.3	0.7
	Maximum	31.8	31.9	37.9	23.4	23.7	10.0
	Mittelwert	11.5	7.6	18.8	9.0	14.2	4.3
<i>Hochhaus</i> (Grauwert- kanten)	Minimum	2.7	0.3	5.8	1.2	6.1	0.7
	Maximum	22.1	37.0	46.5	21.5	35.0	9.1
	Mittelwert	10.1	6.5	22.4	8.2	16.7	3.8
<i>Hochhaus</i> (DHM-Bruch- kanten)	Minimum	7.2	1.7	9.8	6.4	20.1	8.4
	Maximum	77.1	76.5	51.2	55.2	111.4	45.9
	Mittelwert	36.4	21.8	24.3	20.4	50.0	21.9

Tabelle 7.1: Standardabweichungen der rekonstruierten Gebäudeparameter.

enthalten. Dabei ist für jede Rekonstruktion der minimale, maximale und mittlere Wert der berechneten Standardabweichungen aufgeführt. Für die Rekonstruktion aus Grauwertkanten entspricht die innere Genauigkeit den aufgrund der berechneten Lage- und Höhengenaugkeiten der verwendeten linearen Segmente zu erwartenden Werte. Dies gilt jedoch nicht für die Genauigkeiten der Rekonstruktion aus DHM-Bruchkanten. In diesem Fall ist die Standardabweichung der Gebäudeparameter relativ groß, da die berechneten Standardabweichungen der aus dem DHM extrahierten Linien nur unzureichend ihre tatsächliche Genauigkeit widerspiegeln. In Abschnitt 3.3 wurde nur der Fehler der eigentlichen Linienextraktion aus dem DHM bestimmt. Fehler, die sich aus der ungenügenden Repräsentation der Objektgeometrie durch das DHM ergeben, sind darin nicht enthalten.

Um neben der inneren Genauigkeit eine Abschätzung der äußeren Genauigkeit für die rekonstruierten Gebäude durchführen zu können, wurden die acht durch das automatische Verfahren rekonstruierten Eckpunkte jedes Daches zusätzlich an einer photogrammetrischen Arbeitsstation manuell durch einen Operateur gemessen. Bei einem Vergleich der manuell und automatisch bestimmten Punktkoordinaten sind Abweichungen, die durch fehlerhafte Repräsentationen der Wirklichkeit durch das gewählte Modell entstanden, (z.B. Dachüberstand, fehlende Anbauten, Erker oder Dachgauben) nicht enthalten. Die Differenzen zwischen manueller und automatischer Rekonstruktion ergeben sich nur aus den Meßfehlern der Verfahren, d.h. aus den Genauigkeiten gemessener bzw. rekonstruierter Eckpunkte.

Die Genauigkeit photogrammetrisch bestimmter, *signalisierter* Punkte beträgt nach [Kraus 1991]

$$\begin{aligned} \text{Lage: } \sigma_{X,Y_{sig}} &= \pm 8 \mu\text{m im Bild} \\ \text{Höhe: } \sigma_{Z_{sig}} &= \pm 0.01\% \text{ der Flughöhe.} \end{aligned}$$

Aus dem Bildmaßstab von 1:4000 und der Flughöhe von 612 m ergeben sich für die untersuchten Testdatensätze *Vorort* und *Hochhaus* Genauigkeiten von

$$\begin{aligned} \text{Lage: } \sigma_{X,Y_{sig}} &= \pm 3.2 \text{ cm} \\ \text{Höhe: } \sigma_{Z_{sig}} &= \pm 6.1 \text{ cm.} \end{aligned}$$

Da es sich bei Gebäudeecken um natürliche Punkte handelt, addiert sich zu dem Fehler für die Bestimmung signalisierter Punkte noch die Definitionsunsicherheit der gemessenen Punkte. Diese wird für Gebäudeecken von Kraus [1991] mit

$$\begin{aligned} \text{Lage: } \sigma_{X,Y_{def}} &= 7 - 12 \text{ cm} \\ \text{Höhe: } \sigma_{Z_{def}} &= 8 - 15 \text{ cm.} \end{aligned}$$

angegeben, so daß theoretisch für die manuell bestimmten Dacheckpunkte ein Meßfehler von

$$\begin{aligned} \text{Lage: } \sigma_{X,Y_{nat}} &= \sqrt{\sigma_{X,Y_{sig}}^2 + \sigma_{X,Y_{def}}^2} = 8 - 13 \text{ cm} \\ \text{Höhe: } \sigma_{Z_{nat}} &= \sqrt{\sigma_{Z_{sig}}^2 + \sigma_{Z_{def}}^2} = 10 - 16 \text{ cm} \end{aligned}$$

zu erwarten ist. Zum Teil sind jedoch die Eckpunkte der Dächer in dem verwendeten Bildmaterial durch schwachen Kontrast nur schwer zu identifizieren und dadurch schwierig zu messen. So ergaben sich für einzelne Dachecken aus Mehrfachmessungen Standardabweichungen bis zu 20 cm in der Lage und bis zu 30 cm in der Höhe. Fehler der manuellen Messung sind deshalb für beide Datensätze in dieser Größenordnung zu erwarten.

Analog zu dem Meßfehler und der Definitionsunsicherheit bei der manuellen Messung kann auch bei der automatischen Extraktion linearer Segmente zwischen zwei Fehlerquellen unterschieden werden. In Kapitel 3.3 wurde durch die Fehleranalyse die *geometrische* Genauigkeit, d.h. der Meßfehler oder die Positionsgenauigkeit der extrahierten Linien abgeleitet. Wichtig für den Fehler einer Rekonstruktion sind jedoch auch Abweichungen extrahierter Linien von den tatsächlichen Bruchkanten bzw. Grenzen eines Objekts, die durch die *Erfassungsgeneralisierung* [Hake 1982], d.h. die Detailliertheit der Rekonstruktion entstehen. Solche Abweichungen werden in dem vorgestellten Verfahren unter anderem durch die Kombination kollinear Geradenstücke verursacht, bei der parallele Liniensegmente mit einem senkrechten Abstand bis zu 50 cm gruppiert werden (Abschnitt 3.1.2). Dadurch wird beispielsweise die linke und rechte Begrenzung einer Dachrinne zu einer Linie zusammengefaßt. Die berechnete geometrische Genauigkeit bezieht sich dann auf die Lagegenauigkeit der entstandenen, gruppierten Linie, d.h. auf die Mittelachse der Dachrinne. Die Abweichung der entstandenen Linie von der tatsächlichen Objektkante (in diesem Fall der Begrenzung der Dachrinne), d.h. die Erfassungsgeneralisierung oder Definitionsunsicherheit einer Linie, kann deshalb durchaus im Bereich der für die Gruppierung verwendeten Abstände in Normalenrichtung von 50 cm liegen.

Datensatz	X_{RMS} [cm]	Y_{RMS} [cm]	Z_{RMS} [cm]
<i>Vorort</i> (Grauwertkanten)	32.7	32.8	57.9
<i>Hochhaus</i> (Grauwertkanten)	29.9	36.1	60.9
<i>Hochhaus</i> (DHM-Bruchkanten)	60.5	42.5	109.1

Tabelle 7.2: Mittlere Differenzen zwischen manuell bestimmten und automatisch rekonstruierten Eckpunkten der Dächer.

Stehen für die Dachrekonstruktion keine dreidimensionalen linearen Segmente zur Verfügung, die der Firstlinie zugeordnet werden können, muß die Höhe des Dachfirsts durch den Schnitt von Giebellinien berechnet werden. Damit ist die Höhe der Firstlinie geometrisch relativ schlecht bestimmt und deshalb in solchen Fällen im Vergleich zu den Traufkanten mit einem größeren Fehler behaftet. Dadurch lassen sich auch die relativ stark voneinander abweichenden Dachneigungen der rekonstruierten Gebäude in den künstlichen Perspektivansichten (Abbildung 7.11 bzw. Abbildung 7.12) erklären.

Die mittleren Differenzen (RMS) zwischen den manuell gemessenen und den rekonstruierten Dachpunkten ist für beide Datensätze in Tabelle 7.2 dargestellt. Die Werte liegen höher als aus den berechneten inneren Genauigkeiten der Gebäudeparameter (Tabelle 7.1) zu erwarten wäre. Bedingt durch den schwachen Kontrast an den Dachecken ist bei der manuellen Messung mit Fehlern von 20 cm in der Lage bzw. 30 cm in der Höhe zu rechnen. Diese Messungen sind deshalb nur bedingt als exakte Referenzmessungen geeignet. Bei der automatischen Rekonstruktion aus DHM-Bruchkanten kommen beim Vergleich mit der manuellen Messung vor allem systematische Fehler der DHM-Generierung z.B. an verdeckten, vom Nadirpunkt abgewandten Gebäudeseiten zum Tragen. Für den Datensatz *Hochhaus* ist dennoch eine Rekonstruktion ausschließlich aus Höhendaten mit akzeptabler Genauigkeit möglich. Wie das Beispiel *Vorort* zeigt, ist dazu keine allgemeine Aussage möglich. Für die Rekonstruktion dieses Datensatzes ist die Verwendung von Bilddaten unumgänglich, die Rekonstruktion aus Höhendaten ist wegen der mangelnden Qualität des DHM in diesem Bereich nicht möglich. Abweichungen zwischen innerer und äußerer Genauigkeit bei der Rekonstruktion mit Grauwertkanten ergeben sich auch dadurch, daß sich die semantischen Fehler der extrahierten Linien nur zum Teil in den berechneten Standardabweichungen der Gebäudeparameter niederschlagen.

Durch das verwendete relativ einfache Gebäudemodell treten allein durch die nicht erfolgte Modellierung der Dachüberstände Differenzen zwischen Rekonstruktion und Wirklichkeit im Bereich weniger Dezimeter auf. Die in Tabelle 7.2 aufgeführten Differenzen zwischen der manuellen und der automatischen Gebäuderekonstrukti-

on sind deshalb durchaus akzeptabel. Eine Erhöhung der Genauigkeit z.B. durch Verwendung einer höheren Bildauflösung für die Extraktion der Grauwertkanten ist deshalb nicht notwendig.

7.3.3 Zeitvergleich manuelle und automatische Gebäudeerfassung

Für die manuelle Messung der Dächer benötigte ein erfahrener Operateur an einer Stereoarbeitsstation für den Datensatz *Vorort* mit 38 zu messenden Gebäuden insgesamt 20 Minuten, für den Datensatz *Hochhaus* mit 18 zu messenden Gebäuden waren 10 Minuten notwendig. Während der manuellen Messung der Gebäudedächer wurde dabei das Modell 'rechteckiges Gebäude mit Giebeldach' verwendet, d.h. pro Gebäude wurden 6 Dacheckpunkte bestimmt, eine detaillierte Aufnahme beispielsweise von Anbauten oder Erkern wurde nicht durchgeführt.

An einer SUN Sparc 2 wurde für die automatische Gebäuderekonstruktion mit Grauwertkanten für den Datensatz *Vorort* 45 Minuten benötigt. Obwohl im Datensatz *Hochhaus* weniger Gebäude vorhanden sind, liegt die Rechenzeit für dieses Beispiel mit 60 Minuten höher als für den Datensatz *Vorort*. Dies erklärt sich durch die im Mittel größere Anzahl linearer Segmente innerhalb der jeweiligen Suchbereiche für ein Gebäude, was zu einer insgesamt größeren Anzahl von zu überprüfenden Linienkombinationen führt. Die Gebäuderekonstruktion mit DHM-Bruchkanten benötigte für den Datensatz *Hochhaus* 15 Minuten Rechenzeit. Die Rechenzeiten des Verfahrens bewegen sich in einem durchaus vertretbaren Rahmen, vor allem unter dem Aspekt, daß allein durch die fortschreitende Computertechnologie künftig noch größere Rechenleistungen und damit geringere Rechenzeiten zu erwarten sind. Schon jetzt ist durch eine einfache Portierung der Algorithmen auf eine leistungsfähigere Workstation wie z.B. eine Silicon Graphics RW450 eine Verkürzung der Rechenzeit um den Faktor 3 bis 4 zu erreichen. Der beschränkende Faktor für die Qualität und die Einsatzmöglichkeiten der automatischen Gebäuderekonstruktion ist damit weder der notwendige Zeitaufwand noch die geometrische Genauigkeit der bestimmten Rekonstruktionen, sondern vor allem die Möglichkeit, die vorkommenden Gebäude durch das verwendete Gebäudemodell in ausreichendem Maße zu repräsentieren.

8 Mögliche Erweiterungen

Nachdem in den letzten Kapiteln das Konzept und die erreichten Ergebnisse des entwickelten Verfahrens vorgestellt wurden, sollen an dieser Stelle mögliche Erweiterungen behandelt werden. Eine Möglichkeit stellt dabei die Ergänzung der bisher rein kantenbasierten Gebäuderekonstruktion mit einer flächenhaften Nutzung der Bild- und Höhendaten dar (Abschnitt 8.1). Als zweite Möglichkeit zur Erweiterung wird die Integration vorhandener Grundrißdaten in das Verfahren diskutiert, durch die eine Ergänzung bereits existierender zweidimensionaler Datensätze zu 3D-Stadtmodellen erreicht werden soll (Abschnitt 8.2). Zusätzliche Erweiterungen wie der Übergang vom Stereo- zum Mehrbildfall oder die Nutzung von Kontextinformation z.B. der Lage eines Gebäudes relativ zu benachbarten Gebäuden oder Straßen durch einen High-Level Prozeß sollen hier nur erwähnt aber nicht vertieft behandelt werden.

8.1 Flächenbasierte Rekonstruktion

Bei der Rekonstruktion der Gebäude aus Grauwertkanten bzw. DHM-Bruchkanten wird nur Information an den *Grenzen* oder *Bruchkanten* der Objektoberflächen genutzt. Durch die Verwendung von Bild- bzw. Höhendaten auf der *gesamten* Dachfläche kann eine Überprüfung der Rekonstruktion bzw. eine Steigerung der Genauigkeit erreicht werden.

Stehen die Höhendaten durch Messungen mit einem Laserscanner in ausreichender Punktdichte und Genauigkeit zur Verfügung, können diese Daten segmentiert und durch Ebenen oder Flächen zweiter Ordnung approximiert werden [Leonardis, Gupta & Bajcsy 1995], [Bolle & Vemuri 1991]. Dadurch lassen sich beispielsweise Dachflächen in die Höhendaten einpassen. Zur Überprüfung bzw. Verbesserung einer bereits erfolgten Gebäuderekonstruktion können alle im Dachbereich gemessenen Höhendaten durch eine ebene Fläche approximiert und als zusätzliche Beobachtungen verwendet werden. Analog dazu können auch alle im Dachbereich gemessenen Grauwerte eingesetzt werden. Durch die rekonstruierten Dachflächen sind im Stereobildpaar Bereiche definiert, die eine ebene Fläche abbilden; die korrespondierenden Bildausschnitte können deshalb gut durch eine Affintransformation zur Deckung gebracht werden. Die intensitätsbasierte Zuordnung (siehe Abschnitt 2.1.1) dieser Bereiche bietet eine gute Möglichkeit, durch ein zusätzliches, flächenbasiertes Verfahren diese Transformationsparameter zu schätzen [Haala & Hahn 1995]. Gleichzeitig läßt sich dadurch die Konsistenz der angenommenen Affintransformation überprüfen. Führt die Schätzung der Affintransformation zu keinem Ergebnis, ist dies ein Hinweis, daß die Annahme einer Ebene im Raum nicht erfüllt wird und deshalb die überprüfte Dachrekonstruktion fehlerhaft ist. Ist dagegen die Berechnung der Affinparameter mit einer intensitätsbasierten Zuordnung möglich, können diese als zusätzliche Beobachtungen zur Bestimmung der Dachneigung verwendet werden. Die Affintransformation für im Stereobildpaar abgebildete Dachflächen ist durch

$$x_1 = a_{11} x_2 + a_{12} y_2 + a_1 \quad (8-1)$$

$$y_1 = a_{21} x_2 + a_{22} y_2 + a_2 \quad (8-2)$$

definiert. Unter der Annahme, daß das Bildpaar in Epipolargeometrie vorliegt, entspricht die x -Achse des gewählten Bildkoordinatensystems einer Epipolarlinie, so daß

$$y_1 = y_2$$

gilt und dadurch die Parameter a_{21} und a_{22} die Werte

$$a_{21} = 0$$

$$a_{22} = 1$$

annehmen. Durch die Bildzuordnung müssen deshalb in diesem Fall nur noch die Parameter a_{11} und a_{12} bestimmt werden. Diese Parameter legen Maßstab und Scherung der zu transformierenden Bildflächen fest und können mit den folgenden Gleichungen auch für die Bestimmung der Dachneigungen in x - bzw. in y -Richtung verwendet werden [Förstner 1985].

$$Z_x = \frac{a_{11} \frac{\delta x_2}{\delta X} + a_{12} \frac{\delta y_2}{\delta X} - \frac{\delta x_1}{\delta X}}{a_{11} \frac{\delta x_2}{\delta Z} + a_{12} \frac{\delta y_2}{\delta Z} - \frac{\delta x_1}{\delta Z}} \quad (8-3)$$

$$Z_y = \frac{a_{11} \frac{\delta x_2}{\delta Y} + a_{12} \frac{\delta y_2}{\delta Y} - \frac{\delta x_1}{\delta Y}}{a_{11} \frac{\delta x_2}{\delta Z} + a_{12} \frac{\delta y_2}{\delta Z} - \frac{\delta x_1}{\delta Z}} \quad (8-4)$$

Die partiellen Ableitungen der Gleichungen (8-3) und (8-4) ergeben sich aus den Parametern der äußeren Orientierung [Schwidefsky & Ackermann 1976]. Es gilt:

$$\frac{\delta x}{\delta X} = -\frac{\delta x}{\delta X_0} = \frac{1}{N} ((z - z_0) \cos \varphi \cos \kappa - (x - x_0) \sin \varphi) \quad (8-5)$$

$$\frac{\delta x}{\delta Y} = -\frac{\delta x}{\delta Y_0} = \frac{1}{N} ((z - z_0) \cos \varphi \sin \kappa - (y - y_0) \sin \varphi) \quad (8-6)$$

$$\frac{\delta x}{\delta Z} = -\frac{\delta x}{\delta Z_0} = \frac{1}{N} ((z - z_0) (\sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa) - (x - x_0) \cos \omega \cos \varphi) \quad (8-7)$$

mit

$$N = (X - X_0) \sin \varphi - (Y - Y_0) \sin \omega \cos \varphi + (Z - Z_0) \cos \omega \cos \varphi .$$

Das Ergebnis der intensitätsbasierten Zuordnung kann für die Verbesserung der rekonstruierten Dachneigungen verwendet werden. Dies wirkt sich vor allem dann günstig aus, wenn die Firstlinie nicht extrahiert werden konnte und die Bestimmung der Dachneigung deshalb ausschließlich aus den Giebellinien erfolgte. Wie ein Vergleich mit den manuellen Referenzmessungen ergab, konnte auf diese Weise eine geringfügige Verbesserung der automatisch rekonstruierten Neigungen erreicht werden. Da die Qualität der geschätzten Affintransformation stark von der Existenz von Textur auf den Dachflächen abhängt, ist es jedoch schwierig, sie gegenüber der bisher erfolgten, rein kantenbasierten Rekonstruktion zu bewerten und zu gewichten. Deshalb wurde auf eine standardmäßige Verwendung der durch intensitätsbasierte Zuordnung geschätzten Affinparameter verzichtet.

8.2 Integration vorhandener Grundrißdaten

Neben der Ersterfassung von Daten, wie sie mit dem vorgestellten Verfahren durch die Fusion von Bild- und Höhendaten angestrebt wird, ist die Aktualisierung, Ergänzung und Erweiterung vorhandener Datenbestände, die in hochentwickelten Industriestaaten wie der BRD häufig bereits zur Verfügung stehen, ein wichtiger Aspekt eines automatischen Systems zur dreidimensionalen Gebäudeerfassung. In diesem Kapitel sollen Ansätze zur Integration dieser – in den meisten Fällen zweidimensionalen – Daten in das bestehende Verfahren diskutiert werden.

Von großem Interesse für die dreidimensionale Gebäuderekonstruktion sind bereits erfaßte Gebäudegrundrisse, die häufig analog in Form von Plänen oder Karten vorliegen. Eine automatische Digitalisierung solcher Vorlagen ist durch geeignete Verfahren möglich. So wird von Illert [1990] ein Verfahren zur Extraktion von Gebäudeumrissen aus der Deutschen Grundkarte im Maßstab 1 : 5 000 vorgestellt, Carosio [1995] verwendet ein ähnliches Verfahren zur Digitalisierung von Gebäudegrundrissen in der Landeskarte der Schweiz im Maßstab 1 : 25 000. Neben diesen analogen Datenquellen liegt die Grundrißinformation zum Teil bereits digital innerhalb von (zweidimensionalen) Geo-Informationssystemen vor. Ein Beispiel für ein derartiges GIS ist das seit 1977 bundesweit durchgeführte Vorhaben *Automatisierte Liegenschaftskarte* (ALK), das derzeit für ca. 40% der Fläche der BRD zur Verfügung steht. Ein Ausschnitt eines solchen Datensatzes ist in Abbildung 8.1 dargestellt.

Obwohl die Verwendung von a priori Information aus einem 2D-GIS oder einer Karte für die Objektrekonstruktion von großem Nutzen sein kann, stellt sie kein Allheilmittel für die Schwierigkeiten bei der Bildinterpretation, sondern lediglich eine zusätzliche Informationsquelle dar. Abgesehen von der fehlenden dritten Dimension müssen die im GIS enthaltenen Datenstrukturen für einen Einsatz zur automatischen Objektrekonstruktion erweitert werden, da in der Regel komplexere Information benötigt wird, als sie im GIS explizit enthalten ist. Zusätzlich muß vor allem noch Verfahrenswissen eingebracht werden, das angibt, wie mit der vorhandenen Information umzugehen ist. Gebäude werden innerhalb der ALK durch geschlossene Polygone repräsentiert; ein solcher Polygonzug ist auch das Ergebnis der Digitalisierung von Karten oder Plänen. Bedingungen wie horizontale oder vertikale Linien, Relationen wie Parallelität und Kollinearität oder komplexeren Zwängen wie Symmetrien und Wiederholungen bestimmter Strukturen sind von essentieller Bedeutung, um mögliche Zuordnungen zwischen den Elementen (z.B. Punkte, Linien, Flächen) eines Objektmodells und den Elementen der aus Bild- bzw. Höhendaten extrahierten Beschreibung genügend stark einschränken zu können. Deshalb sollten die



Abbildung 8.1: ALK Daten.

teilweise im Grundriß implizit enthaltenen Bedingungen soweit wie möglich automatisch aus den existierenden Daten des 2D-GIS extrahiert und durch ein Gebäudemodell repräsentiert werden.

Innerhalb eines Systems zur dreidimensionalen Gebäuderekonstruktion können bereits existierende Grundrißdaten für zwei zentrale Aufgabenstellungen eingesetzt werden. Zum einen im Rahmen der *Modellierung*, d.h. für die Erzeugung und Auswahl geeigneter Objektrekonstruktionen, zum anderen während der eigentlichen *Rekonstruktion* des Gebäudes, d.h. für die *Zuordnung* des Gebäudemodells zu den aus Bild- bzw. Höhendaten extrahierten Repräsentationen. Die *Auswahl* des passenden Modells für die Rekonstruktion ist für den Fall möglich, daß bereits verschiedene Gebäudemodelle innerhalb einer Datenbank vorhanden sind. Dazu kann beispielsweise überprüft werden, ob gewisse Zwänge oder Relationen, die sich aus dem Grundriß der ALK ergeben (z.B. Parallelität bestimmter Linien bei rechteckigem Gebäudegrundriß) durch ein bestimmtes Gebäudemodell erfüllt werden, d.h. ob dieser Grundriß durch das gewählte Modell repräsentiert werden kann. Daneben können die vorhandenen GIS-Daten im Prinzip auch für die in Abschnitt 5.1 behandelte *Erzeugung von Modellen* durch eine Adaption der existierenden (zweidimensionalen) Modelle verwendet werden. Selbstverständlich kann aus dem Grundriß keine eindeutige Ableitung eines dreidimensionalen Gebäudemodells erfolgen. Bestimmte Hypothesen über die Dachform lassen sich jedoch aus den GIS-Daten z.B. durch die Annahme einer (unbekannten) konstanten Dachneigung konstruieren und während des anschließenden Zuordnungsprozesses verifizieren.

Eine effektive *Einschränkung möglicher Korrespondenzen* während der Zuordnung zwischen den Elementen des Objektmodells und den Elementen der aus den beobachteten Bild- bzw. Höhendaten extrahierten Beschreibung ist für den Fall möglich, daß Position und Orientierung der Modellelemente innerhalb der beobachteten Daten in guter Näherung bekannt sind. Um zu diesem Zweck die vorhandenen Grundrißelemente in ein Bild zu projizieren, wird zu der als bekannt vorausgesetzten äußeren Orientierung des Bildes zusätzlich Höheninformation benötigt. Auch solche Höhendaten sind häufig – wenn auch mit relativ geringer Genauigkeit – in Form von Digitalen Geländemodellen bereits vorhanden. In Baden-Württemberg existiert beim Landesvermessungsamt flächendeckend ein DGM mit 50 m Rasterweite, das aus Glasplattenprofilen der Orthophotoherstellung mit 70 m Profilabstand und 10 m Abtastintervall gewonnen wurde. Die Genauigkeit dieses DGM liegt zwischen 1.5 m in flachem und 5 m in bewegtem Gelände [Sigle 1983].

Wie Abbildung 8.2 für einen Ausschnitt (rechte untere Ecke) des Beispieldatensatzes (Abbildung 8.1) zeigt, können mit Hilfe dieser Höhendaten die Grundrißdaten (weiße Polygone) in das Bild projiziert werden. Da Lage und Orientierung potentieller Dachbruchkanten in der Geländeebene durch die bekannten Gebäudegrenzen sehr



Abbildung 8.2: Bildausschnitt mit Gebäudegrundrissen aus der ALK.

stark eingeschränkt werden, ist eine Detektion von Suchbereichen für Gebäude und vor allem eine Definition von Zuordnungen zwischen extrahierten Grauwertkanten und Linien des Objektmodells effektiv möglich. Auf die Analyse von Höhendaten für die Gebäudedetektion und die Gruppierung, die in dem vorgestellten Algorithmus zur Bestimmung von Näherungswerten der Gebäudeparameter und zur Festlegung der Zuordnungen eingesetzt wurde, kann folglich verzichtet werden.

Ohne größere Modifikationen an dem vorgestellten Verfahren kann bei existierenden Grundrißdaten zunächst überprüft werden, ob der gegebene Gebäudegrundriß durch das verwendete Gebäudemodell repräsentiert werden kann, d.h. ob es sich um ein rechteckiges Gebäude handelt. Ist dies der Fall, können aus den Daten des ALK sowohl die Lageparameter X_0 , Y_0 und die Orientierung φ des Gebäudes, als auch die Formparameter *Breite* und *Länge* des Gebäudes extrahiert und als Beobachtungen der Unbekannten in den Prozeß der Parameterschätzung einbezogen werden. Für die Bestimmung der verbleibenden unbestimmten Parameter Dachneigung α , Höhe des Giebelpunktes Z_0 und Gebäudehöhe *Höhe* genügen in diesem Fall auch weniger als die bisher notwendigen 4 beobachteten linearen Segmente, da die Parameter aus dem bekannten Gebäudegrundriß als zusätzliche Beobachtungen zur Verfügung stehen.

Als Gebäudemodell wurde bis jetzt nur die parametrisierte Darstellung *eines* Gebäudetyps verwendet. Um mehrere Gebäudetypen, z.B. Häuser mit Walmdach oder L- und U-förmige Häuser rekonstruieren zu können, muß in dem bisherigen Verfahren eine Bibliothek von Gebäudemodellen zur Verfügung gestellt werden. Ohne Vorwissen über den Gebäudetyp muß im Prinzip mit jedem verfügbaren Modell eine Rekonstruktion durchgeführt werden, um anschließend anhand des Ergebnisses der Parameterschätzung zu bestimmen, welcher Gebäudetyp am besten zu den beobachteten Primitiven paßt. Dies führt sehr schnell zu einem nicht mehr vertretbaren Rechenaufwand. Steht der Gebäudegrundriß zur Verfügung, kann vorab bestimmt werden, um welchen Gebäudetyp es sich handelt, um so das zu verwendende Gebäudemodell auszuwählen. Eine noch größere Perspektive bietet jedoch die Adaption der vorhandenen (zweidimensionalen) Modelle für die automatische Modellgenerierung.

9 Zusammenfassung und Diskussion

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Verfahren zur automatischen Gebäuderekonstruktion basierend auf der Fusion von Bild- und Höhendaten entwickelt. Obwohl im Prinzip jede der beiden verwendeten Datenquellen (Stereobildpaar mit bekannter äußerer Orientierung bzw. Digitales Höhenmodell) für sich eine Rekonstruktion erlauben würde, wird gerade durch die Kombination beider Datentypen eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit hinsichtlich der Erfolgsrate, des Zeitverhaltens und der geometrischen Genauigkeiten erreicht. Nach der Rekonstruktion der Gebäude können die gemessenen Digitalen Höhenmodelle um diese Objekte reduziert werden, um eine bessere Beschreibung der Geländeoberfläche durch ein Digitales Geländemodell zu erhalten. Die Gebäude werden getrennt davon als CAD-Objekte repräsentiert und bilden gemeinsam mit dem DGM eine Datenbasis für Anwendungen wie dreidimensionale Simulationen oder Visualisierungen.

Objekte, die sich wie Gebäude durch ihre typische dreidimensionale Form von ihrer Umgebung abheben, können durch eine Analyse der Höhendaten relativ einfach detektiert werden. In dem vorgestellten Verfahren werden dadurch Bereiche definiert, auf die weitere Prozessierungsschritte beschränkt werden können. Für eine genauere Rekonstruktion der Gebäudeform – vor allem an den Bruchkanten – ist jedoch in vielen Fällen die Meßpunktdichte und damit die Genauigkeit der Oberflächenbeschreibung durch das DHM nicht ausreichend bzw. nur durch extrem hohen Aufwand zu erreichen. Für die Verifikation der detektierten Gebäudehypothesen, zur genaueren Bestimmung der Gebäudeform und für die Erhöhung des Detailreichtums einer Rekonstruktion ist deshalb der Einsatz von Bilddaten sinnvoll, da diese neben einer hohen geometrischen Auflösung für die weitere Interpretation auch noch zusätzliche Information wie Helligkeit, Farbe oder Textur von Flächen mit einbringen. Neben der Geometrie der zu rekonstruierenden Objekte können so weitere Bedingungen wie homogene Grau- oder Farbwerte bestimmter Objektflächen für die Rekonstruktion verwendet werden.

Die für das Verfahren eingesetzten Höhendaten wurden durch eine merkmalsbasierte Stereobildzuordnung berechnet. Trotz der in bebauten Gebieten bei solchen Bildzuordnungsverfahren üblichen Probleme durch Verdeckungen und Diskontinuitäten war die Qualität dieser Höhendaten in jedem Fall zur Detektion von Suchbereichen für die nachfolgenden Schritte der Gebäuderekonstruktion ausreichen. In dem vorgestellten Verfahren werden dreidimensionale lineare Segmente verwendet, die sich entweder aus Grauwertkanten eines Stereobildpaars oder – bei ausreichender DHM-Qualität – aus Krümmungsmaxima der Höhendaten gewinnen lassen. Diese werden für die Rekonstruktion den Linien eines Gebäudemodells zugeordnet. Durch die Beschränkung der Rekonstruktion auf bestimmte, zuvor aus den Höhendaten detektierte Suchbereiche wird bei der Zuordnung die Gefahr einer kombinatorischen Explosion vermieden, da die Anzahl der zu untersuchenden Linienkombinationen durch die vorausgegangene Gebäudedetektion effektiv eingeschränkt werden kann. DHM-Bruchkanten gehen mit größerer Wahrscheinlichkeit als Grauwertkanten auf die Abbildung von Objektgrenzen bzw. -kanten zurück, sind in der Regel aber ungenauer. Deshalb wird – falls DHM-Kanten zur Verfügung stehen – die Rekonstruktion aus diesen Elementen als Näherungsinformation für die anschließende Rekonstruktion aus Grauwertkanten verwendet. Inwiefern die Qualität von Höhendaten in bebauten Gebieten durch eine weitere Verbesserung der Bildzuordnungsverfahren z.B. mit Verfahren zur Mehrbildzuordnung oder durch den Einsatz von scannenden Lasern gesteigert und dadurch die Bedeutung der Höhendaten für Aufgaben der dreidimensionalen Gebäuderekonstruktion weiter gesteigert werden kann, muß die Zukunft zeigen.

Das Verfahren wurde auf zwei Testdatensätze des *Test on Image Understanding* [Fritsch et al. 1994] angewendet. Von den 38 bzw. 18 abgebildeten Gebäuden konnten mit dem Verfahren 30 bzw. 17 Häuser erfolgreich rekonstruiert werden. Bei den nicht erfolgten Rekonstruktionen führte sehr schwacher Kontrast zwischen den Dachkanten und der Geländeoberfläche dazu, daß für eine oder mehrere komplette Gebäudeseiten keine linearen Segmente extrahiert werden konnten. Bei den erfolgreichen Rekonstruktionen entstehen Abweichungen zwischen der Rekonstruktion und der tatsächlichen Gebäudegeometrie vor allem durch nicht modellierte und damit nicht erfassbare Details eines Gebäudes wie Dachüberstände, Anbauten oder Kamine. Abweichungen durch Meßfehler bei der Extraktion der linearen Segmente oder durch Definitionsunsicherheiten bei der exakten Bestimmung der Gebäudegrenzen fallen dagegen kaum ins Gewicht.

Als Modell wird eine parametrisierte Darstellung verwendet, um damit rechteckige Gebäude mit Giebeldach zu repräsentieren. Das verwendete Modell ist trotz der Vereinfachungen für viele Anwendungen ausreichend, da vor allem in Bereichen offener Bebauung mit relativ geringer Komplexität ein Großteil der Gebäude dadurch beschrieben und rekonstruiert werden kann. Die mit diesem Modell erreichbare Detailliertheit der Rekonstruktion ermöglicht in diesen Bereichen für 3D-Stadtmodelle typische Anwendungen wie 3D-Visualisierungen, die Korrektur von Orthobildern um Reliefversetzungen der Gebäude und Analysen wie Ausbreitungsuntersuchungen

elektromagnetischer Wellen für die Standortplanung von Sendeanlagen oder Umweltverträglichkeitsprüfungen im Rahmen von Untersuchungen des Stadtklimas. Soll die Detailliertheit der erfaßten Rekonstruktionen erhöht werden, ist unter Umständen eine Kombination des automatischen Verfahrens zur Erfassung einer relativ stark generalisierten Beschreibung mit einer manuellen Nachmessung zur Bestimmung weiterer Details sinnvoll. Im Sinne einer solchen stufenweisen Erfassung bebauter Gebiete können auch Bildausschnitte, in denen nach der Analyse der Höhendaten Gebäude vermutet, aber nicht rekonstruiert wurden, nach Ablauf des Prozesses einem Operateur zur manuellen Messung präsentiert werden. Durch die Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsanalyse der Parameterschätzung können zudem schwach bestimmte Gebäude selektiert und ebenfalls einem Operateur zur Kontrolle dargestellt werden.

Das Problem der möglichst allgemeinen Modellierung von Objekten unter Einbeziehung verschiedener Varianten, Abweichungen oder Detaillierungsgraden stellt einen großen Engpaß bei den Verfahren zur Interpretation und Rekonstruktion komplexer Szenen dar. Das Problem der Modellierung von Gebäuden stellt sich selbst bei einer manuellen Rekonstruktion. Nur durch ein explizites Gebäudemodell kann z.B. der Grad an Verallgemeinerung festgelegt und damit definiert werden, ob bestimmte Details aufgenommen werden oder nicht. Da verschiedene Operateure auch (geringfügig) unterschiedliche Vorstellungen haben, was bei der Erfassung wichtig und was unwichtig ist, kann nur dann eine konsistente Erfassung ermöglicht werden, wenn statt der individuellen gedanklichen Vorstellung von einem Gebäude ein explizites Modell verwendet wird.

Neben der eher kurzfristigen Erweiterung auf eine Bibliothek verschiedener parametrischer Modelle, um noch andere einfache Gebäudegrundformen bearbeiten zu können, sollte mittelfristig das ganze Konzept der Gebäudemodellierung erweitert werden. Neben der Automation der Modellierung sollte ein Schwerpunkt zukünftiger Forschungen auch auf der Erzeugung von Modellen liegen, die auch kleinere Abweichungen der Gebäudeform behandeln können, oder mit denen eine stufenweise Erhöhung der Detailliertheit einer Rekonstruktion ermöglicht wird. Zudem ist an der Entwicklung von Modellen zu arbeiten, die auch für die Rekonstruktion von Gebäuden mit höherer Komplexität z.B. in Innenstadtbereichen eingesetzt werden können.

Literatur

- Ackermann, F. [1979], Zur Genauigkeit Digitaler Höhenmodelle, in 'Proceedings of the 37th Photogrammetric Week', Schriftenreihe des Institus für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 6, pp. 133–144.
- Ackermann, F. & Hahn, M. [1991], Image pyramids for digital photogrammetry, in H. Ebner, D. Fritsch & C. Heipke, eds, 'Digital Photogrammetric Systems', Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 43–57.
- Ackermann, F. & Krzystek, P. [1991], 'MATCH-T: Automatic mensuration of digital elevation models', Presented paper to the 3rd Technical Seminar of the Sociedad Espanola de Cartografia Fotogrametria y Teledeteccion.
- Ballard, D. H. & Brown, C. M. [1982], *Computer Vision*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ.
- Baltsavias, E., Mason, S. & Stallmann, D. [1995], Use of DTMs/DSMs and orthoimages to support building extraction, in A. Gruen, O. Kuebler & P. Agouris, eds, 'Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images', Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin, pp. 199–210.
- Bässmann, H. & Besslich, P. W. [1989], *Konturorientierte Verfahren in der digitalen Bildverarbeitung*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Bässmann, H. & Besslich, P. W. [1991], *Bildverarbeitung Ad Oculos*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Berthod, M., Gabet, L., Giraudon, G. & Lotti, J. [1995], High resolution stereo for the detection of buildings, in A. Gruen, O. Kuebler & P. Agouris, eds, 'Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images', Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin, pp. 135–144.
- Bill, R. & Fritsch, D. [1991], *Grundlagen der Geo-Informationssysteme*, Vol. 1, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Boldt, M., Weiss, R. & Riseman, E. [1989], 'Token-based extraction of straight lines', *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* **19**(6), 1581–1594.
- Bolle, R. & Vemuri, B. [1991], 'On three-dimensional surface reconstruction methods', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **13**(1), 1–13.
- Braun, C. [1993], Gebäudeextraktion aus digitalen Bildern, in D. Fritsch & D. Hobbie, eds, 'Photogrammetric Week '93', Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 209–223.
- Braun, C., Kolbe, T., Lang, F., Schickler, W., Steinhage, V., Kremers, A., Förstner, W. & Plümmer, L. [1995], 'Models for photogrammetric building reconstruction', *Computer & Graphics* **19**(1), 109–118.
- Burns, J. [1992], Matching 2D Images to Multiple 3D Objects Using View Description Networks, PhD thesis, University of Massachusetts at Amherst.
- Burns, J., Hansen, A. & Riseman, E. [1986], 'Extracting straight lines', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **8**(4), 425–443.
- Canny, J. [1986], 'A computational approach to edge detection', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **8**, 679–698.
- Carosio, A. [1995], Three-dimensional synthetic landscapes: Data acquisition, modelling and visualization, in D. Fritsch & D. Hobbie, eds, 'Photogrammetric Week '95', Herbert Wichmann Verlag, pp. 293–302.
- Collins, R., Hanson, A., Riseman, E. & Schultz, H. [1995], Automatic extraction of buildings and terrain from aerial images, in A. Gruen, O. Kuebler & P. Agouris, eds, 'Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images', Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin, pp. 169–178.
- Dang, T., Jamet, O. & Maitre, H. [1994], Applying perceptual grouping and surface models to the detection and stereo reconstruction of buildings in aerial imagery, in 'Proc. ISPRS Congress Comm. III', München, pp. 165–172.
- Davis, L. [1975], 'A survey of edge detection techniques', *Computer Graphics and Image Processing* **4**, 248–270.

- Dorrer, E. [1975], ‘Gedanken zum digitalen Geländemodell’, *Bildmessung und Luftbildwesen (BuL)* **43**, 90–91.
- Ebner, H., Fritsch, D., Gillessen, W. & Heipke, C. [1987], ‘Integration von Bildzuordnung und Objektrekonstruktion innerhalb der digitalen Photogrammetrie’, *Zeitschrift für Bildmessung und Luftbildwesen* **55**, S. 194–203.
- Faugeras, O. & Fua, P. [1991], Quantitative and qualitative comparison of some area and feature-based stereo algorithms, *in* ‘Robust Computer Vision’, Bonn, pp. 1–27.
- Fellner, W. [1988], *Computer Grafik*, BI-Wissenschaftsverlag, Mannheim; Wien; Zürich.
- Flynn, P. & Jain, A. [1991], ‘CAD-based computer vision: From CAD models to relational graphs’, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **13**(2), 114–132.
- Förstner, W. [1985], On automatic measurement of digital surface models, *in* ‘Proceedings of the 40th Photogrammetric Week’, Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 11, pp. 137–155.
- Förstner, W. [1986], A feature based correspondence algorithm for image matching, *in* ‘International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing’, Vol. 26, 3/3, Rovaniemi.
- Förstner, W. [1992], Uncertain geometric relationships and their use for object location in digital images, *in* ‘Tutorial notes of the Second International Workshop on Robust Computer Vision’, Institut für Photogrammetrie, Universität Bonn, pp. 1–95.
- Förstner, W. & Pallaske, R. [1993], ‘Mustererkennung und 3D-Geoinformationssysteme’, *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung* **5**, S. 167–177.
- Fritsch, D. [1991], *Raumbezogene Informationssysteme und digitale Geländemodelle*, Vol. C 369, Deutsche Geodätische Kommission, München.
- Fritsch, D. & Kilian, J. [1994], Filtering and calibration of laser scanner measurements, *in* ‘Proc. ISPRS Congress Comm. III’, München, pp. 227–234.
- Fritsch, D., Sester, M. & Schenk, T. [1994], Test on image understanding, *in* ‘Proc. ISPRS Congress Comm. III’, München, pp. 243–248.
- Fua, P. [1995], Stereo reconstruction from multiple views, *in* A. Gruen, O. Kuebler & P. Agouris, eds, ‘Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images’, Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin, pp. 23–32.
- Fua, P. & Hanson, A. [1987], ‘Resegmentation using generic shape: Locating general cultural objects’, *Pattern Recognition Letters* **5**(3), 243–252.
- Fua, P. & Hanson, A. [1988], Extracting generic shapes using model-driven optimization, *in* ‘DAPRA Image Understanding Workshop’, Morgan Kaufmann Publishers, Cambridge, Massachusetts, pp. 994–1004.
- Fuchs, C. & Förstner, W. [1994], Polymorphic grouping for image segmentation, *in* ‘5th ICCV ’95’, Boston.
- Gruber, M., Pasko, M. & Leberl, F. [1995], Geometric versus texture detail in 3-D models of real world buildings, *in* A. Gruen, O. Kuebler & P. Agouris, eds, ‘Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images’, Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin, pp. 189–198.
- Haala, N. [1994], Detection of buildings by fusion of range and image data, *in* ‘Proc. ISPRS Congress Comm. III’, München, pp. 341–346.
- Haala, N. [1995], 3D building reconstruction using linear edge segments, *in* D. Fritsch & D. Hobbie, eds, ‘Photogrammetric Week ’95’, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 19–28.
- Haala, N. & Hahn, M. [1995], Data fusion for the detection and reconstruction of buildings, *in* A. Gruen, O. Kuebler & P. Agouris, eds, ‘Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images’, Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin, pp. 211–220.

- Haala, N., Plietker, B. & Sester, M. [1994], 'Automatische Bildinterpretation', *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung* **6**, 228–238.
- Haala, N. & Vosselman, G. [1992], Recognition of road and river patterns by relational matching, in 'Proc. ISPRS Congress Comm. III', Washington D.C., pp. 969–975.
- Hake, G. [1982], *Kartographie I*, Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- Haralick, R. & Shapiro, L. [1985], 'Image segmentation techniques, a survey', *Computer Vision, Graphics and Image Processing* **29**, 100–132.
- Haralick, R. & Shapiro, L. [1993], *Computer and Robot Vision*, Vol. 2, Addison-Wesley Publishing Company.
- Haralick, R., Sternberg, S. & Zhuang, X. [1987], 'Image analysis using mathematical morphology', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **9**(4), 532–550.
- Helava, U. [1988], Object space least squares correlation, in 'International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing', Vol. 27, B3, Kyoto, Japan, pp. 321–331.
- Hoffmann, C. [1989], *Geometric & Solid Modelling*, Morgan Kaufmann Publishers, Inc., San Mateo, CA.
- Horand, R. & Skordas, T. [1989], 'Stereo correspondence through feature grouping and maximal cliques', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **11**(11), 1168–1180.
- Illert, A. [1990], Automatische Erfassung von Kartenschrift, Symbolen und Grundrißobjekten aus der Deutschen Grundkarte 1:5000, Dissertation, Universität Hannover.
- Irvin, R. & McKeown, D. [1989], 'Methods for exploiting the relationship between buildings and their shadows in aerial imagery', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **19**(6), 1564–1575.
- Kilian, J. [1994], Calibration methods for airborne laser systems, in 'Proc. ISPRS Congress Comm. I', Como, pp. 42–46.
- Kim, T. & Mueller, J.-P. [1995], Building extraction and verification from spaceborne and aerial imagery using image understanding fusion techniques, in A. Gruen, O. Kuebler & P. Agouris, eds, 'Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images', Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin, pp. 221–230.
- Kraus, K. [1991], *Photogrammetrie I*, Dümmler Verlag, Bonn.
- Lang, F. & Schickler, W. [1993], 'Semiautomatische 3D-Gebäudeerfassung aus digitalen Bildern', *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung* **5**, 193–200.
- Leonardis, A., Gupta, A. & Bajcsy, R. [1995], 'Segmentation of range images as the search for geometric parametric models', *International Journal of Computer Vision* **14**(3), 253–277.
- Lohr, U. & Eibert, M. [1995], The TopoSys laser scanner-system, in D. Fritsch & D. Hobbie, eds, 'Photogrammetric Week '95', Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 263–268.
- Lotti, J.-L. & Giraudon, G. [1994], Adaptive window algorithm for aerial image stereo, in 'Proc. ISPRS Congress Comm. III', München, pp. 517–524.
- Lowe, D. [1985], *Perceptual Organization and Visual Recognition*, Kluwer Academic Publishers, Boston, Mass.
- Maitre, H. & Luo, W. [1992], 'Using models to improve stereo reconstruction', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **14**(2), 269–277.
- Marr, D. & Hildreth, E. [1980], Theory of edge detection, in 'Proc. Roy. Soc. London', Vol. 207 of *Series B*, pp. 187–217.
- McCafferty, J. [1990], *Human and Machine Vision: Computing Perceptual Organization*, Ellis Horwood, West Sussex, England.

- McKeown, D. & McGlone, J. [1993], Integration of photogrammetric cues into cartographic feature extraction, in 'SPIE Conference on Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision', Orlando, Florida, pp. 2–15.
- Meier, A. [1986], *Methoden der grafischen und geometrischen Datenverarbeitung*, B.G. Teubner, Stuttgart.
- Mohan, R. & Nevatia, R. [1988], Perceptual grouping for the detection and description of structures in aerial images, in 'Proceedings of the DAPRA Image Understanding Workshop', Cambridge, MA, pp. 512–526.
- Mohan, R. & Nevatia, R. [1989a], Segmentation and description based on perceptual organization, in 'Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition', San Diego, CA, pp. 333–341.
- Mohan, R. & Nevatia, R. [1989b], 'Using perceptual organization to extract 3-d structures', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **11**(11), 1121–1139.
- Mohan, R. & Nevatia, R. [1992], 'Perceptual organization for scene segmentation and description', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **14**(14), 616–635.
- Mueller, W. & Olson, J. [1993], Model-based feature extraction, in 'SPIE Conference on Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision', Orlando, Florida, pp. 263–272.
- Neuenschwander, W., Fua, P., Szekely, G. & Kübler, O. [1995], From ziplock snakes to velcro surfaces, in A. Gruen, O. Kuebler & P. Agouris, eds, 'Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images', Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin, pp. 105–114.
- Niemeier, W. & Wild, P. [1995], Einsatz von Laserscannern für die erfassung von Gebäudegeometrien, in 'Gebäudeinformationssysteme', Schriftenreihe des DVW, Band 19, pp. 155–168.
- Price, K. & Huertas, A. [1992], Using perceptual grouping to detect objects in aerial scenes, in 'Proc. ISPRS Congress Comm. III', Washington D.C., pp. 842–855.
- Quam, L. & Strat, T. [1991], SRI Image understanding research in cartographic feature extraction, in H. Ebner, D. Fritsch & C. Heipke, eds, 'Digital Photogrammetric Systems', Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 111–122.
- Rosenholm, D. [1987], 'Multi-point matching using the least-squares technique for elevation of three-dimensional models', *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **53**(3), 621–626.
- Sarkar, S. & Boyer, K. [1993], 'Integration, inference, and management of spatial information using bayesian networks: Perceptual organization', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **15**(3), 256–274.
- Schade, H., Fritsch, D. & Kilian, J. [1994], An integrated sensor system for airborne DTM data acquisition, in 'Proceedings of the First International Remote Sensing Conference', Vol. 1, Straßburg, pp. 548–559.
- Schenk, T., Li, J. & Toth, C. [1991], 'Towards an autonomous system for orienting digital stereopairs', *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **57**, 1057–1064.
- Schickler, W. [1992], Feature matching for outer orientation of single images using 3-d wireframe controlpoints, in 'Proc. ISPRS Congress Comm. III', Washington D.C., pp. 591–598.
- Schwedfsky, K. & Ackermann, F. [1976], *Photogrammetrie: Grundlagen, Verfahren, Anwendungen*, B. G. Teubner, Stuttgart.
- Sester, M. [1995], *Lernen struktureller Modelle für die Bildanalyse*, Vol. C441, Deutsche Geodätische Kommission, München.
- Sester, M. & Förstner, W. [1989], Object location based on uncertain models, in 'Mustererkennung 1989', Vol. 219 of *Informatik Fachberichte*, Springer Verlag, Hamburg, pp. 457–464.
- Sherman, D. & Peleg, S. [1990], 'Stereo by incremental matching of contours', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **12**, 1102–1106.

- Sigle, M. [1983], Ein Digitales Geländemodell für das Land Baden-Württemberg, in 'Proceedings of the 39th Photogrammetric Week', Schriftenreihe des Institus für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, Heft 9, pp. 141–152.
- Sinning-Meister, M., Mason, S. & Streilein, A. [1995], Photogrammetrische Gebäudeerfassung für 3-D Stadtmodelle, in 'Gebäudeinformationssysteme', Schriftenreihe des DVW, Band 19, pp. 145–154.
- Sommer, G. [1992], 'Wissensverarbeitung in der Bildanalyse - Teil I', *Bild & Ton* **45**(5/6), 103–110.
- Stengele, R. [1995], Kartographische Mustererkennung, Dissertation Nr. 11099, ETH Zürich.
- Tsingas, V. [1991], Automatische Aerotriangulation, in 'Proceedings of the 43th Photogrammetric Week', Vol. 15 of *Series of the Institute of Photogrammetry, Stuttgart University*, Stuttgart, pp. 253–268.
- Vosselman, G. [1989], Symbolic image descriptions for relational matching, in 'Proc. International Workshop on High Precision Navigation', SFB Hochgenaue Navigation, Springer Verlag, Stuttgart / Altensteig-Wart, pp. 378–391.
- Vosselman, G. & Haala, N. [1992], 'Erkennung topographischer Paßpunkte durch relationale Zuordnung', *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung* **6**, 170–176.
- Weidner, U. & Förstner, W. [1995], 'Towards automatic building extraction from high resolution digital elevation models', *ISPRS Journal* **50**(4), 38–49.
- Wertheimer, M. [1923], 'Untersuchungen zur Lehre der Gestalt II', *Psychologische Forschung* **4**, 301–350.
- Wrobel, B. [1987], 'Digitale Bildzuordnung durch Facetten mit Hilfe von Objektraummodellen', *Zeitschrift für Bildmessung und Luftbildwesen* **55**, 93–101.

Lebenslauf

1. Mai 1965 geboren in Heilbronn
- 1971 - 1975 Grundschule in Willsbach
- 1975 - 1984 Justinus-Kerner-Gymnasium in Weinsberg
6. Juni 1984 Abitur
- 1985 - 1990 Studium des Vermessungswesens an der Universität Stuttgart
- 1991 - 1995 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart im Sonderforschungsbereich 228 "Hochgenaue Navigation"
- seit 1995 Akademischer Rat und Leiter der Gruppe Sensorintegration am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart