

Dreidimensionale Gebäuderekonstruktion
aus digitalen Oberflächenmodellen
und Grundrissen

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

vorgelegt von
Dipl.-Inform. Claus Brenner
aus Heilbronn-Sontheim

Stuttgart 2000

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Alfred Kleusberg

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Dieter Fritsch

2. Prof. Dr.-Ing. Armin Grün

Tag der Einreichung:

- am 15.6.2000 Abgabe beim Erstprüfer

- am 28.8.2000 Einreichung der Exemplare für den Umlauf bei der Fakultät.

Tag der mündlichen Prüfung:

16.10.2000

Abstract

Three-dimensional city models are of growing importance. Concerning the applications, providing models for the computation of electromagnetic wave propagation in the context of cellular phones is still a highly relevant topic. Besides this “classic” application, however, there have grown in the meantime several other fields, for example tourism information systems, three-dimensional navigation systems and visualization for the purpose of city planning and architectural contests, just to name a few.

All those applications are based on a *geometric city model*, which contains in particular a three-dimensional representation of the buildings, sometimes complemented by a virtual reality (textured) representation of the building’s surface. Photogrammetric methods are very well suited to obtain such models. However, it has become clear very early that *manual* photogrammetric measurement is very labor-intensive. Thus it is not economically feasible to capture city models consisting of many thousands of buildings using this approach.

Consequently, since many years, the partial or total automation of building reconstruction has been a topic of worldwide research. This work is also part of those efforts. In contrast to other approaches, it exhibits the following characteristics:

- The reconstruction uses high resolution height models, as obtained by airborne laser scanning. This gives the advantage of an explicit geometric representation, which is used by the employed segmentation methods.
- Existing ground plans are incorporated into the reconstruction. On the one hand, this leads to a high lateral accuracy. On the other hand, hints from the ground plan can be used to support the three-dimensional reconstruction process itself.
- The application as a fully automatic system as well as the incorporation of the algorithms into an interactive, semi-automatic reconstruction tool have been investigated.

In summary, using the above mentioned selection of data sources and processing methods, a system was realized which achieves an unprecedented high level of automation. It was tested on several pilot projects, including parts of the cities of Karlsruhe, Heidelberg, Bruchsal, Stuttgart and Vienna.

Zusammenfassung

Dreidimensionale Stadtmodelle gewinnen zunehmend an Bedeutung. Dabei ist nach wie vor die Bereitstellung von Modellen für die Ausbreitungsrechnung von Funkwellen von Relevanz. Zu dieser "klassischen" Anwendung haben sich jedoch zwischenzeitlich eine ganze Reihe von möglichen weiteren Applikationen gesellt, etwa virtuelle Tourismus-Informationssysteme, dreidimensionale Navigationssysteme sowie Visualisierung für Stadtplanung und Architekturwettbewerbe, um nur einige zu nennen.

Allen diesen Anwendungen liegt ein *geometrisches Stadtmodell* zugrunde, welches insbesondere die dreidimensionale Repräsentation der Gebäude umfasst, manchmal ergänzt um eine realitätsnahe (texturierte) Darstellung der Gebäudeoberflächen. Für die Erfassung derartiger Modelle sind photogrammetrische Methoden sehr gut geeignet. Allerdings wurde bereits sehr früh klar, dass die *manuelle* photogrammetrische Auswertung sehr arbeitsintensiv ist, wodurch umfangreiche Stadtmodelle mit vielen tausend Gebäuden nicht wirtschaftlich lohnend erstellt werden können.

Seit etlichen Jahren wird daher von verschiedenen Forschergruppen weltweit an Systemen gearbeitet, welche die vollständige oder teilweise Automatisierung der Rekonstruktion von Gebäuden zum Ziel haben. Auch die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dieser Thematik. Im Vergleich zu anderen vorgeschlagenen Systemen besitzt der hier beschriebene Ansatz die folgenden Alleinstellungsmerkmale:

- Die Rekonstruktion nutzt hochaufgelöste Höhenmodelle, gewonnen durch flugzeuggetragenes Laserscanning. Hierdurch ergibt sich der Vorteil einer expliziten Geometrierepräsentation, welcher durch die eingesetzten Segmentierverfahren ausgenutzt wird.
- Existierende Grundrisse werden für die Rekonstruktion herangezogen. Dadurch wird einerseits eine hohe Lagegenauigkeit erzielt, andererseits die dreidimensionale Rekonstruktion unterstützt.
- Sowohl die Anwendung als vollautomatisches System als auch der Einsatz der Verfahren innerhalb eines interaktiven, semiautomatischen Rekonstruktionssystems wurde untersucht.

Insgesamt wurde durch die Auswahl der Datenquellen und Verfahren ein System realisiert, welches einen bisher nicht erreichten Automatisierungsgrad aufweist. Sein Einsatz wurde anhand verschiedener Testprojekte erprobt, welche Teile der Städte Karlsruhe, Heidelberg, Bruchsal, Stuttgart und Wien umfassen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	7
1.1	Motivation	7
1.2	Motivation für die vorliegende Arbeit	10
1.3	Gliederung der Arbeit	11
2	Dreidimensionale Stadtmodelle	12
2.1	Datenquellen für die Rekonstruktion von Stadtmodellen	12
2.2	Digitale Oberflächenmodelle (DOM)	14
2.2.1	DOM aus Bildzuordnung	16
2.2.2	Laserscanning	17
2.2.3	Vergleich von DOM aus Bildzuordnung und Laserscanning.	18
2.3	Extraktion von Gebäuden	19
2.3.1	Objekterkennung und Rekonstruktion	19
2.3.2	Geometrische Gebäudemodelle	21
2.4	Rekonstruktionssysteme	24
2.4.1	Vollautomatische Rekonstruktionssysteme	25
2.4.2	Semiautomatische Rekonstruktionssysteme	29
3	Segmentierung von digitalen Oberflächenmodellen	32
3.1	Einleitung	32
3.2	Morphologische Segmentierung	34
3.3	Steigungssegmentierung	36
3.4	Ebenensegmentierung	40
3.4.1	Ebenenschätzung	40
3.4.2	Bereichswachstumsverfahren	41
3.4.3	Gruppierung von Linien	42
3.4.4	Robuste Ebenenschätzung mittels der RANSAC-Methode	43
3.5	Krümmungsbasierte Segmentierung	46
3.5.1	Grundlagen der Differentialgeometrie	46
3.5.2	Anwendung auf DOM	48
3.5.3	Diskussion	51
3.6	Richtungssegmentierung	52
3.7	Segmentierung basierend auf Höhenlinien	53
3.8	Diskussion	54

4	Grundrisse	56
4.1	Einleitung	56
4.2	Dachkonstruktion aus Grundrissen	58
4.2.1	Grundrisse und einfache Dächer	58
4.2.2	Mittelachstransformation und Skelett	59
4.2.3	Anwendung des Skeletts zur Gebäuderekonstruktion	62
4.3	Dekomposition von Grundrissen	64
4.3.1	Allgemeine Verfahren	64
4.3.2	Dekomposition in Rechtecke	67
5	Rekonstruktion von Gebäuden mittels Rechteckzerlegung	70
5.1	Ein automatisches Rekonstruktionsverfahren	70
5.1.1	Auswahl von Primitiven	71
5.1.2	Bestimmung der Parameter von Primitiven	71
5.1.3	Kombination von Primitiven	72
5.2	Semiautomatische Erweiterung	73
5.3	Ergebnisse des Verfahrens	75
6	Verallgemeinerte Ansätze	87
6.1	Nicht-kanonische Dächer über Grundrissen	87
6.1.1	Die maximale Anzahl erzeugbarer Topologien	87
6.1.2	Positionierung von Knoten	89
6.1.3	Vom Skelett verschiedene Graphen	90
6.1.4	Reduktion des Suchraums	92
6.2	Generierung von Graphen auf der Basis von DOM	95
6.2.1	Ein grammatikalischer Ansatz zur Akzeptierung von Dachflächen	96
6.2.2	Bildung der Topologie auf der Basis akzeptierter Regionen	97
6.3	Ausgleichung komplexer Dachformen	99
7	Textur	102
7.1	Textur aus Luftbildern	103
7.2	Textur aus terrestrischen Bildern	104
7.2.1	Automatische Extraktion von Textur aus terrestrischen Bildern	104
7.2.2	Manuelle Extraktion von Textur	108
8	Zusammenfassung und Ausblick	111
	Abbildungsverzeichnis	113
	Literatur	116

1 Einführung

1.1 Motivation

Unter dreidimensionalen Stadtmodellen versteht man allgemein die (realitätsnahe) Beschreibung von Geländeoberfläche, Straßen, Gebäuden und Vegetation innerhalb von bebautem Gebiet in räumlicher Darstellung. Im engeren Sinne meint man damit heute auch die Repräsentation und Darstellung dieser Information mittels elektronischer Datenverarbeitungsanlagen. Nachdem hiermit verbundene Fragestellungen über Jahre hinweg vor allem wissenschaftlich bearbeitet wurden, zeigt sich inzwischen auch ein breites Interesse bei Anwendern sowohl im öffentlichen als auch im privatwirtschaftlichen Bereich.

Mit dreidimensionalen Stadtmodellen sind die folgenden wesentlichen Fragestellungen verbunden:

1. Die *Gewinnung* der zur Erzeugung und Aktualisierung von Stadtmodellen notwendigen Information.
2. Die *Repräsentation* bzw. *Verwaltung* von Stadtmodellen im Hinblick auf eine geeignete, konsistente Haltung und Bereitstellung der Daten.
3. Die Verwendung von Stadtmodellen als Basisdaten, beispielsweise für *Analysen* und *Simulationen*.
4. Die Verwendung von Stadtmodellen zur *Visualisierung*, beispielsweise im Bereich von Architektur, Stadtplanung, Werbung und Marketing.

Die Leistungsfähigkeit von dreidimensionalen Visualisierungs- und Geo-Informationssystemen hat in den letzten Jahren beständig zugenommen. Umfangreiche Möglichkeiten zur dreidimensionalen Visualisierung und Analyse sind bereits heute gegeben, wenn auch in der Praxis häufig noch Beschränkungen hinsichtlich der verarbeitbaren Datenmenge auftreten. Geht man jedoch von einer weiterhin rasanten Entwicklung im Bereich der elektronischen Datenverarbeitung aus, d.h. insbesondere einer Erhöhung der Speicherkapazität, Übertragungsbandbreite und Ausführungsgeschwindigkeit, so kann man prognostizieren, dass die heute nur mittels spezieller Programmpakete und leistungsfähiger Rechner realisierbaren Lösungen morgen gang und gäbe sein werden. Dies gilt wegen der zu erwartenden, stark fallenden Kosten auch für den Bereich von kleinen Unternehmen oder Privathaushalten.

Es ist also offensichtlich, dass eine Beschränkung der breiten Nutzung dreidimensionaler Information weniger aufgrund mangelnder technischer Möglichkeiten der Endgeräte erfolgen wird, sondern eher aufgrund unzureichender Verfahren, welche die enorme Menge benötigter Daten in effektiver und wirtschaftlicher Weise erfassen und fortführen können [Danahy 1999].

Die Situation ist vergleichbar mit der Gewinnung von Straßenkarten für Fahrzeugnavigationssysteme. Hier hat man in den vergangenen Jahren praktisch ausschließlich auf manuelle Erfassungstechniken gesetzt und die Erfahrung gemacht, dass sowohl die *Ersterfassung* als auch die *Fortführung* der Daten einen enormen Aufwand und hohe Kosten verursacht. Diese Erfahrungen lassen sich übertragen auf den Bereich von Stadtmodellen, mit dem Unterschied, dass die Erfassung *dreidimensionaler* Information sicherlich als wesentlich aufwendiger angesehen werden kann als die Digitalisierung *zweidimensionaler* Straßenkarten. Vor diesem Hintergrund ist es um so dringlicher, leistungsfähige Erfassungstechniken zu entwickeln und bereitzustellen.

Obwohl die Forschung auf dem Gebiet der automatisierten Extraktion von *Gebäuden* schon in den 80er Jahren eingesetzt und bis heute angehalten hat, sind sowohl die Endprodukte als auch die Anwendungsgebiete noch relativ unklar. Sicherlich besteht ein grundsätzliches Interesse darin, die gegenwärtig nur in Form von zweidimensionalen Beschreibungen (z.B. Grundrissen) vorliegende Information um die dritte Dimension zu erweitern. Dabei kann man sich jedoch ein sehr breites Spektrum an "Erweiterungsmöglichkeiten" vorstellen. Im einfachsten Fall kann es sich um die vielerorts schon realisierte Einführung eines oder mehrerer skalarer Attribute handeln, welche die maximale oder durchschnittliche Gebäudehöhe bzw. Giebel- und Traufhöhe beschreiben. Näherungswerte lassen sich teilweise aus der bereits erfassten Anzahl der Geschosse ableiten. Am anderen Ende des Spektrums sind dreidimensionale Gebäudemodelle denkbar, welche eine exakte Modellierung von geometrischen Details, zusammen mit Material- und Farbinformation (Textur) beinhalten. Dadurch wäre es jederzeit möglich, realistische Ansichten von hoher Qualität zu generieren. Es wäre sogar vorstellbar, das Modell nicht auf die Beschreibung der Oberfläche zu beschränken, sondern die Modellierung vielmehr im Inneren des Gebäudes fortzusetzen. Damit könnten Stadtmodelle mit Möglichkeiten des Computer Aided Facility Management (CAFM) verbunden werden.

Es wäre verlockend, einen “allumfassenden” Datensatz zu erstellen, welcher ein derartig detailliertes Modell enthält, und aus welchem problemspezifische, entsprechend vereinfachte Modelle automatisch abgeleitet werden können. Diese Vorgehensweise ist jedoch heute aus den folgenden Gründen nicht realisierbar:

- Nach derzeitigem Stand der Technik ist eine auch nur teilweise flächendeckende Erfassung von Objekten mit dem skizzierten Detaillierungsgrad praktisch unbezahlbar. Öffentliche Stellen können eine Erfassung nicht durchführen, solange kein belegtes öffentliches Interesse vorliegt. Privatwirtschaftlich wird eine solche Investition nicht getragen werden, weil dem hohen Investitionsbedarf keine genauen Aussagen über Höhe und Zeitpunkt entsprechender Erträge gegenüberstehen.
- Die automatische Ableitung von “einfachen”, problemspezifischen Datensätzen aus einem detaillierten Datensatz ist noch nicht realisiert. Das zugrundeliegende Problem der *automatischen Generalisierung* ist Gegenstand aktueller Forschung [Anders & Sester 1997, Sester, Anders & Walter 1998] und bereits in zwei Dimensionen äußerst nichttrivial. Für dreidimensionale Modelle liegen einzelne Untersuchungen vor [Sester & Klein 1999], eine generelle Verfügbarkeit von Methoden und Techniken ist jedoch nicht gegeben.

Deshalb wird man davon ausgehen müssen, dass eine Erfassung von Stadtmodellen – ähnlich der Situation bei der Erfassung von Straßennetzen – anwendungsspezifisch erfolgen wird. Als mögliche Anwendungen sind denkbar:

- Allgemeine, räumliche Datengrundlage für Stadtinformationssysteme (Stadtplanung und -entwicklung)
- Funknetzplanung für Mobiltelefone, Ortsnetze (“letzte Meile”)
- Tourismus-Informationssysteme
- Intermodale Navigationssysteme¹
- Bauprojektierung und Standortplanung, Gestaltung, Architekturwettbewerbe
- Denkmalschutz
- Simulationen zu Mikroklima, Luftverschmutzung, Lärmausbreitung, Solarzellenausrichtung
- Risikoanalyse für Naturkatastrophen und Gefahrguttransporte
- Informationssysteme für Rettungsdienste
- Unterhaltungsindustrie

Funknetzbetreiber wurden lange Zeit als ein möglicher “Hauptabnehmer” dreidimensionaler Stadtmodelle betrachtet, weil zum einen für die Funknetzplanung, insbesondere im Innenstadtbereich (mikrozelluläre Netze), relativ genaue Stadtmodelle mit flächendeckender Erfassung erforderlich sind, zum anderen aufgrund des explodierenden Telekommunikationsmarkts eine entsprechende Investitionsbereitschaft angenommen wurde. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass für die Belange der Funknetzplanung relativ grobe Modelle und Genauigkeiten im Bereich von 1–2 m vorgegeben wurden [Bahne & Rathgeber 1999, Phoencis 2000], welche photogrammetrisch auf manuellem Wege gewonnen werden konnten. Allerdings ist es wahrscheinlich, dass sich hier in naher Zukunft durchaus Änderungen ergeben werden, aufgrund der hohen Kosten für die manuelle Nachführung sowie erhöhten Anforderungen an die Genauigkeit, welche sich für die neu aufzubauenden UMTS-Netze ergeben. In jedem Fall ist jedoch die Erfassung von Fassadentexturen für die Netzplanung nicht erforderlich.

Navigationssysteme werden als ein zukünftiges Anwendungsfeld dreidimensionaler Stadtmodelle erachtet. Im breiten Einsatz sind heute Geräte für die Fahrzeugnavigation. Die dort verfügbaren Systeme bieten Darstellungsmöglichkeiten, welche entweder die aktuelle Position in einer Karte einblenden oder Navigationshinweise in Form von Richtungspfeilen geben. Diese Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle entspricht jedoch eher der traditionellen Form einer kartenbasierten Navigation. Demgegenüber ist bekannt, dass sich Menschen auf natürliche Weise anhand von besonders auffälligen Strukturen (Wahrzeichen, *landmarks*) navigieren, welche sie sich einprägen [Distler, Veen, Braun, Heinz, Franz & Bühlhoff 1998, Gillner & Mallot 1998]. Auf der Basis

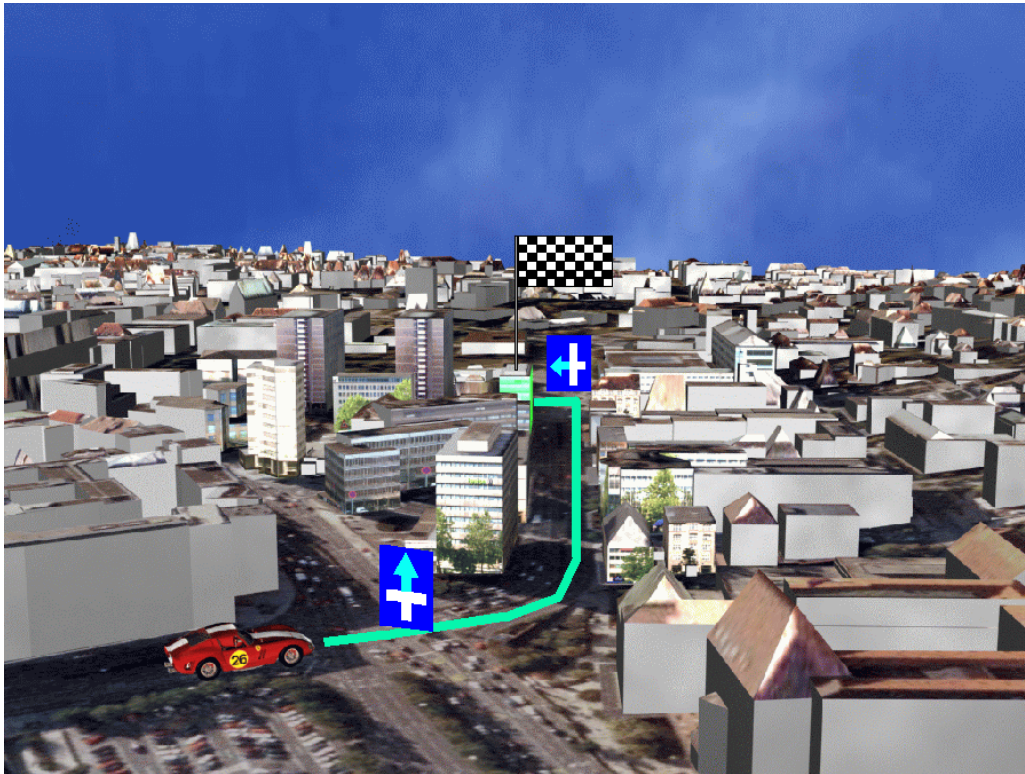


Abbildung 1.1: Vision der Visualisierung eines zukünftigen Fahrzeugnavigationssystems: Der Fahrer kann seine Umgebung von verschiedenen Positionen aus betrachten, u. a. aus der hier gezeigten "Vogelperspektive". Es ist ihm möglich, sich anhand von Gebäudeansichten (Wahrzeichen) zu navigieren, welche das System einblendet. Anhand dieser Ansicht wird auch klar, dass das Verstehen komplexer Verkehrsknotenpunkte durch eine derartige Darstellung gegenüber Karten- oder Pfeildarstellungen wesentlich vereinfacht wird. (Das Bild wurde generiert aus einem Stadtmodell, welches mit dem in dieser Arbeit beschriebenen Verfahren gewonnen wurde. Fahrzeug und Navigationshinweise wurden nachträglich manuell eingefügt.)

von Stadtmodellen könnten zukünftige Navigationssysteme dreidimensionale Ansichten einblenden, welche die Funktion von Wahrzeichen übernehmen und so eine intuitivere Navigation erlauben (Abb. 1.1).

Angesichts der Möglichkeiten, welche bereits heute durch portable Rechner und Kommunikationsgeräte gegeben sind, ist es nicht schwierig, zu prognostizieren, dass die Bereitstellung einer Navigationshilfe nur ein Teilaspekt zukünftiger, mobiler Endgeräte sein wird. Diese werden die Funktionalität der heutigen "Palmtops", "Handys" und Navigationssysteme vereinen und darüber hinaus den Zugriff auf umfangreiche Datenbanken ermöglichen. Entsprechende Ansätze sind Gegenstand aktueller Forschung. Beispielsweise werden im Projekt NEXUS Fragestellungen bezüglich Navigation und verteilter Datenbanken untersucht, welche sich aus dem Einsatz eines mobilen digitalen Assistenten ergeben [Volz & Klinec 1999, Volz & Sester 2000]. Grundgedanke ist hier die *ortsbezogene* Bereitstellung von Information, d.h. ein Nutzer bekommt Daten dort zur Verfügung gestellt, wo er sie benötigt – etwa den Plan eines Gebäudes, wenn er sich darin befindet. Die Relevanz der Daten ergibt sich also erst in Verbindung mit der aktuellen Position des Benutzers (location aware application), und die Bereitstellung kann durch verteilte Datenbanken erfolgen. Ein ähnliches Projekt mit Schwerpunkt auf Tourismus-Informationssystemen ist DeepMap [Malaka 1999]. Die geometrische Grundlage für alle derartigen Systeme werden dreidimensionale Stadtmodelle bilden.

Im Bereich *Tourismus-Informationssysteme* ergibt sich auch die Möglichkeit, Informationen über das Internet bereitzustellen. Somit ist es mittelfristig denkbar, Reisen vorab am Rechner zu planen, indem die entsprechenden Orte "virtuell erkundet" werden. Grundlage hierfür bildet ebenfalls ein entsprechendes dreidimensionales Stadtmodell. Der Auftritt von Einrichtungen, Gastronomie und Firmen in dieser virtuellen Welt wird das Verhalten potentieller Besucher beeinflussen, woraus sich völlig neue Ansätze für Werbung und Marketing ergeben werden.

¹Intermodale Navigationssysteme erlauben es einem Benutzer, dieselbe Navigationshilfe über verschiedene Verkehrsmittel hinweg beizubehalten.

	3D Stadt-GIS	Mobilfunk	Tourismus-IS
Genauigkeit	++	+	-
Visueller Eindruck	+	-	++
Datenreduktion	-	+	++
Aktualität	++	-	+
Flächendeckung	++	++	+
Geometrieprepräsentation	2.5...3D	2.5...3D	3D

Tabelle 1.1: Bewertung einiger Aufgabenstellungen im Hinblick auf ihre jeweiligen Anforderungen (++ sehr wichtig, + wichtig, - unwichtig). Tourismus-Informationssysteme (IS) benötigen nur eine geringe Genauigkeit, solange trotzdem ein guter visueller Eindruck besteht und ggf. eine Navigation auf Basis der Daten möglich ist. Weil die Daten zum (potenziellen oder tatsächlichen) Touristen übertragen werden müssen, sind Tourismus-IS auf eine Reduktion der Datenmenge angewiesen. Auch der Mobilfunk profitiert von einer geringen Datenmenge, da die Zahl der Flächen im Datensatz die Komplexität der Ausbreitungsrechnungen wesentlich beeinflusst. 3D Stadt-GIS hingegen verwalten die Daten lediglich und sind so eher auf eine vollständige Darstellung als auf geringe Datenmengen angewiesen.

Obwohl diese Ansätze alle dreidimensionale Stadtmodelle benutzen, wird deutlich, dass dadurch sehr unterschiedliche Anforderungen an diese Modelle entstehen (Tab. 1.1). Dreidimensionale Informationssysteme und Anwendungen im Bereich der Architektur werden geometrische Details und Oberflächentextur benötigen, um photorealistische Visualisierungen erzeugen zu können. Auf der anderen Seite wird weder Textur noch geometrisches Detail benötigt bei Simulationsrechnungen für Mikroklima, Luftverschmutzung und Lärmausbreitung. Umgekehrt erfordern diese Anwendungen in der Regel ein flächendeckendes, homogenes Modell, während bei Tourismus-Informationssystemen eine Bevorzugung der wichtigsten touristischen Attraktionen bei der Modellierung möglich ist. Die Photogrammetrie ist in der Lage, ein breites Spektrum an Verfahren anzubieten, um den unterschiedlichen Anforderungen gerecht zu werden [Fritsch 1999].

1.2 Motivation für die vorliegende Arbeit

Bei der Gewinnung von dreidimensionalen Stadtmodellen ist ein klassisches Ingenieursproblem zu lösen: Die Bereitstellung eines technischen Systems, welches die gestellten Anforderungen auf *wirtschaftliche* Weise erfüllt.

Wie im vorigen Abschnitt dargestellt, werden die Anforderungen durch z.T. sehr verschiedene Applikationen vorgegeben, so dass sie keineswegs homogen vorliegen. Dennoch scheint es sich abzuzeichnen, dass für Anwendungen im Bereich der Kommunikation kurzfristig ein großer Bedarf bestehen wird. Aufgrund der wirtschaftlichen Bedeutung kann man davon ausgehen, dass für die Erfassung hierfür geeigneter Stadtmodelle auch entsprechende Mittel bereitgestellt werden.

Auf der anderen Seite kann die Entwicklung von Erfassungsmethoden im Bereich der Navigations- oder Tourismus-Informationssysteme mittelfristig erfolgen, da auch die Bereitstellung entsprechender Infrastruktur und Endgeräte noch einige Zeit in Anspruch nehmen wird. Im Unterschied zu den Daten, welche für den Bereich der Kommunikation erhoben werden und damit hauptsächlich für einen relativ kleinen Kreis professioneller Anwender bestimmt sind, ergibt sich hier jedoch in Zukunft ein Massenmarkt von erheblichem Volumen und Zukunftspotenzial.

Klassische photogrammetrische oder geodätische Verfahren sind zwar in der Lage, Stadtmodelle mit der gewünschten Genauigkeit und Detailliertheit zu erfassen. Sie arbeiten dabei jedoch fast ausschließlich auf der Basis manueller Messung, wodurch die geforderte Wirtschaftlichkeit nur schwer erreicht werden kann (siehe die ausführliche Darstellung in Kapitel 2). Kennzeichnend ist daher häufig die Beschränkung auf relativ kleine Ausschnitte, oder, wenn eine flächendeckende Erfassung erforderlich ist, die Herabsetzung der Anforderungen bezüglich der Genauigkeit bzw. Detailliertheit.

Die Aufgabe der vorliegenden Arbeit war es deshalb, neuartige Verfahren zu untersuchen, welche es ermöglichen, Stadtmodelle wirtschaftlich zu erfassen, wobei eine hohe Genauigkeit und ein hoher Detaillierungsgrad erreicht werden sollten. Im Rahmen dieser Arbeit wurden hierfür Lösungsvorschläge erarbeitet, in Computerprogramme umgesetzt und anhand realer Datensätze verifiziert. Kennzeichnende Merkmale der entwickelten Methoden sind:

- Die Verwendung von genauen und *hochauflösten Höhenmodellen*, gewonnen durch *flugzeuggetragene Laserscanning-Systeme*. Diese Systeme sind noch relativ jung, haben aber in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen.
- Der Einsatz von *Segmentierungsverfahren für Höhenmodelle*, welche eine hohe Detaillierung bei der Rekonstruktion erlauben. Segmentierungsverfahren wurden bisher vorwiegend für digitale Bilder oder Distanzdatensätze im Nahbereich verwendet.
- Die *Integration von Grundrissen* in den Rekonstruktionsprozess. Dieser manchmal auch als *Datenfusion* bezeichnete Schritt ermöglicht nicht nur eine hohe Lagegenauigkeit, sondern auch die Ableitung von Information zur Unterstützung der dreidimensionalen Rekonstruktion.
- Die Bereitstellung von sowohl *vollautomatischen* als auch *semiautomatischen* Rekonstruktionsverfahren. Hierdurch konnten einerseits Vorteile und Grenzen des automatischen Ansatzes aufgezeigt werden. Andererseits war es möglich, die Integration automatischer Komponenten in ein manuelles Messsystem anhand mehrerer durchgeführter Projekte zu evaluieren.

Ein wesentliches Alleinstellungsmerkmal der vorliegenden Arbeit ist, dass durch die geeignete Auswahl von Datenquellen und Verfahren ein bisher nicht gegebener Automatisierungsgrad erreicht werden konnte.

1.3 Gliederung der Arbeit

Kapitel 2 stellt zunächst generelle Aspekte zusammen. Dazu gehören die möglicherweise für die Rekonstruktion von Stadtmodellen einsetzbaren Datenquellen (mit einem Schwerpunkt auf digitalen Oberflächenmodellen), die Darstellung der allgemeinen Problematik der Gebäudeextraktion sowie eine Vorstellung verschiedener in der Literatur berichteter semiautomatischer und vollautomatischer Verfahren. *Kapitel 3* geht auf verschiedene Möglichkeiten zur Segmentierung digitaler Oberflächenmodelle ein. Es werden sowohl Verfahren betrachtet, welche allein auf der Basis des Oberflächenmodells arbeiten (morphologie-, steigungs-, ebenen-, krümmungsbasiert), als auch solche, welche Grundrissinformation integrieren (richtungs-, höhenlinienbasiert). In *Kapitel 4* wird die Verwendung von Grundrissen näher beleuchtet. Dabei wird vor allem auf die Bildung des Skeletts sowie auf die Zerlegung von Grundrissen in einfache Primitive eingegangen. *Kapitel 5* stellt schließlich ein neues Verfahren zur Gebäuderekonstruktion vor, welches auf der Basis einer Segmentierung eines Oberflächenmodells sowie der Zerlegung von Grundrissen in Primitive arbeitet. Für dieses Verfahren existieren sowohl eine vollautomatische als auch eine interaktive, semiautomatische Komponente. Die Ergebnisse des Verfahrens werden aufgezeigt und diskutiert. *Kapitel 6* greift die Betrachtung von Grundrissen aus Kapitel 4 nochmals auf. Es wird ein Verfahren zur verallgemeinerten Konstruktion von Dächern aus Grundrissen sowie zur Generierung von entsprechenden Graphen auf der Basis der Information aus digitalen Oberflächenmodellen beschrieben. *Kapitel 7* geht auf die Gewinnung von Textur für Stadtmodelle ein, wobei sowohl Luftbilder als auch terrestrische Aufnahmen berücksichtigt werden. *Kapitel 8* fasst schließlich die Ergebnisse der Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick.

2 Dreidimensionale Stadtmodelle

2.1 Datenquellen für die Rekonstruktion von Stadtmodellen

Eine Übersicht über verschiedene, im Zusammenhang mit der Gebäuderekonstruktion verwendbare Datenquellen befindet sich in Abb. 2.1. Dort wird eine grundsätzliche Unterscheidung in “ferne” Quellen (Flugzeug-, Satellitenbasiert) und Nahbereich (terrestrische Sensoren) getroffen. Die Quellen werden weiter unterteilt nach “qualifizierten” und “unqualifizierten”, je nachdem, ob sie durch menschliche Interpretation entstanden sind oder nicht.

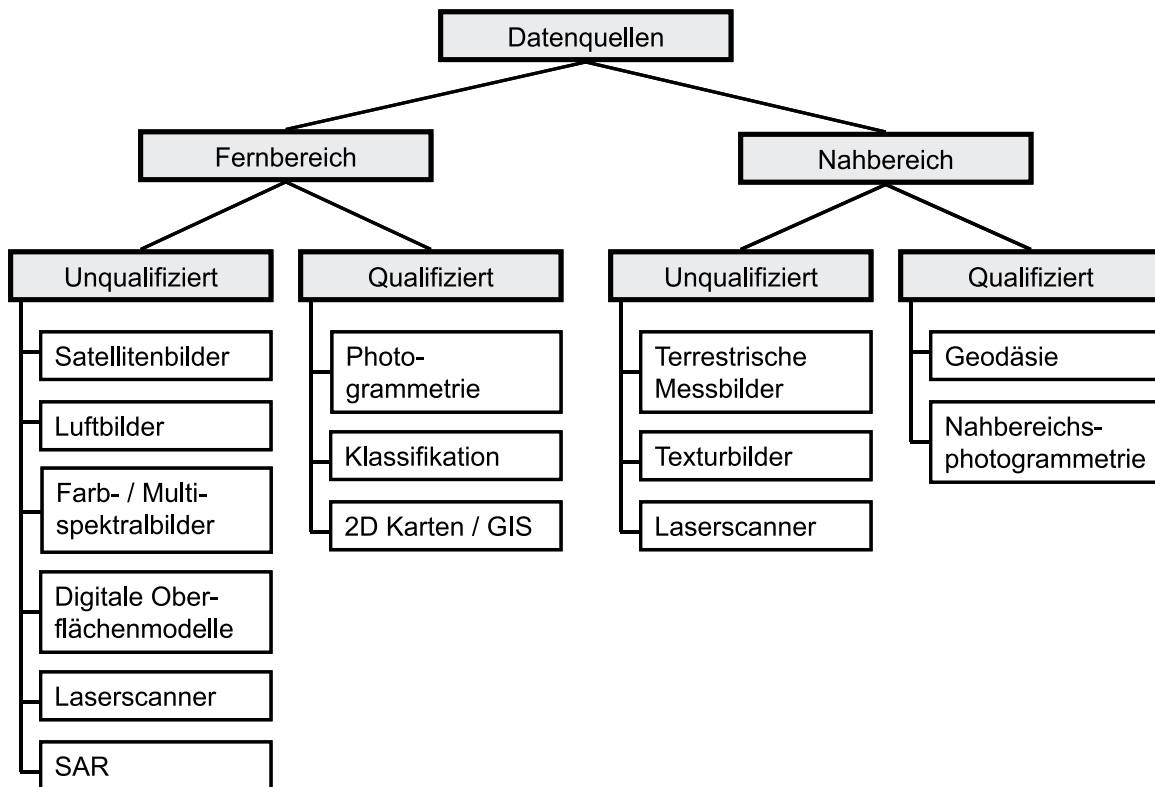


Abbildung 2.1: Mögliche Datenquellen für die Gebäuderekonstruktion.

Während bislang die Auflösung von Satellitendaten noch unter 5 m lag, sind seit 1999 durch den *Satelliten* Ikonos-2 hochauflösende Bilder auch für nicht-militärische Nutzung erhältlich. Die Bodenauflösung von 1 m ist jedoch für Zwecke der Gebäuderekonstruktion noch zu gering. Dennoch sind die Entwicklungen auf diesem Gebiet äußerst interessant und könnten in Zukunft zu einer wesentlichen Änderung des traditionellen Gefüges zwischen Luft- und Satellitenbildern führen [Fraser 1999].

Luftbilder und *Farb- / Spektralbilder* sind nach wie vor eine der Hauptdatenquellen für die Gebäuderekonstruktion. Messgenauigkeiten von ± 8 cm in der Lage und ± 15 cm in der Höhe für Einzelpunkte sowie ± 30 cm für Dachflächen wurden im Zusammenhang mit der manuellen photogrammetrischen Erfassung von Stadtmodellen (bei einem Bildmaßstab von 1:10000) [Wolf 1999] berichtet. Die Hauptproblematik bei der Verwendung von Luftbildern liegt jedoch in der Schwierigkeit, die Rekonstruktionsaufgabe zu automatisieren (siehe Abschnitt 2.4).

Aus Luftbildern lassen sich digitale Oberflächenmodelle (DOM)² mittels *Bildzuordnungsverfahren* gewinnen (Abschnitt 2.2.1). Die heute kommerziell verfügbaren Verfahren gehen jedoch üblicherweise von kontinuierlichen, glatten (Gelände-) Oberflächen aus. Gerade in Stadtgebieten ist daher das Verhalten an Bruchkanten problematisch. Aufgrund schlechter Texturierung und vom Verfahren verursachter Glättung werden die Gebäudegrenzen oft nicht richtig rekonstruiert und Hochhäuser bzw. enge Straßenschluchten fehlen ganz.

Mittels *Laserscanning* gewonnene DOM besitzen gegenüber DOM aus Bildzuordnung den Vorteil einer besseren Oberflächenapproximation, besonders im Bereich von Bruchkanten (vgl. Abschnitt 2.2.3). Aufgrund der

²vgl. die Definition in Abschnitt 2.2.

üblicherweise relativ niedrigen lateralen Auflösung ist die erzielbare Lagemessgenauigkeit jedoch gering. Da in einem DOM die Geometrie explizit repräsentiert wird, ist die Automatisierung von Rekonstruktionsverfahren wesentlich leichter als bei Luftbildern. DOM und Luftbilder verhalten sich also in gewisser Weise komplementär, was die Messgenauigkeit und automatisierte Interpretation betrifft.

Eine andere Technik zur Gewinnung von DOM ist *interferometrisches SAR* (synthetic aperture radar). Im Jahr 2000 hat besonders die SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) Aufsehen erregt, welche das Ziel hatte, 80% der Landmasse der Erde innerhalb von nur 11 Tagen zu erfassen [Bamler 1999]. Die Eckdaten des erzeugten DOM (Rasterweite $30\text{ m} \times 30\text{ m}$, 16 m absolute Höhengenaugigkeit, 10 m relative Höhengenaugigkeit, 20 m Lagegenauigkeit) lassen jedoch erkennen, dass eine Gebäuderekonstruktion mit diesen Daten nicht möglich ist. Mittels flugzeuggetragenem SAR lassen sich deutlich geringere Rasterweiten im Bereich von 2.5 m erzielen. Mercer & Schnick [1999] vergleichen DOM, welche durch SAR bzw. Laserscanning gewonnen wurden: In offenem Gelände wurden systematische Abweichungen von 50–70 cm festgestellt, überlagert mit einem Rauschen von 30 cm (1σ). Generell ist das Problem von SAR-Systemen, dass der erforderliche flache Blickwinkel zu Abschattungen führt, wodurch gerade in dicht bebauten Gebieten ein Einsatz schwierig ist. Mercer & Schnick [1999] haben bei Gebäudehöhen von 10 bis 45 Metern Abweichungen von mehreren Metern festgestellt, welche relativ zur Gebäudehöhe mit etwa 10% angegeben wurden.

Klassische *photogrammetrische* Verfahren besitzen den Vorteil, dass die Erfassung durch einen Operateur erfolgt, welcher eine Interpretation vornimmt und dadurch eine *Reduktion* bzw. *Generalisierung* der Daten herbeiführt, die in dieser Form in naher Zukunft nicht durch automatische Verfahren gewonnen werden kann [Förstner 1999]. Ein Nachteil ist jedoch der hohe Zeitaufwand, welcher mit einer manuellen Messung verbunden ist. Dieser liegt auch teilweise daran, dass traditionelle photogrammetrische Auswertesysteme mit ihrer punktbasiereten Arbeitsweise der Aufgabenstellung nicht optimal angepasst sind. Eine Verbesserung kann hier durch semiautomatische Systeme erreicht werden (Abschnitt 2.4.2). Ein weiterer Nachteil ist der häufig vom Operateur abhängige Detaillierungsgrad, welcher zu inhomogenen Generalisierungsstufen innerhalb eines Datensatzes führen kann, insbesondere, wenn die Datengewinnung über lange Zeiträume hinweg bzw. durch verschiedene Personen und/oder Institutionen erfolgt. Es gibt jedoch Anwendungen, z.B. bei Tourismus-Informationssystemen, bei denen eine inhomogene Modellierung durchaus erwünscht ist.

Klassifikationsverfahren können zur *Detektion* von Gebäuden eingesetzt werden. Dabei hat sich besonders die Verwendung von Farb- oder Infrarotbildern (CIR) *in Verbindung mit Höheninformation* als geeignet herausgestellt. Henricsson, Bignone, Willuhn, Ade, Kübler, Baltsavias, Mason & Grün [1996] beschreiben hierzu einen hierarchischen Klassifikationsansatz, während Walter [1999], Haala [1999] die Klassifikation durchführen, indem das normalisierte DOM als zusätzlicher Kanal in die Klassifikation einfließt. Eine Klassifikation aufgrund der Oberfläche eines DOM allein hat sich als schwierig erwiesen. In einer Untersuchung von Hug [1997] werden Maße zur Bewertung von Höhentextur, Varianz des Gradienten und Richtung des Normalenvektors eines Laser-DOM definiert. Es zeigt sich jedoch, dass deren Fehlerraten bei einer Auflösung von 1 m und 446 betrachteten Gebäuden bei 52%, 46% und 52% liegen. Insgesamt wurde eine Fehlerrate von 21% erzielt, die jedoch fast ausschließlich auf die Verwendung von Intensitätsinformation des im nahen Infrarot (810nm) operierenden Lasers zurückzuführen ist. Es ist denkbar, dass die definierten Maße erfolgreicher sind bei höher aufgelösten DOM.

Zweidimensionale Karten können sehr wesentliche Informationen für die Extraktion von Objekten liefern, im Zusammenhang mit der Rekonstruktion von Gebäuden sind dies besonders zweidimensionale Grundrisse. Diese Art von Daten besitzt den Vorteil, dass sie bereits *interpretiert* vorliegen, d.h. bei ihrer Erfassung wurde das zugrundeliegende Generalisierungsproblem bereits gelöst.

Terrestrische Messbilder können mittels digitaler Kameras oder Teilmesskammern gewonnen werden. Die Auswertung erfolgt durch Methoden der Nahbereichsphotogrammetrie (Architekturphotogrammetrie) [Luhmann 2000, Atkinson 1996, Regensburger 1990], welche inzwischen in PC-basierte Software integriert sind (z.B. [Technet 1996, Rollei 1996, Photomodeler 2000]). Dadurch ist es möglich, mit relativ preisgünstiger Ausstattung Genauigkeiten im Zentimeter- oder gar Millimeterbereich zu erzielen. Neben der reinen Punktmessung können auch dreidimensionale, texturierte Modelle direkt erzeugt werden. Nachteilig an diesen Verfahren ist der enorme Zeitaufwand, welcher nur im industriellen Umfeld durch Automation wesentlich reduziert werden kann, beispielsweise durch Einsatz von codierten Marken [Ahn & Schultes 1997]. Aufgrund (a) der notwendigen Arbeiten vor Ort (z.B. Passpunktbestimmung), (b) häufig auftretender Beschränkungen hinsichtlich Zugänglichkeit und Sichtbarkeit, (c) komplexer Aufnahmegeometrien mit einer großen Zahl von Aufnahmen, welche schon bei Gebäuden moderater Komplexität erforderlich sind und (d) der letztlich manuell durchzuführenden

Messung können nach Erfahrungswerten nicht mehr als einige wenige Gebäude pro Tag erfasst werden. Die Nahbereichsphotogrammetrie ist daher eher zur genauen und detaillierten Messung einzelner Gebäude denn zur flächendeckenden Erfassung einer großen Anzahl von Häusern geeignet. Entsprechendes gilt für die klassischen, *geodätischen* Messverfahren, welche mittels Theodolit oder Tachymeter Einzelpunkte bestimmen. Diese besitzen gegenüber der Nahbereichsphotogrammetrie den Nachteil, dass die für eine Darstellung notwendigen Texturen getrennt erfasst werden müssen.

Texturbilder wurden in Abb. 2.1 gesondert aufgenommen, um anzudeuten, dass diese – im Unterschied zu Messbildern – keine besonderen Aufnahmevorrichtungen benötigen. Sie werden in der Regel nur entzerrt und anschließend Flächen zugeordnet, welche bereits dreidimensional rekonstruiert vorliegen (Abschnitt 7.2).

Laserscanner für den Nahbereich können eingesetzt werden, um Gebäudefassaden geometrisch dicht zu erfassen [Wehr 1991, Riegl 2000]. Die einzeln gewonnenen Datensätze können zueinander orientiert [Besl & McKay 1992], zu einem Datensatz verschmolzen und mit Textur versehen werden [Bergevin, Soucy & Gagnon 1996]. Allerdings ist ähnlich wie bei DOM von flugzeuggetragenen Scannern zu beachten, dass dabei enorme Datenmengen entstehen. Allgemeine Verfahren zur Reduktion von Dreiecksnetzen [Heckbert 1997] können nicht ohne weiteres verwendet werden, weil sie die starke Regularität von Fassaden nicht ausreichend erhalten. Vielversprechend wäre dagegen die automatisierte Extraktion von Fassadenteilen (Balkone, Fenster, etc.) und ihre anschließende Repräsentation in einem vektorisierten Format.

2.2 Digitale Oberflächenmodelle (DOM)

Unter einem digitalen Oberflächenmodell versteht man eine (im Rechner vorliegende) Darstellung der geometrischen Ausprägung einer Oberfläche. Sowohl *welche* Objekte Bestandteil der Oberflächenbeschreibung sind als auch wie die Oberfläche *diskret repräsentiert* werden soll muss festgelegt werden.

Beschreibt ein Oberflächenmodell das *Gelände*, so spricht man allgemein von einem *digitalen Geländemodell* (DGM, *digital terrain model*, DTM), manchmal auch als *digitales Höhenmodell* (DHM) bezeichnet. Nach einer Definition von Ackermann [1979] wird im Unterschied hierzu das DHM als eine Erweiterung des DGM angesehen, welche zusätzlich noch Bruchkanten, Strukturlinien und ausgezeichnete Punkte des Geländes enthält. Diese Definition orientiert sich demnach an der klassischen Gewinnung von DGM, bei der die Oberfläche ausgehend von der Messung weniger, wichtiger Strukturen interpoliert wird. Von Dorrer [1975] wird eine andere Definition gegeben, wobei das DGM aus der Kombination eines DHM und eines sogenannten *digitalen Situationsmodells* (DSM) besteht. Dabei werden durch das DSM topographische Objekte (Straßen, Gebäude, Gewässer) durch Lagekoordinaten (bei Bedarf auch Höhenkoordinaten) ihres Objektgrundrisses beschrieben, während das DHM die Höhe von Punkten auf der Erdoberfläche angibt. In der Literatur hat sich des weiteren der Begriff des *digitalen Oberflächenmodells* (DOM, *digital surface model*, DSM) etabliert [Förstner 1985, Weidner 1996], welcher die Geländeoberfläche *plus* die auf ihr befindlichen topographischen Objekte bezeichnet.

In der vorliegenden Arbeit werden die folgenden Konventionen getroffen (Abb. 2.2):

1. Das *digitale Oberflächenmodell* (DOM) beschreibt die Geländeoberfläche einschließlich der darauf befindlichen topographischen Objekte. Es ist also die Oberfläche, welche man durch Messung aller Oberflächenpunkte erhalten würde.
2. Das *digitale Geländemodell* (DGM) hingegen beschreibt nur die Geländeoberfläche *ohne* topographische Objekte. Da sich Geländepunkte innerhalb dieser Objekte nicht messen lassen, werden diese aus umliegenden Punkten (z.B. durch Interpolation) bestimmt.
3. Als *normalisiertes DOM* wird die Subtraktion des DGM vom DOM bezeichnet. Dadurch erhält man im Idealfall ein Oberflächenmodell, welches nur die topographischen Objekte enthält. Bei ebenem Gelände sind DOM und normalisiertes DOM identisch (bis auf einen Offset).
4. In jedem Fall wird von einer *ikonischen* Repräsentation ausgegangen, welche die Oberfläche in Form vieler, dreidimensional bestimmter Punkte bildhaft definiert. Vektorisierte Informationen, z.B. Grundrisse oder dreidimensionale Modelle, sind nicht Bestandteil der hier betrachteten Oberflächenmodelle.



Abbildung 2.2: Zur Definition des digitalen Oberflächen- (DOM) und digitalen Geländemodells (DGM).

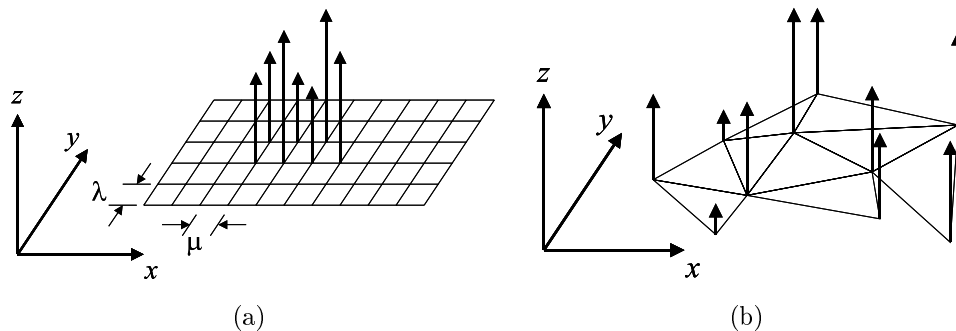


Abbildung 2.3: Darstellung eines DOM als Raster (a) und als trianguliertes irreguläres Netz (TIN) (b).

Die in dieser Arbeit verwendeten Oberflächenmodelle werden in Form von Graphen definiert, d.h. die Höhe wird als Funktion der Lage angegeben. Die hier verwendete Notation in kontinuierlichen Variablen ist

$$f(x, y) : \mathbb{R}^2 \supseteq (x, y) \mapsto z = f(x, y) \in \mathbb{R},$$

wobei (x, y) die Lagekoordinaten bezeichnen und $z = f(x, y)$ die zugehörige Höhe ist. Diese Darstellung wird auch *zweieinhalbdimensional* (2.5D) genannt, womit zum Ausdruck kommt, dass ein Lagepunkt keine zwei verschiedenen Höhen besitzen kann und somit keine echte dreidimensionale Beschreibung vorliegt [Fritsch 1991]. Vielmehr wird die Oberflächengeometrie durch dreidimensionale Punkte festgelegt, während deren Topologie nur zweidimensional repräsentiert wird [Bill & Fritsch 1991].

Für Oberflächenmodelle wird in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle eine der folgenden beiden diskretisierten Darstellungsformen gewählt (Abb. 2.3):

- *Regelmäßige Raster*, d.h. die kontinuierliche Funktion $f(x, y)$ wird nur an den diskreten Stellen $(x, y) = (\mu \cdot i, \lambda \cdot j)$ definiert, wobei μ und λ die Gitterweite (Abtastintervall) in x - bzw. y -Richtung ist (meist $\mu = \lambda$). Diese Darstellung besitzt vor allem große Vorteile bei der Verarbeitung: Zum einen sind die direkten Nachbarn eines Punktes (i, j) implizit gegeben (durch $(i - 1, j)$, $(i + 1, j)$, $(i, j - 1)$, $(i, j + 1)$), wodurch ein direkter Zugriff möglich ist. Zum anderen vereinfachen sich viele Algorithmen unter der Annahme konstanter Gitterweite, z.B. erhält man bei Ausgleichungsansätzen wie der Fourier-Analyse oder dem in Abschnitt 3.5.2 vorgestellten Verfahren zur Approximation durch Polynome diagonale Normalgleichungsmatrizen. Ein praktischer Vorteil besteht außerdem darin, dass DOM in dieser Darstellung *Fließkomma-Bildern* entsprechen, wodurch eine Verarbeitung mittels bestehender Bildverarbeitungsprogramme möglich ist. Alle Algorithmen dieser Arbeit verwenden regelmäßige Raster. Abb. 2.4 zeigt einige gebräuchliche Darstellungen für regelmäßig gerasterte DOM.
- *Triangulierte Netze*, auch *triangulated irregular networks* (TIN) genannt, repräsentieren unregelmäßig verteilte Punkte (x, y, z) des DOM. Die Nachbarschaft wird über eine (ebene) Triangulierung hergestellt. Somit besteht die Möglichkeit, die Oberfläche durch wenige, wichtige Punkte darzustellen, wodurch Vorteile bei der Speicherung, Übertragung und Darstellungsgeschwindigkeit auf Rechnern entstehen. TIN können entweder durch direkte Erfassung der benötigten Punkte gewonnen werden (klassische photogrammetrische Vorgehensweise) oder aber durch *Ausdünnung* dichter Daten (typische Vorgehensweise bei Scandaten), beispielsweise auf der Basis des Approximationsfehlers oder der lokalen Krümmung [Heckbert 1997]. Nachteilig ist, dass TIN relativ aufwendige Verarbeitungsalgorithmen induzieren, weil die Nachbarschaft über

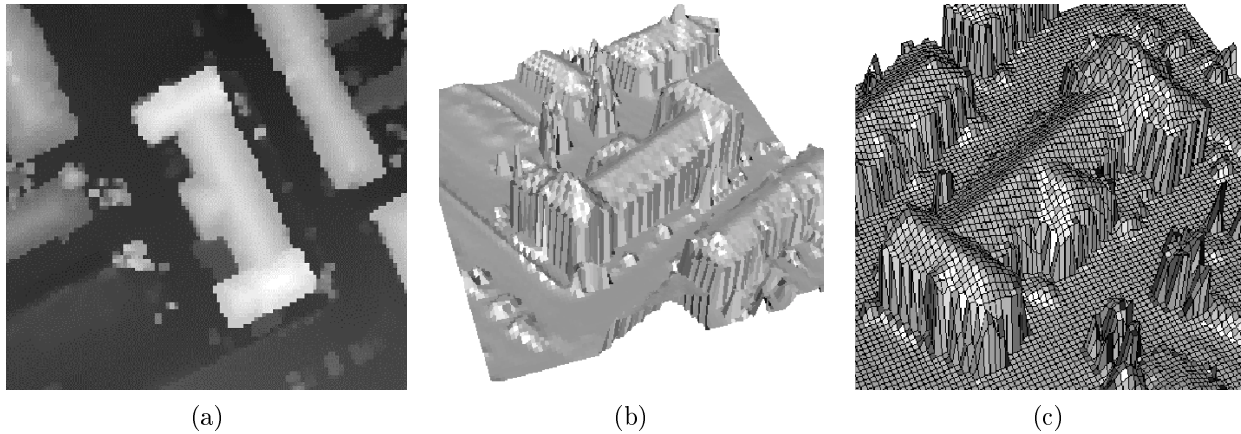


Abbildung 2.4: Darstellung von regelmäßig gerasterten DOM. (a) Als Grauwertdarstellung, helle Werte entsprechen großen Höhen z . (b), (c) Als schattierte dreidimensionale Darstellung ohne und mit Gitterlinien des zugrunde liegenden Rasters. Eine Darstellung mit Höhenlinien befindet sich in Abb. 3.21.

die (unterschiedlich langen) Kanten der Dreiecksvermaschung definiert ist. Des Weiteren kann die inhomogene Punktverteilung zu Abweichungen bei der Schätzung von Modellparametern führen [Maas 1999].

Die beiden heute am meisten eingesetzten Verfahren zur Gewinnung von DOM, zum einen passiv aus Luftbildern mittels *Bildzuordnung*, zum anderen aktiv durch abtastende Lasersysteme, sollen in den folgenden beiden Abschnitten kurz vorgestellt werden.

2.2.1 DOM aus Bildzuordnung

Zur Ableitung von Oberflächenmodellen aus Bildern wird die automatische Stereo- oder Mehrbildzuordnung eingesetzt. Dabei sind zwei Verfahren besonders erwähnenswert, die intensitätsbasierte und die merkmalsbasierte Zuordnung.

Die *intensitätsbasierte* Zuordnung (intensity based matching, IBM), auch *gebietsbasiert* genannt, ordnet homologe Punkte zweier Bilder anhand kleiner Bildfenster zu. Hierfür werden die Beobachtungsgleichungen

$$g(x_i, y_i) + v_i = k \cdot f(u_i, v_i) + h$$

für jeden Bildpunkt i innerhalb dieser Fenster aufgestellt, wobei $g(x, y)$ und $f(x, y)$ die Grauwerte der beiden Bilder sind, k und h die Korrekturterme für Kontrast und Helligkeit und die Koordinaten (x, y) und (u, v) über die Affintransformation

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

in Beziehung stehen. Die Ausgleichung minimiert die Quadratsumme der Grauwertdifferenzen in den beiden Bildern, wobei die acht Unbekannten k , h , a_{11} , a_{12} , a_{21} , a_{22} , b_1 , b_2 geschätzt werden. Da sechs der Unbekannten im Argument von $f(\cdot)$ enthalten sind, ist die Ausgleichung nichtlinear, somit ist eine iterative Lösung unter Verwendung von Startwerten erforderlich. In [Haralick & Shapiro 1993], Kapitel 16, befindet sich eine ausführliche, von W. Förstner verfasste Darstellung.

Die intensitätsbasierte Zuordnung ist eines der genauesten Verfahren, mit geometrischen Genauigkeiten von bis zu 0.1 Bildpunkten bei ausreichender Textur. Experimente zu Farbbildern und verschiedenen Maskengrößen sind von Hahn & Brenner [1995] beschrieben. Problematisch an diesem Verfahren ist

1. die Bereitstellung von *Näherungswerten*: Für die radiometrische und lineare Transformation ist es meist ausreichend, die Identität anzusetzen, die Translationsparameter b_1 , b_2 müssen jedoch nach Erfahrungswerten auf 2–3 Bildpunkte genau bekannt sein. Zur Lösung dieses Problems wird vielfach eine grob-zu-fein Strategie in Form von Bildpyramiden eingesetzt [Ackermann & Hahn 1991], welche jedoch nur funktioniert, wenn auf *allen* Pyramidenstufen ausreichende Textur vorhanden ist.

2. die *Größe* des eingesetzten Bildfensters: Für die Zuordnung selbst sind große Masken günstig, weil dadurch viele Beobachtungsgleichungen zur Verfügung stehen. Dann trifft jedoch die Annahme einer hinreichend genauen Approximation durch die Affinabbildung in Gl. 2.1 nicht mehr zu. Insbesondere im Bereich von Bruchkanten kann die intensitätsbasierte Zuordnung zu Fehlern führen. Berthod, Gabet, Giraudon & Lotti [1995] beschreiben ein Verfahren, welches zunächst Konturen in den Bildern extrahiert und die für die Zuordnung verwendeten Bildfenster entsprechend adaptiert.
3. die Kontrolle der Ergebnisse: Die a posteriori Schätzung der Varianz ist nicht ohne weiteres geeignet, die Richtigkeit einer Bildzuordnung festzustellen. Um ein mehr geometrisches Kriterium zu erhalten, kann ein Punkt p in Bild A zunächst nach Bild B zugeordnet werden (Punkt p'), um anschließend rückwärts (von B nach A) zugeordnet zu werden (man erhält Punkt p'' in Bild A). Die Differenz der Bildkoordinaten $\|p - p''\|$ wird dann zur Beurteilung herangezogen. Bei bekannter Aufnahmegeometrie bieten geometrische Einschränkungen die beste Möglichkeit zur Kontrolle [Baltsavias 1991].

Das Verfahren der *merkmalsbasierten* Zuordnung (feature based matching, FBM) arbeitet in zwei Schritten. Zunächst werden in den Bildern getrennt Merkmale extrahiert, welche anschließend zugeordnet werden. Merkmale können Punkte, Linien oder Flächen sein, wobei sich für die Generierung von DOM punktförmige Merkmale durchgesetzt haben. Besonders geeignet ist der Operator nach Förstner [1986] (Abschnitt 3.1), weil er genau die Punkte extrahiert, welche in ihrer Lage gut bestimmt werden können. Die Zuordnung der Punkte erfolgt i.a. im Rahmen einer robusten Ausgleichung, welche mit einer vorläufigen Zuordnung beginnt und iterativ die Gewichte (auf der Basis der normierten Verbesserungen) verändert. Durch diese Ausgleichung wird eine Fläche rekonstruiert, an welche gleichzeitig (zur Elimination von Ausreißern) Stetigkeitsforderungen gestellt werden, beispielsweise die Minimierung der Krümmung [Ackermann & Krzystek 1991].

Die Genauigkeit der Zuordnung wird bei merkmalsbasierten Verfahren allgemein mit 0.3–0.5 Bildpunkten angegeben. Damit sind sie etwas schlechter als intensitätsbasierte Verfahren, benötigen aber andererseits weniger genaue Näherungswerte. Prinzipiell sind merkmalsbasierte Verfahren in der Lage, Höhengsprünge zu handhaben, weil die extrahierten Punkte genau die Stellen der Diskontinuität im Bild markieren. Allerdings wird durch die erwähnten Stetigkeitsbedingungen bei der Ausgleichung eine Glättung der Oberfläche herbeigeführt. In der Regel steht hier ein Parameter zur Verfügung, welcher Punktapproximation und Stetigkeit gegeneinander gewichtet. Betont man die Punktapproximation, um Bruchkanten der Gebäude zu erhalten, werden gleichzeitig mehr fehlerhafte Punktkorrespondenzen berücksichtigt. Obwohl das Verhalten insgesamt günstiger ist als bei der intensitätsbasierten Zuordnung, muss man feststellen, dass beide Verfahren für die Oberflächenrekonstruktion von Stadtlandschaften problematisch sind (vgl. Abschnitt 2.2.3).

2.2.2 Laserscanning

Laserscanning-Systeme gehen zurück auf Entwicklungen, welche bereits in den 70er und 80er Jahren durchgeführt wurden [Ackermann 1999]. Dennoch verlief die Entwicklung im Bereich flugzeuggetragener Laserscanner (airborne laser scanner, ALS) zunächst langsam – so gab es beispielsweise 1996 nur eine einzige Firma, welche ALS kommerziell anbot. Inzwischen gibt es jedoch mehrere Hersteller, und auch die Zahl der Firmen, welche Dienstleistungen in diesem Bereich anbieten wird nach einer neueren Untersuchung auf weltweit etwa 40 beziffert [Baltsavias 1999a].

ALS bestehen im wesentlichen aus den folgenden Komponenten [Wehr & Lohr 1999]:

1. Einem *Laserentfernungsmesser* (laser range finder, LRF). Diese Einheit ermittelt den Abstand einer Fläche vom Sensor durch eine einzige, punktförmige Messung. Als Messprinzipien stehen die *Laufzeit-* (Pulsbetrieb) oder die *Phasenmessung* (kontinuierlicher Betrieb, continuous wave, CW) zur Verfügung; alle Systeme mit Ausnahme von ScaLARS (INS Stuttgart) benutzen jedoch die Laufzeitmessung.
2. Einem *Scanner*. Dieser lenkt den Strahl des LRF ab und erzeugt damit (in Verbindung mit der Flugbewegung) ein flächiges Abtastmuster. Eingesetzt werden oszillierende, nutierende (Palmer scanner) und Polyspiegel; das System von TopoSys setzt ein Bündel von Glasfasern ein. Entsprechend dem Scanprinzip erhält man Abtastmuster in Form von Zickzack-Linien, (nahezu) parallelen Linien oder ellipsenförmigen Kurven. Diese besitzen jeweils spezifische Vor- und Nachteile.

3. Einem System zur Erfassung der *Position und Orientierung*. Hierfür wird heute meist differentielles GPS in Verbindung mit einer inertialen Messeinheit verwendet.
4. Einem oder mehreren Rechnern zur Überwachung und Aufzeichnung von Messdaten von Laser, GPS und inertialem Messsystem sowie zugehörigen Synchronisationssignalen.

Im weiteren Sinn kann man noch als Komponenten betrachten: die Plattform, GPS-Referenzstationen, Software für die Planung der Befliegung und Postprocessing der Daten, sowie weitere Sensoren, etwa Video-, digitale CCD- und Luftbildkameras [Baltsavias 1999a].

Die *Messpunktdichte* am Boden hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie Scanfrequenz, Scanwinkel, Pulsfrequenz, Fluggeschwindigkeit und Flughöhe. Oft ist die Dichte in Flugrichtung verschieden von der Dichte senkrecht hierzu. Flugzeuggetragene Scanner erreichen typischerweise 5–1 m, Systeme an Hubschraubern bis zu 0.5–0.25 m Punktabstand [Axelsson 1999]. Im Zusammenhang mit der Rekonstruktion von Gebäuden wird (abhängig vom gewünschten Detaillierungsgrad) eine Punktdichte von mindestens einem Punkt pro Quadratmeter als sinnvoll erachtet [Maas 1999].

Die *Höhenmessgenauigkeit* von ALS wird meist mit 0.15–0.2 m angegeben, jedoch ist unklar, wie diese bestimmt wurde. Oft liegen hier idealisierte Bedingungen zugrunde und in der Praxis wird man von einer geringeren Genauigkeit ausgehen müssen (vgl. [Baltsavias 1999a], S. 169–170). Meist werden die Daten in Form von regularisierten Rastern abgegeben, welche durch Interpolation aus den Messpunkten erhalten werden. Für die Qualität dieser Daten sind somit auch die eingesetzten Algorithmen verantwortlich (über welche allerdings in der Regel sehr wenig Information vorliegt).

ALS besitzen noch eine Reihe von Vorteilen, wie z.B. der Aufnahme von Mehrfachechos (wodurch sich der Grund bewaldeter Gebiete messen lässt), der Erfassung von Objekten, welche kleiner als die Bodenpixelgröße sind (Aufnahme von Hochspannungsleitungen), dem möglichen Einsatz bei Nacht, sowie dem im Vergleich zur Photogrammetrie höheren Automatisierungsgrad bei der Herstellung von DOM. Die Photogrammetrie bietet demgegenüber eine höhere Leistung in Beziehung auf die erfasste Fläche je Flugstunde [Baltsavias 1999b]. Wesentlich für die Verwendung in Verbindung mit der Gebäuderekonstruktion ist jedoch die im Vergleich zu photogrammetrisch gewonnenen DOM bessere Oberflächenrepräsentation in Stadtgebieten.

Insgesamt ist in der Zukunft ein verstärkter Einsatz von Laserscanning-Systemen zu erwarten, sowohl aufgrund der technischen Entwicklung, als auch der allgemein gestiegenen Akzeptanz. Übersichten über Systeme und Einsatzgebiete bieten die Sonderausgaben [Baltsavias, Wehr & Lohr 1999, Steinborn & Fritsch 1999].

2.2.3 Vergleich von DOM aus Bildzuordnung und Laserscanning

Abb. 2.5 zeigt Ergebnisse von Bildzuordnung und Laserscanning für identische Objekte. Dargestellt sind jeweils die Konturlinien im Intervall 1 m, welche aus den abgeleiteten DOM gewonnen wurden. Die Bildzuordnung erfolgte mit dem Programm Match-T [Ackermann & Krzystek 1991], wobei ein DOM mit 1 m Rasterweite abgeleitet wurde. Match-T verwendet einen merkmalsbasierten Zuordnungsansatz. Die Luftbilder lagen im Maßstab 1:5000 vor, aufgenommen mit einem Normalwinkelobjektiv ($c=305$ mm). Für die Zuordnung selbst wurden verschiedene Einstellungen der Parameter vorgenommen, Abb. 2.5 oben zeigt ein (das subjektiv “beste”) Ergebnis. Der Laserscanner-Datensatz wurde durch den Scanner der Firma TopoSys aufgenommen und mit Rasterweite 1 m regularisiert.

Die Daten lassen erkennen, dass das aus Bildzuordnung gewonnene DOM häufig an den Gebäudekanten fehlerhaft ist. Dies äußert sich an langsam abfallenden Flanken, welche sich in das Gelände (Abb. 2.5(a)) oder das Gebäude (Abb. 2.5(b)) erstrecken. Obwohl das DOM aus Bildzuordnung die Dachstruktur (besonders in Nähe des Giebels) recht ordentlich wiedergibt, ist offensichtlich, dass durch Laserscanning ein DOM erhalten wird, das den Unstetigkeiten wesentlich besser folgen kann. Das in Abb. 2.5(c) gezeigte Hochhaus wird durch die Bildzuordnung nicht erfasst, wohl aber durch Laserscanning, welches auch den Flachdachaufbau wiedergibt. Man beachte aber auch die wellenförmigen Konturlinien in Abb. 2.5(a) unten, welche auf eine fehlerhafte Interpolation bei der Regularisierung der Lasermessungen hindeuten.

Es ist anzumerken, dass die heute kommerziell verfügbaren Programme zur Bildzuordnung oftmals für die Erfassung von freiem Gelände konzipiert wurden. In der Regel schöpfen diese – meist auf der Zuordnung von zwei

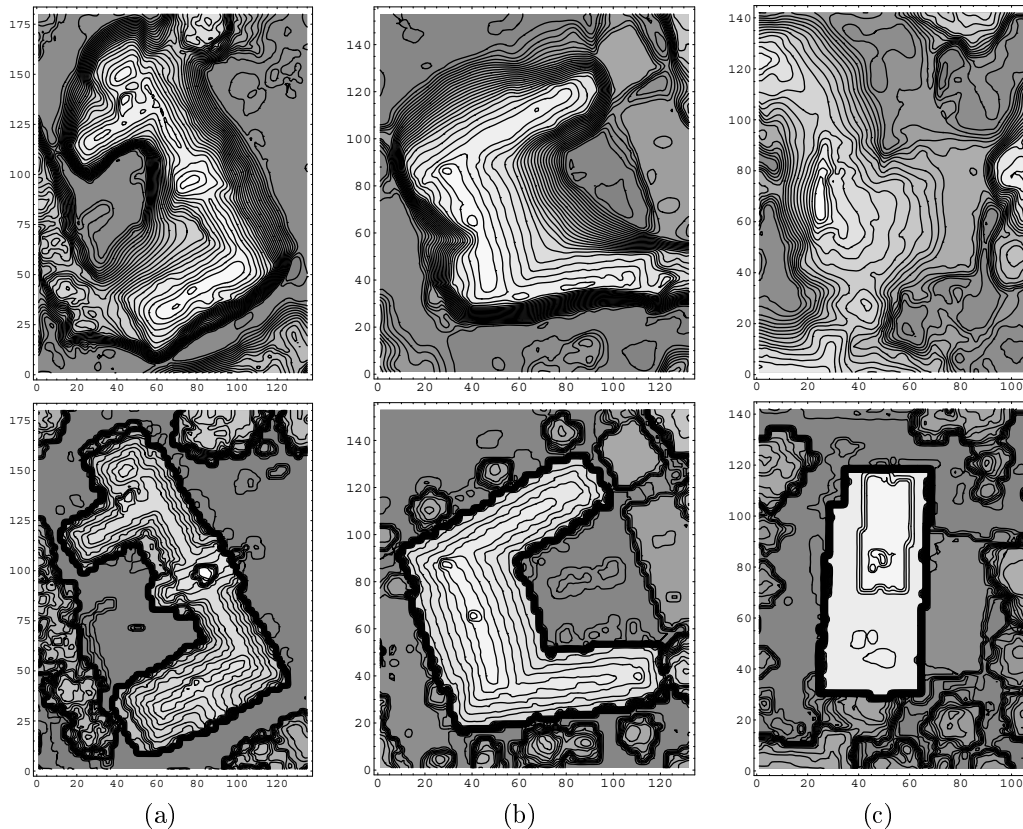


Abbildung 2.5: Vergleich von DOM aus Bildzuordnung (oben) und Laserscanning (unten). Die eingezeichneten Höhenlinien sind im Intervall 1 m.

Bildern beruhenden – Verfahren das mögliche Potenzial der Bildzuordnung nicht aus. Eine deutliche Verbesserung bringen Ansätze, welche auf der *Mehrbildzuordnung* basieren. So beschreibt Baltsavias [1991] den Einsatz geometrischer Bedingungen bei der Mehrbildzuordnung. Maas [1992] stellt ein Verfahren zur Auflösung von Mehrdeutigkeiten bei der Bildzuordnung durch Ausnutzung des Kernlinienschnittverfahrens vor. Das Verfahren basiert auf einer Anordnung von drei Kameras und wurde im Hinblick auf die dreidimensionale Strömungsmesstechnik entwickelt, später jedoch auf weitere Konfigurationen und Anwendungsfälle, auch den der Generierung von DOM, erweitert (vgl. die Darstellung in [Maas 1997]).

2.3 Extraktion von Gebäuden

2.3.1 Objekterkennung und Rekonstruktion

Die Objekterkennung ist ein sehr weitläufiges Feld, und sie wird im Kontext sehr unterschiedlicher Aufgabenstellungen erforscht und eingesetzt [Grimson 1990, Jain & Flynn 1993]. Dementsprechend ist eine umfassende Darstellung innerhalb dieser Arbeit nicht möglich, jedoch können die vielen Ansätzen gemeinsamen Prinzipien herausgearbeitet werden. Generell sind für die Objekterkennung und Rekonstruktion folgende Schritte nötig:

- Die Erfassung und Bereitstellung von *Objektmodellen* in einer geeigneten Form.
- Die *Detektion* und *Erkennung* von einem oder mehreren Objekten in einer Szene, wobei die hierfür notwendigen Objektmodelle vorausgesetzt werden.
- Die Gewinnung exakter geometrischer Information über die Position, Orientierung und Ausdehnung des Objekts, welche eine *Rekonstruktion* des Objekts erlaubt.

Die *Modellierung* von Objekten stellt einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen der Objekterkennung und -Rekonstruktion dar, obwohl dieser Punkt – besonders in der Vergangenheit – häufig vernachlässigt wurde. Erkennen kann man jedoch nur, wovon man eine (genaue oder vage) Vorstellung besitzt. Es stellt sich insbesondere die Frage

- *welcher Art* die eingesetzten Modelle sind,
- wie man diese *gewinnen* kann, vorzugsweise in automatischer oder automatisierter Weise und
- wie man ihre *Eignung* bezüglich der Erkennung von Objekten feststellen bzw. quantitativ bemessen kann.

Arten von Modellen: Grundsätzlich lässt sich eine Unterteilung in spezifische und generische Modelle vornehmen. Ein *spezifisches Modell* eines Objekts liegt vor, wenn eine exakte, vollständige Beschreibung vorhanden ist. In Bezug auf eine geometrische Repräsentation ist dies z.B. die Beschreibung des Objekts durch ein CAD- oder GIS-Modell, wodurch Form und Abmessungen festgelegt sind. Spezifische Modelle können vor allem dann verwendet werden, wenn die Umgebungsbedingungen genau kontrolliert sind, d.h. insbesondere im industriellen Umfeld. Allgemeine Aufgabenstellungen lassen sich damit jedoch nicht lösen, weil die explizite Beschreibung aller in einer Szene möglicherweise vorkommenden Objekte nicht gelingt. Auch im Kontext der Gebäuderekonstruktion lassen sich spezifische Modelle somit nicht einsetzen (obwohl sie beispielsweise für die Lokalisierung bekannter Gebäude in Luftbildern Verwendung fanden [Sester & Förstner 1989]).

Man ist in diesen Fällen auf *generische Modelle* angewiesen. Diese erlauben es, anstatt einzelner Objekte *Objektklassen* zu beschreiben. *Parametrische Modelle* sind einfache Beispiele generischer Beschreibungen, welche zwar die Form festlegen (Quader, Zylinder, Kugel), nicht jedoch die Abmessungen. Diese sind als Parameter ausgeführt (etwa Länge, Breite, Höhe, Radius) und werden bei der *Instanziierung* des Objektmodells bestimmt.

Parametrische Modelle können – abhängig vom Anwendungsbereich – eine erstaunlich große Zahl von Objekten beschreiben. Beispielsweise führt die CAD-Modellierung durch sogenannte *features* dazu, dass industrielle Objekte aus “Bausteinen” zusammengefügt werden, welche direkt parametrischen Modellen entsprechen. Auch bezüglich der Modellierung von Gebäuden lässt sich feststellen, dass sich eine überwiegende Anzahl mit relativ einfachen parametrischen Primitiven (Flachdach, Satteldach, etc., siehe Abschnitt 2.3.2) beschreiben lässt.

Allgemeiner sind generische Modelle, die auf Prinzipien der *Gestalttheorie* beruhen. Sie nutzen Eigenschaften wie Nachbarschaft, Ähnlichkeit, Geschlossenheit, Kontinuität und Symmetrie aus, um dadurch Strukturen (d.h. einfache Objekte) zu erkennen [Lowe 1985]. Derartige Modelle lassen sich für die Rekonstruktion von Gebäuden vorteilhaft verwenden, weil diese häufig sehr regelmäßige Strukturen enthalten (siehe etwa [Lin, Huertas & Nevatia 1995, Collins, Hanson, Riseman & Schultz 1995, Haala 1996]). Im allgemeinen werden diese Modelle jedoch eher im Vorfeld der eigentlichen Objekterkennung verwendet, z.B. um Liniensegmente zu Linien zu gruppieren, parallele und senkrecht stehende Linien zu detektieren oder ähnliche Flächen zusammenzufassen.

Gewinnung von Modellen: Die einfachste (und am häufigsten eingesetzte) Art, Modelle zu gewinnen, besteht darin, sie *manuell* festzulegen. Der damit verbundene Aufwand führt jedoch dazu, dass nur eine kleine Zahl von Objekten definiert werden kann und eine Erweiterung entsprechend teuer ist. Objekterkennungssysteme sind daher oft auf wenige, spezielle Objekte beschränkt und es besteht die Tendenz, die präsentierten Szenen im Hinblick auf die bekannten Fähigkeiten des Systems auszuwählen.

Im industriellen Bereich bieten sich *dreidimensionale CAD-Daten* als Objektmodelle an, weil sie häufig für Objekte heutiger industrieller Produktion verfügbar sind. Diese beschreiben zwar die Objektgeometrie exakt, sind jedoch nicht unmittelbar für die Objekterkennung geeignet. Ähnlich wie bei der Ableitung von Fertigungsdaten von Teilen sind die Bestrebungen jedoch dahingehend, die benötigten Modelle automatisch aus den CAD-Daten zu gewinnen [Bolles & Horaud 1986, Hansen & Henderson 1989, Flynn & Jain 1991].

Eine weitere, interessante Alternative stellt die Gewinnung mittels *Lernverfahren* dar. Dabei gibt ein Operateur Objekte manuell vor und identifiziert sie in Datensätzen. Anhand dieser Beispiele kann ein Verfahren des maschinellen Lernens die implizit in den Beispielen gegebenen Objekteigenschaften ermitteln und sie in ein explizites Objektmodell überführen [Sester 1995].

Eignung von Modellen: Ein Modell kann nur dann erfolgreich für die Objekterkennung eingesetzt werden, wenn es in den Daten auch *beobachtbar* ist. Beispielsweise sind die durch CAD-Daten gegebenen Beschrei-

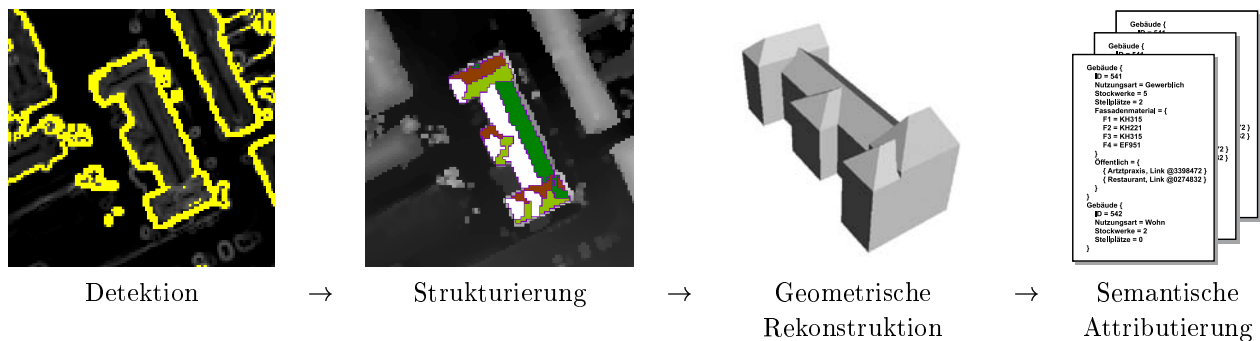


Abbildung 2.6: Unterteilung der Objektextraktion in die Schritte der Detektion, Strukturierung, geometrischen Rekonstruktion und semantischen Attributierung (nach [Förstner 1999]).

bungen oft aufgrund grundsätzlicher Eigenschaften nicht direkt beobachtbar.³ Häufiger ist jedoch der Fall, dass die Beobachtbarkeit von der Art der eingesetzten Daten abhängt: Eine Modellbeschreibung, welche Farbe berücksichtigt, kann nicht zur Erkennung von Objekten unter Verwendung von DOM benutzt werden. Um die Objekterkennung zu erleichtern, benutzt man deshalb heute häufig den Ansatz der *Datenfusion*. Dabei wird versucht, möglichst viele verschiedenartige Daten zum Aufbau einer möglichst reichhaltigen Szenenbeschreibung heranzuziehen. Dementsprechend muss das verwendete Objektmodell jedoch auch verschiedene Facetten des Objekts beschreiben.

Die *Erkennung* und *Rekonstruktion* wird auch manchmal insgesamt unter dem Begriff der Objektextraktion zusammengefasst. Andererseits kann man den Gesamtvorgang in die Teilschritte der Detektion (wo könnte ein Objekt in der Szene sein?), der Strukturierung (welche Teile gehören zu dem Gebäude und wie hängen sie zusammen?), und der geometrischen Rekonstruktion (wie sind die Längen und Winkel?) unterteilen (Abb. 2.6). Optional ist ein vierter Schritt, welcher zusätzliche Informationen (Attribute) ableitet, z.B. die Nutzungsart eines Gebäudes. Dieser Schritt fehlt heute jedoch noch bei den meisten Rekonstruktionssystemen [Förstner 1999].

Generell können *datengetriebene (bottom up)* und *modellgetriebene (top down)* Rekonstruktionverfahren unterschieden werden, obwohl die Kombination beider Ansätze die Regel ist. Die datengetriebene Vorgehensweise versucht, die Rekonstruktion ausgehend von den Daten (der Szene) zunächst auf der Basis von “allgemeinem Wissen” (etwa den oben erwähnten Gestaltgesetzen) vorzunehmen. Das Objektmodell wird erst relativ spät eingesetzt, wenn wenige und aussagekräftige Merkmale zur Verfügung stehen. Der modellgetriebene Ansatz hingegen geht vom Objektmodell aus und vergleicht es möglichst frühzeitig mit der Szene. Dieser Ansatz mag zunächst seltsam erscheinen, weil z.B. die Ermittlung der unbekanntenen Objektposition in einer Szene eine erschöpfende Suche und somit sehr viele Vergleiche erfordert. Dennoch ist er vorherrschend beispielsweise in der zweidimensionalen Bildverarbeitung für industrielle Anwendungen. Die Rekonstruktion von Gebäuden kann jedoch nicht nach diesem Ansatz erfolgen, weil keine spezifischen Modelle eingesetzt werden können und die Anzahl der unbekanntenen Parameter zu gross ist.

2.3.2 Geometrische Gebäudemodelle

Bei der Modellierung von Gebäuden sind zwei Aspekte zu unterscheiden. Erstens, welches geometrische *Modell* verwendet wird: Dieses entscheidet darüber, welche Untermenge der tatsächlich vorkommenden Gebäude behandelt werden kann. Zweitens, wie diese Geometrie im Rechner *repräsentiert* wird. Hier werden vorwiegend die folgenden Ansätze verwendet (Abb. 2.7):

Randbeschreibung (boundary representation, BREP). Dabei wird die *Oberfläche* eines Objekts durch eine analytische Darstellung der einzelnen Teilflächen und ihrer Schnitte beschrieben. Hierfür muss einerseits die *Geometrie* (in Form dreidimensionaler Koordinaten), andererseits die *Topologie* festgelegt werden. Für polyedrische Objekte ist es beispielsweise ausreichend, die Schnittpunkte der Flächen geometrisch festzulegen. Die topologische Beschreibung beinhaltet dann Kanten (zwischen jeweils zwei Punkten)

³Das klassische Beispiel hierzu ist ein Kreis, welcher im CAD durch Mittelpunkt, sowie Anfangs- und Endpunkt des Kreisbogens beschrieben wird. Obwohl dies eine vollständige geometrische Definition darstellt, lassen sich der Mittelpunkt allenfalls indirekt, die beim Vollkreis identischen Anfangs- und Endpunkte überhaupt nicht beobachten.

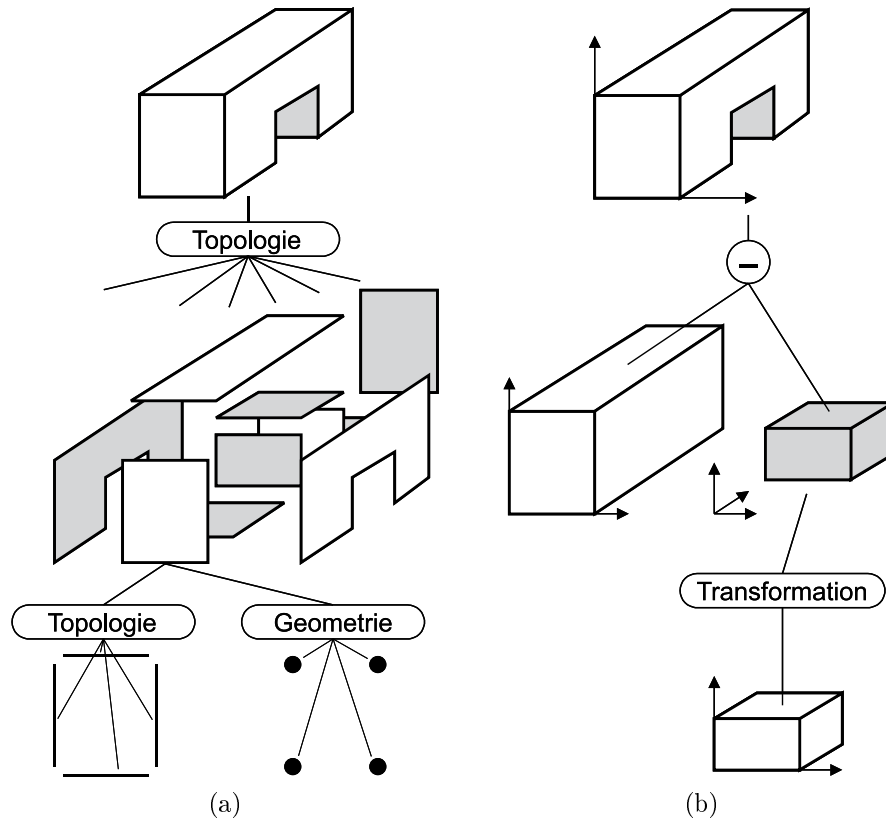


Abbildung 2.7: Repräsentation eines Objekts (a) in Randdarstellung (BREP) und (b) als Kombination von Raumprimitiven (CSG).

und Flächen (eine geordnete Folge von Kanten definiert das jeweilige Umringspolygon einer Fläche). Triangulierte Oberflächen sind Beispiele einfacher Randbeschreibungen.

Konstruktion aus Raumprimitiven (constructive solid geometry, CSG). Hier wird das Objekt *volumetrisch* beschrieben durch die Menge der Punkte, welche Bestandteil des Objekts sind. Die Objektbeschreibung erfolgt durch die mengentheoretischen Operationen der Vereinigung (\cup), Schnittbildung (\cap) und Differenz (\setminus bzw. $-$), ausgehend von einfachen Grundprimitiven wie Quader ($\{(x, y, z)^T : 0 \leq x \leq b \wedge 0 \leq y \leq t \wedge 0 \leq z \leq h\}$), Kugel, Zylinder und Kegel. Jedes Objekt kann durch einen *Konstruktionsbaum* dargestellt werden, dessen Blätter die Grundprimitiven und dessen innere Knoten Transformationen und Mengenoperationen sind. Die Darstellung eines Objekts durch CSG beinhaltet die Art und Reihenfolge der Konstruktion und ist somit nicht eindeutig.

Enumerationsverfahren (spatial enumeration, Voxeldarstellung). Diese teilen den dreidimensionalen Raum in einzelne Zellen auf. Objekte werden dann durch die Menge der von ihnen belegten Zellen beschrieben. Im Unterschied zu den anderen beiden genannten Darstellungen geht damit eine *Diskretisierung* des Objekts einher.

CSG ist heute häufig bei CAD-Paketen anzutreffen, wobei in der Regel die rechnerinterne Darstellung durch BREP erfolgt. CSG wird somit eher als Modellierprinzip denn als Repräsentationsform eingesetzt. Eine Anzeige auf dem Bildschirm setzt immer die Wandlung in BREP voraus, wobei letztlich eine Unterteilung in Dreiecke (Triangulierung, Facettierung) stattfindet. Umgekehrt ist die Umsetzung von BREP nach CSG nichttrivial [Hoffmann 1989]. Da Volumen (im Unterschied zu Punkten, Linien und Flächen) in Bildern oder DOM nicht direkt beobachtbar sind, bietet sich demnach eine Modellierung in BREP an, bzw. in CSG mit Umsetzung nach BREP.

Bei der Wahl eines *geometrischen Modells* müssen verschiedene Randbedingungen berücksichtigt werden:

1. Das Modell sollte das reale Objekt – abhängig vom angestrebten Zweck – geometrisch “hinreichend gut” darstellen hinsichtlich Genauigkeit und Detailliertheitsgrad.

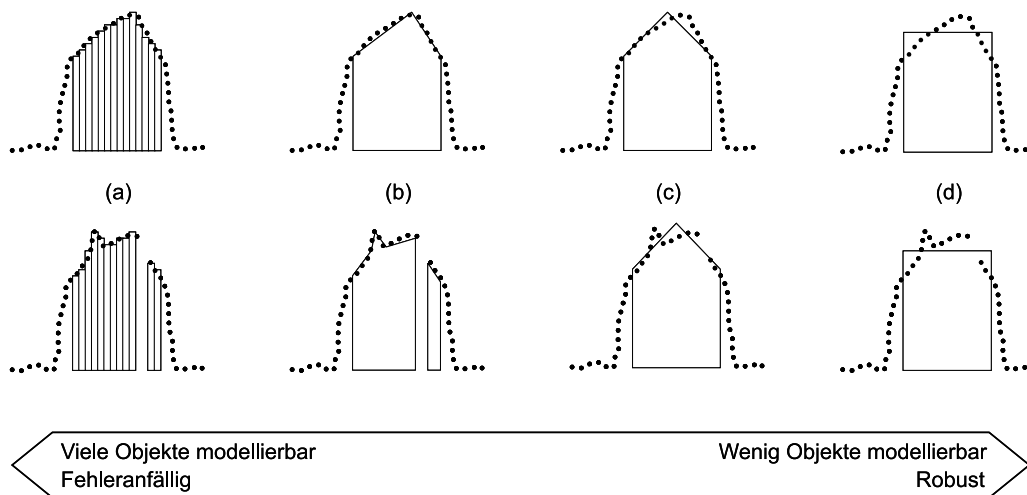


Abbildung 2.8: Illustration zur Wahl von Modellen im eindimensionalen Fall. Dargestellt ist die "Messung" einer Oberfläche (gepunktet), welche ein Profil durch ein Hausdach vom Typ "Satteldach mit verschiedenen Dachneigungen" darstellt, sowie jeweils eine Rekonstruktion mit folgenden Modellen. (a) "Kein" Modell, d.h. nur eine Regularisierung wird durchgeführt. (b) Polygonmodell (stückweise gerade). (c) Parametrisches Modell "Satteldach". (d) Parametrisches Modell "Flachdach". Oben: Bei "guten" Messdaten stellt sich das Polygonmodell als vorteilhaft heraus. Die Polygonsegmente können geschätzt werden und das Modell ist in der Lage, die unterschiedlichen Dachneigungen zu repräsentieren. Unten: Bei Ausreißern und Lücken in den Daten reagieren die parametrischen Modelle jedoch unempfindlicher.

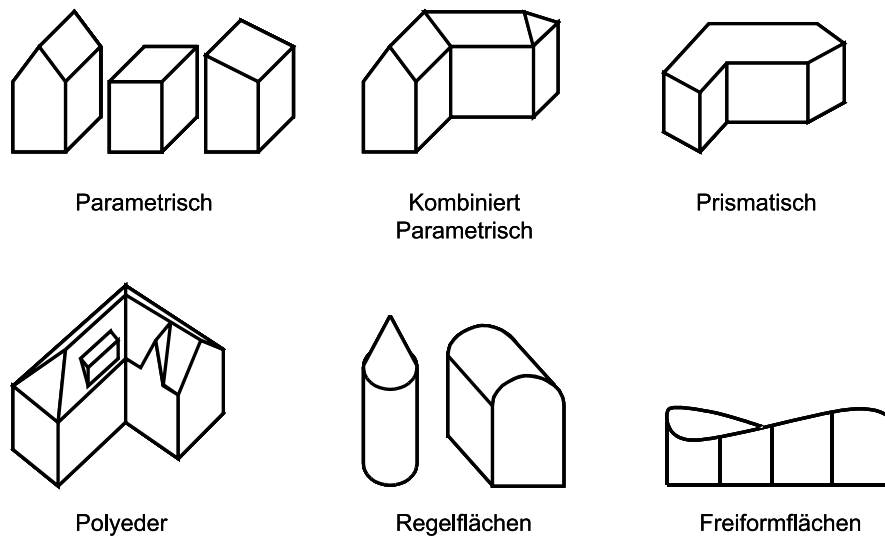


Abbildung 2.9: Geometrische Gebäudemodelle.

2. Die zu extrahierenden Strukturen müssen in den betrachteten Daten mit den eingesetzten Methoden *beobachtbar* sein, entweder mittels automatischer Verfahren oder mit manuellen Verfahren vertretbaren Aufwands.
3. Das Modell muss in der Regel einen Beitrag leisten zur Reduktion von Rauschen, der Entfernung von Ausreißern sowie der Überbrückung von fehlenden Messungen.

Die Modellwahl wird also einerseits von Anforderungen bestimmt, andererseits aber auch durch die maximalen Möglichkeiten einer Erfassungsmethode beschränkt. Abb. 2.8 skizziert diesen Zusammenhang. Für Gebäude kommen die folgenden geometrischen Modelle in Betracht (Abb. 2.9):

Parametrische Modelle, wie beispielsweise Sattel-, Flach-, Pult- oder Walmdächer. Diese wurden vor allem in frühen Arbeiten eingesetzt. Ihr Vorteil liegt darin begründet, dass die geometrischen und topologischen Eigenschaften des Modells implizit enthalten sind, beispielsweise Traufpunkte identischer Höhe, identische

Dachneigungen, Parallelität und Rechtwinkligkeit. Auf der anderen Seite lassen sich damit nur relativ einfache Gebäude modellieren, etwa einzelstehende Wohn- oder Industriegebäude.

Kombinierte parametrische Modelle. Diese entstehen aus den einfachen parametrischen Modellen (Primitiven) durch Kombination, allgemeiner durch Anwendung der (CSG-) Mengenoperationen Vereinigung, Schnitt und Differenz. Ihr Vorteil liegt ebenfalls in den (pro Teilmodell) implizit definierten topologischen und geometrischen Eigenschaften. Sie sind jedoch in der Lage, einen großen Teil von Gebäudeformen zu modellieren (insbesondere Gebäude mit mehreren, unterschiedlichen Traufhöhen). Ungewöhnliche Gebäude- und Dachformen sind nicht möglich, etwa auf runden oder spitzwinkligen Grundrissen.

Prismatische Modelle bestehen aus Flachdächern konstanter Höhe. Sie sind die Verallgemeinerung von Quadern für komplexe Grundrisse. Nachteilig ist die (in Europa) geringe Anzahl von Gebäuden, die sich hiermit modellieren lassen.

Allgemeine Polyeder schliessen die vorgenannten Klassen ein. Mit ihnen lässt sich die überwiegende Mehrzahl der Gebäude beschreiben, einschließlich Strukturen wie Erker oder Gauben. Der Nachteil liegt in der komplexen Topologie. Geometrische Bedingungen (Höhe, Neigungen, Parallelität, Rechtwinkligkeit) sind nicht implizit enthalten und müssen so explizit in Form von Gleichungen eingeführt werden.

Regelgeometrische Flächen sind in der Lage, Kegel-, Tonnen- und Ringpultdächer zu beschreiben. Der Prozentsatz derartiger Strukturen ist jedoch relativ niedrig. Deshalb wurden sie bisher nur manuell erfasst.

Freiformflächen können auch Zwiebel-, Glocken- und gekrümmte Hängedächer darstellen. Sie wurden für die Gebäuderekonstruktion bisher jedoch nicht in Betracht gezogen.

Zusammenfassend bieten sich für eine automatische oder semiautomatische Gebäuderekonstruktion insbesondere kombinierte parametrische oder polyedrische Modelle an, weil sie einen guten Kompromiss zwischen Aufwand und Anteil rekonstruierbarer Gebäude darstellen.

2.4 Rekonstruktionssysteme

Rekonstruktionssysteme für Stadtmodelle lassen sich aufgrund folgender Kriterien einteilen:

1. Die *Datenquellen*, welche sie benutzen (Abschnitt 2.1).
2. Das *Gebäudemodell*, welches von ihnen verwendet wird (Abschnitt 2.3.2).
3. Die Funktionsweise: *automatisch* oder *semiautomatisch*.

In diesem Abschnitt soll die Unterscheidung anhand der Funktionsweise der Systeme erfolgen. Historisch gesehen haben sich viele Wissenschaftler zunächst mit der *vollautomatischen* Rekonstruktion von Objekten befasst (Abschnitt 2.4.1). Als besonders vorteilhafte Ausgangsdaten wurden Luftbilder angesehen, aufgrund ihrer Aktualität, Rekonstruktionsgenauigkeit, Verfügbarkeit und ihres Detailreichtums.

Allerdings stimmen diese Argumente nicht grundsätzlich. So sind die von den Vermessungsämtern üblicherweise bereitgestellten Luftbilder im Maßstab 1:15000 bis 1:18000, in der Regel schwarz/weiß und bis zu fünf Jahre alt. Für manuelle Messungen wird jedoch ein Maßstab von 1:10000 bis 1:13000 empfohlen [Wolf 1999], wobei Farbbilder die Interpretation erleichtern. Automatische Rekonstruktionsverfahren haben noch größere Maßstäbe sowie hohe Überdeckungen eingesetzt (z.B. 1:5000 mit 60% Längs- und Querüberdeckung bei dem weit verbreiteten "Avenches"-Datensatz, [Mason, Baltsavias & Stallmann 1994]). Für die Erfassung eines Stadtmodells mittels Luftbildern ist es daher in jedem Fall angebracht, eine gesonderte Befliegung durchzuführen, so dass die obigen Argumente hinsichtlich Aktualität und Verfügbarkeit nicht unbedingt gegeben sind.

Detailreichtum in Luftbildern ist sicherlich vorhanden, wurde jedoch automatischen Rekonstruktionssystemen auch in gewisser Weise zum Verhängnis. Einerseits existiert eine Fülle von Strukturen im Bild, welche sich *nicht* aufgrund geometrischer Eigenschaften ergeben, sondern z.B. durch verschiedene Objektmaterialien, Bemalungen und Schattenwürfe. Andererseits sind geometrische Strukturen oft nicht deutlich abgebildet, etwa aufgrund von Rauschen, ungünstigen Beleuchtungsverhältnissen oder radiometrisch ähnlicher Eigenschaften verschiedener Objekte. So steht eine automatische Objektextraktion vor der Aufgabe, aus einer überwältigenden Menge

extrahierbarer Strukturen die geringe Menge von relevanter Information zu selektieren, wobei andererseits mit dem Fehlen wichtiger Strukturen gerechnet werden muss.

In der jüngsten Vergangenheit ist in der photogrammetrischen Forschung häufig versucht worden, die Situation zu verbessern durch eine besonders aussagekräftige Segmentierung [Henricsson 1995, Fuchs 1998], den Übergang von 2D nach 3D in frühen Phasen der Extraktion [Baltsavias, Mason & Stallmann 1995, Haala 1996, Fischer, Kolbe, Lang, Cremers, Förstner, Plümer & Steinhage 1998] oder die Hinzunahme von weiteren Datenquellen (Datenfusion) in Form von DOM [Haala 1994, Baltsavias et al. 1995, Ameri 2000] oder Farb-/ multispektraler Information [Henricsson et al. 1996, Mason & Baltsavias 1997]. Obwohl enorme Fortschritte auf diesen Gebieten erzielt und anhand einiger Datensätze demonstriert wurden, muss heute konstatiert werden, dass die vollautomatische Extraktion von Gebäuden aus Bilddaten nicht ausreichend stabil und zuverlässig arbeitet [Grün & Wang 1998].

Deshalb hat sich die Forschung in den letzten Jahren verstärkt der Untersuchung *semiautomatischer* Verfahren zugewandt (Abschnitt 2.4.2). Im Vergleich zu vollautomatischen Systemen sind diese operationell und teilweise kommerziell erhältlich. Die Vorteile eines semiautomatischen Ansatzes sind:

- Die "Rekonstruktionsrate" liegt bei 100%, bezogen auf das gewählte Gebäudemodell. Somit können semi-automatische Systeme innerhalb von großen, praktischen (Auftrags-) Projekten eingesetzt werden. Damit kann sowohl die Eignung der Verfahren als auch die Akzeptanz des Ergebnisses bei den Kunden untersucht werden.
- Im Unterschied zu automatischen Systemen, welche im Batchbetrieb ausgeführt werden, kann bei semi-automatischen Verfahren die Wirkung von Eingriffen (Parameter, Messungen) direkt beobachtet werden. Forschern steht damit eine wirkungsvolle Testumgebung zur Verfügung, mit der sich die Anwendbarkeit automatischer Verfahren sehr schnell evaluieren lässt.
- Semiautomatische Verfahren können als *Kern* eines Systems eingesetzt werden, um den herum schrittweise automatische Komponenten integriert werden. Dadurch steht einerseits stets die benötigte Grundfunktionalität bereit, andererseits kann der Operateur wählen, inwieweit er zusätzliche Automatisierungskomponenten nutzen will.

Neben diesen Vorteilen gibt es aber auch noch andere Erwägungen, die für eine semiautomatische Erfassung sprechen. Aufgrund der notwendigen Qualitätssicherung ist es ohnehin erforderlich, dass vollautomatisch gewonnene Daten interaktiv kontrolliert werden. Insbesondere bei sicherheitsrelevanten Daten ist klar, dass aufgrund der Haftungsproblematik in jedem Fall eine manuelle Kontrolle des Endprodukts notwendig ist. Deshalb wird man hier weniger eine vollständige Automatisierung anstreben, sondern semiautomatische Systeme bevorzugen. Dabei kann die Ersterfassung durch wirkungsvolle Tools unterstützt werden, welche insbesondere die genaue Messung oder Topologiegenerierung automatisieren. Die Fortführung kann dagegen von Verfahren profitieren, welche auf der Basis eines Vergleichs von bestehenden Daten mit neueren Datenquellen die Orte von möglichen Änderungen detektieren [Walter 1998].

So wird es in naher Zukunft Aufgabe der Forschung und Entwicklung sein, die rein manuelle Erfassung von Stadtmodellen [Wolf 1999, Phoenix 2000] durch automatische Verfahren so weit zu ergänzen, dass sich der manuelle Aufwand mehr und mehr auf die Kontrolle der Ergebnisse beschränkt.

Die folgenden Abschnitte gehen auf einige voll- und semiautomatische Rekonstruktionsverfahren näher ein. Die Zusammenstellung besitzt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Gute Übersichten befinden sich beispielsweise in [Grün, Kübler & Agouris 1995, Grün, Baltsavias & Henricsson 1997].

2.4.1 Vollautomatische Rekonstruktionssysteme

Haala [1996]. In seiner Dissertation beschreibt Haala ein Verfahren zur automatischen Rekonstruktion von Gebäuden aus Stereobildern (Abb. 2.10). Der Ablauf ist dabei wie folgt. Aus einem Stereobildpaar (1) wird mittels einer konventionellen Bildzuordnung ein DOM erzeugt (2). Durch einen morphologischen Ansatz (Abschnitt 3.2) werden daraus einerseits Regionen extrahiert (3), welche mögliche Gebäudestandorte markieren (regions of interest, ROI). Andererseits wird das DOM zur Generierung einer Disparitätskarte

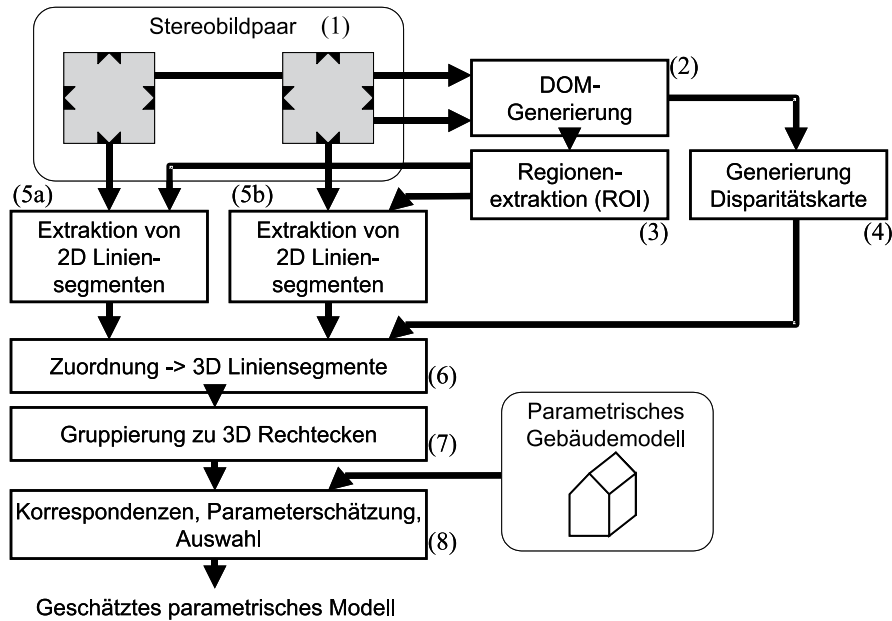


Abbildung 2.10: Illustration zur Gebäuderekonstruktion nach [Haala 1996].

zwischen dem linken und rechten Luftbild verwendet (4). Aus jedem Luftbild werden getrennt Liniensegmente extrahiert (5a,b), wobei sich die Betrachtung auf die detektierten Regionen (ROI) beschränken kann. Mittels der Disparitätskarte werden die zweidimensionalen Liniensegmente beider Bilder zu 3D-Segmenten gruppiert (6), wodurch eine erste Filterung erreicht werden kann. Die dreidimensionalen Segmente werden wiederum im Objektraum zu Rechtecken gruppiert (7), wodurch abermals eine Filterung möglich ist. Durch die Lage der Rechtecke im Objektraum kann die ungefähr erforderliche Parametrisierung eines Gebäudemodells "Satteldach" festgestellt werden. Die Parameter werden dann anschließend mittels einer Schätzung bestimmt, welche den Abstand des Modells von den dreidimensionalen Liniensegmenten minimiert. Der Schätzfehler und die Grauwertvarianz in den Bildern werden letztlich zur endgültigen Auswahl eines Rekonstruktionsergebnisses herangezogen (8).

Charakteristisch an diesem Ansatz ist die schrittweise Filterung der Daten, welche schließlich zur Auswahl einer einzigen Lösung führt. Dies geschieht durch

- Einsatz von dreidimensionaler Information, welche in Form des DOM und der Disparitätskarte eingeht.
- Aggregation zu höherwertigen (seltener vorkommenden) Primitiven, z.B. Gruppierung von Liniensegmenten zu Linien, von parallelen Linien, von Linien zu Rechtecken.
- Übergang vom (2D-) Bild- in den (3D-) Objektraum. Beispielsweise werden Rechteckeigenschaft, Größen, Neigungswinkel der Flächen durch Schwellwerte im Objektraum behandelt.
- Parameterschätzung zur Gewinnung einer im Sinne kleinster Quadrate besten Lösung und Verwendung des Schätzfehlers zur Beurteilung.

Die Limitationen des Verfahrens bestehen in der Abhängigkeit von einem DOM guter Qualität, der Anwendbarkeit nur in locker besiedeltem Gebiet und der eingeschränkten Modellierung von Gebäuden in Form von Satteldächern.

Henricsson & Baltsavias [1997]. Auch dieses Verfahren (ARUBA) verwendet Luftbilder für die Extraktion von Gebäuden (Abb. 2.11). Die Rekonstruktion startet mit einer durch einen Operateur vorgegebenen Region (1). Anschließend werden – ähnlich zum Ansatz von Haala [1996] – Liniensegmente extrahiert (2), mittels Zuordnung in 3D-Segmente übergeführt (3), und zur Bildung von Ebenenhypothesen herangezogen (4). Eine Ähnlichkeitsgruppierung (5) [Henricsson 1996] wird durchgeführt und die am meisten evidenten und konsistenten Ebenen werden ausgewählt. Zur Generierung der Hauswände (durch Ermittlung der Grundhöhe) wird ein DGM verwendet.

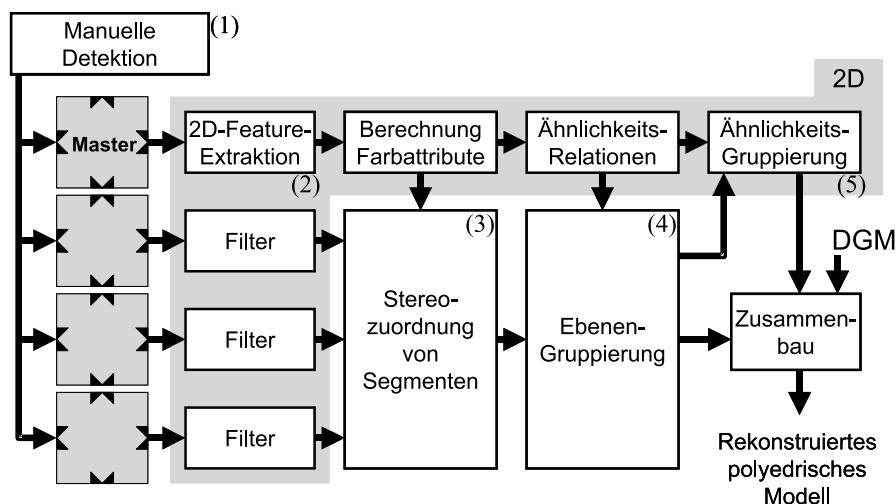


Abbildung 2.11: Illustration zur Funktionsweise von ARUBA. Die Schritte, welche ausschließlich zweidimensionale Information verarbeiten (im Bildraum), sind grau hinterlegt (Abbildung nach [Henricsson & Baltsavias 1997]).

Eine Besonderheit dieses Ansatzes liegt in der Verwendung von *Farbinformation*. Entlang den extrahierten Konturen werden Farbattribute für die links und rechts der Kontur liegenden flankierenden Regionen berechnet. Diese Information wird in den Schritten der Stereozuordnung, Ebenengruppierung und Ähnlichkeitsgruppierung verwendet.

Auch ARUBA ist nicht in der Lage, komplexe Szenen in dicht bebautem Gebiet zu prozessieren ([Henricsson & Baltsavias 1997], S. 75). Die Autoren sehen zwei mögliche Erweiterungen des Systems, nämlich die Verwendung stärkerer Objektmodelle und die vermehrte Einbindung eines Operateurs in den Rekonstruktionsprozess.

Fischer et al. [1998]. Diese Arbeit entstand im Rahmen eines umfangreichen Forschungsprojekts (siehe auch [Braun, Kolbe, Lang, Schickler, Steinhage, Cremers, Förstner & Plümer 1995]). Ihr liegt ein hierarchisches Konzept für die Modellierung zugrunde. Auf jeder Hierarchieebene existieren vier Repräsentationen: das dreidimensionale Objektmodell und seine Instanziierung sowie die zweidimensionale Projektion des Objektmodells mit zugehöriger Instanziierung. Dadurch wird auf *jeder Ebene* eine enge Kopplung zwischen zweidimensionalen und dreidimensionalen Strukturen erreicht. Somit werden die von z.B. Haala [1996] oder Henricsson & Baltsavias [1997] realisierten Ansätze bezüglich des frühen Übergangs in den Objektraum formalisiert. Dabei bedeutet die Projektion des 3D-Objektmodells nach 2D nicht nur eine Projektion der Geometrie, z.B. durch die zentralperspektivische Abbildung, sondern umfasst auch Beschränkungen und Qualitätsmaße. Beispielsweise wird die Parallelität von Strukturen im 3D-Objektmodell unter der Annahme einer schwach perspektiven Abbildung in eine "toleranzbehaftete" Parallelität im 2D-Bildmodell übergeführt.

Als Hierarchiestufen des Objektmodells wurden von Braun et al. [1995] angegeben: Szene, Objekt, Objektteil, Merkmalsaggregat, Merkmal und Voxel. Entsprechend ergeben sich für den Bildraum: Bild, Aspekt, Aspektteil, Merkmalsaggregat, Merkmal, Pixel. In diesem Graph findet von oben nach unten eine Modellspezifikation bzw. Dekomposition statt, von unten nach oben entsprechend eine Aggregation (Merkmal ist *teil-von* Merkmalsaggregat).

Realisiert wurde diese Hierarchie für Gebäudeecken (Abb. 2.12). Merkmale sind hier Punkte, Linien und Regionen. Diese können mittels einer polymorphen Segmentierung aus den Bildern extrahiert werden [Fuchs 1998]. Ecken stellen aggregierte Merkmale dar und befinden sich somit eine Hierarchiestufe höher. Sie bestehen aus jeweils (mindestens) drei sich schneidenden Ebenen, der entsprechenden Anzahl von Linien und einem Punkt. Ecken können auf der Basis der polymorphen Segmentierung gewonnen werden [Lang 1999]. Wiederum eine Stufe höher kann eine Aggregation in Objektteile vorgenommen werden, hier in Form verschiedener "Bausteine", der Konnektoren und Terminale. Deren Aggregation führt schließlich zum Objekt selbst (das wiederum Teil der Szene ist).

Von Lang [1999] werden Ergebnisse des Verfahrens für den "Avenches"-Datensatz [Mason et al. 1994] vorgestellt. Dieser beinhaltet Luftbilder einer Testszene mit 12 Gebäuden. Die Bilder beruhen auf einer

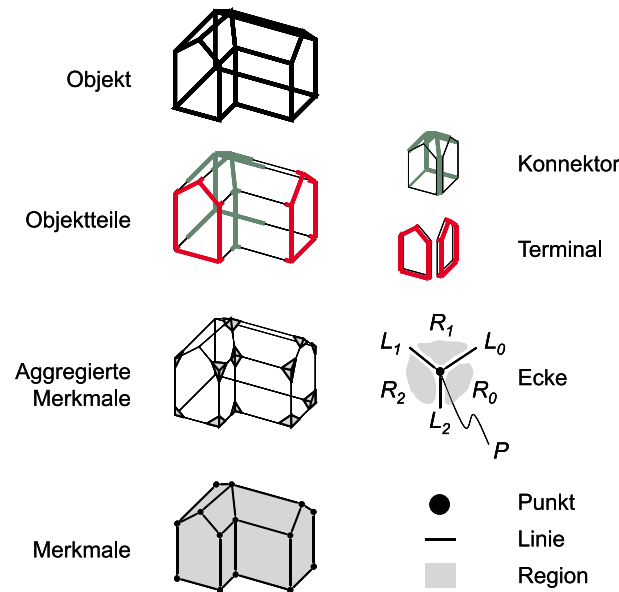


Abbildung 2.12: Hierarchisches Modellierungskonzept beim Verfahren nach [Fischer et al. 1998].

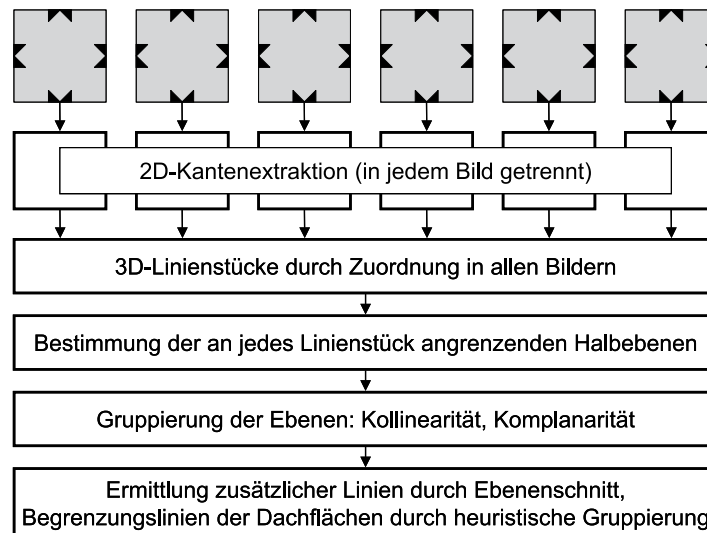


Abbildung 2.13: Rekonstruktionsverfahren nach [Baillard & Zisserman 1999].

Farbbefliegung⁴ mit 60% Längs- und Querüberdeckung, im Bildmaßstab 1:5000, digitalisiert mit 15 μm . Für die Gebäude der Testszene ergibt sich eine Vierfachüberdeckung aus zwei Streifen.

Von den 109 im Testdatensatz vorhandenen Ecken wurden 61 (56%) korrekt rekonstruiert, was bedeutet, dass für 4 (36%) der 11 betrachteten Gebäude alle Ecken korrekt rekonstruiert wurden. Als Ursache für fehlerhafte Rekonstruktionen werden von Lang [1999] fehlerhafte Knotenkorrespondenzen zwischen Gebäudeteilen und Gelände, mehrdeutige Kantenkorrespondenzen, schlechte Kantengeometrie durch Störungen durch Fassadentexturen und Doppelkanten an der Traufe angegeben.

Baillard & Zisserman [1999]. Im Unterschied zum eben beschriebenen Verfahren von Fischer et al. [1998] rekonstruiert dieser Ansatz ein polyedrisches Modell basierend auf den *Kanten* zwischen (ebenen) Dachflächen. Die Grundidee ist dabei, ausgehend von detektierten Linien die Halbebenen links und rechts der Linien zu bestimmen. Im Vergleich zu anderen Ansätzen besteht der Vorteil darin, dass mit der Linie und der Bildinformation in ihrer Nachbarschaft zunächst relativ *lokale* Information verwendet wird.

Der Ansatz verwendet Luftbilder mit sechsfacher Überdeckung (Abb.2.13). Zunächst werden in den Bildern getrennt Linienstücke extrahiert (mittels des Canny-Operators und einer Linienschätzung). Durch ein

⁴Die Farbe wurde in dem gewählten Ansatz jedoch nicht berücksichtigt.

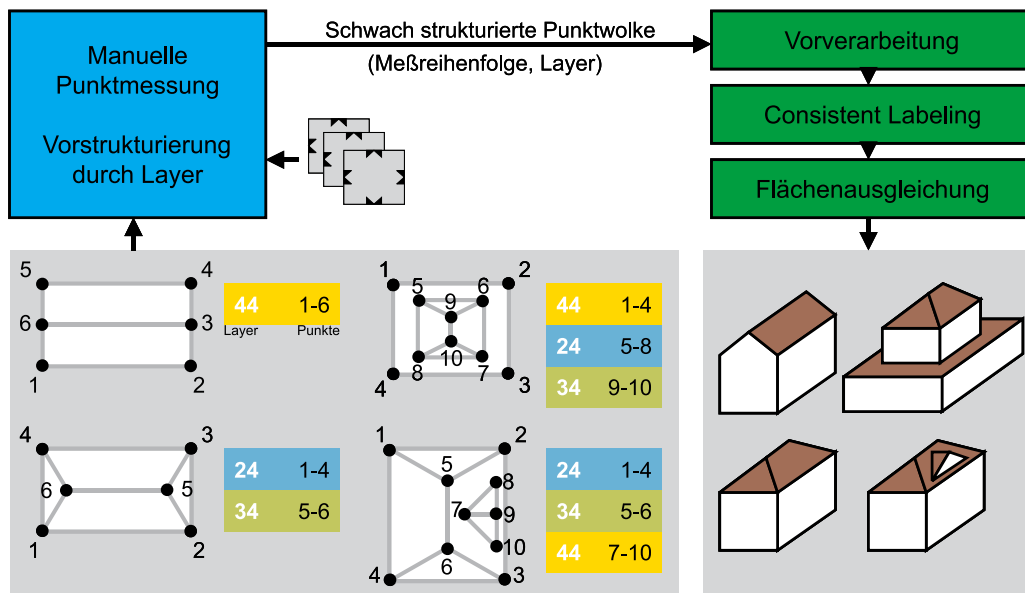


Abbildung 2.14: Illustration zur Funktionsweise von CyberCity Modeler. Ein Satteldach wird erhalten, indem die Punkte 1-6 nacheinander gemessen (im oder gegen den Uhrzeigersinn) und einem Layer zugeordnet werden. Für ein Walmdach werden Trauf- und Giebelpunkte verschiedenen Layern zugeordnet, bei komplexeren Dachstrukturen sind entsprechend mehr Layer erforderlich. Die Angaben wurden aus [Grün & Wang 1998, Kersten & Cuche 1999] entnommen.

Linienzuordnungsverfahren [Baillard, Schmid, Zisserman & Fitzgibbon 1999], welches die Geometrie und Radiometrie der sechs Bilder ausnutzt, werden daraus dreidimensionale Liniensegmente generiert. Sodann werden die (maximal zwei) Halbebenen links und rechts jeder Linie bestimmt. Da diese Halbebenen durch eine Linie gehen, welche dreidimensional festgelegt ist, ist nur noch der Neigungswinkel α zu bestimmen. Dies erfolgt durch eine Suche über alle möglichen Winkel $-\pi/2 < \alpha < \pi/2$, wobei für jeden betrachteten Winkel ein heuristisches Maß für die Übereinstimmung der Flächen in den Bildern berechnet wird. Dieses basiert auf einer gewichteten Korrelation zwischen den Grauwertbildern (die geometrische Transformation zwischen den Bildern ist durch die Ebenengleichung und die Bildorientierungen gegeben), welche über alle Bilder aufsummiert wird. Der Winkel mit der höchsten Maßzahl gewinnt⁵.

Anschließend werden die Liniensegmente mit zugehörigen Halbebenen auf der Basis von Kollinearität und Komplanarität gruppiert, wodurch die Zahl der Ebenen insgesamt reduziert wird. Zusätzliche Linien werden durch Ebenenschnitte eingeführt und die Begrenzungslinien jeder Dachfläche werden durch heuristische Gruppierung bestimmt. Jede Fläche wird durch Berechnung eines Ähnlichkeitsmaßes über alle Bilder verifiziert.

Baillard & Zisserman [1999] zeigen vielversprechende Ergebnisbilder für ein Stadtviertel mit 180 rekonstruierten Flächen. Eine Angabe über den Prozentsatz der tatsächlich richtig strukturierten Häuser bzw. die erreichte Rekonstruktionsgenauigkeit ist nicht erfolgt.

2.4.2 Semiautomatische Rekonstruktionssysteme

CyberCity Modeler. Nach dem semiautomatischen Ansatz "TOBAGO" [Grün & Dan 1997] wurde 1998 der "CyberCity Modeler" [Grün & Wang 1998] vorgestellt. Dieser basiert auf der Messung von Strukturen in (Stereo-) Luftbildern und arbeitet im wesentlichen in zwei Schritten.

Im ersten Schritt (Abb. 2.14 links) wird durch eine manuelle Messung eine sogenannte *schwach strukturierte Punktwolke* erzeugt. Diese besteht aus allen Trauf- und Giebelpunkten, wahlweise können auch zusätzliche Punkte an Gauben und Dachaufbauten gemessen werden. Die Strukturierung der Punkte wird durch zwei Maßnahmen erreicht. Erstens muss die Punktmessung in einer bestimmten Reihenfolge durchgeführt werden. Zweitens bekommt jeder Punkt vom Operateur einen bestimmten Code zugewiesen,

⁵Das Diagramm der Maßzahl über alle Winkel α muss zusätzlichen Bedingungen genügen, welche ein "klares Maximum" detektieren, ansonsten wird die Hypothese einer Halbebene verworfen.

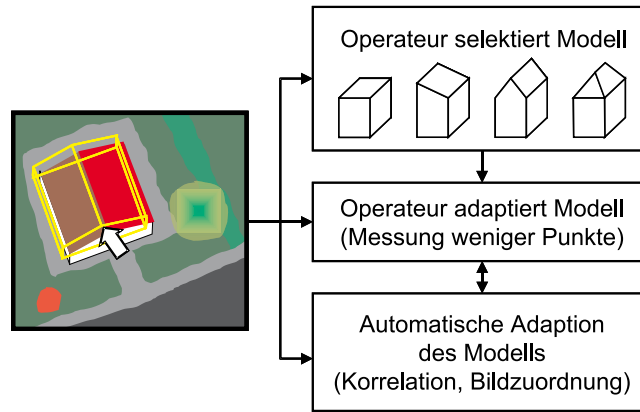


Abbildung 2.15: Illustration zur Funktionsweise von ObEx. Der Operateur wählt ein Primitiv, welches anschließend in Form eines Drahtmodells in Luftbilder eingeblendet wird. Durch Messen in den Bildern oder Einstellen lassen sich die verschiedenen Parameter adaptieren. Nach Wahl kann der Operateur auch automatische Prozeduren zur Bildmessung und Bildzuordnung in Anspruch nehmen.

entsprechend einer gegebenen Vorschrift. Diese Zuordnung kann innerhalb von üblichen Photogrammetrie- oder CAD-Systemen erfolgen, indem die Punkte vorgegebenen Layern zugewiesen werden.

Der zweite Schritt besteht aus einer vollautomatischen Prozessierung, welche ein Relaxationsverfahren benutzt, um die Topologie des Dachs zu ermitteln (Abb. 2.14 rechts). Aufgrund der dann bekannten Zugehörigkeit der Punkte zu Flächen können die gemessenen Punktpositionen anschließend noch ausgeglichen werden. Das Ergebnis muss kontrolliert werden, weil die durch Relaxation gefundene Lösung auch fehlerhaft sein kann. Von Grün & Wang [1998] werden jedoch Erfolgsraten von 95% bei der automatischen Strukturierung angegeben, so dass lediglich 5% der Objekte manuell strukturiert werden müssen. Dies wird zudem durch eine interaktive, graphische Benutzerschnittstelle erleichtert.

Im Vergleich zur manuellen Messung von Objekten automatisiert CyberCity Modeler die Topologiegenerierung. Die Messung der einzelnen Punkte entspricht dagegen vom Aufwand her dem rein manuellen Verfahren, sowohl bezüglich der Vorgehensweise als auch der benötigten Anzahl von Messungen. Andererseits ist es dadurch möglich, für diesen Schritt Standardpakete zur photogrammetrischen Punkterfassung einzusetzen. Dadurch erspart man sich zum einen den üblicherweise recht hohen Programmieraufwand für interaktive Oberflächen, zum anderen können Operateure so mit bekannten Systemen arbeiten. Im Gegensatz zu anderen interaktiven Systemen erfolgt die Messung durch Stereobetrachtung, wodurch die Interpretation vereinfacht wird. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass das Verfahren nicht auf bestimmte Geometrien beschränkt ist, sondern vielmehr alle polyedrischen Objekte modellieren kann. Eine Erweiterung zu einem dreidimensionalen GIS wird von Grün & Wang [1999] vorgestellt.

ObEx. Dieses an der Universität Bonn entwickelte System folgte den früheren semiautomatischen Ansätzen “Hase” und “Hase+” [Gülch, Müller & Läbe 1999, Gülch, Müller, Läbe & Ragia 1999] (Abb. 2.15). Dabei werden Gebäude mit Hilfe einer Anzahl von parametrischen Primitiven modelliert (vgl. Abschnitt 2.3.2), wozu Flachdach, Pultdach, Satteldach und Walmdach gehören. In jedem Fall trifft der Operateur zunächst die Modellauswahl manuell. Das gewählte Modell wird dann als Drahtmodell (wahlweise auch mit Entfernung der Verdeckungen) in ein oder mehrere Bilder eingeblendet. Der Operateur kann dann mittels einiger Mausoperationen die Modellparameter wie laterale Dimension, Position und Orientierung sowie Trauf- und Giebelhöhe festlegen. Ein “geführter” Modus ist möglich, bei dem das System die Reihenfolge der notwendigen Angaben vorgibt, wodurch sich die Anzahl der notwendigen Interaktionen auf ein Minimum beschränken lässt. Neben dieser manuellen Messung stehen dem Operateur jedoch auch automatische Prozeduren der Bildkorrelation und Bildzuordnung zur Verfügung, welche die automatische Messung von Parametern erlauben. Für diese wird eine Erfolgsrate von 50–90% von Gülch, Müller & Läbe [1999] angegeben. Eine Besonderheit ist, dass der Operateur im Rahmen der interaktiven Messung stets die Wahl hat zwischen manueller, “geführter” oder automatischer Messung. So ist es möglich, bei einem Versagen automatischer Verfahren sofort korrigierend einzugreifen.

Die geometrisch bestimmten Einzelprimitive (Gebäudeteile) werden mittels eines CSG-Ansatzes zu komplexeren Gebäuden zusammengesetzt. Hierfür stehen die Boole’schen Operationen *Vereinigung*, *Schnitt*

und *Subtraktion* zur Verfügung. Es ist möglich, komplette CSG-Bäume zu kopieren, um so komplexe Gebäude zu erfassen, welche wiederholt auftreten.

Durch den Ansatz mittels parametrisierter Primitive ist eine – im Vergleich zur manuellen Einzelpunktmes-
sung – wesentlich reduzierte Anzahl von Interaktionen möglich, welche durch die angebotenen automati-
schen Prozeduren noch weiter verringert werden kann. Der effizienten Gestaltung der Benutzerschnittstelle
wird innerhalb der Untersuchungen ein hoher Stellenwert gegeben. Die Bereitstellung einer softwaretechni-
schen Basis, welche die schrittweise Integration automatischer und manueller Module unterstützt, erfolgt
mittels objektorientierter Techniken und wurde gesondert untersucht [Gülch & Müller 1997, Müller 1998].

Wie jedes System, welches auf der Verwendung parametrisierter Primitive beruht, besteht ein Nachteil
von ObEx in der begrenzten Modellierfähigkeit. So kann mit dem Ansatz generell nur die Klasse der *kom-
binierten Primitive* rekonstruiert werden. Von Gülch, Müller & Läbe [1999] wird jedoch die Modellierung
eines nicht durch Primitive darstellbaren Gebäudes mittels der Boole'schen Subtraktion beschrieben, des
weiteren wurde der Ansatz auf die Erfassung von prismatischen Modellen erweitert.

3 Segmentierung von digitalen Oberflächenmodellen

3.1 Einleitung

In der Verarbeitungskette von der Bildvorverarbeitung bis zur Bildinterpretation stellt die *Segmentierung* die unterste Stufe der symbolischen Informationsgewinnung dar. Ihre Aufgabe besteht darin, aus einer *ikonischen* Darstellung, etwa einem digitalen Bild oder rasterbasierten DOM, eine *symbolische* und *strukturelle* Beschreibung abzuleiten. Diese erfolgt mittels einfacher Beschreibungselemente (*Primitive*), üblicherweise den Elementen Punkte, Linien und Flächen (Regionen).

Punkte und Linien, welche keine flächige Ausdehnung besitzen, werden häufig mittels Verfahren extrahiert, welche die "Diskontinuität" in den Daten detektieren. Hierzu werden oft Ableitungen oder Krümmungen herangezogen. Flächen dagegen werden meist über die Ähnlichkeit der in ihnen enthaltenen Einzelemente definiert. Sie basieren daher auf der "Kontinuität" der Daten.

Extraktoren für Punktmerkmale sind meist darauf ausgelegt, isolierte Punkte oder Ecken (Schnitte von Linien) zu detektieren ([Moravec 1977, Canny 1986], siehe auch [Haralick & Shapiro 1992], Kap. 7). Die überwiegende Anzahl von *Interestoperatoren* hat die Extraktion punktförmiger Merkmale zum Ziel. Ein besonderer Interestoperator wurde von Förstner [1986] vorgestellt (siehe auch [Haralick & Shapiro 1993], Kap. 16.4). Er extrahiert Punktzentren und Ecken, wobei als Kriterien die Rundheit und Größe der Konfidenzellipse für die Punktbestimmung herangezogen werden. Die dadurch selektierten Punkte sind somit auch geometrisch am genauesten bestimmbar. Der Operator arbeitet in zwei Schritten, wobei zunächst Punkte pixelgenau selektiert und anschließend subpixelgenau geschätzt werden.

Die Extraktion von Linien erfolgt häufig, indem zunächst Kantenpunkte extrahiert werden. Erst in einem zweiten Schritt werden diese durch Konturverfolgungsalgorithmen zu Linien verbunden. Ein Vergleich verschiedener Verfahren findet sich in [Haralick 1984, Bernsen 1991]. Auch bei Linien sind Verfahren von Interesse, welche die geometrische Position mit Subpixelgenauigkeit bestimmen können. Beispielsweise behandeln Burns, Hanson & Riseman [1986] die Extraktion von geraden Liniensegmenten. Da die Segmente letztlich auf dem Schnitt zweier Ebenen beruhen, welche jeweils auf der Basis von unterstützenden Regionen (support regions) geschätzt werden, ist eine subpixelgenaue Lokalisierung möglich. Von Haala [1996] wird die Genauigkeit dieses Ansatzes analysiert. Die subpixelgenaue Extraktion von gekrümmten Linien wird von Steeger [1996] beschrieben.

Flächen sind Regionen, welche sich durch Homogenität auszeichnen. Ihre Extraktion kann demnach grundsätzlich auf zwei verschiedene Arten erfolgen. Entweder findet eine Extraktion des Flächenrands statt (auf der Basis einer Detektion von "Diskontinuität"), wodurch sich anschließend die Fläche als Region innerhalb des Rands definiert. Oder die Fläche wird zunächst durch ein regionenbasiertes Verfahren auf der Basis ihrer Homogenität extrahiert, und die Ränder ergeben sich implizit aus den Trennlinien verschiedener Flächen.

Der Vorteil des ersten Ansatzes besteht darin, dass die detektierten Kanten auf tatsächliche Bildkanten zurückzuführen sind. Nachteilig ist jedoch, dass sich aufgrund von Störungen häufig keine geschlossenen Ränder extrahieren lassen, wodurch die Regionen nicht klar definiert sind. Regionenbasierte Verfahren führen demgegenüber zu wohldefinierten Flächen. Allerdings besteht hier wiederum der Nachteil, dass sich die Regionengrenzen nur implizit ergeben. Besonders in Regionen mit nur geringen, kontinuierlichen Änderungen in den Daten kann dies zu bedeutungslosen Regionengrenzen führen, die keinen physikalischen Objektgrenzen entsprechen.

Der Zusammenhang zwischen den Primitiven der "Diskontinuität" (Punkte, Linien) und der "Kontinuität" (Regionen) besteht darin, dass (zweidimensionale) Regionen von (eindimensionalen) Linien begrenzt werden, deren Begrenzungen wiederum (nulldimensionale) Punkte sind (Verbindungs-, Eck-, Endpunkte). Eine Steigerung der Stabilität kann daher i.d.R. erzielt werden, wenn sich die Segmentierung nicht nur auf ein Primitiv stützt, sondern verschiedenartige Primitive extrahiert und deren Beziehungen analysiert.

Ein Ansatz in diese Richtung findet sich z.B. in [Henricsson 1995], welcher extrahierte Kurven attribuiert, wobei nicht nur Eigenschaften von Bildpunkten entlang der Kurve betrachtet werden, sondern vielmehr auch

die *flankierenden Regionen* links und rechts der Kurve mit eingehen. Ein umfassender Ansatz wird von Fuchs [1998] beschrieben, welche auch einen ausführlichen Überblick über die Segmentierung gibt. Dabei handelt es sich um ein *polymorphes* Verfahren, welches *alle* drei Primitivtypen (Punkt, Linie, Fläche) extrahiert und die topologischen Nachbarschaftsbeziehungen ermittelt. Das Ergebnis wird in Form eines Merkmals-Nachbarschafts-Graphen repräsentiert. Dadurch kann auf eine raster-, vektor- oder graphbasierte Beschreibung zugegriffen werden.

Das generelle Problem einer *regionenbasierten* Segmentierung kann folgendermaßen formuliert werden [Gonzalez & Woods 1992, Haralick & Shapiro 1992]. Gegeben ist eine Menge von Punkten (im vorliegenden Fall Oberflächenpunkte eines DOM), welche eine Gesamtregion R bilden und in n Teilregionen R_i unterteilt werden sollen, so daß gilt:

$$\begin{aligned}
 1) & \quad \bigcup_{i=1}^n R_i = R \\
 2) & \quad R_i \text{ ist zusammenhängend } \forall 1 \leq i \leq n \\
 3) & \quad R_i \cap R_j = \emptyset, \forall 1 \leq i, j \leq n : i \neq j \\
 4) & \quad P(R_i) = \text{TRUE}, \forall 1 \leq i \leq n \\
 5) & \quad P(R_i \cup R_j) = \text{FALSE}, \forall 1 \leq i, j \leq n : R_i, R_j \text{ benachbart,}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

wobei $P(\cdot)$ ein logisches Prädikat ist und Zusammenhang (2) und Nachbarschaft (5) von Regionen basierend auf der Definition einer punktwisen, direkten Nachbarschaft definiert wird (bei Punkten im regelmäßigen Raster üblicherweise die vier Nachbarn mit den relativen Koordinaten $\{(-1, 0), (1, 0), (0, -1), (0, 1)\}$ bzw. die acht Nachbarn, welche zusätzlich $\{(-1, -1), (1, -1), (-1, 1), (1, 1)\}$ umfassen). Das logische Prädikat $P(\cdot)$ muss entsprechend der Zielsetzung der Segmentierung gewählt werden. In der Regel handelt es sich dabei um ein *Homogenitätskriterium*. Im Kontext von DOM können etwa Punkte zu einer Region R_i gehören, welche ähnliche Höhen oder lokale Steigungen aufweisen bzw. innerhalb einer vorgegebenen Toleranz zu einer gemeinsamen Fläche zugehörig sind.

Aufgrund der exponentiellen Komplexität ist es nicht möglich, eine optimale (Gl. 3.1 erfüllende) Unterteilung von R in die Teilregionen R_i durch erschöpfende Suche zu bestimmen. Es gibt zwei klassische Heuristiken für dieses Problem:

- Es wird mit einer kleinen Teilregion (Saatregion) $R_i^0 \subset R$ begonnen, welche die Homogenitätseigenschaft aus Gl. 3.1 erfüllt. Anschließend werden zu R_i^0 angrenzende Punkte iterativ hinzugefügt, solange dadurch die Homogenitätsbedingung nicht verletzt wird. Dies wird als Bereichswachstumsverfahren (region growing) bezeichnet (siehe auch Abschnitt 3.4.2).
- Es wird mit der kompletten Region R begonnen. Erfüllt diese das Homogenitätskriterium aus Gl. 3.1, so ist das Verfahren beendet. Ist dies nicht der Fall, so wird R an einer "optimalen" Stelle geteilt und der Algorithmus wird rekursiv auf die entstehenden Teilregionen angewandt. Dies wird als Teilungsverfahren (split) bezeichnet. Ist die Möglichkeit gegeben, dass unterteilte Regionen wieder zusammengefasst werden können, so wird das Verfahren als "Teilen und Verschmelzen" (split and merge) bezeichnet.

Beide Verfahren haben verschiedene Vor- und Nachteile. Bereichswachstumsverfahren sind sehr rechenintensiv. Zudem wird über die iterativ wiederholte Wahl einer Saatregion eine Sequentialisierung erzeugt, welche das Ergebnis wesentlich beeinflusst. "Teile und Verschmelze"-Verfahren können dagegen schnell unterteilen, oftmals werden jedoch über die zugrundeliegende Datenstruktur (z.B. Quadtree) Regionengrenzen induziert, welche den tatsächlichen Verlauf nicht wiedergeben. Verwendet man kein binäres Unterteilungsschema, so ist die Wahl einer optimalen Unterteilungsgrenze schwierig. Haralick & Shapiro [1992] vergleichen verschiedene Verfahren.

Eine klassische Problematik der Segmentierung ist die der Über- bzw. Untersegmentierung. Da in praktisch allen Fällen in natürlicher Umgebung die Anzahl der zu segmentierenden Regionen nicht bekannt ist, muss diese vom Segmentierverfahren selbst gefunden werden⁶. In der Regel sind hierfür in den Verfahren Parameter vorgesehen, die geeignet gesetzt werden müssen. Es gibt Ansätze, welche eine "parameterfreie" Segmentierung erlauben, z.B. indem die Rauschvarianz des Sensors geschätzt und Parameter hieraus abgeleitet werden. Allerdings muss man anmerken, dass dies keine generelle Lösung des Problems darstellt. Beispielsweise kann man sich vorstellen, dass die Anwendung eines Algorithmus auf zwei Aufnahmen desselben Sensors, welche mit stark unterschiedlichen Maßstäben gewonnen wurden, zu völlig unterschiedlichen Segmentierungen führt. Über- und

⁶ Ausnahmen betreffen vor allem den industriellen Bereich, wo Objekte bekannt und Umgebungsbedingungen genau kontrolliert sind.

Untersegmentierung sind also nicht Probleme technischer Art, sondern berühren vielmehr die elementare Frage der Bedeutung von Regionen, welche maßstabsabhängig ist.

Im Fall von DOM ergeben sich verschiedene Vereinfachungen. Zum einen liegt ein bekannter Maßstab vor, welcher über das gesamte "Bild" hinweg konstant ist. Zum anderen wird das DOM mit einer bestimmten Konfiguration (Aufnahmegesetz, Prozessierungsverfahren) erzeugt, und in der Regel kann man davon ausgehen, dass diese über verschiedene Projekte hinweg konstant ist. Es liegen also kontrollierte Umgebungsbedingungen vor, und innerhalb eines Projekts empirisch bestimmte Parameter können wiederverwendet werden.

Die Segmentierung lässt sich auch über Zusatzwissen steuern. Im Fall der Gebäuderekonstruktion aus DOM können beispielsweise Grundrisse herangezogen werden, um einen Anhaltspunkt für die Anzahl der zu segmentierenden Regionen zu erhalten. Allerdings ist zu beachten, dass Grundrisse – auch innerhalb ein und desselben Datensatzes – völlig verschiedene Detaillierungsgrade aufweisen können, was damit zusammenhängt, dass sie in der Regel über lange Zeiträume hinweg von unterschiedlichen Operateuren manuell erfasst wurden. Die Frage einer einheitlichen, maßstabsabhängigen Darstellung ist Gegenstand aktueller Forschung im Bereich der automatischen Generalisierung von Karten und GIS-Datenbeständen.

Gegenüber Bildern besitzen DOM den Vorteil der expliziten Geometriepäsentation. Dies macht zum einen Segmentierungsansätze möglich, welche vergleichsweise einfach sind. Beispielsweise lassen sich Objekte in flachem Gelände durch eine simple Schwellwertbildung detektieren, eine Aufgabe, welche auf der Basis von Luftbildern als äußerst anspruchsvoll und heute noch nicht gelöst betrachtet werden muss. Zum anderen erhalten Parameter der Segmentierung von DOM im Unterschied zu Bildern oft eine geometrische Bedeutung. Schwellwerte betreffen nicht mehr Grauwerte, sondern Höhen, Neigungen, Winkel oder Krümmungen; Angaben zu Maskengrößen in Pixeln stehen Grundflächen in Quadratmetern gegenüber.

Die Segmentierung von DOM wird sowohl zum Zwecke der *Detektion* als auch der *Strukturierung* eingesetzt. In den folgenden Abschnitten wird eine Auswahl elementarer Segmentierverfahren für DOM vorgestellt und hinsichtlich ihrer Eigenschaften diskutiert. Im einzelnen sind dies:

- Segmentierverfahren basierend auf DOM
 - Morphologische Segmentierung
 - Steigungssegmentierung
 - Ebenensegmentierung
 - Krümmungsbasierte Segmentierung
- Segmentierverfahren für Gebäude, basierend auf DOM und Grundrissinformation
 - Richtungssegmentierung
 - Höhenliniensegmentierung

3.2 Morphologische Segmentierung

Morphologische Verfahren gehören zu den Standardverfahren der digitalen Bildverarbeitung [Gonzalez & Woods 1992]. Im Fall von binären Bildern $I(x, y)$ definiert man die Operationen der Erosion \ominus

$$(I \ominus s)(x, y) := \begin{cases} 1 & \text{falls } \forall (i, j) \in s : I(x+i, y+j) = 1 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.2)$$

und Dilatation \oplus

$$(I \oplus s)(x, y) := \begin{cases} 1 & \text{falls } \exists (i, j) \in s : I(x+i, y+j) = 1 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}, \quad (3.3)$$

wobei s das *Strukturelement* ist, welches man sich als eine Ansammlung von Bildpunkten (in einer Maske) $s = \{(i_1, j_1), (i_2, j_2), \dots\}$ vorstellen kann. Die Operationen Opening \circ und Closing \bullet werden als eine Hintereinanderausführung von Erosion und Dilatation definiert

$$(I \circ s) := (I \ominus s) \oplus s, \quad (I \bullet s) := (I \oplus s) \ominus s. \quad (3.4)$$

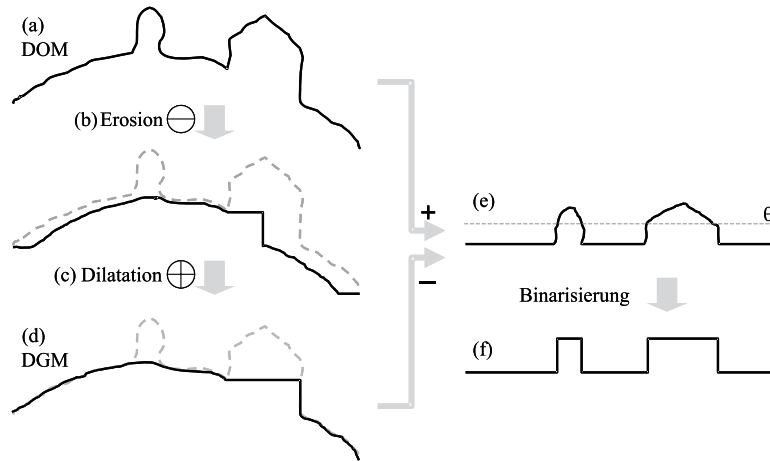


Abbildung 3.1: Morphologische Operationen zur Gewinnung eines DGM und zur Extraktion von Objekten, illustriert am eindimensionalen Fall. Auf der Basis des DOM (a) wird durch Erosion (b) und Dilatation (c) eine Approximation eines DGM (d) gewonnen. Durch Subtraktion des DGM vom DOM erhält man ein normalisiertes DOM (e), welches durch Anwendung eines Schwellwerts Θ für die Gebäudehöhe in eine binäre Darstellung überführt werden kann.

Opening besitzt die Eigenschaft, schmale “Stege” im Binärbild I zu entfernen, Closing schließt dagegen kleine Löcher (wobei sich “schmal” und “klein” auf die Ausdehnung relativ zum Strukturelement s bezieht). Die folgenden Definitionen für Erosion und Dilatation stellen Generalisierungen der Gleichungen 3.2, 3.3 dar

$$(I \ominus s)(x, y) := \min_{(i, j) \in s} \{I(x + i, y + j)\}, \quad (I \oplus s)(x, y) := \max_{(i, j) \in s} \{I(x + i, y + j)\}, \quad (3.5)$$

welche auf Grauwertbilder I angewendet werden können und auf Binärbildern identisch mit Gl. 3.2, 3.3 sind [Haralick, Sternberg & Zhuang 1987]. Opening und Closing für Grauwertbilder wird wie in Gl. 3.4 definiert, mit den Definitionen aus Gl. 3.5.

Die morphologischen Operatoren Erosion und Dilatation sind also nichts anderes als Minimum- bzw. Maximumfilter, beschränkt auf die Ausdehnung des Strukturelements s . Als solche sind sie entsprechend anfällig gegenüber Ausreißern in den Bilddaten I . Eine interessante Alternative stellt daher die Verwendung von Rangfiltern dar [Eckstein & Munkelt 1995]. Sei R_i ein Operator, welcher das Element mit dem Rang i liefert, d.h. $R_i(M)$ ergibt das i -te Element der Menge M , wenn diese aufsteigend sortiert wird. Auf der Basis von dualen Rangfiltern lassen sich robuste Erosion \ominus_i und Dilatation \oplus_i definieren:

$$\begin{aligned} (I \ominus_i s)(x, y) &:= R_i(\{I(x + i, y + j) | (i, j) \in s\}) \\ (I \oplus_i s)(x, y) &:= R_{n+1-i}(\{I(x + i, y + j) | (i, j) \in s\}) \end{aligned} \quad (3.6)$$

wobei n die Anzahl der Elemente in s bezeichnet und zwischen Gl. 3.5 und Gl. 3.6 die Beziehungen $\ominus \equiv \ominus_1$, $\oplus \equiv \oplus_1$ gelten.

Betrachtet man DOM $z = f(x, y)$ als Bilder $I(x, y)$, so können morphologische Operationen sowohl zur Ableitung von DGM aus DOM als auch zur Extraktion von Objekten eingesetzt werden. Abbildung 3.1 illustriert die Vorgehensweise anhand eines eindimensionalen Beispiels. Das DOM wird dabei zunächst mit einem Strukturelement s erodiert, welches größer als die größte zu extrahierende Struktur ist. Dadurch sind kleinere Strukturen im Ergebnis nicht enthalten. Allerdings führt die Erosion auch zu einer Veränderung von Höhenwerten bei unduliertem Gelände. Diese werden durch eine nachfolgende Dilatation korrigiert, wobei die fehlenden Strukturen natürlich nicht wiederhergestellt werden. Die Kombination von Erosion und Dilatation (Opening) führt somit zu einem bereinigten DOM, welches Objekte kleiner als s nicht mehr enthält und deshalb eine Näherung für ein DGM darstellt.

Subtrahiert man anschließend das DGM vom originalen DOM, so erhält man ein normalisiertes DOM, welches die Objekte kleiner als s repräsentiert. Eine Extraktion dieser Objekte kann man auf der Basis einer einfachen Binarisierung durchführen, wobei der Binarisierungsschwellwert entsprechend der erwarteten Objekthöhe gesetzt wird. Die so erhaltenen Regionen lassen sich anhand ihrer Fläche oder Form weiter differenzieren, um z.B. zu einer Unterscheidung von Gebäuden und Vegetation zu gelangen.

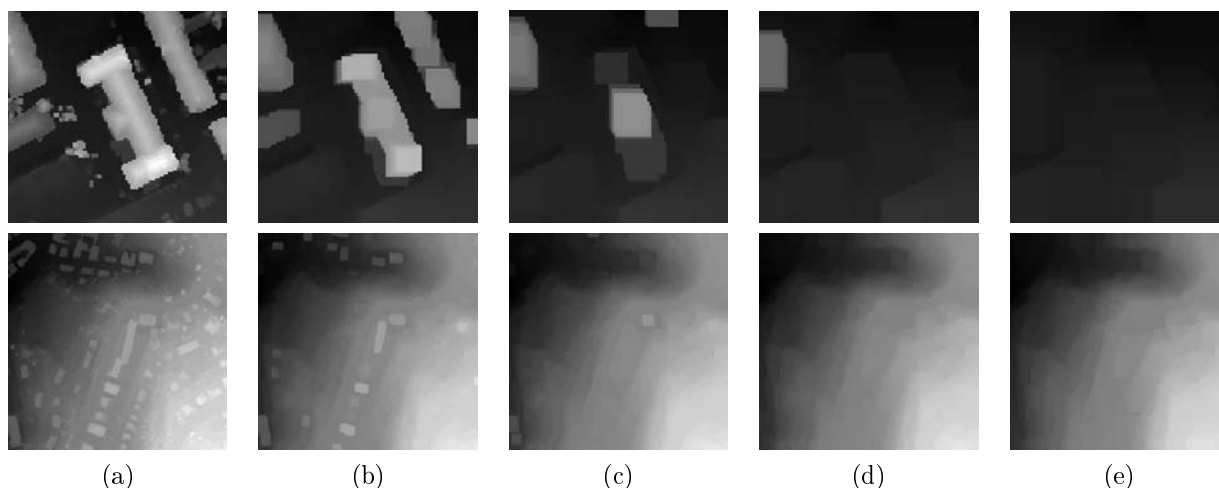


Abbildung 3.2: Wirkung eines morphologischen Opening mit einem quadratischen Strukturelement s . (a) Original-DOM in Grauwertdarstellung. (b)–(e): Strukturelementgrößen von $11 \times 11 \text{ m}^2$, $15 \times 15 \text{ m}^2$, $21 \times 21 \text{ m}^2$, $31 \times 31 \text{ m}^2$.

Wie in Abb. 3.1 zu erkennen, enthält das durch Opening gewonnene (eindimensionale) DGM Artefakte in Form von Sprüngen. Im zweidimensionalen Fall $I(x, y)$ entstehen Sprungkanten, deren Verlauf von der Form des Strukturelements s abhängt. Meist werden für s quadratische oder kreisförmige Masken eingesetzt. Für die Extraktion von Objekten ist die Form der Maske jedoch nicht kritisch.

Verschiedene Autoren [Haala 1994, Weidner & Förstner 1995, Baltasavias et al. 1995, Ameri 2000] haben morphologische Operatoren zur Detektion von Gebäuden in DOM verwendet. Diese Verfahren sind konzeptuell sehr einfach und extrahieren Objekte relativ robust. Auf der anderen Seite gelten die folgenden Einschränkungen:

1. Die Grenzen der detektierten Objekte sind oft unförmig. Dies gilt sowohl für DOM aus Bildzuordnung als auch aus Laserscanning (regularisiert mit Rasterweite 1 m). Gebäudeformen sind meist nur schwer zu erkennen.
2. Sind die zu extrahierenden Objekte nicht mehr einzelstehend, so wird die Wahl der Größe des Strukturelements s problematisch. Zu kleine Größen führen zu “Löchern” in den Objekten, zu große führen zu Fehlern in unduliertem Gelände.
3. Die Unterscheidung von Gebäuden und Vegetation ist sehr schwierig. Dies betrifft nicht nur Objekte als Ganzes, vielmehr tritt bei locker besiedeltem Stadtgebiet häufig der Fall auf, dass dicht bei Gebäuden stehende Vegetation die Objektgrenzen verfälscht.

Die direkte Verwendung morphologisch extrahierter Gebäude ist somit – insbesondere in dicht bebautem Gebiet – nicht ohne weiteres möglich. Dennoch ist das Verfahren in vielen Fällen von Bedeutung, weil es geeignet ist, eine robuste “initiale Segmentierung” bereitzustellen. Diese kann dann in Verbindung mit Luftbildern [Haala 1996] oder DOM [Weidner 1996] verfeinert werden. Abb. 3.2 und 3.3 zeigen Beispiele für die Anwendung morphologischer Verfahren auf DOM.

3.3 Steigungssegmentierung

Wie die morphologischen Verfahren gehört auch die Berechnung von Ableitungsbildern zu den Standardverfahren der digitalen Bildverarbeitung, hauptsächlich zur Detektion von Diskontinuitäten (Kanten). Im einfachsten Fall wird die Ableitung eines diskreten, eindimensionalen Bildes $I(x)$ durch Faltung ($*$) mit der auf dem Differenzenquotienten beruhenden Maske $(-1, 1)$ vorgenommen. Diese Maske besitzt jedoch eine gerade Länge, d.h. ein linearphasiges Filterverhalten und verstärkt das Rauschen im Bild. Deshalb wird gerne die Maske $1/2(-1, 0, 1) = 1/2(1, 1)*(-1, 1)$ eingesetzt, welche die Kombination einer Glättungs- und einer Ableitungsmaske darstellt, ungerade Maskenlänge besitzt (nullphasiges Filterverhalten) und rauschmindernd wirkt. Für zweidimensionale diskrete Bilder $I(x, y)$ kann die Ableitung in eine Koordinatenrichtung mit einer Glättungsmaske

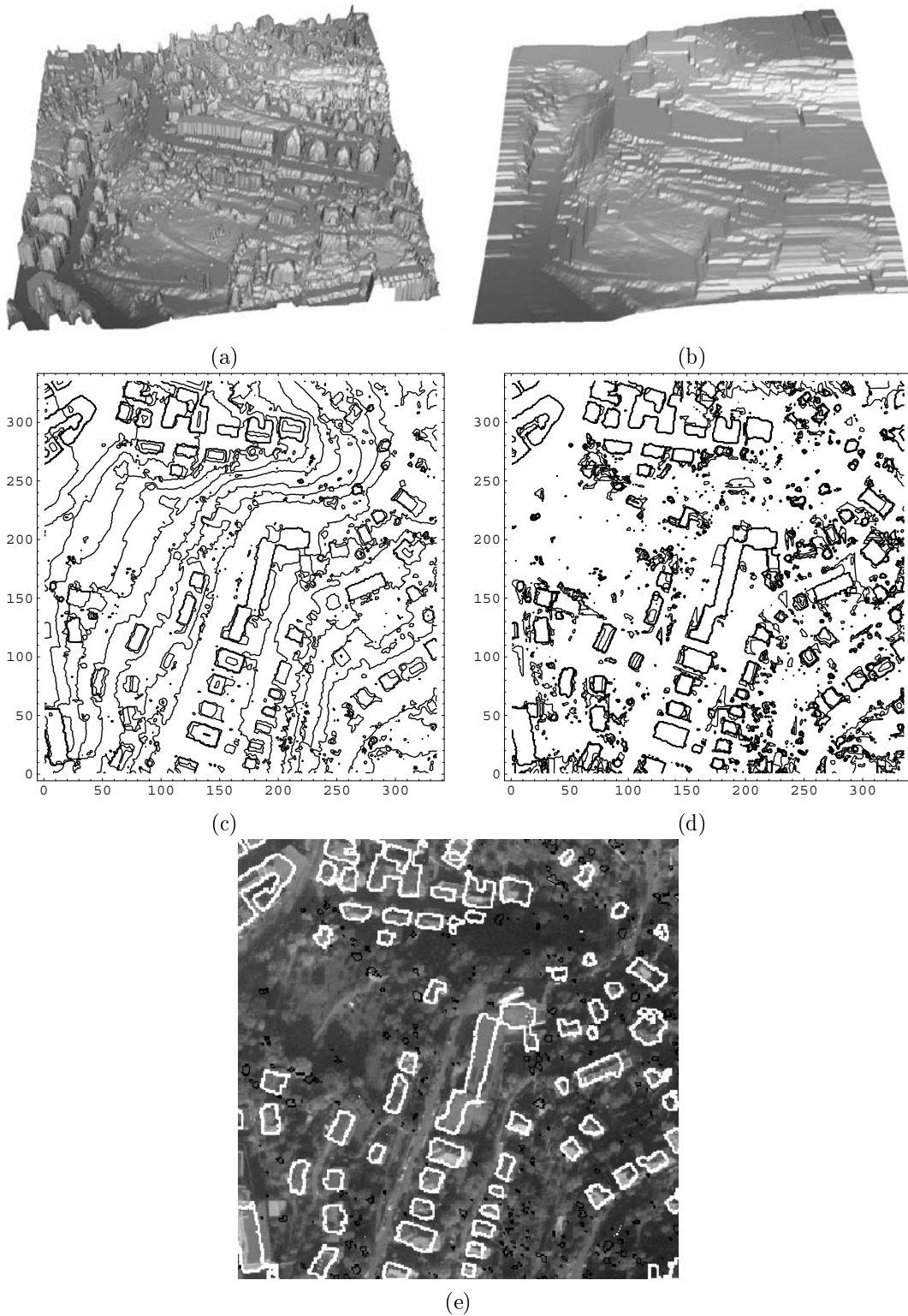


Abbildung 3.3: Wirkung eines morphologischen Opening mit einem quadratischen Strukturelement s . (a), (b) DOM und DGM in 3D-Ansicht. (c), (d) DOM und normalisiertes DOM in Höhenliniendarstellung. (e) Detektierte Objekte mit einer Höhe von mehr als 5 Metern (schwarz, weiß) sowie zusätzlich einer Grundfläche von mehr als 50 m^2 (weiß).

$1/4(1, 2, 1)$ in der anderen Koordinatenrichtung kombiniert werden, wodurch man die bekannten Sobel-Masken

$$D_x := \frac{1}{8} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad D_y := \frac{1}{8} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

erhält. Andere Ableitungsmasken aus der digitalen Bildverarbeitung sind einsetzbar, z.B. solche mit stärkeren Glättungseigenschaften [Gonzalez & Woods 1992]. In Abschnitt 3.5.2 werden Ableitungsmasken speziell für

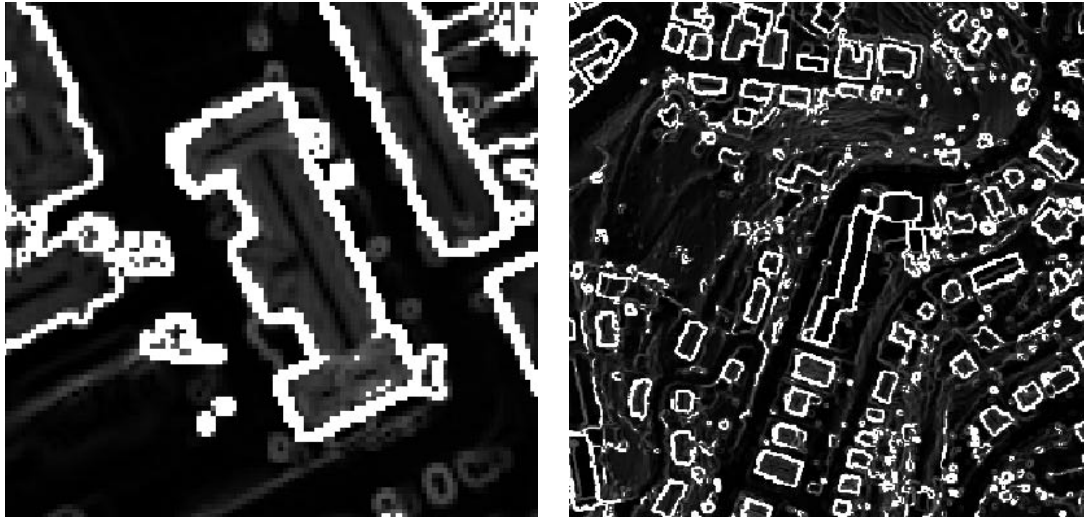


Abbildung 3.4: Segmentierung durch Schwellwertbildung des Gradientenbetrags (Gl. 3.8, die erhaltenen Regionen sind weiß markiert).

DOM hergeleitet, welche auf der lokalen Einpassung von bivariaten Polynomen beruhen (Gl. 3.22, 3.23).

Bei Grauwertbildern werden Ableitungsoperatoren oftmals als Vorverarbeitung für die Gewinnung von symbolischer Information verwendet, etwa der Extraktion von Punkten oder Kanten. In der Regel führt die Bildung von Ableitungen nicht direkt zu symbolischen Ergebnissen, es sei denn, genau kontrollierte Umgebungsbedingungen (insbesondere Beleuchtung) liegen vor. Aufgrund der explizit vorliegenden Geometrieinformation kann jedoch der Gradient eines DOM in einfacher Weise zur Segmentierung herangezogen werden.

Für den Normalenvektor eines DOM $f(u, v)$ gilt (vgl. Gl. 3.15)

$$N = \frac{1}{\sqrt{f_u^2 + f_v^2 + 1}} \begin{pmatrix} -f_u \\ -f_v \\ 1 \end{pmatrix},$$

für den Steigungswinkel α (Winkel zwischen N und der positiven Z-Achse) des DOM $\alpha = \arctan \sqrt{f_u^2 + f_v^2}$, und die Steigung selbst ist der Betrag des Gradienten $\sqrt{f_u^2 + f_v^2}$. Daraus ergeben sich die folgenden Ansatzpunkte für eine steigungs-basierte Segmentierung:

Detektion von Sprungkanten. Gebäudegrenzen führen zu sehr hohen Werten für den Betrag des (diskreten) Gradienten. Durch einfache Schwellwertbildung

$$\sqrt{f_u^2 + f_v^2} > \gamma \quad (3.8)$$

lassen sich diese relativ zuverlässig extrahieren. Abb. 3.4 zeigt hierzu typische Resultate. Für eine Gebäude-detektion ist dabei problematisch, dass dadurch (im Unterschied z.B. zur morphologischen Segmentierung) nur die Umrisse extrahiert werden, welche bei Vorhandensein von Störungen, etwa durch Vegetation, nicht notwendigerweise geschlossen sein müssen. Dagegen hat es sich im Rahmen anderer Verfahren, z.B. der Schätzung von approximierenden Oberflächen, als nützlich herausgestellt, Punkte auszumaskieren, welche Gl. 3.8 erfüllen.

Kompatibilität von Normalenvektoren. Mittels des Normalenvektors lässt sich abprüfen, ob ein DOM-Punkt *kompatibel* zu einem gegebenen Vektor ist. Beispielsweise kann ein Punkt als zugehörig zu einem Flachdach angesehen werden, wenn der ermittelte Normalenvektor mit der Z-Achse einen kleinen Winkel einschließt, oder äquivalent

$$\frac{1}{\sqrt{f_u^2 + f_v^2 + 1}} > \cos \zeta. \quad (3.9)$$

Soll die Kompatibilität mit einer zweidimensionalen Richtung, z.B. dem Normalenvektor $n = (n_u, n_v)^T$ einer Grundrisskante, festgestellt werden, so verwendet man zweckmäßigerweise den in die Ebene projizierten Normalenvektor

$$\frac{1}{\sqrt{f_u^2 + f_v^2}} \left\langle \begin{pmatrix} -f_u \\ -f_v \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} n_u \\ n_v \end{pmatrix} \right\rangle > \cos \eta. \quad (3.10)$$

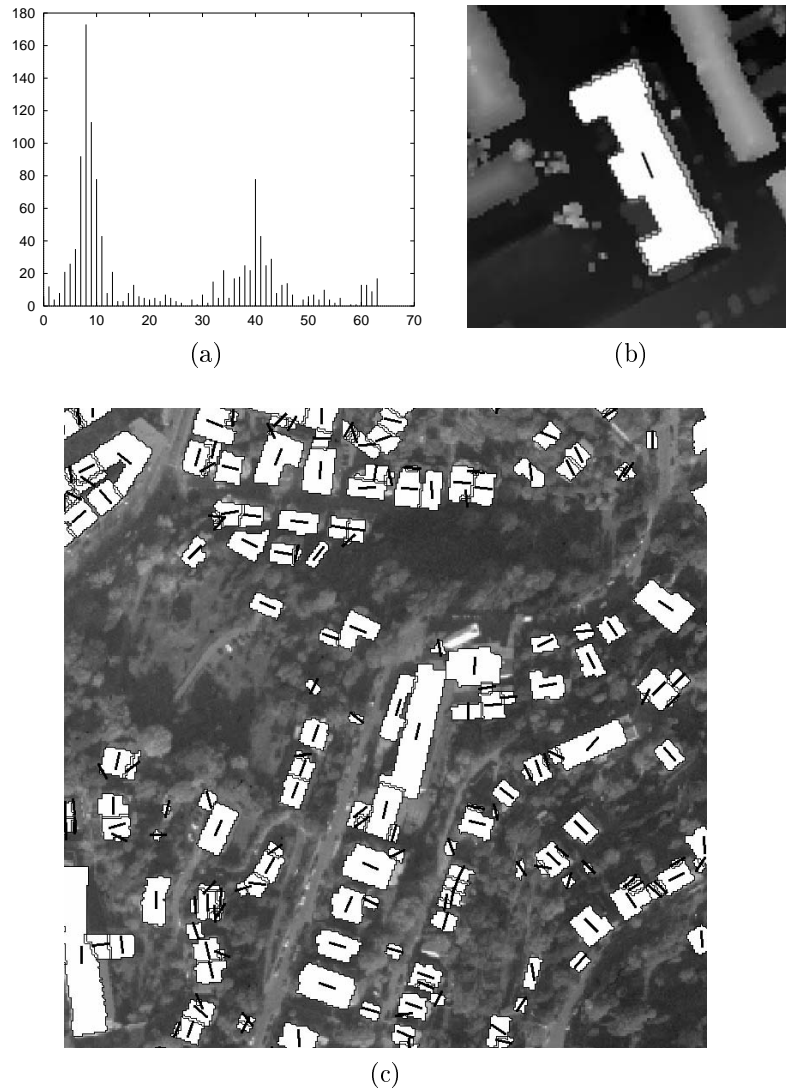


Abbildung 3.5: (a) Richtungshistogramm mit 64 Histogrammeinträgen. Zu sehen sind zwei lokale Maxima mit Abstand 32 (entsprechend π). (b) Zugehöriges DOM mit eingezeichneter, aus dem Histogramm durch Bestimmung der Maxima ermittelter Orientierung (nur Punkte innerhalb der weißen Region gehen in die Berechnung ein). (c) Wie (b), jedoch für einen größeren Ausschnitt.

Orientierungshistogramme. Der Richtungswinkel der Projektion des Normalenvektors $(-f_u, -f_v)^T$ ist gegeben durch $\alpha = \arctan(f_v/f_u)$. Ist ein Gebäude bereits detektiert, so können die Richtungswinkel aller Punkte innerhalb der detektierten Region in ein Histogramm eingetragen werden, welches die Häufigkeit (d.h. die Fläche) über dem Winkel $\alpha \in [0, 2\pi]$ abträgt. Sehr viele Gebäude, welche auf rechtwinkligen Strukturen beruhen, führen zu zwei oder vier lokalen Maxima (Abb. 3.5). Ein einfaches Satteldach weist beispielsweise zwei lokale Maxima auf. Um die “Orientierung” eines Gebäudes festzustellen, genügt es also, $\alpha \bmod (\pi/2)$ in einem entsprechend auf $[0, \pi/2]$ beschränkten Histogramm einzutragen und anschließend den maximalen Eintrag zu suchen.

Orientierungshistogramme sind besonders dann von Interesse, wenn die Auflösung oder Qualität des DOM eine Extraktion komplexerer Primitive nicht zulässt. Ihre Anwendung wird von Haala & Brenner [1997], Stilla & Jurkiewicz [1999] beschrieben. Da das Ergebnis des Verfahrens eine einzelne Richtung ist (und bei Eintragung in das Histogramm der örtliche Bezug verloren geht), ist die Methode zur Rekonstruktion komplexer Dachformen nicht geeignet. Von Hug [1997] werden Orientierungshistogramme zur Unterscheidung von Gebäuden und Vegetation eingesetzt.

3.4 Ebenensegmentierung

Im Zusammenhang mit der Extraktion von Gebäuden bietet sich insbesondere eine regionenbasierte Segmentierung von DOM in *ebene* Regionen an. Zum einen können damit alle polyedrischen Dachformen behandelt werden, wodurch eine Anwendbarkeit auf die überwiegende Mehrzahl von Gebäuden gegeben ist. Zum anderen erscheint die Verwendung von Flächen höherer Ordnung bei DOM mit Auflösungen im Bereich von einem Meter nicht sinnvoll.

Die Ebenensegmentierung wurde bereits vielfach untersucht, hauptsächlich in Verbindung mit der Analyse von Distanzdaten im Nahbereich. Eingesetzt wurden Verfahren des Bereichswachstums [Yang & Kak 1986], Teilen und Verschmelzen [Parvin & Medioni 1986, Taylor, Savini & Reeves 1989], sowie Clustering [Jolion, Meer & Bataouche 1991]. Bereichswachstumsverfahren sind auch geeignet, allgemeine Flächen höherer Ordnung zu segmentieren. Daneben existieren Ansätze wie die *Gruppierung von Linien* (Abschnitt 3.4.3) oder die *RANSAC-Methode* (Abschnitt 3.4.4), welche einen speziellen Flächentyp voraussetzen. Von Hoover, Jean-Baptiste, Jiang, Flynn, Bunke, Goldgof, Bowyer, Eggert, Fitzgibbon & Fisher [1996] werden verschiedene Ansätze und Implementierungen vorgestellt und hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit anhand von (ebenfalls dort vorgestellter) Vergleichskriterien verglichen.

3.4.1 Ebenenschätzung

Die Ebenengleichung für eine Region R_i (vgl. Abschnitt 3.1) erhält man durch Parameterschätzung aus den Punkten p_i , aus denen R_i besteht. Zum einen kann die Schätzung die explizite Form der impliziten Ebenengleichung

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (3.11)$$

(in Hesse-Normalform mit $a^2 + b^2 + c^2 = 1$) verwenden:

$$z = Ax + By + D, \quad (3.12)$$

mit $A := -a/c$, $B := -b/c$, $D := -d/c$, wobei für DOM auf regelmäßigen Gittern stets $c \neq 0$ gilt. Das funktionale Modell der Ausgleichung lautet dann

$$z_i + v_i = Ax_i + By_i + D,$$

wobei die Punkte $p_i(x_i, y_i, z_i)$ eingehen, A , B , C die Unbekannten und v_i die Verbesserungen sind. Mit dieser Formulierung wird nur der senkrechte Abstand (d.h. der Abstand parallel zur Z-Achse) minimiert. Als Normalgleichungsmatrix und Absolutglied erhält man (bei Einheitsgewichtung)

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \sum_i x_i^2 & \sum_i x_i y_i & \sum_i x_i \\ \sum_i x_i y_i & \sum_i y_i^2 & \sum_i y_i \\ \sum_i x_i & \sum_i y_i & \sum_i 1 \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad \mathbf{A}^T \mathbf{z} = \begin{bmatrix} \sum_i x_i z_i \\ \sum_i y_i z_i \\ \sum_i z_i \end{bmatrix}$$

und daraus die geschätzten Parameter $(\hat{A}, \hat{B}, \hat{D})^T = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{z}$. Die vier Parameter der impliziten Flächengleichung (Gl. 3.11) erhält man aus \hat{A} , \hat{B} , \hat{D} unter Beachtung von $a^2 + b^2 + c^2 = 1$.

Ein anderer Ansatz minimiert die Abstände *senkrecht zur geschätzten Ebene* und kann mittels der Hauptachsentransformation berechnet werden [Duda & Hart 1973]. Ist \bar{p} der Schwerpunkt aller Punkte $p_1, p_2, \dots, p_{n_i} \in R_i$, d.h.

$$\bar{p} = \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{bmatrix} = \frac{1}{n_i} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n_i} x_i \\ \sum_{i=1}^{n_i} y_i \\ \sum_{i=1}^{n_i} z_i \end{bmatrix}$$

so erhält man durch $x' = x - \bar{x}$, $y' = y - \bar{y}$, $z' = z - \bar{z}$ die Matrix der zweiten zentralen Momente

$$\begin{bmatrix} \sum (x')^2 & \sum x' y' & \sum x' z' \\ \sum y' x' & \sum (y')^2 & \sum y' z' \\ \sum z' x' & \sum z' y' & \sum (z')^2 \end{bmatrix}$$

mit den Summationsgrenzen jeweils von 1 bis n_i . Eine Schätzung \hat{a} , \hat{b} , \hat{c} für die Parameter in Gl. 3.11 erhält man aus dem auf Einheitslänge normierten Eigenvektor dieser Matrix, welcher zum kleinsten Eigenwert gehört.

Weil \bar{p} auf der geschätzten Ebene liegt, ergibt sich weiter $\hat{d} = -(\hat{a}\bar{x} + \hat{b}\bar{y} + \hat{c}\bar{z})$. Damit sind alle erforderlichen Parameter in Gl. 3.11 bestimmt.

Die vorgestellten Ebenenschätzer arbeiten mit einer Gleichgewichtung aller Punkte p_i und sind deshalb entsprechend anfällig gegen Ausreißer. Eine Verbesserung kann durch robuste Schätzung wie z.B. dem M-Schätzer [Huber 1981] oder der RANSAC-Methode (Abschnitt 3.4.4) erfolgen.

Im Zusammenhang mit Bereichswachstumsverfahren ist jedoch anzumerken, dass die Ebenenschätzung üblicherweise ausgehend von einer sehr kleinen Saatregion erfolgt (vgl. Abschnitt 3.4.2) und Punkte p_j nur dann zur Region R_i hinzugefügt werden, wenn sie ein Homogenitätskriterium erfüllen. Da der Ebenenabstand normalerweise Bestandteil dieses Kriteriums ist, werden grobe Ausreißer ohnehin nicht in die Menge R_i eingefügt. Ausreißer können demnach nur dann entstehen, wenn sich eine Ebene im Zuge des Wachstums ihrer zugehörigen Region R_i so stark verändert, dass bereits akzeptierte Punkte später zu Ausreißern werden.

3.4.2 Bereichswachstumsverfahren

Diese Verfahren gehen von einer Saatregion R_i^0 aus, welche das Prädikat $P(\cdot)$ aus Gl. 3.1 erfüllt. Iterativ werden anschließend so lange Punkte zu R_i^{k-1} hinzugefügt, bis eine Erweiterung nicht mehr möglich ist, ohne die Bedingung $P(R_i^{k-1})$ zu verletzen. Da für die Erweiterung stets nur Punkte entlang des Rands von R_i^{k-1} betrachtet werden, ist die letztlich entstehende Region R_i^k trivialerweise zusammenhängend. Die einzelnen Schritte des Algorithmus sind also:

1. R ist die Menge aller Punkte des DOM.
2. Iteriere über alle Regionen $i = 1, 2, \dots$:
 - (a) Bestimme aus R die "beste" Saatregion R_i^0 . Für diese gilt $P(R_i^0) = \text{TRUE}$.
 - (b) Erweitere die Region für alle $k = 1, 2, \dots$:
 - i. Füge Randpunkte p von R_i^{k-1} zu R_i^{k-1} hinzu, wenn dadurch weiterhin $P(R_i^{k-1} \cup \{p\}) = \text{TRUE}$ gilt. Die erhaltene Region ist R_i^k .
 - ii. Breche die Schleife ab, wenn sich keine Änderung ergeben hat ($R_i^k = R_i^{k-1}$).
 - iii. Bestimme das Prädikat $P(\cdot)$ neu auf der Basis der Punkte von R_i^k .
 - (c) Akzeptiere die letztlich erhaltene Region R_i^k und streiche die enthaltenen Punkte aus der Menge der verbleibenden Punkte ($R \leftarrow R \setminus R_i^k$).

Eine häufig eingesetzte Methode zur Ermittlung der "besten" Saatregion besteht darin, in einer lokalen Umgebung jedes Punktes $p \in R$ eine Ebene zu schätzen mittels einer der Methoden von Abschnitt 3.4.1. Die Umgebung, welche zum kleinsten Residuum führt, wird als Saatregion R_i^0 verwendet.

Als Prädikat $P(\cdot)$ wird eine Kombination aus Normalenvektorkompatibilität (Gl. 3.10) und Abstand von der geschätzten Ebene (Gl. 3.11):

$$P(p_j) = \text{TRUE} \Leftrightarrow |ax_j + by_j + cz_j + d| < \varepsilon \quad (3.13)$$

(welche jeweils für alle $p_j \in R_i$ erfüllt sein müssen) eingesetzt. Dass Bedingung (3.13) allein nicht ausreicht, illustriert Abb. 3.6. Abb. 3.7 zeigt Ergebnisse der Ebenensegmentierung durch Bereichswachstum, angewendet auf ein DOM mit 1 m Auflösung. Man sieht, dass viele der Dachflächen zu entsprechenden Regionen führen. Probleme treten dann auf, wenn die Oberflächen stark fragmentiert sind.

Ein Nachteil von Bereichswachstumsverfahren ist der erforderliche hohe Rechenaufwand. Dieser rührt daher, dass nach jeder Erweiterung der Region eine Neuschätzung der Ebenenparameter erforderlich ist. Man kann dieses Verhalten etwas verbessern, indem die Neuschätzung nicht nach Hinzufügen eines einzelnen Punktes p , sondern erst nach Betrachtung *aller* Punkte auf dem Rand der momentanen Region erfolgt. Dennoch bleibt der Algorithmus zeitaufwendig. Abhilfe schafft in dieser Beziehung die Gruppierung von Linien (Abschnitt 3.4.3).

Ein weiteres Problem von Bereichswachstumsverfahren liegt in der Reihenfolge der Wahl von Saatregionen. Um einer Übersegmentierung vorzubeugen, sollten zunächst solche Saatregionen ausgewählt werden, die zu möglichst großen Regionen expandiert werden können. Die "Expansionsfähigkeit" ist jedoch zum Zeitpunkt der Wahl der Saatregion nicht bekannt, da die Priorisierung rein auf der Basis des Residuums einer lokalen Ebenenschätzung erfolgt. Ziel des weiter unten diskutierten RANSAC-Ansatzes (Abschnitt 3.4.4) ist es, eine Priorisierung in der Reihenfolge der Größe expandierter Regionen zu erreichen.

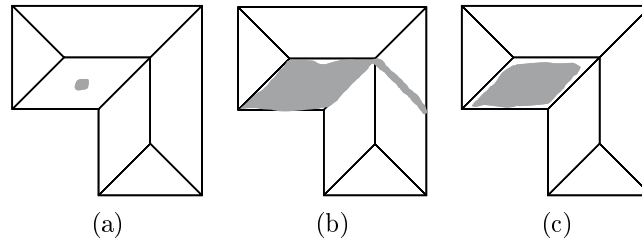


Abbildung 3.6: Illustration zum Prädikat $P(\cdot)$ bei Bereichswachstumsverfahren. (a) Draufsicht auf ein L-förmiges Gebäude mit sechs geneigten Dachflächen. Grau eingezeichnet ist die Saatregion R_1^0 . (b) Maximale Ausdehnung der Saatregion nach dem Bereichswachstum, wenn lediglich das Abstandskriterium (Gl. 3.13) verwendet wird. (c) Maximale Ausdehnung, wenn Abstandskriterium und Normalenvektorkompatibilität verwendet werden.

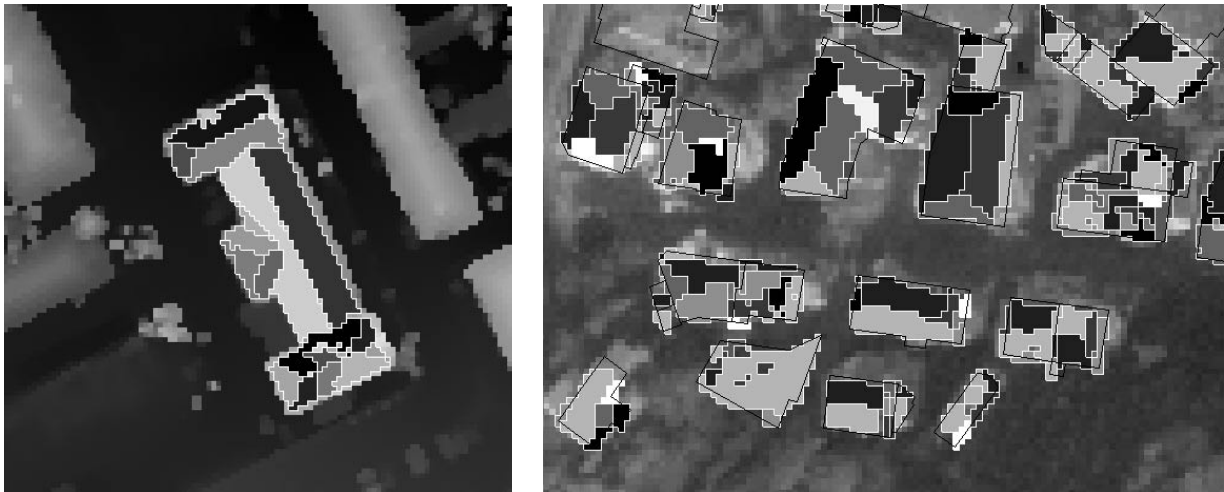


Abbildung 3.7: Ergebnisse von Ebenensegmentierungen basierend auf einem Bereichswachstumsverfahren.

3.4.3 Gruppierung von Linien

Dieses Verfahren, auch scan line grouping genannt, wurde von Jiang & Bunke [1992] vorgestellt (siehe auch [Jiang & Bunke 1994]). Es beruht auf der Beobachtung, dass Bereichswachstumsverfahren hauptsächlich deshalb rechenintensiv sind, weil als kleinste Einheit jeweils ein einzelner Punkt p betrachtet wird. Wird jedoch eine Segmentierung in *ebene* Regionen durchgeführt, so kann dieses Wissen dazu benutzt werden, Liniensegmente statt Punkte als Primitive zu verwenden.

Betrachtet man die explizite Form einer Ebenengleichung Gl. 3.12, so stellt man fest, dass entlang einer Zeile $y = y_0 = \text{const.}$ gilt:

$$z = Ax + By_0 + D = Ax + D',$$

d.h. es liegt eine Geradengleichung vor. Eine ebene Region führt demnach zu einer Geraden entlang einer fest vorgegebenen Zeile $y = y_0$. Umgekehrt ist es in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle auch so, dass ein Geradensegment innerhalb einer Zeile Teil einer einzelnen Region ist (Jiang & Bunke [1992] geben ein Beispiel für eine Ausnahme).

Die Grundidee des Verfahrens nach Jiang & Bunke besteht nun darin, zunächst jede Zeile y_0 des DOM in Liniensegmente zu segmentieren, welche dann im Rahmen eines Bereichswachstumsverfahrens zu zweidimensionalen Regionen kombiniert werden. Im einzelnen werden die folgenden Schritte durchgeführt:

1. **Ermittlung der Liniensegmente in jeder Zeile $y = y_0$ des DOM $f(x, y)$.** Hierzu werden zunächst alle DOM-Punkte dieser Zeile mittels einer Geraden $\phi(x) = Ax + D$ approximiert, welche durch den ersten und letzten DOM-Punkt der Zeile geht. Die Abweichung des DOM von der Geraden $\phi(x)$ entlang der Zeile wird bestimmt. Liegt das Maximum am Punkt x_0 vor und ist

$$|f(x_0, y_0) - \phi(x_0)| > \varepsilon$$

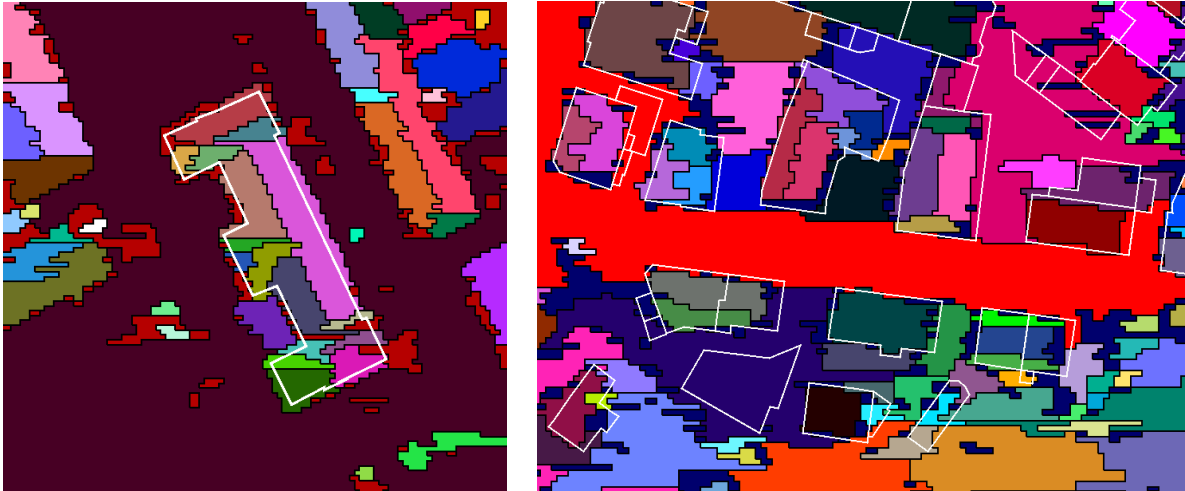


Abbildung 3.8: Ergebnisse von Ebenensegmentierungen basierend auf dem Algorithmus von Jiang & Bunke. Das Verfahren wurde auf das gesamte DOM angewendet; die Grundrisse wurden nachträglich überlagert.

für einen Schwellwert ε , so wird das Segment bei x_0 in zwei Teilsegmente unterteilt, auf welche der Algorithmus rekursiv angewendet wird [Douglas & Peucker 1973, Duda & Hart 1973]. Der Punkt $(x_0, y_0)^T$ selbst wird einem der beiden Teilsegmente zugeschlagen. Eine Datenstruktur in Form einer verketteten Liste wird aufgebaut, um jeweils die Nachbarschaften innerhalb der Zeile sowie zu den Zeilen $y_0 - 1$ und $y_0 + 1$ zu repräsentieren.

2. **Suche nach einer Saatregion.** Für die Auswahl werden überlappende Liniensegmente in drei aufeinanderfolgenden Zeilen $y_0 - 1, y_0, y_0 + 1$ herangezogen, welche eine Mindestlänge besitzen. Jiang & Bunke [1992] verwenden als Optimalitätskriterium ein Maß basierend auf dem Winkel der Normalenvektoren der Segmente. Es ist jedoch genauso möglich, die Standardabweichung einer Ebenenschätzung durch die drei Segmente heranzuziehen [Gühring 1997].
3. **Bereichswachstumsverfahren.** Ausgehend von der Saatregion wird die Region iterativ so lange erweitert, wie benachbarte Liniensegmente vorhanden sind, welche zur Region hinzugefügt werden können. Als Homogenitätskriterium wird der Abstand der Segmente von der zur Region gehörenden Ebene verwendet. Wie man leicht einsieht, sind hierfür nur jeweils die Endpunkte der Liniensegmente zu prüfen. Es wird also ein normales Bereichswachstum durchgeführt, wobei die hinzugefügten Primitive nicht Punkte, sondern Liniensegmente sind, die Komplexität des Homogenitätstests jedoch vergleichbar mit einem punktweise arbeitenden Verfahren ist. Hierin liegt die Effizienz des Algorithmus begründet.
4. **Nachbearbeitung.** Sind alle Regionen expandiert, wird die Regionenzugehörigkeit von Punkten p auf den Rändern der Regionen überprüft und ggf. geändert. Dieser Schritt wird so lange wiederholt, bis ein stabiler Zustand eintritt. Eine neuerliche Bestimmung der Ebenengleichungen (wie während des Bereichswachstums) findet nicht statt.

Das Verfahren arbeitet schnell und hat in einem Vergleichstest sehr gut abgeschnitten [Hoover et al. 1996]. Auf der anderen Seite ist anzumerken, dass der Algorithmus durch die unterschiedliche Behandlung der Punktgruppierung (in Zeilenrichtung erfolgt die Gruppierung in Segmente im ersten Schritt durch Unterteilung in Liniensegmente, in Spaltenrichtung erfolgt die Gruppierung durch Bereichswachstum) ein unterschiedliches Verhalten in den beiden Achsrichtungen aufweist. Dieses schlägt sich in der Form der segmentierten Regionen nieder, welche dazu neigen, in einer Koordinatenrichtung “auszufransen”. Ein weiterer Nachteil ist die im Vergleich zum punktweisen Bereichswachstum größere Zahl von erforderlichen Schwellwerten, weil die Steuerung der Segmentierung in Zeilen- und Spaltenrichtung getrennt erfolgt. Jiang & Bunke [1992] leiten die Schwellwerte aus den Daten ab mittels einer Rauschschätzung. Abb. 3.8 zeigt Beispiele.

3.4.4 Robuste Ebenenschätzung mittels der RANSAC-Methode

Die RANSAC-Methode (random sample consensus) wurde 1981 von Fischler und Bolles vorgestellt, mit Anwendungen für den Rückwärtsschnitt [Fischler & Bolles 1981] sowie der Suche nach zylindrischen Flächen in

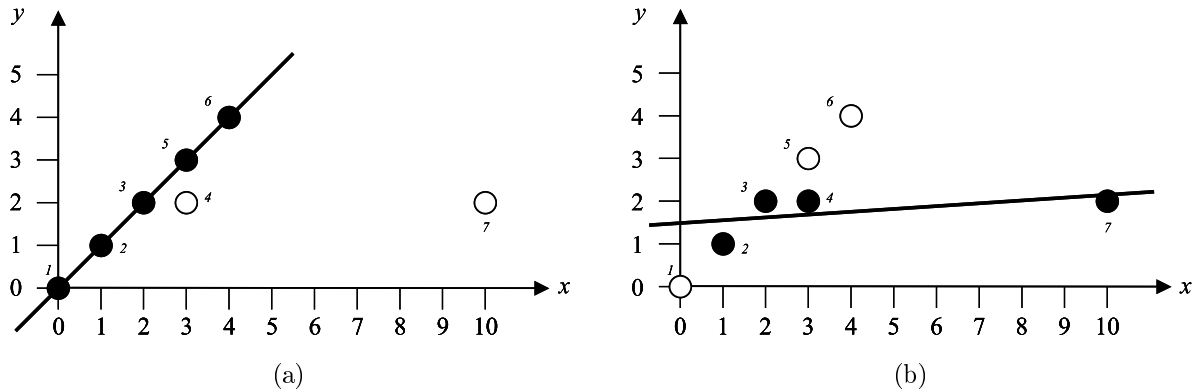


Abbildung 3.9: Einfaches Beispiel zum Versagen eines robusten, iterativen Schätzers, entnommen aus [Fischler & Bolles 1981]. Gegeben sind die eingezeichneten sieben Punkte. Eine ausgleichende Gerade der Form $y = ax + b$ soll geschätzt werden, wobei keiner der Punkte mehr als 0.8 Einheiten von der Linie abweichen darf. Die jeweils benutzten Punkte sind als Scheiben, die nicht benutzten als Kreise dargestellt. (a) Die korrekte Lösung. (b) Die Lösung eines iterativen Schätzers ($y = 1.51x + 0.06$), welcher in jeder Iteration die Punkte mit einem Residuum größer als 0.8 Einheiten entfernt. Der grobe Fehler (Punkt 7) führt dazu, dass ausschließlich korrekte Beobachtungen (Punkte 1, 5, 6) entfernt werden.

Distanzdaten [Bolles & Fischler 1981].

Der Methode liegt die folgende Betrachtung zugrunde. Robuste Schätzverfahren basieren üblicherweise auf den beiden iterativ ausgeführten Schritten:

1. Führe eine Parameterschätzung durch.
2. Verwende die durch Parameterschätzung erhaltenen Verbesserungen, um Beobachtungen zu entfernen bzw. die zugehörigen Gewichte zu verkleinern.

Insbesondere die erste hierbei ausgeführte Parameterschätzung beruht somit auf der (heuristischen) Annahme, dass Ausreißer in den Beobachtungen nicht zu einem Ergebnis führen, welches völlig falsch ist, und dass in der Folge die groben Fehler anhand ihrer großen Verbesserungen identifiziert werden können. Fischler & Bolles [1981] zeigen jedoch anhand eines einfachen Beispiels (Abb. 3.9), dass bereits ein einzelner grober Fehler unter sieben Datenpunkten diese Heuristik zum Scheitern bringt⁷.

Der RANSAC-Ansatz vermeidet diese Probleme, indem er keine initiale Schätzung beruhend auf *allen* Beobachtungen durchführt, sondern mit einer *kleinstmöglichen* Anzahl von Beobachtungen startet, welche die Schätzung der Parameter gerade noch zulässt (in Abb. 3.9 wären dies genau zwei Punkte). Anschließend wird die Anzahl der Beobachtungen bestimmt, welche mit den geschätzten Parametern kompatibel sind. Die Auswahl initialer Beobachtungen erfolgt zufällig und wird mehrmals wiederholt. Die Lösung, welche die größte Anzahl kompatibler Beobachtungen erreicht, wird als die richtige Lösung angesehen.

Bezüglich des Problems der Segmentierung in ebene Regionen kann der Algorithmus also folgendermaßen formuliert werden (Abb. 3.10):

1. R ist die Menge aller Punkte des DOM.
2. Iteriere über alle Regionen $i = 1, 2, \dots$:
 - (a) Wiederhole “ausreichend” oft die folgende zufällige Punktauswahl:
 - i. Wähle aus der (verbliebenen) Region R drei Punkte $p_{i_1}, p_{i_2}, p_{i_3}$ zufällig aus.
 - ii. Berechne eine Ebene E durch diese drei Punkte (exakte Lösung, es liegt keine Überbestimmung vor).
 - iii. Stelle die Punkte aus R fest, welche mit E kompatibel sind. Als Kriterium wird der Winkel (Gl. 3.10) und der Abstand (Gl. 3.13) verwendet.

⁷ Allerdings muss angemerkt werden, dass diese Gegenüberstellung simplifiziert ist, da aufwendigere Methoden des *data snooping* zur Verfügung stehen, welche eine Beurteilung der Beobachtungen nicht direkt auf der Basis der Verbesserung durchführen.

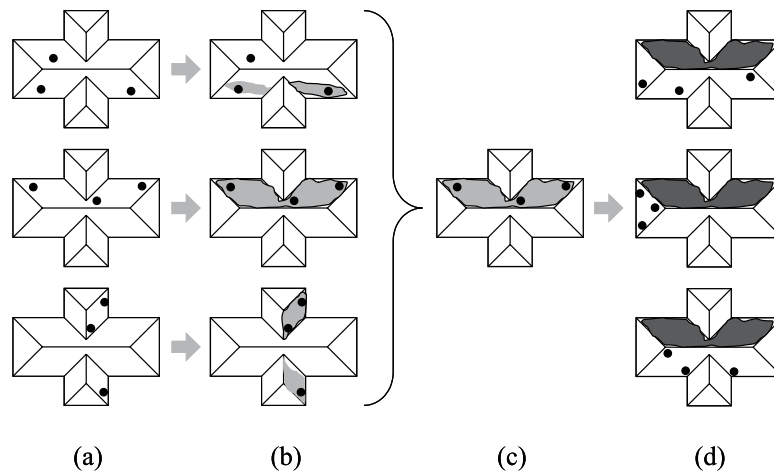


Abbildung 3.10: Illustration zum Ablauf der Ebenensegmentierung mittels des RANSAC-Algorithmus. (a) Es werden etliche Auswahlen von drei Punkten getroffen, welche innerhalb der (verbleibenden) Gesamtregion liegen. (b) Für jede Auswahl wird die zugehörige Ebene berechnet. Die zu dieser Ebene kompatiblen Punkte des DOM werden bestimmt. Von diesen wird jeweils die größte zusammenhängende Region (umrandet) ausgewählt. (c) Die größte der so bestimmten Regionen wird akzeptiert. (d) Die Gesamtregion wird um die akzeptierte Region reduziert und der Algorithmus wird iterativ fortgesetzt.

iv. Verwende hiervon die größte zusammenhängende Komponente R_i und ermittle deren Mächtigkeit.

(b) Akzeptiere die Region R_i mit der größten Mächtigkeit und streiche die enthaltenen Punkte aus der Menge der verbleibenden Punkte ($R \leftarrow R \setminus R_i$).

Von Fischler & Bolles [1981] wird ein Hinweis gegeben, wie sich die Anzahl der erforderlichen Punktauswahlen aus der Fehlerwahrscheinlichkeit und der Gesamtanzahl von Beobachtungen berechnen lässt.

Es hat sich als vorteilhaft erwiesen, die Bestimmung der Ebenengleichung (welche nur auf der Basis der drei ausgewählten Punkte erfolgt) um eine überbestimmte Schätzung zu erweitern. Als Ausgangspunkt dient dabei die vom RANSAC-Algorithmus akzeptierte Menge von Punkten R_i . Iterativ wird jeweils die Ebene geschätzt und eine Veränderung der Punktmenge R_i durchgeführt, so lange, bis keine Verbesserung mehr erzielt werden kann.

Um eine starke Fragmentierung der Segmentierung zu unterbinden und gleichzeitig die Eigenschaft einer robusten Schätzung zu erhalten, können während der überbestimmten Ebenenschätzung zwei unterschiedliche Intervalle für das Abstandskriterium verwendet werden. Die Punkte, welche zur Schätzung der Ebenenparameter herangezogen werden, sollten Gl. 3.13 mit $\varepsilon = \sigma_1$ erfüllen, während für die letztlich als zur Fläche kompatiblen Punkte $\varepsilon = \sigma_2$ ausreicht ($\sigma_1 < \sigma_2$). Eine sinnvolle Wahl ist, σ_1 entsprechend dem Rauschen des Distanzdatensensors zu setzen und für σ_2 ein Konfidenzintervall mit hoher Vertrauenswahrscheinlichkeit zu wählen, etwa $\sigma_2 = 3\sigma_1$ (99.7% Vertrauenswahrscheinlichkeit bei Normalverteilung).

Ein großer Vorteil der Ebenensegmentierung mittels des RANSAC-Algorithmus ist die Eigenschaft, dass die Region R_i auf der Basis ihrer (bereits expandierten) Größe akzeptiert wird. Dies führt dazu, dass große Regionen tendenziell zuerst akzeptiert werden und wirkt somit einer Übersegmentierung entgegen. Segmentierer auf der Basis von Bereichswachstumsverfahren gehen dagegen von einer Saatregion aus, welche aufgrund einer lokalen Eigenschaft (z.B. dem kleinsten Residuum einer lokalen Ebenenschätzung) ausgewählt wird. Diese garantiert jedoch nicht die Expansionsfähigkeit der Saatregion. Abb. 3.11 zeigt Ergebnisse der Segmentierung.

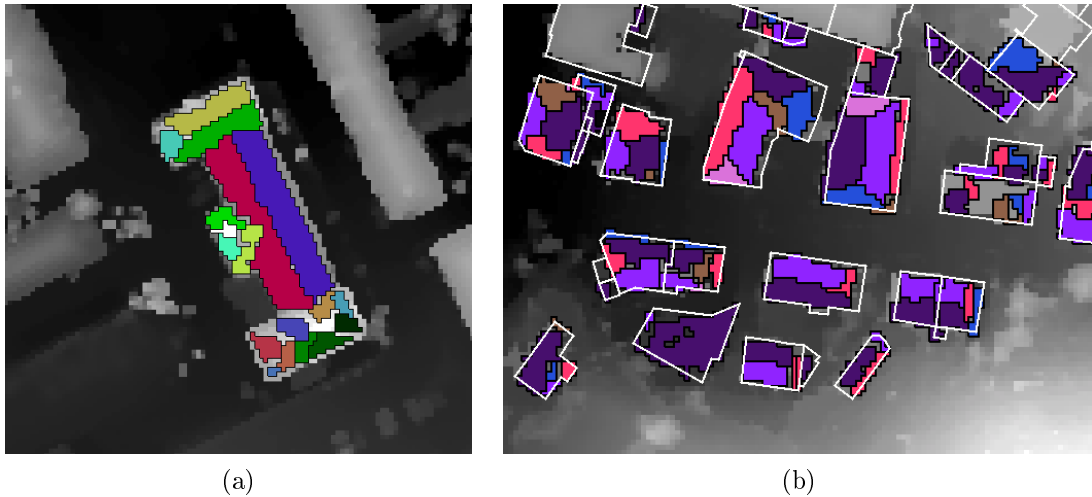


Abbildung 3.11: Ergebnisse der Ebenensegmentierung mittels des RANSAC-Algorithmus.

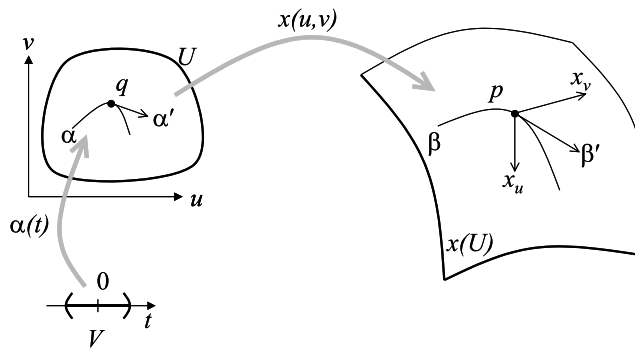


Abbildung 3.12: Illustration zur regulären, parametrisierten Fläche.

3.5 Krümmungsbasierte Segmentierung

3.5.1 Grundlagen der Differentialgeometrie

Zur Herleitung der Beziehungen kann man zunächst vom allgemeinen Fall einer regulären, parametrisierten Fläche x ausgehen [do Carmo 1992]:

$$x : \mathbb{R}^2 \supseteq U \longrightarrow \mathbb{R}^3 ,$$

wobei U offen, $x = x(u, v)$ differenzierbar und das Differential dx_q injektiv für alle $q \in U$. Letztere Bedingung gilt genau dann, wenn $(\partial x / \partial u)(q)$ und $(\partial x / \partial v)(q)$ linear unabhängig, oder wiederum äquivalent, $\|x_u \times x_v\| > 0$. Sei des weiteren $x(q) = p$. Betrachtet man nun eine Kurve im Parameterraum U

$$\alpha = \alpha(t) = \begin{pmatrix} u(t) \\ v(t) \end{pmatrix} : \mathbb{R} \supseteq V \longrightarrow U \subseteq \mathbb{R}^2$$

mit $\alpha(0) = q$, dann gilt für den Tangentenvector an diese Kurve im Parameterraum $\alpha' = (u', v')^T$ und für die Konkatenation $\beta = x \circ \alpha$ erhält man $\beta' = x_u \cdot u' + x_v \cdot v'$ (Abb. 3.12). Die Menge aller solcher Tangentenvektoren im Punkt $p = x(q)$ spannt die Tangentialebene T_p an die Fläche im Punkt p auf.

Für einen Vektor $w \in T_p$ wird die *erste Fundamentalform* definiert als $I_p(w) := \langle w, w \rangle$. In der Darstellung bezüglich lokaler Koordinaten ergibt sich

$$I(\beta') = E \cdot (u')^2 + 2F \cdot u'v' + G \cdot (v')^2 ,$$

mit den Koeffizienten $E := \langle x_u, x_u \rangle$, $F := \langle x_u, x_v \rangle$ und $G := \langle x_v, x_v \rangle$.

Die Gauß-Abbildung ordnet jedem Punkt p auf der Fläche $S = x(U)$ den Normalenvektor auf die Tangentialebene T_p zu. Ausgedrückt in der lokalen Parametrisierung ist der Normalenvektor

$$N(q) := \frac{x_u \times x_v}{\|x_u \times x_v\|}(q) , \quad (3.14)$$

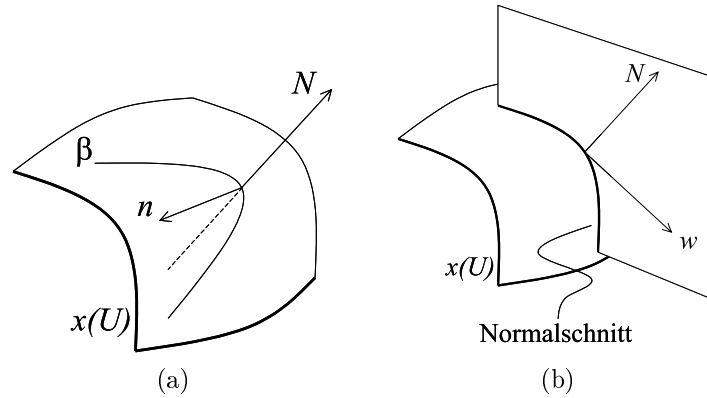


Abbildung 3.13: Illustration zu (a) Normalkrümmung und (b) Krümmung des Normalschnitts.

wobei der Nenner aufgrund der Eigenschaften einer regulären parametrisierten Fläche nicht null sein kann. Basierend auf dem Differential dN_p des Normalenvektors im Punkt $p = x(q)$ wird die zweite Fundamentalform definiert als

$$\Pi_p(w) := -\langle dN_p(w), w \rangle.$$

Die zweite Fundamentalform gibt Auskunft darüber, wie sich N entlang einer Kurve auf der Oberfläche S verändert, welche durch p geht und in p den Tangentenvektor w besitzt. “Dreht” sich N bei einem infinitesimalen Schritt in Richtung w ebenfalls in Richtung w , so ist $\Pi_p(w)$ (aufgrund des negativen Vorzeichens in der Definition) negativ. Es liegt dann eine konvexe Krümmung der Oberfläche S in Richtung w vor. Ausgedrückt in lokalen Koordinaten ist

$$\Pi_p(\beta') = e \cdot (u')^2 + 2f \cdot u'v' + g \cdot (v')^2$$

mit den Koeffizienten $e = \langle N, x_{uu} \rangle$, $f = \langle N, x_{uv} \rangle$, $g = \langle N, x_{vv} \rangle$.

Die Normalkrümmung κ_n einer Kurve auf der Oberfläche S ist definiert als $\kappa_n := \kappa \cdot \langle n, N \rangle$, wobei κ die Krümmung und n der Normalenvektor der Kurve sind. Der Wert von κ_n ist nicht abhängig von einer speziellen Kurve, sondern wird bereits durch die Kenntnis des Tangentenvektors $w \in T_p$ festgelegt. Aus den Fundamentalformen läßt sich die Normalkrümmung berechnen mittels $\kappa_n = \Pi_p(w)/I_p(w)$. Eine intuitive Bedeutung für die Normalkrümmung erhält man, wenn man beachtet, dass die Krümmung des Normalschnitts $|\kappa_n|$ (der Betrag der Normalkrümmung) ist. Der Normalschnitt in einem Punkt p der Oberfläche S ergibt sich aus dem Schnitt der durch N und w aufgespannten Ebene mit S (Abb. 3.13).

Mittels zweier beliebiger, linear unabhängiger Vektoren $w_1, w_2 \in T_p$ läßt sich die Tangentialebene aufspannen. Eine spezielle Basis von T_p ist die Orthonormalbasis $\{e_1, e_2\}$, $\|e_i\| = 1$, $e_1 \perp e_2$, welche sich aus den Eigenvektoren von dN_p ergibt:

$$dN_p(e_1) = -\kappa_1 \cdot e_1, \quad dN_p(e_2) = -\kappa_2 \cdot e_2,$$

wobei e_1 und e_2 als die beiden Hauptkrümmungsrichtungen und κ_1, κ_2 als die beiden Hauptkrümmungen bezeichnet werden. “Dreht” man den Vektor w um den Punkt p :

$$w = e_1 \cdot \cos \theta + e_2 \cdot \sin \theta \in T_p,$$

so nimmt die zugehörige Normalkrümmung entsprechende Werte zwischen beiden Hauptkrümmungen an (Euler-Formel):

$$\kappa_n = \kappa_1 \cdot \cos^2 \theta + \kappa_2 \cdot \sin^2 \theta.$$

Die Gauß’sche Krümmung K und die Hauptkrümmung H werden definiert als Produkt bzw. Mittelwert von κ_1 und κ_2 :

$$K := \kappa_1 \cdot \kappa_2 \quad \text{und} \quad H := \frac{1}{2}(\kappa_1 + \kappa_2).$$

In lokalen Koordinaten ergibt sich

$$K = \frac{eg - f^2}{EG - F^2} \quad \text{und} \quad H = \frac{1}{2} \cdot \frac{eG - 2fF + gE}{EG - F^2}.$$

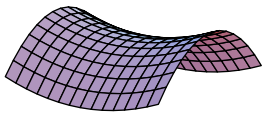
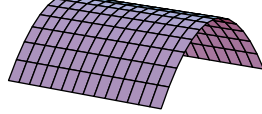
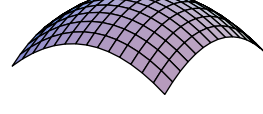
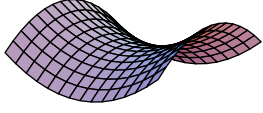
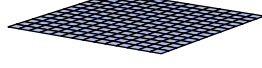
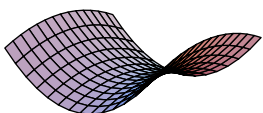
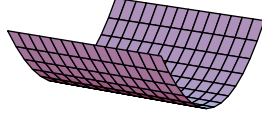
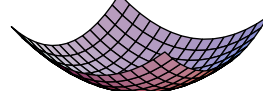
	$K < 0$ (hyperbolisch)	$K = 0$ (parabolisch/flach)	$K > 0$ (elliptisch)
$H < 0$	 Sattelgrat	 Grat	 Maximum
$H = 0$	 Minimalfläche	 Ebene	(nicht möglich)
$H > 0$	 Satteltal	 Tal	 Minimum

Abbildung 3.14: Die verschiedenen Oberflächentypen in Abhängigkeit des Vorzeichens von K und H .

Die Gauß'sche Krümmung und die Hauptkrümmung in einem Oberflächenpunkt p charakterisieren die lokalen Krümmungseigenschaften. Abhängig vom Vorzeichen von K und H werden die in Abb. 3.14 gezeigten Oberflächen angenommen. Das Vorzeichen von H hängt von der gewählten Flächenorientierung ab (Vorzeichen von N). Die herausragende Bedeutung von K und H für die Charakterisierung von Oberflächen rührt nicht zuletzt daher, dass K und H invariant sind sowohl gegenüber einer räumlichen Ähnlichkeitstransformation (ohne Skalierung) als auch gegenüber einer Änderung der Parametrisierung der Fläche.

3.5.2 Anwendung auf DOM

Ein DOM sei in der Form eines Graphen $z = f(x, y)$ gegeben. Eine triviale Flächenparametrisierung ist dann

$$x(u, v) = \begin{pmatrix} u \\ v \\ f(u, v) \end{pmatrix}$$

mit den partiellen Ableitungen

$$x_u = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ f_u \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad x_v = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ f_v \end{pmatrix},$$

woraus die lineare Unabhängigkeit von x_u und x_v direkt ersichtlich ist. Die Koeffizienten $E = 1 + f_u^2$, $F = f_u f_v$, $G = 1 + f_v^2$ erhält man sofort, und nach der Wahl einer Orientierung des Normalenvektors (in Richtung der Z-Achse)

$$N = \frac{1}{\sqrt{f_u^2 + f_v^2 + 1}} \begin{pmatrix} -f_u \\ -f_v \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

ergibt sich $e = f_{uu}/s$, $f = f_{uv}/s$ und $g = f_{vv}/s$ mit $s := \sqrt{f_u^2 + f_v^2 + 1}$.

Für den häufigen Fall, dass das Oberflächenmodell nicht in analytischer Form, sondern in Form eines diskretisierten (ggf. regularisierten) Rasters $z = \varphi(i, j)$, $i, j \in \mathbb{N}$ vorliegt, ist eine geeignete Vorgehensweise zur Bestimmung der Krümmungsparameter wie folgt:

1. Berechnen der diskreten Ableitungen φ_u , φ_v , φ_{uu} , φ_{uv} , φ_{vv} durch Faltung von φ mit entsprechenden Ableitungsmasken D_u , D_v , D_{uu} , D_{uv} , D_{vv} . Aufgrund der Rauschempfindlichkeit der ersten und vor allem zweiten Ableitungen sollten Masken verwendet werden, welche die Ableitung mit einer Mittelung

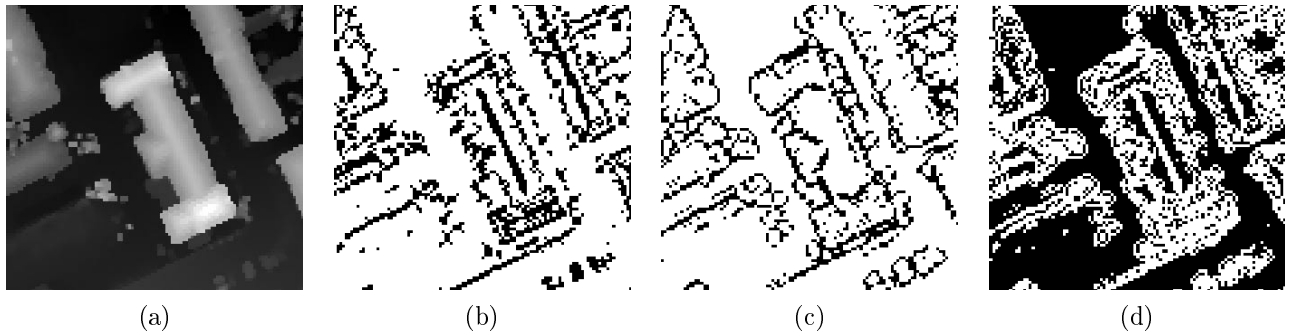


Abbildung 3.15: Typisches Ergebnis einer Krümmungskarte bei Anwendung auf ein DOM mit einem Meter Rasterweite. (a) Ausschnitt aus dem DOM in Grauwertdarstellung. (b)–(d): Alle “konvexen” ($H < 0$ sowie $H = 0 \wedge K < 0$), “konkaven” ($H > 0$), sowie “ebenen” ($H = K = 0$) Oberflächenpunkte. In den Abbildungen sind die Firste und Grate (b), Kehlen (c) und ebenen Dachflächen (d) erkennbar.

verbinden, etwa basierend auf den Sobel-Masken (Gl. 3.7):

$$D_u := \frac{1}{8} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad D_{uu} := \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 2 & -4 & 2 \\ 1 & -2 & 1 \end{pmatrix}, \quad D_{uv} := \frac{1}{4} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix} \text{ etc.} \quad (3.16)$$

2. Ermitteln der Koeffizienten E , F , G , e , f , g und daraus K sowie H .
3. Ist eine Klassifizierung der Oberfläche entsprechend den in Abb. 3.14 gezeigten Typen erwünscht (dies führt auf die sogenannte “HK-Vorzeichenabbildung”, *HK sign map*), so muß beachtet werden, dass die dort zugrundegelegte Signum-Funktion ersetzt werden muß durch

$$\text{sgn}_\varepsilon := \begin{cases} -1 & x < -\varepsilon \\ 0 & \text{für } -\varepsilon \leq x \leq \varepsilon \\ 1 & x > \varepsilon \end{cases}, \quad (3.17)$$

wobei $\varepsilon \geq 0$ ein Toleranzparameter ist. Für $\varepsilon = 0$ ergibt sich die bekannte Signum-Funktion.

Abb. 3.15 zeigt Krümmungskarten basierend auf 3×3 -Ableitungsmasken, wobei die acht möglichen Klassen in “konvexe”, “konkave” und “ebene” Punkte zusammengefasst wurden. Man erkennt, dass konvexe und konkave Kanten des Dachs zu einer entsprechenden Klassifikation führen. Bruchkanten erzeugen häufig dicht benachbarte konvexe und konkave Punkte. Ebene Flächen des Dachs führen zu der entsprechenden Klassifikation (Abb. 3.15(d)), allerdings sind die erhaltenen Regionen oftmals fragmentiert und mit einzelnen, fehlerhaften Punkten durchsetzt. Insbesondere im unteren Teil der Abbildung führt die komplexe Dachstruktur zu einer nicht nachvollziehbaren Krümmungskarte.

Um zu einem besseren Ergebnis zu gelangen, hat Besl [1988] einen Ansatz vorgeschlagen, welcher auf der Schätzung von Polynomen basiert. Anstatt die diskrete Ableitung über die Faltung mit Ableitungsmasken zu berechnen, werden hier im ersten Schritt durch eine kleinste-Quadrate-Schätzung die Parameter eines Polynoms ψ bestimmt. Im zweiten Schritt erfolgt dann die Ermittlung der Ableitungen des – nun analytisch vorliegenden – Polynoms an der entsprechenden Stelle.

Um eine einfache Behandlung zu ermöglichen, wird ein lokales Koordinatensystem um die Stelle angenommen, für welche die diskreten Ableitungen berechnet werden sollen. In Abb. 3.16 wird der eindimensionale Fall illustriert, bei welchem u die Abszissenwerte $u \in U = \{-M, -M+1, \dots, M\}$ annimmt. Des weiteren erfolgt die Darstellung der zu schätzenden Funktion ψ in Form einer Summe von Basisfunktionen

$$\psi(u) = \sum_{i=0}^2 a_i \psi_i(u) \quad (3.18)$$

mit

$$\psi_0(u) := 1, \quad \psi_1(u) := u, \quad \psi_2(u) := u^2 - \frac{M(M+1)}{3},$$

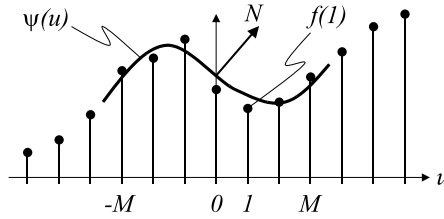


Abbildung 3.16: Illustration zur Approximation nach Besl.

welche den Vorteil besitzen, dass sie in Bezug auf die folgende Definition des Skalarprodukts zwischen zwei beliebigen Funktionen f und g

$$\langle f, g \rangle := \sum_{u \in U} f(u) \cdot g(u)$$

orthogonal sind, d.h. $\langle \psi_i, \psi_j \rangle = 0$ für $i \neq j$ und $\langle \psi_i, \psi_j \rangle \neq 0$ sonst. Um orthonormale Basisfunktionen zu erhalten, müssen die Basisfunktionen noch normiert werden:

$$b_i := \psi_i / \langle \psi_i, \psi_i \rangle, \quad 0 \leq i \leq 2,$$

wodurch $\langle \psi_i, b_j \rangle = \delta_{ij}$ (δ_{ij} Kronecker-Symbol) wird. Die kleinste-Quadrate-Schätzung für die Koeffizienten a_i führt somit auf eine Einheitsmatrix als Normalgleichungsmatrix, und die Koeffizienten a_i ergeben sich direkt aus dem Absolutglied des Normalgleichungssystems zu

$$a_i = \langle f, b_i \rangle = \sum_{u \in U} f(u) \cdot b_i(u). \quad (3.19)$$

Der Ansatz der Funktion $\psi(u)$ als Polynom zweiten Grades rührt daher, dass dies der geringstmögliche Grad ist, bei welchem eine Berechnung der zweiten Ableitungen (zur Bestimmung der Krümmung) noch sinnvoll ist.

Für zweidimensionale Funktionen erfolgt der Gl. 3.18 entsprechende Ansatz mittels eines bivariaten Polynoms

$$\psi(u, v) = \sum_{0 \leq i, j \leq 2, i+j \leq 2} a_{ij} \psi_i(u) \psi_j(v), \quad (3.20)$$

wobei sich analog zu Gl. 3.19 die Koeffizienten a_{ij} ergeben aus

$$a_{ij} = \langle f(u, v), b_i(u) b_j(v) \rangle = \sum_{(u, v) \in U^2} f(u, v) b_i(u) b_j(v). \quad (3.21)$$

Durch Ableiten der Funktion $\psi(u, v)$ aus Gleichung 3.20 an der Stelle $(u, v) = (0, 0)$ erhält man $\psi_u(0, 0) = a_{1,0}$, $\psi_v(0, 0) = a_{0,1}$, $\psi_{uu}(0, 0) = 2a_{2,0}$, $\psi_{uv}(0, 0) = a_{1,1}$, $\psi_{vv}(0, 0) = 2a_{0,2}$. Dadurch wird offensichtlich, dass sich der Gesamtvorgang der Schätzung lokaler, bivariater Polynome und der analytischen Bestimmung der Ableitungen auf die Faltung der zu approximierenden Funktion $f(u, v)$ mit Masken reduziert, welche entsprechend Gleichung 3.21 aus den Basisfunktionen $b_i(u) \cdot b_j(v)$ gewonnen werden. Analog zu Gleichung 3.16 erhält man so z.B. für die Maskengröße 7 ($M = 3$):

$$\begin{aligned} d_0 &:= \frac{1}{7}(1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)^{\mathbf{T}} \\ d_1 &:= \frac{1}{28}(-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3)^{\mathbf{T}} \\ d_2 &:= \frac{1}{84}(5, 0, -3, -4, -3, 0, 5)^{\mathbf{T}} \end{aligned} \quad (3.22)$$

und daraus die Masken

$$D_u := d_0 d_1^{\mathbf{T}}, \quad D_v := d_1 d_0^{\mathbf{T}}, \quad D_{uu} := 2d_0 d_2^{\mathbf{T}}, \quad D_{vv} := 2d_2 d_0^{\mathbf{T}}, \quad D_{uv} := d_1 d_1^{\mathbf{T}}, \quad (3.23)$$

welche somit trivialerweise separierbar sind. Die Masken führen neben der Ableitung auch eine Glättung durch, deren Stärke sich über die Maskengröße $2M + 1$ regulieren läßt.

Abb. 3.17 zeigt Krümmungskarten, welche unter Verwendung der Masken aus Gleichungen 3.22, 3.23 berechnet wurden. Im Unterschied zu den in Abb. 3.15 dargestellten Ergebnissen fällt die geringere Anfälligkeit gegenüber Rauschen auf. Des weiteren sind Dachkanten und ebene Flächen deutlicher zu erkennen. Im Unterschied zu Abb. 3.15 ist auch die grobe Form des Dachs im unteren Teil der Abbildung ersichtlich.

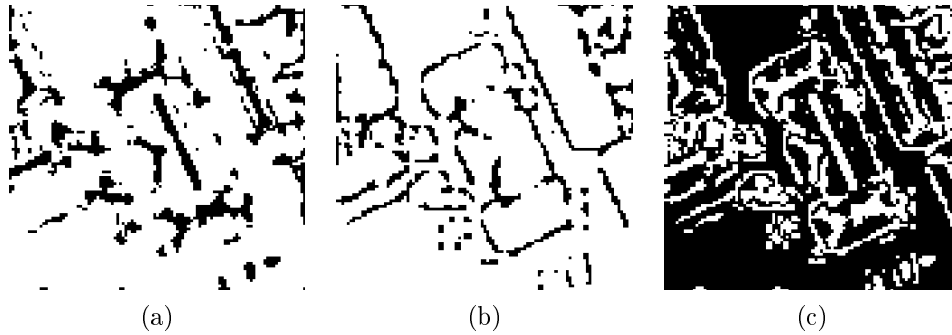


Abbildung 3.17: “Konvexe”, “konkave” und “ebene” Oberflächenpunkte (vgl. Abb. 3.15), ermittelt durch den Ausgleichungsansatz nach Besl mit einer Maskengröße von 7 ($M = 3$).

3.5.3 Diskussion

In der vorgestellten Form führt die krümmungsbasierte Segmentierung zunächst zu einer punktweisen Klassifikation von regularisierten DOM. Obwohl bei einer Zusammenfassung von Klassen in “konvexe”, “konkave” und “ebene” Punkte die Strukturen von Dächern erkennbar sind (Abb. 3.15, 3.17) ist doch anzumerken, dass eine *direkte* Verwendung dieser Ergebnisse, z.B. im Rahmen einer Analyse von zusammenhängenden Komponenten (connected component analysis) nicht erfolgversprechend erscheint. Insbesondere führt der Einsatz von großen bzw. glättenden Masken, welche für die Rauschunterdrückung günstig sind, zu einer Unempfindlichkeit gegenüber feinen Dachstrukturen. Dadurch werden einerseits “konvexe” und “konkave” Regionen unterbrochen, so dass Brüche und Knicke in der Dachstruktur (z.B. Giebel) nicht zuverlässig extrahiert werden können. Auf der anderen Seite führen unterbrochene Segmentierungen dieser Regionen zu fehlerhaften zusammenhängenden ebenen Regionen. Beispielsweise läßt sich in Abb. 3.17(c) erkennen, dass in der Mitte des Dachs vier Regionen zusammenhängen, obwohl ihre Normalenvektoren wesentlich verschieden sind. Die Wahl von ε in Gl. 3.17 hat zudem einen deutlichen Einfluß auf den Verlauf von Regionengrenzen.

Von Besl [1988] wird deshalb vorgeschlagen, die durch eine Zusammenhangsanalyse gewonnenen Regionen zunächst auf Kernregionen zu reduzieren, welche anschließend wieder mittels eines Bereichswachstumsverfahrens expandiert werden. Vereinfachend besteht diese Vorgehensweise aus den folgenden Schritten (Abb. 3.18):

1. Berechne aus dem gegebenen DOM eine Krümmungskarte.
2. Iteriere:
 - (a) Extrahiere Regionen R_i mittels einer Zusammenhangsanalyse.
 - (b) Wähle aus allen Regionen die größte Region R_i aus.
 - (c) Reduziere R_i mittels Erosion, bis eine Saat-Region R_i^0 erhalten wird, deren Größe (Punktzahl) gerade noch über einem vorgegebenen Schwellwert liegt.
 - (d) Verwende ein Bereichswachstumsverfahren (Abschnitt 3.4.2), welches iterativ Punkte zu R_i^0 hinzufügt, solange ein Kompatibilitätskriterium erfüllt ist.
 - (e) Akzeptiere die endgültig erhaltene Region R_i^k und streiche die Menge ihrer Punkte aus der Liste verbliebener Punkte.

Als Kompatibilitätskriterium im k -ten Schritt des Algorithmus eignet sich hierbei der Abstand der DOM-Punkte von einer Fläche, die auf der Basis der Punkte von R_i^{k-1} geschätzt wird. Von Besl & Jain [1988] werden für die Fläche bivariate Polynome angesetzt. Der Grad der Polynome beginnt dabei bei eins und wird im Laufe des Bereichswachstums bei Bedarf erhöht (*variable order surface fitting*).

Im Kontext der Extraktion von Dachflächen ist dagegen eine Beschränkung auf ebene Flächen (bilineare Polynome) günstig. Die Saatregionen können in diesem Fall auf Basis aller Regionen R_i mit $sgn_\varepsilon(H) = sgn_\varepsilon(K) = 0$ gewählt werden [Ameri 2000].

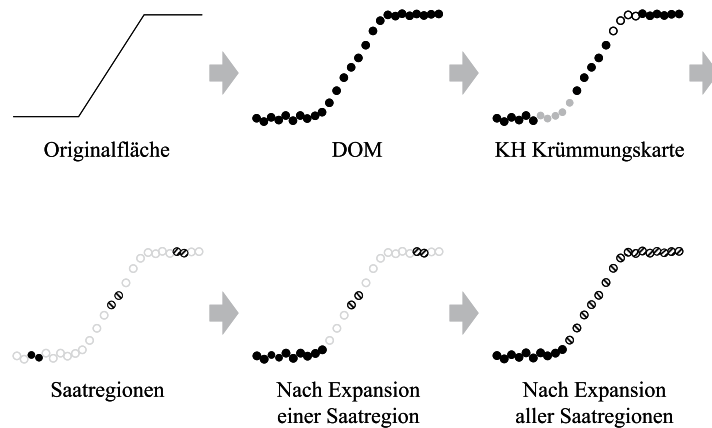


Abbildung 3.18: Illustration zur Regionenextraktion auf der Basis von Kernregionen.

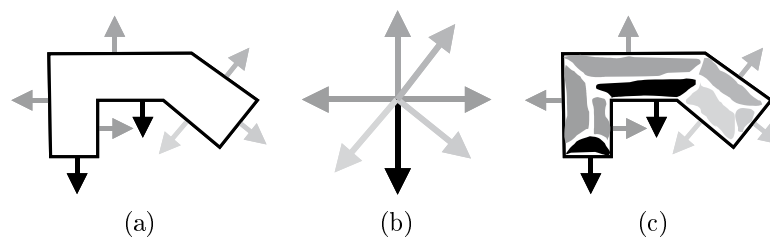


Abbildung 3.19: Illustration zur Richtungssegmentierung. (a) Die Normalenvektoren zu den Grundrisskanten werden berechnet. (b) Daraus werden n Äquivalenzklassen abgeleitet. (c) Die DOM-Punkte werden den Repräsentanten der Äquivalenzklassen zugeordnet.

3.6 Richtungssegmentierung

Dieses Verfahren führt Grundrissinformation in den Segmentierungsprozess mit ein [Haala & Brenner 1997]. Es arbeitet in zwei Schritten (Abb. 3.19):

1. Analyse des gegebenen Grundrisses. Die Normalenvektoren aller Grundrisskanten werden in n Äquivalenzklassen aufgeteilt. Im Fall eines einfachen Gebäudes auf rechteckigem Grundriss erhält man z.B. $n = 4$ jeweils um 90 Grad verschiedene Normalenvektoren.
2. Die Normalenvektoren aller DOM-Punkte werden bestimmt (Gl. 3.15) und einem Repräsentant einer Äquivalenzklasse zugeordnet (Gl. 3.10).

Das Verfahren entspricht also einer clusterbasierten Segmentierung, wobei die Clusterzentren jedoch nicht aus dem DOM, sondern aus dem Grundriss gewonnen werden. Da die Richtungen der Grundrisskanten normalerweise sehr exakt vorliegen, kann zum Finden der Äquivalenzklassen (Cluster) ein einfacher Algorithmus eingesetzt werden.

Da das Verfahren die Normalenvektoren der Regionen nicht berechnet, sondern nur im DOM “wiederfinden” muss, arbeitet es relativ stabil auch bei DOM von geringer Qualität. Des weiteren ist der Algorithmus konzeptionell einfach und besitzt wenige Schwellwerte (Zwei Winkelschwellwerte für die Bildung von Äquivalenzklassen und für die Normalenvektorkompatibilität). Zu beachten ist, dass die Menge aller zu einem Normalenvektor kompatiblen DOM-Punkte selbstverständlich in unzusammenhängende Regionen zerfallen kann, welche zu verschiedenen Seiten des Grundrisses gehören.

Abb. 3.20 zeigt Ergebnisse des Algorithmus. Vergleicht man diese mit Ergebnissen eines Bereichswachstumsverfahrens (Abb. 3.7), so stellt man eine große Ähnlichkeit fest, obwohl der Algorithmus zur Richtungssegmentierung wesentlich einfacher ist.

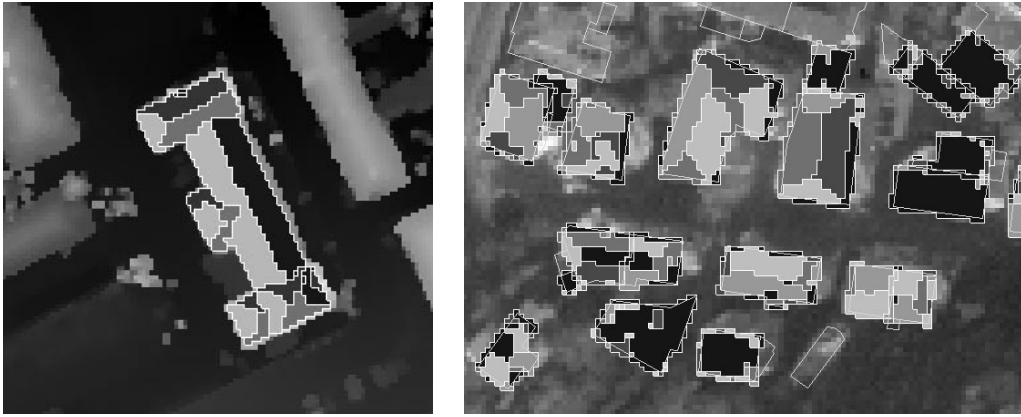


Abbildung 3.20: Ergebnisse einer Richtungssegmentierung.

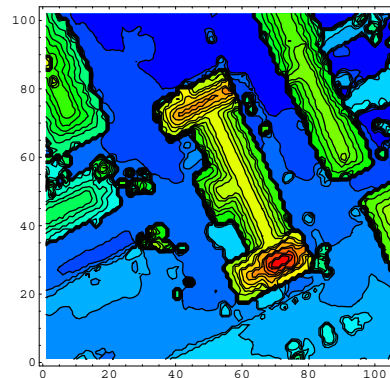


Abbildung 3.21: Höhenliniendarstellung eines DOM in 1 m-Intervall.

3.7 Segmentierung basierend auf Höhenlinien

Auch dieser Ansatz verwendet Grundrisse als Zusatzinformation. Betrachtet man zunächst Höhenlinien im Bereich eines Gebäudes, so stellt man fest, dass diese (trotz der relativ geringen Auflösung von einem Meter) die Struktur des Gebäudes relativ gut wiedergeben (Abb. 3.21). Die Idee der Höhenliniensegmentierung ist nun, ausgehend von einer Kante des Grundrisses die zugehörigen Höhenlinien zu verfolgen. Jeweils eine zugehörige Schar von Höhenlinien spannt dann eine Dachfläche auf (Abb. 3.22).

Die Frage ist nun, wie die zu einer Grundrisskante gehörenden Höhenlinien aus einem DOM extrahiert werden können. Gewinnt man zunächst aus den diskreten Datenpunkten des DOM eine Approximation der Höhenlinien (wie in Abb. 3.21), ist anschließend die Segmentierung dieser Kurven in gerade, zu Grundrisskanten gehörende Linienstücke erforderlich. Die genaue Bestimmung der Grenzen von Dachflächen würde zudem sehr dicht gewählte Höhenlinien erfordern.

Wesentlich einfacher ist der folgende Ansatz. Er entspricht einem Bereichswachstum, ausgehend von den Grundrisskanten. Dabei wird eine Zuordnung jedes DOM-Punkts zu einer Grundrisskante getroffen. Der Algorithmus führt die folgenden Schritte durch (Abb. 3.23):

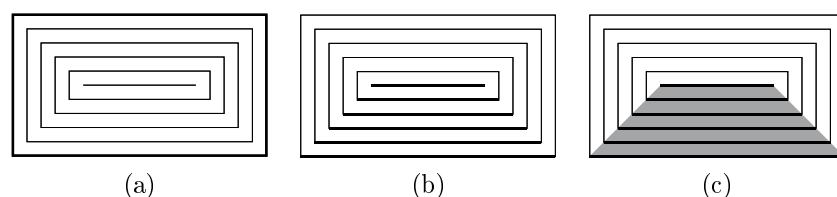


Abbildung 3.22: Illustration zum Prinzip der Höhenliniensegmentierung. (a) Höhenlinien bei einem einfachen Walmdach. (b) Zu einer Grundrisskante zugehörige Höhenlinien. (c) Hierdurch aufgespannte Dachfläche.

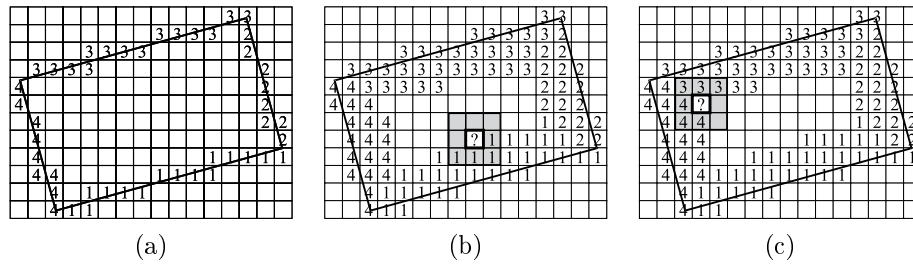


Abbildung 3.23: Zuordnung der DOM-Punkte zu Grundrisskanten bei der Höhenliniensegmentierung. Punkte auf der Grundrisskante werden vorab zugeordnet (a). (b) Punkt mit nur einer Zuordnung bzw. mit mehreren Zuordnungen (c) in der Nachbarschaft.

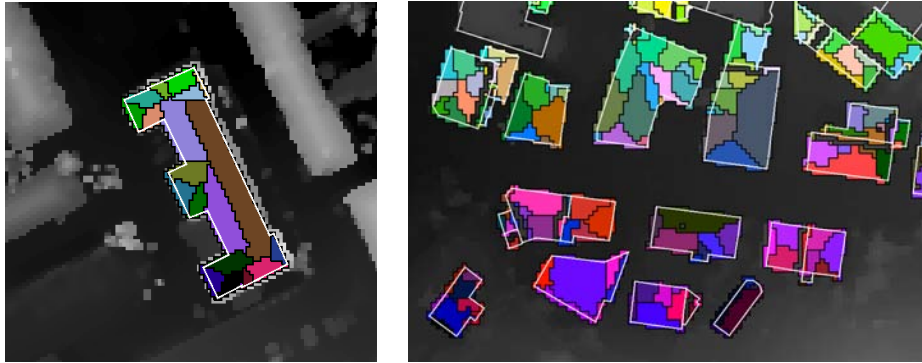


Abbildung 3.24: Ergebnisse der Höhenliniensegmentierung.

1. DOM-Punkte, welche von Grundrisskanten geschnitten werden, werden diesen zugeordnet. Die übrigen Punkte besitzen zunächst keine Zuordnung (Abb. 3.23(a)).
2. Alle DOM-Punkte p_i innerhalb des betrachteten Grundrisses werden in aufsteigender Reihenfolge ihres Höhenwerts betrachtet:
 - (a) Befinden sich in der (8-) Nachbarschaft des Punkts p_i nur Punkte, welche der Grundrisskante j zugehören, dann wird p_i ebenfalls j zugeordnet (Abb. 3.23(b)).
 - (b) Befinden sich in der (8-) Nachbarschaft Punkte, welche mehreren Grundrisskanten angehören, so wird die Auswahl unter der häufigsten (j) und zweithäufigsten (k) Kante getroffen anhand der Normalenvektorkompatibilität (Gl. 3.10), siehe Abb. 3.23(c).
 - (c) Befindet sich kein zugeordneter Punkt in der Nachbarschaft, dann besitzt das DOM an dieser Stelle ein lokales Minimum. In diesem Fall wird die Zuordnung von p_i zurückgestellt.

Ein Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass das Resultat der Segmentierung aus Regionen besteht, deren Zugehörigkeit zu den Grundrisskanten bereits feststeht. Anhand Abb. 3.24 wird jedoch auch deutlich, wie abhängig der Algorithmus (zumindest in dieser Form) von den bereitgestellten Grundrissen ist. Die große Anzahl von Regionen in der Segmentierung von Abb. 3.24 rührt daher, dass der Algorithmus für jede Grundrisskante eine eigene Region erzeugt. Betrachtet man Abb. 3.25, so erkennt man, dass die verwendeten Grundrisse viele nicht erforderliche Punkte enthalten, welche kollineare Segmente trennen. Durch eine vorgeschaltete Prozessierung der Grundrisse (Entfernung von Punkten auf kollinearen Segmenten) ließe sich das Ergebnis daher verbessern.

3.8 Diskussion

In diesem Kapitel wurden verschiedene Segmentierverfahren für DOM vorgestellt. Die Verfahren können entsprechend ihrem Funktionsprinzip oder ihrer Eingangsdaten klassifiziert werden. Es wurden sowohl Verfahren basierend auf DOM als auch basierend auf DOM in Verbindung mit Grundrissinformation vorgestellt.

Dabei führt die Integration von Grundrissen in die Segmentierung zu erstaunlich einfachen und dennoch leistungsfähigen Algorithmen. Nachteilig an derartigen Ansätzen ist jedoch, dass dadurch die allgemeine Segmentierung eingeschränkt wird. So kann die Richtungssegmentierung keine Dachflächen segmentieren, welche nicht

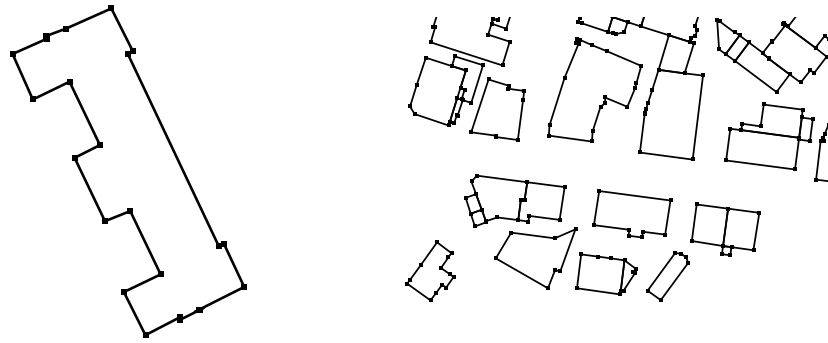


Abbildung 3.25: In der Höhenliniensegmentierung verwendete Grundrisse mit eingezeichneten Eckpunkten. Deutlich erkennbar sind die “unnötigen” Ecken, welche zu der großen Anzahl von Regionen in Abb. 3.24 führen.

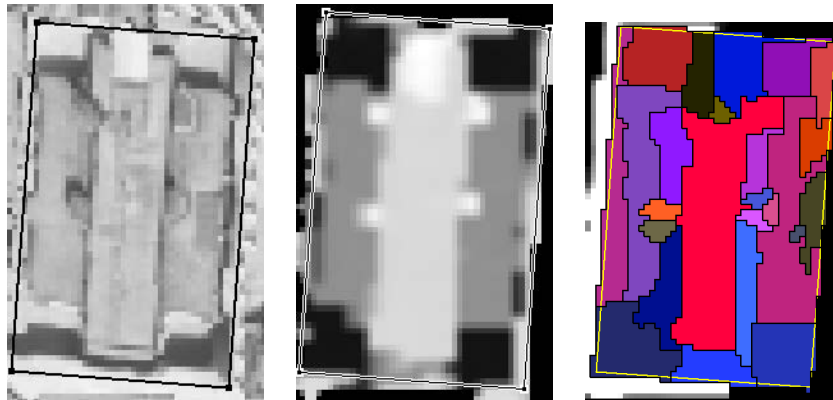


Abbildung 3.26: Ergebnis einer Ebenensegmentierung bei einer fragmentierten Dachstruktur eines Hochhauses mit Flachdach. (a) Dach im Orthobild mit überlagertem Grundriss. (b) Darstellung im DOM. (c) Regionen der Ebenensegmentierung. Die wesentlichen Flächen in den vier Ecken und in der Mitte wurden erfasst, die komplexe Dachstruktur führt jedoch zu vielen kleinen, zusätzlichen Regionen.

parallel zu einer der Grundkanten sind und die Höhenliniensegmentierung kann nur Dachflächen finden, welche zu einer Kante des Grundrisses gehören. Nachfolgende Schritte, welche eine Interpretation der Daten vornehmen müssen, können so nicht auf der maximal möglichen Information aufsetzen. Aus diesem Grund sind die Verfahren eher dann geeignet, wenn allgemeine Segmentierverfahren aufgrund von geringer Auflösung oder Qualität des DOM zu keinem befriedigenden Ergebnis führen.

Die Auflösung von DOM spielt eine wesentliche Rolle für die Segmentierung. Es ist offensichtlich, dass bei einer Messpunktdichte von etwa einem Punkt pro Quadratmeter viele Strukturen nicht mehr erkennbar sind. Beispielsweise fällt es schwer, die Regionen relativ kleiner Dachflächen von Ausbauten und Dachgauben zu segmentieren. Selbstverständlich nimmt auch die Genauigkeit geschätzter Parameter ab, wenn nur kleine Regionen (wenige Beobachtungen) vorliegen. Eine Lösung dieses Problems besteht in der Verwendung von Sensoren mit höherer Messpunktdichte [Axelsson 1998].

Auch die zur Ableitung eines regularisierten Rasters verwendeten Algorithmen beeinflussen das Segmentierungsergebnis wesentlich. Durch die Interpolation der Daten wird eine Glättung herbeigeführt, welche die Übergänge zwischen Dachflächen verwischt und die Effekte von Sprungstellen auf die DOM-Punkte in der Nachbarschaft verteilt. So führen etwa einzelne Schornsteine (Grundfläche kleiner als 1 m^2) zu Störungen mehrerer DOM-Punkte (d.h. bei einer DOM-Auflösung von einer Messung pro Quadratmeter sind mehrere Quadratmeter betroffen). In einzelnen Fällen kann eine Vielzahl von Dachaufbauten eine Segmentierung stark erschweren. Hiervon sind besonders Flachdächer betroffen, bei welchen nicht selten Schächte, Dachzugänge und Aggregate auf der eigentlichen Dachfläche untergebracht sind (Abb. 3.26).

4 Grundrisse

4.1 Einleitung

Zweidimensionale Gebäudegrundrisse können einen sehr wesentlichen Beitrag zur Rekonstruktion dreidimensionaler Modelle liefern⁸. Die Vorteile einer Rekonstruktion basierend auf bestehenden Grundrissen sind:

Vereinfachung der Rekonstruktion. Diese hängt damit zusammen, dass es sich bei Grundrissen um *interpretierte* Daten handelt. Das Problem der *Erfassungsgeneralisierung* wurde somit bereits bei der Erstellung der Daten (durch einen Operateur) gelöst. Rückblickend auf Abb. 2.1 (Seite 12) kann man feststellen, dass Gebäudegrundrisse die einzige qualifizierte Datenquelle darstellen, deren Existenz man (unter Umständen, s.u.) voraussetzen kann.

Die Gebäuderekonstruktion kann unterschiedlich stark an die Information aus Karten gekoppelt werden. Es ist etwa vorstellbar, den Schritt der *Gebäudedetektion* mittels Karten zu unterstützen. Auch könnten allgemeine Aussagen, wie die "Hauptrichtung" des Gebäudes oder Bedingungen über die vorzugsweise Lage von Strukturen abgeleitet werden. Beispielsweise sind die Orientierungen von Trauf- und Giebelkanten bevorzugt in Richtung von Grundrisskanten; eine extrahierte Kante in der Nähe des (aus der Karte bekannten) Gebäuderands ist wahrscheinlicher eine Trauf- denn eine Giebelkante. Auf der anderen Seite kann eine starke Berücksichtigung der Karteninformation erfolgen, etwa indem die Übereinstimmung der zwei- und dreidimensionalen Lage gefordert wird. In diesem Fall kann man die dreidimensionale Gebäudestruktur ausgehend vom Grundriss konstruieren, wobei Information anderer Quellen hinzugezogen wird.

Sicherstellung der Datenintegrität. Die Erfassung von dreidimensionaler Geometrie auf Basis von zweidimensionalen Grundrissen erzeugt eine direkte (1:1) Korrespondenz der beiden Darstellungen. Damit ist es später möglich, über die dreidimensionale Repräsentation auf Attribute und Funktionalität zugreifen zu können, welche ursprünglich nur für das entsprechende zweidimensionale Objekt vorhanden sind.

Wird die dreidimensionale Rekonstruktion dagegen getrennt vorgenommen, erhält man zwei verschiedene Datensätze, die in der Regel nicht einfach zu integrieren sind. Beispielsweise kommt es häufig vor, dass ein Haus zwei Hälften besitzt, die unterschiedlichen Eigentümern gehören. Dementsprechend existieren in der Liegenschaftskarte zwei getrennte Objekte. In DOM oder Luftbildern lassen sich die Eigentumsverhältnisse jedoch nicht erkennen und die Rekonstruktion liefert ein einziges Objekt. Somit besteht eine n:1 Beziehung zwischen den Objekten der Karte und der dreidimensionalen Rekonstruktion. Umgekehrt kann ein einzelnes Objekt der Karte eine komplexe Dachstruktur bestehend aus mehreren, unterschiedlichen Dächern besitzen, die als verschiedene dreidimensionale Objekte rekonstruiert werden, so dass eine 1:m Beziehung besteht. Insgesamt müsste eine Integration beider Datensätze also n:m Beziehungen berücksichtigen, was zu erheblichen Problemen führt⁹.

Kontrolle bestehender Grundrissdaten. Im Zuge einer grundrissbasierten Gebäuderekonstruktion lassen sich auch Plausibilitätsbedingungen überprüfen. Dadurch können Fehler in den Grundrissdaten aufgedeckt werden. Die Verarbeitung führt also auch zu einem Nutzen für den Originaldatensatz.

Der größte Nachteil grundrissbasierter Verfahren ist selbstverständlich, dass die Existenz entsprechender Daten vorausgesetzt wird. In vielen hochentwickelten Industriestaaten ist dies der Fall, wobei der Übergang von analogen Karten und Plänen zur digitalen, vektorisierten Repräsentation innerhalb von GIS nicht immer vollzogen ist. Beispielsweise sind in der Bundesrepublik Deutschland gegenwärtig über 40% der Fläche in der *Automatisierten Liegenschaftskarte (ALK)* erfasst. Dieses Vorhaben wurde von der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) seit 1977 zur automatisierten Führung des Liegenschaftskatasters entwickelt. Als Datenaustauschformat steht die *Einheitliche Datenbankschnittstelle (EDBS)* zur Verfügung. Daneben existieren regional weitere Datensätze, beispielsweise ist für das Gebiet der Stadt Stuttgart eine digitale Stadtgrundkarte vorhanden (vgl. Abb. 5.12).

⁸Die Nutzung im Rahmen der Segmentierung wurde im vorigen Kapitel bereits vorgestellt.

⁹Zu beachten ist, dass eine Integration auf Basis der Geometrie erfolgen muss. Die zweidimensionalen Grundrisse werden jedoch – beispielsweise aufgrund andersartiger Generalisierung – verschieden sein von der Projektion der dreidimensionalen Rekonstruktion. Die Schwierigkeit besteht also darin, Unterschiede in der Geometrie entweder auf strukturelle Unterschiede zurückzuführen oder sie im Rahmen der geometrisch erlaubten Abweichungen zu tolerieren [Uitermark, van Oosterom, Mars & Molenaar 1998].

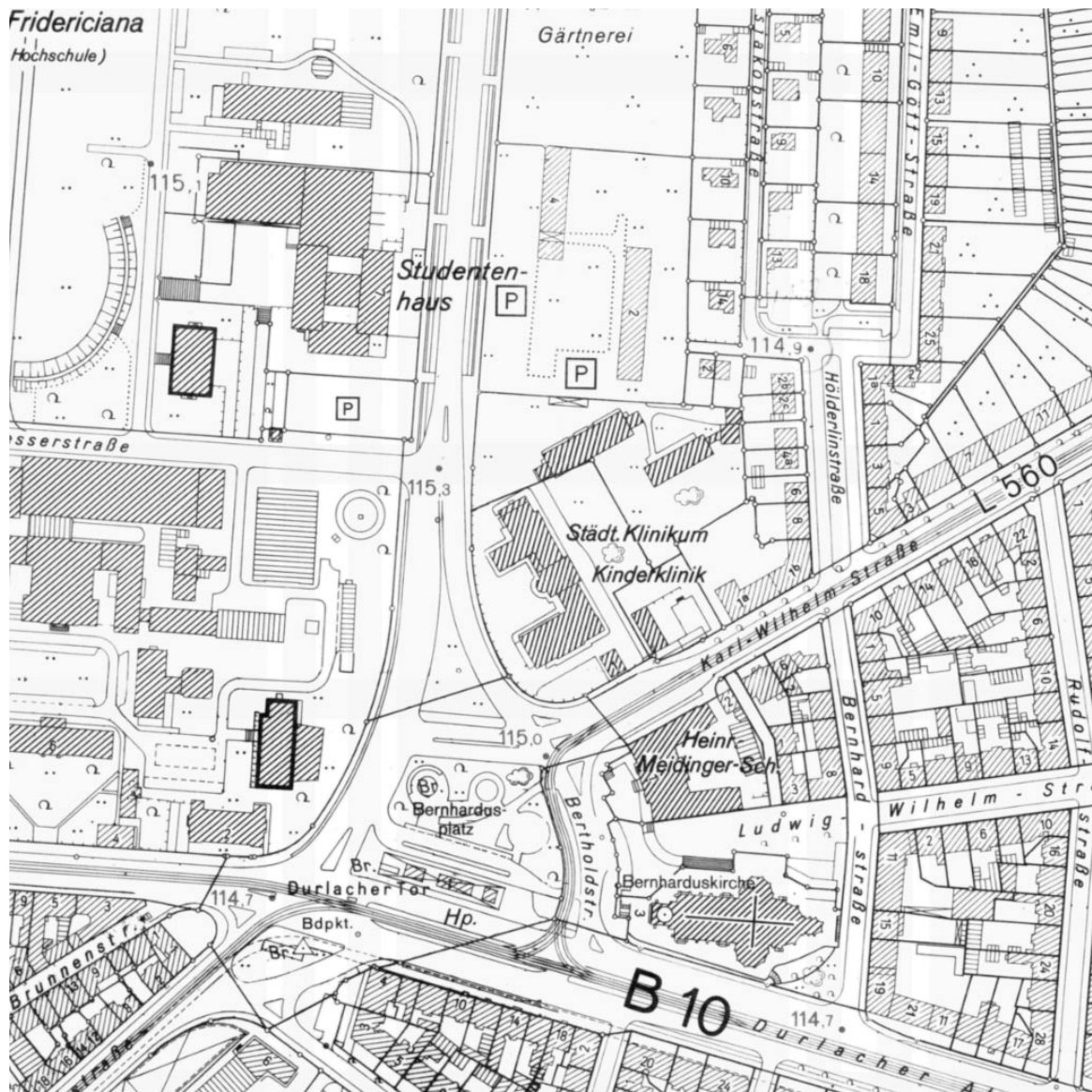


Abbildung 4.1: Ausschnitt aus der Deutschen Grundkarte 1:5000 (DGK 5, gezeigt ist das Gebiet um das Durlacher Tor in Karlsruhe).

Liegen die Daten nicht in digitaler Form vor, so kommt eine Digitalisierung aus existierenden Karten in Betracht, in der Bundesrepublik Deutschland etwa der Deutschen Grundkarte DGK 5 (Maßstab 1:5000, siehe Abb. 4.1). Eine Automatisierung dieses Vorgangs ist teilweise möglich. Entsprechende Ansätze wurden von Illert [1990], Mayer [1993] und Carosio [1995] untersucht.

Die Nutzung digitaler Grundrisse kann aus verschiedenen Gründen erschwert werden. Zunächst stellt sich die Frage nach der *Korrektheit* der Daten. Dies kann einerseits die *Aktualität* betreffen, d.h. an sich korrekt erfasste Daten können aufgrund von Änderungen am Objekt selbst im Laufe der Zeit fehlerhaft werden. Daneben existieren jedoch auch Fehler, welche bereits bei der Erfassung auftreten (Abb. 4.2), die jedoch teilweise durch Funktionen heutiger GIS behoben werden können. Ein Grundproblem dabei ist, dass digitale Karten bislang oft ausschließlich zum Zwecke der Darstellung verwendet wurden – Fehler wie Einzellinien oder nicht geschlossene Polygone werden jedoch erst erkannt, wenn die Daten automatisiert weiterverarbeitet werden sollen. Der überaus schwierigste Aspekt ist jedoch die *Generalisierung*. Häufig können zwei Grundrisse desselben Objekts als korrekt angesehen werden, obwohl bei einem direkten Vergleich erhebliche Differenzen festgestellt werden. Dies ist einerseits von Vorteil, erlaubt es doch, durch die Generalisierung der Grundrisse auch die Generalisierung der dreidimensionalen Rekonstruktion zu steuern. Andererseits stellt es ein Problem dar, wenn Grundrisse in zu hohem Detaillierungsgrad vorliegen, und die benötigten Informationen über das Dach in den zusätzlich herangezogenen Quellen (DOM, Luftbild) mangels Auflösung nicht beobachtet werden können. Eine Lösung für

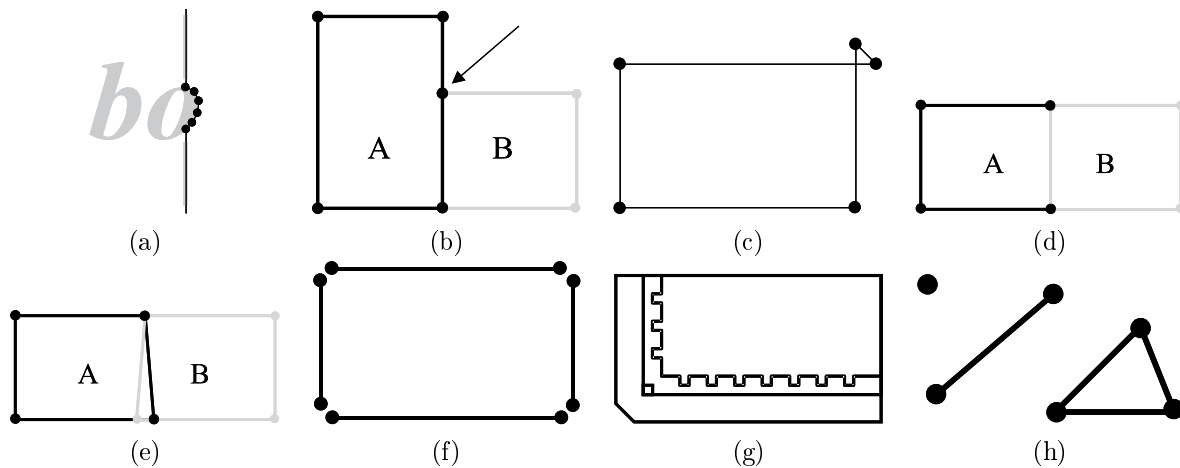


Abbildung 4.2: Beispiele schwierig nutzbarer digitaler Grundrisse. (a) Fehlerhafte Digitalisierung bei der automatischen Raster zu Vektor-Konversion aufgrund von überlagertem Text. (b) A enthält einen überflüssigen Punkt im Grundriss (evtl. aufgrund eines angrenzenden Gebäudes B). (c) Digitalisierfehler beim Schließen eines Polygons. (d) Polygon A ist nicht geschlossen (in einer Darstellung aufgrund des Polygons B nicht erkennbar). (e) Falsch digitalisierte Grundrisse, dadurch Überlappung. (f) Darstellung in Form von einzelnen Linien statt geschlossener Polygone. (g) Mehrfachrepräsentation von Gebäuden durch verschiedene, überlappende Polygone. (h) Digitalisierfehler: Vereinzelt auftretende Punkte, Linien und Dreiecke.

dieses Problem kann die automatische Generalisierung von (zweidimensionalen) Grundrissen sein. Unterschiede in Grundrissdaten lassen sich zurückführen auf (vgl. [Ragia & Winter 1998])

- die jeweils eingesetzte *Erfassungstechnik*. Dies betrifft sowohl die verwendeten Datenquellen (Abschnitt 2.1) und Auflösungen als auch die zur Extraktion von Information eingesetzte Methode. Beispielsweise führt eine Erfassung durch Messung von Einzelpunkten in der Regel zu anderen Ergebnissen als eine Messung in Form struktureller Einheiten (im Kontext von Grundrissen etwa rechteckiger Primitive).
- verschiedene *Anforderungen*, die im Hinblick auf konkrete Anwendungen definiert werden. Hierdurch wird i.a. eine bewusste Generalisierung der Daten herbeigeführt.
- *Mess-, Numerik- und Diskretisierungsfehler*.

Ragia & Winter [1998] stellen Methoden zum Vergleich verschiedener Grundrissdaten vor. Dabei unterscheiden sie zwischen *topologischen* Differenzen, welche die interne Struktur und den Rand von Regionen betreffen, sowie *geometrischen* Abweichungen. Ersteres wird durch den Vergleich von *Regionenadjazenzgraphen* beurteilt, welche auf der Basis der Grundrisse und ihrer Relationen *Berührung*, *schwache Überlappung* und *starke Überlappung* erstellt werden. Die geometrischen Unterschiede werden durch Betrachtung einer Distanzfunktion und ihres Histogramms erfasst. Diese Funktion wird aus der Mittelachse ermittelt, welche in der Differenz $(A \setminus B) \cup (B \setminus A)$ zweier Regionen A, B verläuft. Derartige Untersuchungen erlauben die Definition objektiver Maßzahlen und sind somit ein wichtiger Schritt in Richtung automatisierter Systeme.

4.2 Dachkonstruktion aus Grundrissen

4.2.1 Grundrisse und einfache Dächer

In dieser Arbeit werden nur stückweise lineare Grundrisse in Form von geschlossenen *Polygonzügen* P betrachtet. Diese bestehen aus n linearen Segmenten p_i , $1 \leq i \leq n$ und Polygonpunkten $v_{1,2}, \dots, v_{n-1,n}, v_{n,1}$ (Abb. 4.3(a)). Die Indizes gelten jeweils modulo n , so dass $v_{n,n+1}$ identisch ist mit $v_{n,1}$. Ein Polygonpunkt heißt *konvex*, wenn der im Polygon liegende Winkel seiner beiden angrenzenden Segmente kleiner als π und *konkav*, wenn er größer als π ist. Ein Polygon ist *konvex*, wenn alle seine Punkte konvex sind, und *konkav*, wenn mindestens ein konkaver Punkt enthalten ist.

Ein ausgehend von diesem Grundriss konstruiertes (einfaches) Dach besteht aus den (ebenen) Dachflächen Π_i , welche sich mit den Hauswänden in den Traufen P_i und Traufpunkten $V_{i,i+1}$ schneiden (Abb. 4.3(b)). Durch die

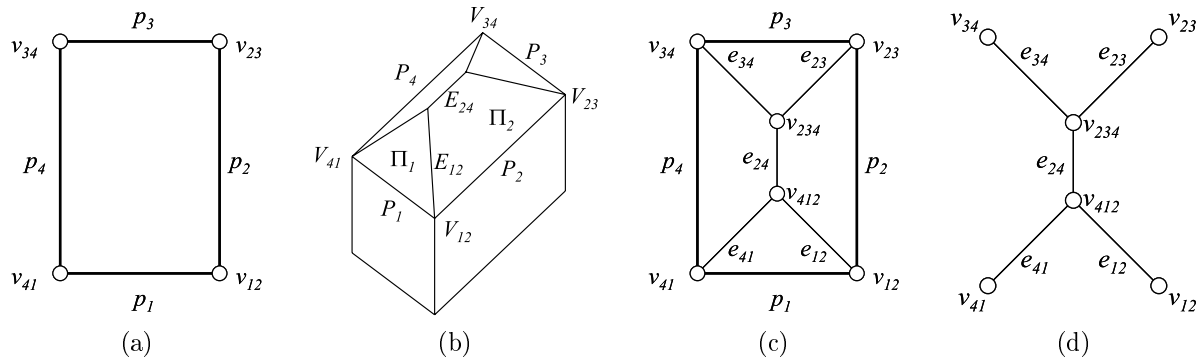


Abbildung 4.3: Verwendete Bezeichnungen bei Grundrissen und einfachen Dächern. (a) Grundriss mit Segmenten p_i und Punkten $v_{i,i+1}$. (b) Mögliches einfaches Dach auf der Basis von (a), mit Traufen P_i , Traufpunkten $V_{i,i+1}$ und ebenen Dachflächen Π_i . (c) Projektion des Dachs in die Grundrissebene. (d) Zugehöriger Graph G .

weiteren Schnitte der Ebenen Π_i erhält man Grate (z.B. E_{12}), Kehlen (an konkaven Punkten) und Firste (E_{24}). In die Grundrissebene projiziert ergeben sich die jeweils analog mit Kleinbuchstaben bezeichneten Punkte und Segmente (Abb. 4.3(c)).

Das in Abb. 4.3 gezeigte einfache Dach besitzt die Eigenschaften

- alle Traufen bzw. Traufpunkte haben dieselbe Höhe
- jede Traufe P_i ist Ursprung einer zugehörigen ebenen Dachfläche Π_i
- alle Dachflächen Π_i haben dieselbe Steigung.

Die dreidimensionale Form des Dachs lässt sich deshalb aus der projizierten Darstellung Abb. 4.3(c) vollständig ableiten, wenn Trauf- und Giebelhöhe (bzw. Traufhöhe und Dachneigung) angegeben werden. Steht zusätzlich die Grundhöhe zur Verfügung, erhält man durch Verlängern der Hauswände von der Trauf- bis zur Grundhöhe ein komplettes Hausmodell (Abb. 4.3(b)). Daraus kann man eine zweistufige Vorgehensweise zur Rekonstruktion von Gebäuden aus Grundrissen ableiten: Zunächst wird auf der Basis des Grundrisses die ebene Projektion der Kanten und Punkte abgeleitet, welche im zweiten Schritt anhand zusätzlicher Höheninformation zur dreidimensionalen Rekonstruktion erweitert werden.

Lässt man in Abb. 4.3(c) den ursprünglichen Grundriss weg (Abb. 4.3(d)), dann erkennt man, dass die projizierten Kanten und Punkte einen ebenen Graphen G darstellen. Dieser besteht aus den *Blättern* $v_{i,j}$, den *inneren Knoten* $v_{i,j,k}$ und den Kanten $e_{i,j}$. Betrachtet man die jeweiligen Indizes als Mengen, so verbindet die Kante e_A genau die Knoten v_B und v_C , wenn $A = B \cap C$. Der Graph G ist *zusammenhängend* und *zyklenfrei*, ist demnach also ein *Baum* [Diestel 1996].

4.2.2 Mittelachstransformation und Skelett

Wie erhält man aus einem gegebenen Grundriss einen Graphen G wie in Abb. 4.3(d)? Auf den ersten Blick mag es erscheinen, dass die Menge der Punkte von G identisch ist mit der *Mittelachstransformation* des Grundrisses P . Diese besteht aus der Menge der Punkte im Innern von P , für die kein eindeutiger nächster Nachbar auf P existiert. Man kann sie also erhalten, indem man für jeden Punkt im Innern von P den maximalen Inkreis bestimmt und die Zahl der Schnitte mit P feststellt. Liegt mehr als ein Schnitt vor, so ist der Punkt Bestandteil der Mittelachstransformation (Abb. 4.4(a)). Besitzt der Grundriss jedoch konkave Ecken (Abb. 4.4(b)), dann besteht die Mittelachstransformation sowohl aus geraden als auch aus parabolischen Kurven. Da gekrümmte Dachformen aufwendig zu realisieren sind, werden diese jedoch i.a. nicht eingesetzt.

Im Unterschied dazu besteht das *Skelett* eines Polygons ausschließlich aus geraden Liniensegmenten. Skelett und Mittelachstransformation sind identisch bei konvexen Grundrissen. Das Skelett ist auch in der darstellenden Geometrie unter dem Begriff der *Dachausmittlung* lange bekannt [Fucke, Kirch & Nickel 1989], wurde jedoch in jüngster Zeit “wiederentdeckt” und hinsichtlich seiner Eigenschaften untersucht [Aichholzer, Aurenhammer, Alberts & Gärtner 1995].

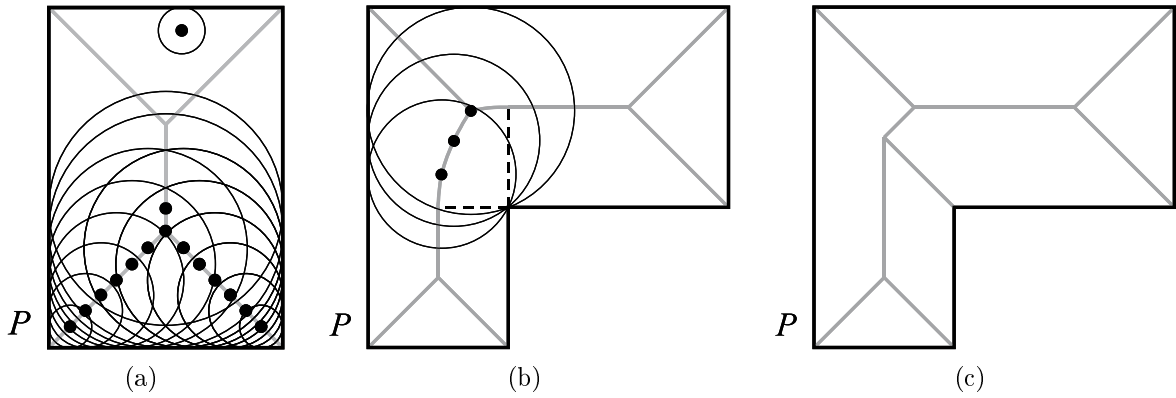


Abbildung 4.4: Mittelachstransformation und Skelett. (a) Die Mittelachstransformation besteht aus den Punkten in P , welche keinen eindeutigen nächsten Nachbarn auf P besitzen. (b) Bei konkaven Grundrissen P enthält die Mittelachstransformation auch parabolische Kurvenstücke. (c) Das Skelett besteht ausschließlich aus geraden Liniensegmenten.

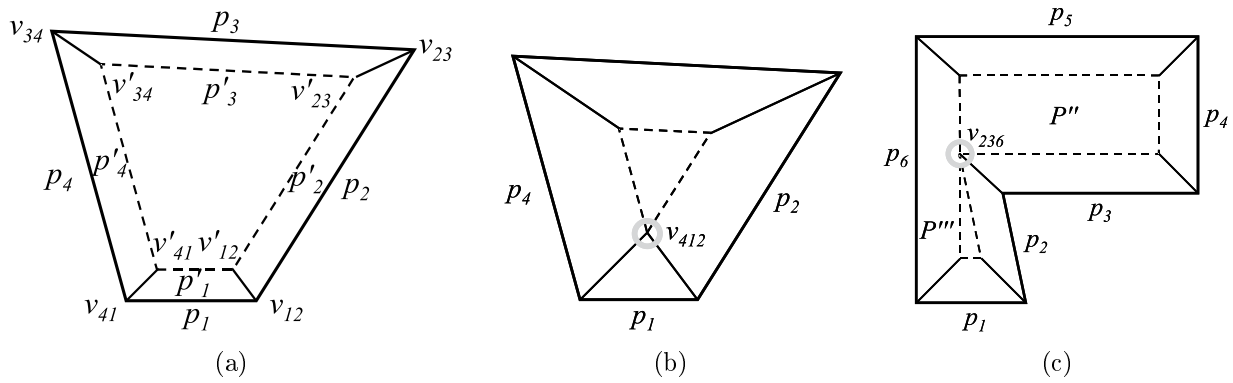


Abbildung 4.5: Konstruktion des Skeletts eines Polygons. (a) Polygon P und "verkleinertes" Polygon P' . (b) Situation 1: eine Seite von P' besitzt Länge null. (c) Situation 2: ein Polygonpunkt "trifft" eine gegenüberliegende Seite.

Das Skelett lässt sich konstruieren, indem man vom Polygon P ausgeht und dieses "schrumpft": parallel zu P wird ein kleineres Polygon P' konstruiert, dessen Seiten p'_i jeweils parallel und im gleichen Abstand sind zu p_i , und dessen Punkte v'_{ij} sich deshalb auf den jeweiligen Winkelhalbierenden durch v_{ij} befinden (Abb. 4.5(a)). Verkleinert man P' schrittweise, so kommt es zur Veränderung des Polygons:

1. Wenn eine Seite p'_i des n -seitigen Polygons P' die Länge null besitzt (Abb. 4.5(b)). In diesem Fall entsteht der innere Knoten $v_{i-1,i,i+1}$ und das Verfahren wird fortgesetzt mit einem Polygon P' mit $n - 1$ Seiten.
2. Wenn der Polygonpunkt $v'_{i,i+1}$ auf der Seite p'_k liegt (Abb. 4.5(c)). Dann entsteht der innere Knoten $v_{i,i+1,k}$ und die Seite k wird unterteilt. Dadurch entstehen zwei neue Polygone P'' und P''' (mit zusammen $n + 1$ Seiten), auf denen das Verfahren rekursiv fortgesetzt wird.

Liegt ein konvexes Polygon P vor, tritt Fall (2) nicht auf. Alle inneren Knoten sind dann Schnitte von Winkelhalbierenden von P bzw. P' . Das Skelett ergibt sich aus den erzeugten inneren Knoten v_{ijk} . Die Kanten bestehen aus allen Positionen, die von Knoten v'_{ij} während des "Schrumpfens" überstrichen wurden. Man erhält sie aus den Polygonknoten v_{ij} und den erzeugten inneren Knoten v_{ijk} direkt, indem jeweils zwei Knoten v_A und v_B durch eine Kante e_{ij} verbunden werden genau dann wenn $\{i, j\} \subseteq A \wedge \{i, j\} \subseteq B$.

Algorithmisch wird die Konstruktion des Skeletts durchgeführt, indem ein Parameter t eingeführt wird, welcher proportional zum Abstand von P' zu P ist. In jedem Schritt wird der kleinste Wert von t gesucht, für den eine Änderung des Polygons nach Fall (1) oder (2) eintritt. Ein entsprechender innerer Knoten wird generiert und das Verfahren wird fortgesetzt. Es terminiert, wenn in P' $n = 3$ Polygonseiten verbleiben, für die ein innerer Knoten erzeugt wird.

Interessanterweise wurde bislang kein effizienterer als dieser unmittelbar einsichtige Algorithmus gefunden. Verbesserungen betreffen lediglich die effiziente Verwaltung der Ereignisse nach Fall (1) und (2). Eppstein & Erickson [1999] haben dadurch eine (theoretische) Zeitkomplexität von $\mathbf{O}(n^{8/5+\varepsilon})$ erzielt. Insbesondere wurde kein

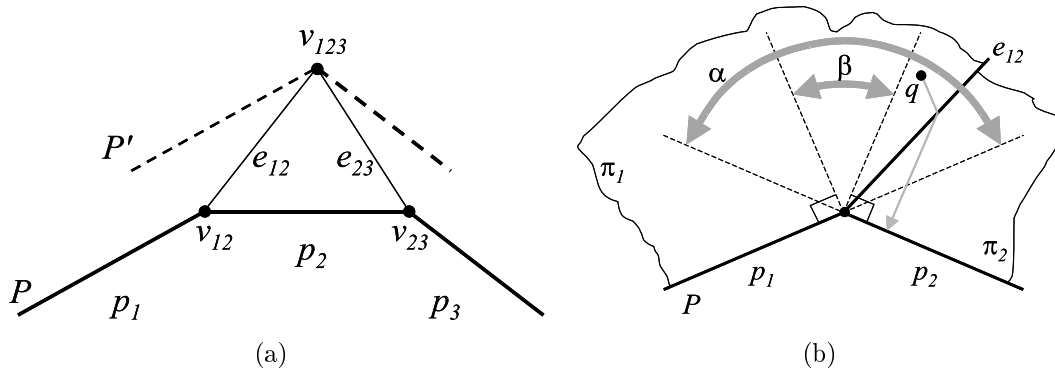


Abbildung 4.6: Eigenschaften des Skeletts bei ungleichen Dachneigungen. (a) Von zwei konkaven Polygonknoten v_{12} und v_{23} ausgehende Kanten e_{12} und e_{23} schneiden sich im Punkt v_{123} . Das entstehende Polygon P' besitzt in v_{123} einen konkaven Knoten. (Bei gleichen Dachneigungen würden e_{12} und e_{23} nicht zum Schnitt kommen.) (b) Je nach Dachneigung von Π_1 und Π_2 kann die Gradienteneigenschaft erfüllt oder verletzt sein. Die Kante e_{12} muss im Winkelbereich α liegen (an den Grenzen dieses Bereichs ist jeweils eine Dachfläche senkrecht). Innerhalb des Bereichs β ist die Gradienteneigenschaft erfüllt. Ansonsten fließt ein Wassertropfen, welcher (in der Projektion) die Fläche π_1 an der Stelle q trifft, zur Polygonkante p_2 (eingzeichnete Pfeil).

Algorithmus gefunden, welcher nach dem *divide and conquer*-Prinzip arbeitet und somit Aussicht auf Zeitkomplexität $O(n \log n)$ bieten würde. Allerdings besitzen die im Rahmen der Dachrekonstruktion betrachteten Polygone typischerweise wenige Seiten, etwa $n < 30$, so dass die Zeitkomplexität nicht kritisch ist.

Das Skelett eines Polygons besitzt die folgenden Eigenschaften (vgl. [Aichholzer et al. 1995, Eppstein & Erickson 1999]):

1. Aufgrund der wohldefinierten Berechnungsvorschrift führt die Konstruktion des Skeletts zu einem *eindeutigen* Ergebnis. Das zugehörige Dach bezeichnet man deshalb auch als *kanonisch*.
2. Da während der Konstruktion des Skeletts Polygonseiten p'_i nur verschwinden (Fall 1), nicht jedoch entstehen können, ist der erhaltene Graph generell zyklensfrei, also ein Baum. Seine Blätter sind die Polygonknoten und besitzen den Grad 1, die inneren Knoten besitzen den Grad 3.¹⁰ Deshalb besitzt G n Blätter, $n - 2$ innere Knoten, $2n - 2$ Knoten und (als Baum) $2n - 3$ Kanten (davon verbinden $n - 3$ innere Knoten).
3. Konkave Kanten (Kehlen) E_{ij} gehen ausschließlich von konkaven Traufpunkten V_{ij} aus, d.h. durch die Schritte (1) oder (2) des Algorithmus werden stets konvexe Kanten eingeführt¹¹.
4. Ein auf dem Skelett basierendes Dach besitzt die Eigenschaft, dass seine Dachflächen Π_i *monoton* sind in Bezug auf ihre jeweiligen Grundkanten. Schneidet man also die Projektion π_i in der Ebene mit einer Gerade senkrecht zu p_i , dann erhält man höchstens ein Schnittintervall. Damit zusammenhängend ist die *Gradienteneigenschaft*, welche besagt, dass der Weg von einem beliebigen Punkt $q \in \Pi_i$ eines (nicht-flachen) Dachs in Richtung des steilsten Gradienten immer zur Kante P_i führt. Ein Wassertropfen, welcher auf eine beliebige Dachfläche fällt, fließt also immer zu der zugehörigen Traufkante. Das auf dem Skelett basierende Dach ist das einzige mit dieser Eigenschaft.

Das Skelett eines Polygons P lässt sich genauso konstruieren, wenn *unterschiedliche Dachneigungen* angenommen werden. Die Kanten e_{ij} ergeben sich dann selbstverständlich nicht mehr aus den Winkelhalbierenden von P . Auch die Eigenschaften (3) und (4) bleiben i.a. *nicht* erhalten (vgl. Abb. 4.6). Interessanterweise lassen sich auf komplexen Grundrissen verschiedene Dächer mit identischen Neigungen der Dachflächen konstruieren. Abschnitt 6.1.3 geht hierauf näher ein.

¹⁰ Ausgenommen sind degenerierte Fälle. Beispielsweise führt die Konstruktion des Skeletts auf einem quadratischen Polygon P zu einem einzigen inneren Knoten vom Grad 4. Diesen kann man sich jedoch aufgeteilt denken in zwei Knoten jeweils vom Grad 3, welche über eine Kante der Länge null verbunden sind.

¹¹ Auch hier gibt es eine Ausnahme in degenerierten Fällen. Am Schnittpunkt zweier konkaver Kanten entsteht ein Knoten vom Grad 4, der eine konkave Kante einführt.

4.2.3 Anwendung des Skeletts zur Gebäuderekonstruktion

Abb. 4.7 zeigt einige Beispiele für die Anwendung des Skeletts zur Dachrekonstruktion. Daraus wird ersichtlich, dass es nicht ausreicht, das Skelett zu bilden und anschließend Trauf- und Giebelhöhe der Gebäude zu ermitteln. Selbst einfache Satteldächer werden nicht korrekt rekonstruiert, weil vier (statt zwei) Dachflächen erzeugt werden. Es ist also erforderlich, die tatsächliche *Struktur* der Dächer bei der Bildung des Skeletts zu berücksichtigen.

Der folgende Ansatz stellt eine zweistufige, heuristische Vorgehensweise zur Lösung dieses Problems dar [Haala & Brenner 1997]:

1. Berechne – allein auf der Grundlage der Grundrisse – die Skelette aller Gebäude. Dabei kann eine beliebige Dachneigung angenommen werden, welche jedoch für alle Dachflächen Π_i identisch sein muss.
2. Verwende die Projektionen π_i der Dachflächen in die Ebene, um die “Kompatibilität” mit einem DOM festzustellen. Die Dachfläche π_i ist kompatibel, wenn die Zahl der normalenvektorkompatiblen Punkte des DOM, welche sich innerhalb von π_i befinden, einen absoluten und relativen Schwellwert (bezogen auf π_i) überschreitet. Als Kriterium für die Kompatibilität wird Gl. 3.10 verwendet. Die Schwellwerte geben somit die absolut bzw. relativ geforderte Mindestfläche des DOM an, die in Einklang mit der Hypothese einer geneigten Dachfläche Π_i steht.
3. Wiederhole die Berechnung der Skelette, wobei die Dachneigungen nichtkompatibler Flächen auf $\pi/2$ (senkrecht) gesetzt werden. Die Neigungen der übrigen Flächen werden aus dem DOM abgeleitet.
4. Verwende die dadurch erhaltenen Regionen π_i , um die Höhe des Dachs zu ermitteln. Die Wände ergeben sich durch Verlängerung der Traufen bis zu einer Grundhöhe.

Die erste Berechnung des Skeletts wird bei diesem Verfahren also dazu verwendet, ausgehend von den Traufkanten P_i “Einflussbereiche” festzulegen, welche im zweiten Schritt überprüft werden. Abb. 4.8, 4.9 zeigen die Anwendung des Verfahrens in Verbindung mit einem DOM aus Laserscanning. Obwohl die Gebäude dieses Ausschnitts richtig strukturiert werden, sind die folgenden Nachteile zu nennen:

- Flachdächer können nicht zufriedenstellend behandelt werden. Dieses Problem kann man lösen, indem vorab getestet wird, ob es sich um ein Flachdach handelt (anhand des Normalenvektors im DOM, vgl. Gl. 3.9). In diesem Fall kann man ein prismatisches Modell zur Rekonstruktion ansetzen (dies bedeutet die Bestimmung einer einzigen, mittleren Höhe aus dem DOM).
- Es können nur Dächer rekonstruiert werden, welche *eine einzige* Traufhöhe aufweisen.
- Eine Grundannahme des Verfahrens ist, dass jede Dachfläche Π_i mit genau einer Traufkante P_i korrespondiert. Dies ist zwar häufig, jedoch nicht immer erfüllt. Entsprechende Fälle werden in Abb. 6.15 vorgestellt.
- Die Dachrekonstruktion auf Basis des Skeletts besitzt keine Möglichkeit zur *Generalisierung*. Sind im Grundriss kleine und unwichtige Details enthalten, so werden für diese entsprechende Dachflächen generiert.
- Die Bildung des Skeletts reagiert sehr empfindlich auf die Situation, bei der sich zwei konkave Kanten treffen (Abb.4.10(a)). Dabei handelt es sich um einen Sonderfall, weil der Punkt v_{1245} – bei parallelen p_1 , p_5 – weder konkav noch konvex ist (p'_1 und p'_5 sind kollinear). Häufig kommt es jedoch aufgrund kleiner Digitalisierfehler oder numerischer Ungenauigkeiten dazu, dass e_{12} und e_{45} nicht zum Schnitt kommen (Abb.4.10(b)). Der entstehende Versatz zieht sich dann bis zum Giebel hin (Abb.4.10(c)). Die Situation tritt häufig bei Vorbauten oder Stützfeilern (Kirchen) auf.

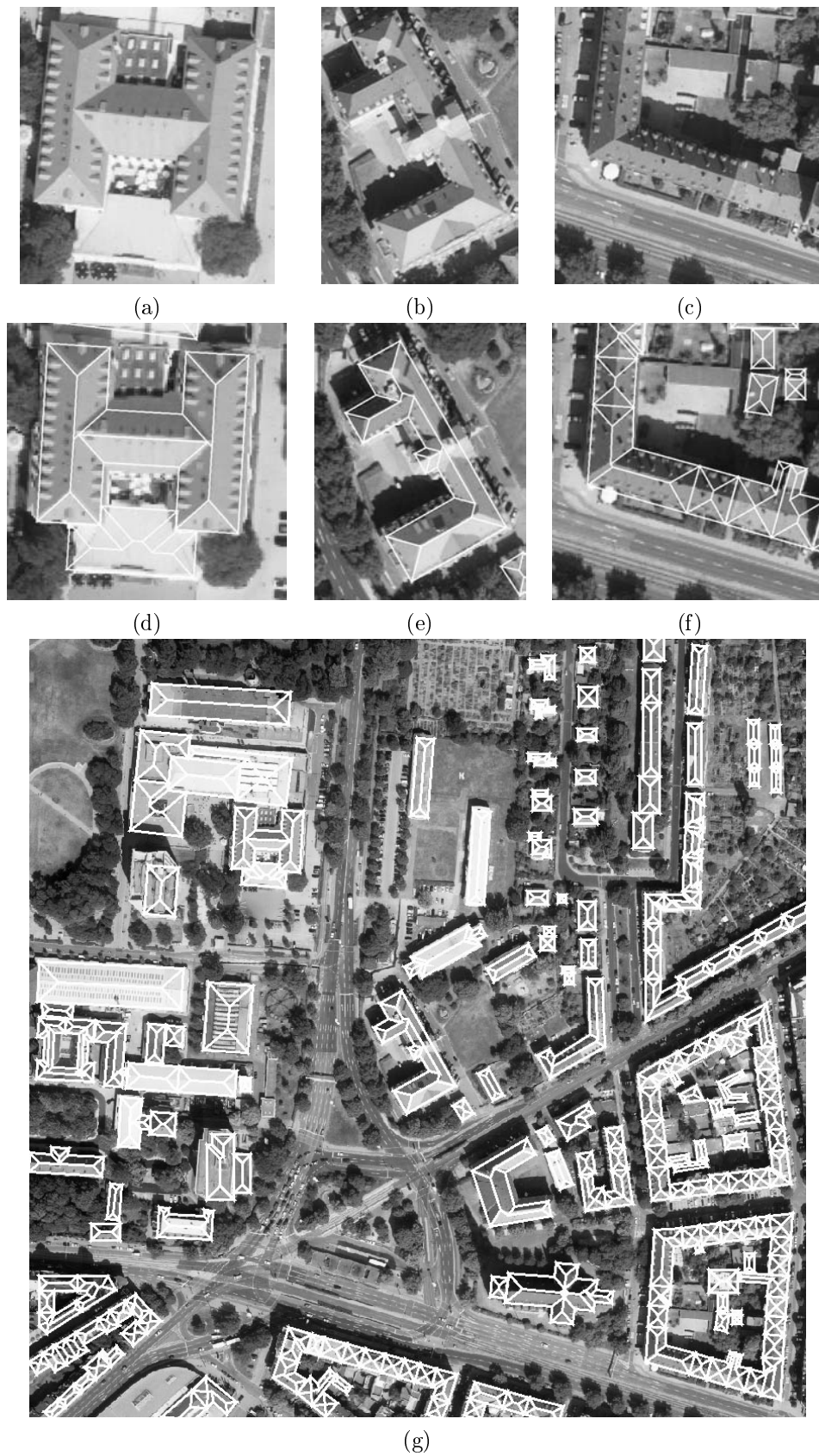


Abbildung 4.7: Anwendung des Skeletts zur Dachrekonstruktion. (a)–(c) Ausschnitte aus einem Luftbild. (d)–(f) Jeweils zugehöriges Orthobild mit überlagertem Skelett. (g) Gesamtansicht (Orthobild mit überlagerten Skeletten).

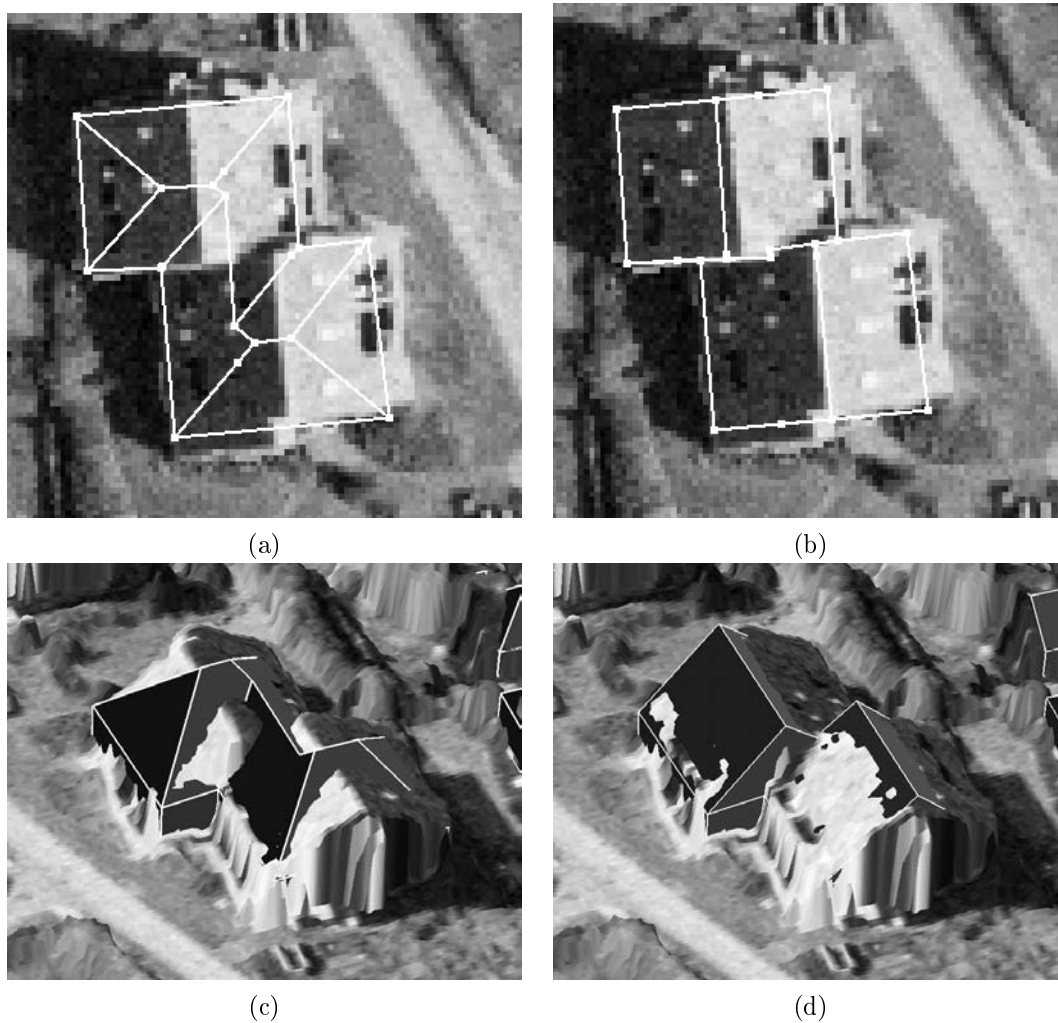


Abbildung 4.8: Anpassung eines Skeletts unter Verwendung des DOM (Detail). (a) Überlagerung von Orthobild und Skelett auf der Basis des Grundrisses (nach Schritt 1 des Algorithmus). (b) Angepasstes Skelett (nach Schritt 3 des Algorithmus). (c), (d) Ansicht des rekonstruierten Dachs zu (a) und (b) nach Schätzung der Höhe. Die Darstellung zeigt die Rekonstruktion, überlagert mit dem zugrundeliegenden DOM.

4.3 Dekomposition von Grundrissen

4.3.1 Allgemeine Verfahren

Manche der im vorigen Abschnitt dargelegten Probleme einer skelett-basierten Dachrekonstruktion können durch eine *Dekomposition* komplexer Grundrisse in einfache (zweidimensionale) *Primitive* gelöst werden. Dadurch ist zum einen die Generalisierung der Grundrisse möglich. Zum anderen ist die Rekonstruktion der dritten Dimension basierend auf den zweidimensionalen Primitiven relativ einfach. Dennoch können durch Kombination der Primitive komplexe Gebäude dargestellt werden (insbesondere Gebäude mit mehreren, unterschiedlichen Traufhöhen).

Die Dekomposition von Formen in einfache Teile wurde schon sehr früh erforscht, beispielsweise im Zusammenhang mit der Erkennung von Objekten oder insbesondere der Erkennung von (handgeschriebenen) Zeichen. Pavlidis [1968] bzw. Pavlidis [1972] beschreibt die Zerlegung von Formen in *konvexe Elementarmengen* (*primary convex subsets*) und *Nuklei*. Letztere stellen die Überlappung der Elementarmengen dar (Abb. 4.11(a)).

Shapiro & Haralick [1979] stellen die Unterteilung von Umrissen auf der Basis eines graphentheoretischen Clusterings vor. Grundlage hierfür ist die Betrachtung von inneren Kanten, d.h. von geradlinigen Verbindungen zwischen Punkten des Umrisspolygons P , welche vollständig im Inneren des Polygons verlaufen (Abb. 4.11(b)). Definiert man eine Relation R über der Menge der Polygonpunkte durch

$$(v_i, v_j) \in R \Leftrightarrow v_i \text{ und } v_j \text{ sind durch eine innere Kante verbunden,}$$

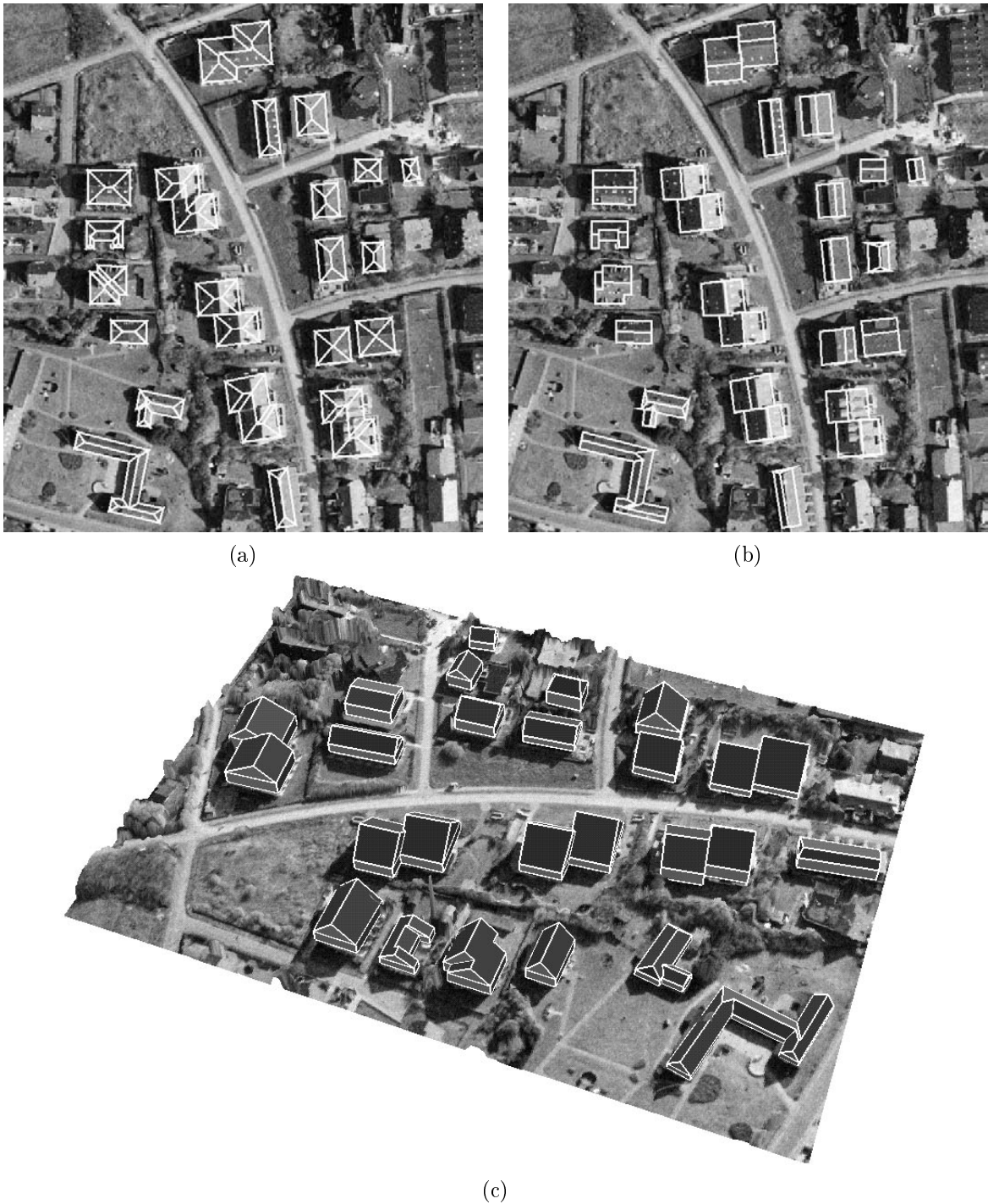


Abbildung 4.9: Anpassung eines Skeletts unter Verwendung des DOM (Gesamtszene). (a), (b) Überlagerung von Orthobild und Skeletten vor und nach der Anpassung. (c) Ansicht der dreidimensional rekonstruierten Gebäude nach Schätzung der Höhe.

dann wird deutlich, dass häufig die *maximalen Cliques* von R mit intuitiv gewählten Unterteilungen von P korrespondieren¹² (Abb. 4.11(c)). Für die praktische Anwendung lässt sich dies nicht direkt ausnutzen, weil kleine Störungen des Umrisspolygons P eine Veränderung der Cliques bewirken können. Um das strikte Kriterium für eine Clique durch ein “weicherer” zu ersetzen, wird zunächst zwischen je zwei Polygonpunkten die “Dichte” $D(v_i | v_j)$ definiert als die Zahl der Nachbarn, welche v_i und v_j gemeinsam sind. Die Menge

$$Z(v_i, k) := \{v_j \in P : D(v_i | v_j) \geq k\}$$

beinhaltet dann alle Punkte v_j , welche mindestens k Nachbarn mit v_i gemein haben. Ist $v_i \in A$ und A eine

¹²Eine Clique von R ist eine Teilmenge A der Punkte für die $A \times A \subseteq R$, d.h. A und seine inneren Kanten bilden einen *vollständigen Graphen*.

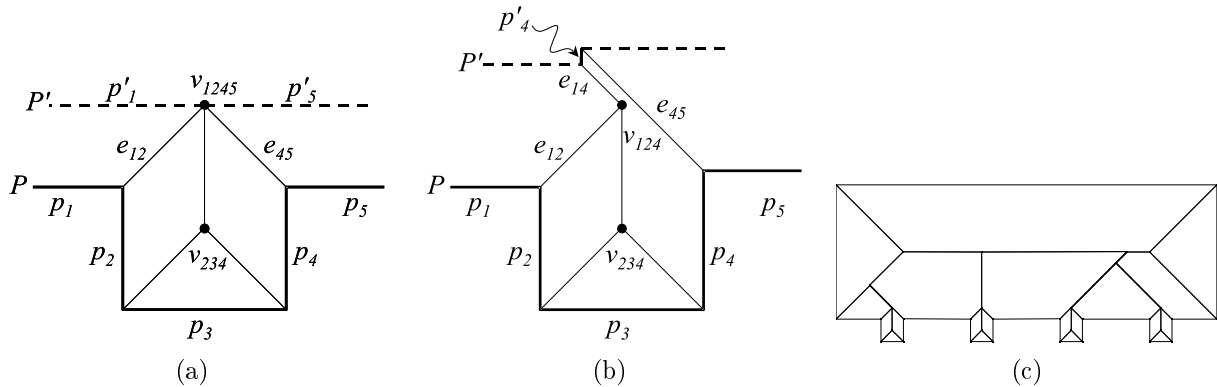


Abbildung 4.10: Empfindlichkeit des Skeletts beim Aufeinandertreffen konkaver Kanten. (a) Bei exakter Digitalisierung schneiden sich e_{12} und e_{45} in v_{1245} . Das neue Polygon P' besitzt zwei aufeinanderfolgende, kollineare Segmente p'_1, p'_5 . (b) Tritt zwischen p_1 und p_5 ein leichter Versatz auf, schneiden sich e_{12} und e_{45} nicht. Es entsteht ein Polygonsegment p'_4 , welches sich u.U. bis zum Giebel hinzieht. (c) Typisches Beispiel des Auftretens, etwa bei Stützpfählern.

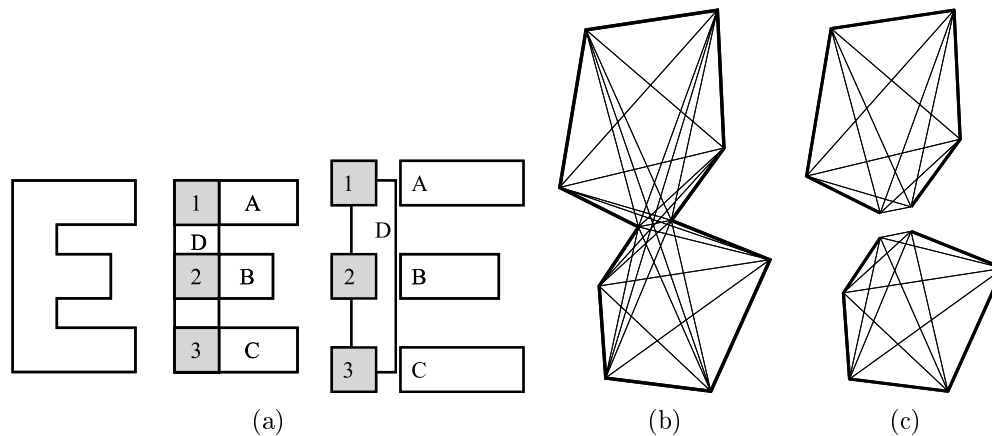


Abbildung 4.11: Dekomposition von Formen. (a) Zerlegung in konvexe Elementarmengen (A, B, C, D) und Nuklei ($1, 2, 3$) nach Pavlidis [1972]. (b) Polygon und alle inneren Kanten. (c) Die beiden maximalen Cliques entsprechen der Unterteilung, welche man intuitiv vornehmen würde.

maximale Clique mit m Elementen, dann ist $A \subseteq Z(v_i, m)$. Mit wachsendem k fällt $\#Z(v_i, k)^{13}$. Als Kandidat für eine dichte Menge an einem Punkt v_i wird daher

$$Z(v_i) := Z(v_i, m) \text{ mit } m := \max\{k : \#Z(v_i, k) \geq k\} \quad (4.1)$$

definiert. Für jeden Punkt v_i wird des weiteren die Zugehörigkeit ζ zu einer Menge A definiert als

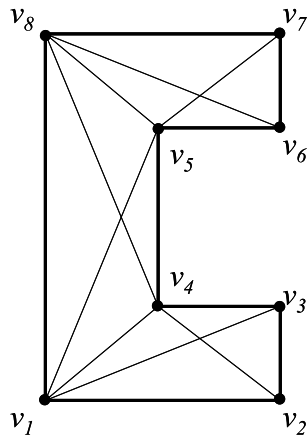
$$\zeta(v_i | A) := \frac{\#((\text{Nachbarn von } v_i) \cap A)}{\#A}$$

sowie basierend darauf die Kompaktheit einer Menge A durch

$$\gamma(A) := \frac{1}{\#A} \sum_{v_i \in A} \zeta(v_i | A).$$

Dichte Mengen Z werden aus den Kandidaten $Z(v_i)$ bestimmt durch Anwendung eines Schwellwerts für ζ und γ , sowie einer Forderung an die Mindestanzahl von Elementen $\#Z$. In einem Folgeschritt werden aus diesen Mengen noch Cluster anhand einer vorgegebenen minimalen Überlappung gebildet. Abb. 4.12 zeigt ein Beispiel für die Anwendung des Verfahrens bei einem einfachen, U-förmigen Grundriss. Je nach Schwellwerten würde das Verfahren eine Aufteilung von P in $\{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ und $\{v_5, v_6, v_7, v_8\}$ bzw. in die überlappenden Mengen $\{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_8\}$ und $\{v_1, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8\}$ vornehmen. Nachteilig an diesem Verfahren sind die relativ vielen Schwellwerte (Punktzugehörigkeit, Kompaktheit, Mindestanzahl von Elementen und Überlappung). Des weiteren können die entstehenden Mengen überlappend sein, und die speziell bei Grundrissen vorliegenden Strukturen werden nicht berücksichtigt.

¹³ $\#M$ bezeichnet die Mächtigkeit der Menge M .



(a)

v_i	Nachbarn v_j
1	{1, 2, 3, 4, 5, 8}
2	{1, 2, 3, 4}
3	{1, 2, 3, 4}
4	{1, 2, 3, 4, 5, 8}
5	{1, 4, 5, 6, 7, 8}
6	{5, 6, 7, 8}
7	{5, 6, 7, 8}
8	{1, 4, 5, 6, 7, 8}

(b)

$D(v_i v_j)$	1	2	3	4	5	6	7	8
1	6	4	4	6	4	2	2	4
2	4	4	4	4	2	0	0	2
3	4	4	4	4	2	0	0	2
4	6	4	4	6	4	2	2	4
5	4	2	2	4	6	4	4	6
6	2	0	0	2	4	4	4	4
7	2	0	0	2	4	4	4	4
8	4	2	2	4	6	4	4	6

(c)

i	m	$Z(v_i, m) = Z(v_i)$	$\gamma(Z(v_i))$
1	4	{1 _{1.0} , 2 _{0.67} , 3 _{0.67} , 4 _{1.0} , 5 _{0.67} , 8 _{0.67} }	0.78
2	4	{1 _{1.0} , 2 _{1.0} , 3 _{1.0} , 4 _{1.0} }	1.00
3	4	{1 _{1.0} , 2 _{1.0} , 3 _{1.0} , 4 _{1.0} }	1.00
4	4	{1 _{1.0} , 2 _{0.67} , 3 _{0.67} , 4 _{1.0} , 5 _{0.67} , 8 _{0.67} }	0.78
5	4	{1 _{0.67} , 4 _{0.67} , 5 _{1.0} , 6 _{0.67} , 7 _{0.67} , 8 _{1.0} }	0.78
6	4	{5 _{1.0} , 6 _{1.0} , 7 _{1.0} , 8 _{1.0} }	1.00
7	4	{5 _{1.0} , 6 _{1.0} , 7 _{1.0} , 8 _{1.0} }	1.00
8	4	{1 _{0.67} , 4 _{0.67} , 5 _{1.0} , 6 _{0.67} , 7 _{0.67} , 8 _{1.0} }	0.78

(d)

Abbildung 4.12: Beispiel zur Dekomposition nach Shapiro & Haralick [1979]. (a) Einfaches, U-förmiges Grundrisspolygon P . (b) Tabelle der Nachbarn für jedes v_i , welche durch innere Kanten erreicht werden können. (c) "Dichtefunktion" $D(v_i | v_j)$ (Tabelle ist symmetrisch). $D(v_i | v_j)$ gibt an, wie viele Nachbarn v_i und v_j gemeinsam sind. Die Tabelle kann aus (b) abgeleitet werden. (d) Kandidaten für dichte Mengen, abgeleitet aus (c) nach Gl. 4.1. Beispielsweise erhält man aus der ersten Zeile von (c): $\#Z(v_1, 1) = \#Z(v_1, 2) = 8$, $\#Z(v_1, 3) = \#Z(v_1, 4) = 6$, $\#Z(v_1, 5) = \#Z(v_1, 6) = 2$, $\#Z(v_1, 7) = 0$ und somit $m = 4$, $Z(v_1) = Z(v_1, 4)$. Tiefgestellt ist jeweils die Zugehörigkeit $\zeta(v_j | Z(v_i))$.

4.3.2 Dekomposition in Rechtecke

Eine Unterteilung von Grundrissen in *Rechtecke* bietet sich an, weil ein großer Teil der Gebäude auf rechtwinkligen und parallelen Strukturen beruht. Des weiteren ist die Konstruktion von dreidimensionalen Dachformen über Rechtecken aufgrund der einfachen Topologie trivial.

Ziel des hier beschriebenen Ansatzes ist eine Zerlegung in *überlappende* Rechtecke, wie sie in Abb. 4.11(a) gezeigt ist. Hierzu werden schrittweise Rechtecke im Grundriss identifiziert, und die durch sie abgedeckten Grundrisskanten werden markiert. Eine Überdeckung durch Rechtecke ist gefunden, wenn alle Grundrisskanten markiert sind. Im einzelnen läuft das Verfahren folgendermaßen ab:

1. Konstruiere über jeder (verbliebenen) Kante des Grundrisspolygons P ein Rechteck, dessen eine Seite auf der Grundrisskante liegt, und dessen andere Seiten so gewählt sind, dass das Rechteck maximale Breite und Höhe besitzt. (Das Rechteck kann somit länger sein als die zugehörige Grundrisskante.)
2. Wähle das Rechteck mit der größten Fläche aus und akzeptiere es.
3. Markiere alle Grundrisskanten, welche durch dieses Rechteck überdeckt sind. Hierfür wird ein Puffer um das Rechteck eingeführt. Grundrisskanten, die vollständig innerhalb dieses Puffers liegen werden markiert. Sind alle Kanten markiert, wird das Verfahren beendet und die Menge der akzeptierten Rechtecke stellt eine Überdeckung des ursprünglichen Grundrisses dar. Ansonsten wird das Verfahren weiter iteriert, wobei bereits markierte Kanten nicht mehr berücksichtigt werden.



Abbildung 4.13: Arbeitsweise des Algorithmus zur Rechteckzerlegung. (a) In den Grundriss können mehrere Rechtecke eingepasst werden (1-4). (b) Das größte Rechteck wird akzeptiert. Die Seiten des Ursprungspolygons, welche komplett innerhalb eines Puffers um dieses Rechteck liegen, werden als behandelt gekennzeichnet (grau). Es verbleiben die Rechtecke 1-3. (c) Wiederum das größte Rechteck wird akzeptiert. Die kleine "Ausbuchtung" im Grundriss fällt komplett in den Bereich des Puffers und wird somit als behandelt gekennzeichnet. Es verbleibt nur noch ein mögliches Rechteck. (d) Das Rechteck wird akzeptiert, keine Seiten des Grundrisses verbleiben.

Abb. 4.13 zeigt ein (idealisiertes) Beispiel der Anwendung des Verfahrens. Hervorzuheben ist, dass in Schritt (3) die *Generalisierungsfähigkeit* des Verfahrens gesteuert werden kann. Wird ein breiter Puffer gewählt, so werden Details im Grundriss stärker unterdrückt. Die realen Beispiele in Abb. 4.14 zeigen in vielen Fällen gute Zerlegungen, selbst bei komplexer Geometrie. Naturgemäß kommt es zu Problemen bei Grundrissen mit anderen als rechten Winkeln. Bei stumpfen Winkeln führt die Rechteckzerlegung immerhin noch zu einer Überdeckung, spitze Winkel verursachen jedoch Lücken. Will man diese Gebäude auch überdecken, muss zu komplexeren Primitiven übergegangen werden.

Ein Vorteil der Rechteckzerlegung besteht in der Fähigkeit, Grundrisse zu generalisieren. Da die Zerlegung jedoch für jeden Grundriss getrennt erfolgt, kann es zu Problemen bei aneinandergrenzenden Gebäuden kommen. Durch Generalisierung können dort Lücken oder Überschneidungen entstehen. Um dies zu lösen, müssten die Nachbarschaften analysiert und bei der Zerlegung berücksichtigt werden.

Bei Grundrissen, welche (aufgrund von Digitalisierfehlern) nicht-parallele Kanten besitzen (Abb. 4.14(g)), ist es unklar, welche Kante verwendet und welche ignoriert werden soll. Generell führen diese Überlegungen auf die Frage, ob Grundrisse verändert werden dürfen (obwohl nicht genügend Information zur Verfügung steht, um zu entscheiden, welche Veränderung "richtig" ist) oder ob sie unangetastet in die dreidimensionale Rekonstruktion eingebracht werden sollen. Ersteres kann zu falschen Lagen führen, letzteres zur Fehlern in der Gebäuderekonstruktion, etwa ungleichen Traufhöhen oder nicht-waagerechten Giebeln.

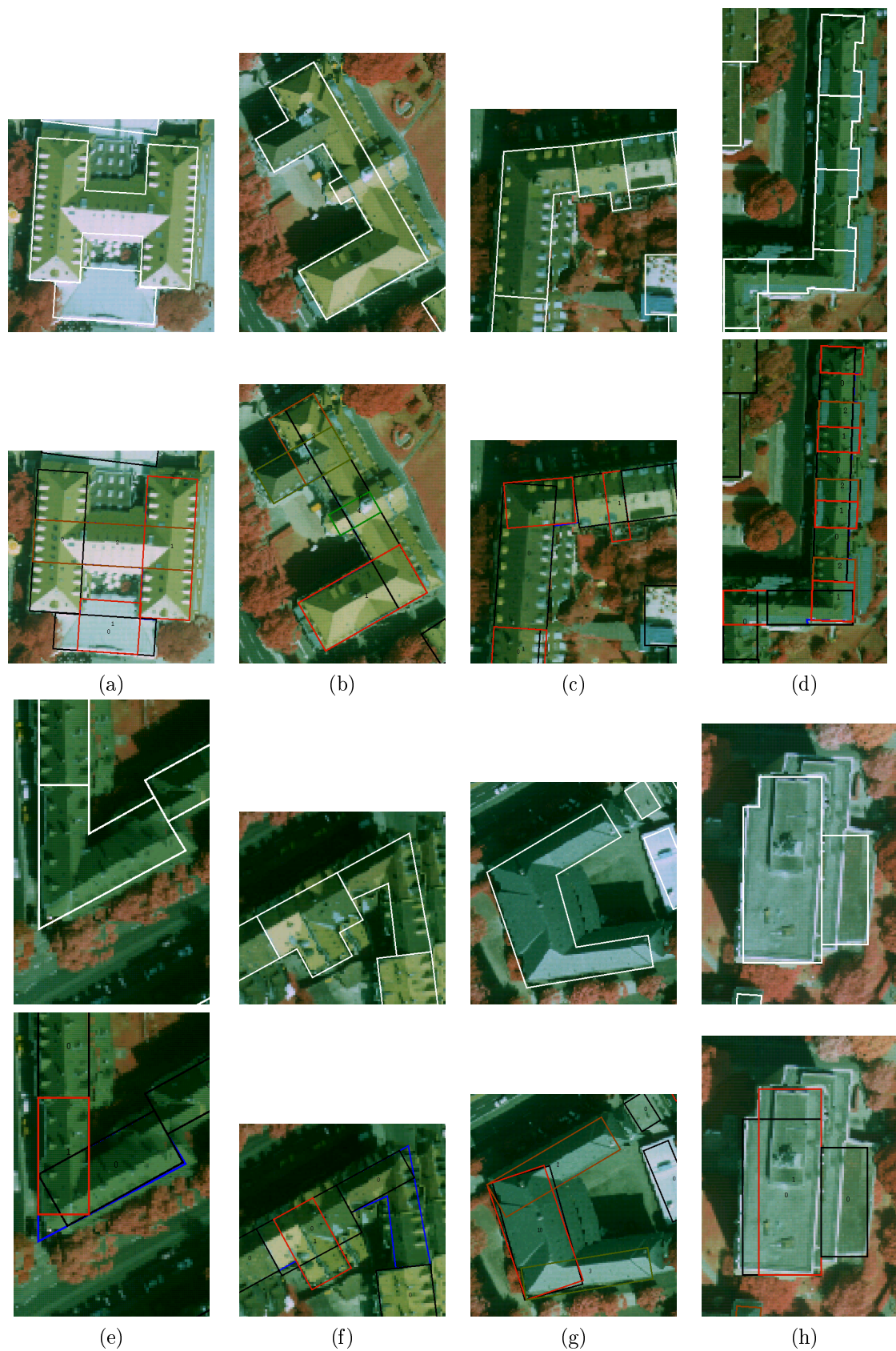


Abbildung 4.14: Beispiele für Rechteckzerlegungen. (a)–(d): Gute Zerlegungen werden erzielt, auch bei relativ komplexen Grundrissen. Man beachte die Generalisierung des Eckgebäudes in (d). (e) Spitzwinklige Polygonkanten lassen sich nicht durch Rechtecke abdecken. (f) Falsche Digitalisierung führt zu nicht-parallelen Linien im Grundriss, in welche sich kein Rechteck einpassen lässt. (g) Ein anderer Fall nicht-paralleler Linien führt hier zu zwei überlagerten Rechtecken. (h) Flachdächer mit komplexem Grundriss werden in mehrere Rechtecke zerlegt (erfolgt eine dreidimensionale Rekonstruktion, so muss auf identische Höhen geachtet werden).

5 Rekonstruktion von Gebäuden mittels Rechteckzerlegung

5.1 Ein automatisches Rekonstruktionsverfahren

Wie in Abschnitt 2.4.1 dargelegt, ist die automatische Rekonstruktion von Gebäuden aus Luftbildern noch nicht gelungen. Das hier vorgestellte Verfahren beruht deshalb auf anderen Datenquellen. Zum einen werden existierende Grundrisse verwendet, um die Lage von Gebäuden zu erhalten. Zum anderen wird die benötigte Höheninformation aus einem DOM abgeleitet. Zielsetzung ist dabei die *vollautomatische* Funktionsweise des Verfahrens. Dadurch ist es möglich, eine sehr große Anzahl von Gebäuden in kürzester Zeit zu rekonstruieren. Eine Korrektur falsch rekonstruierter Gebäude sowie die Hinzunahme von Details kann dann anschließend je nach Bedarf erfolgen. Hierfür wurde ein semiautomatisches Modul implementiert, welches auf den vom automatischen Teil rekonstruierten Modellen aufsetzt.

Das Verfahren unterscheidet sich somit wesentlich von anderen semiautomatischen Ansätzen, bei welchen in jedem Fall manuelle Interaktion zur Erstellung der Modelle erforderlich ist. Abb. 5.1 skizziert die Gesamtstruktur des Ansatzes. Im ersten Schritt werden die Grundrisse in zweidimensionale, rechteckige Primitive zerlegt. Das

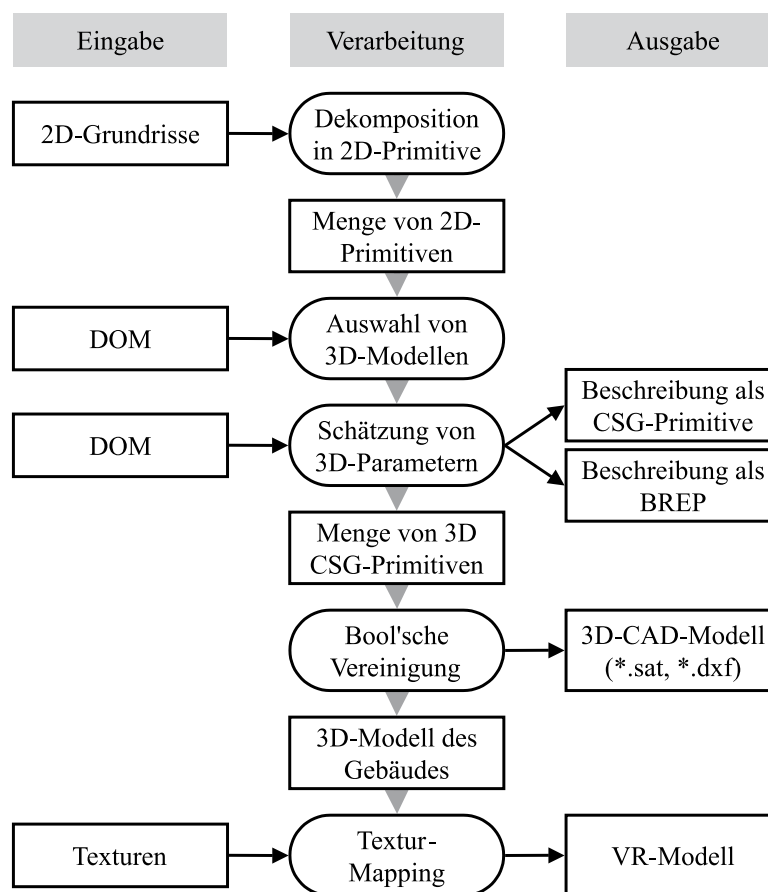


Abbildung 5.1: Überblick über das Rekonstruktionsverfahren.

hierzu verwendete Verfahren wurde in Abschnitt 4.3.2 beschrieben. Anschließend erfolgt für jedes 2D-Primitiv die Wahl eines dreidimensionalen, parametrischen Modells, dessen Parameter im nächsten Schritt bestimmt werden. Sowohl die Modellauswahl als auch die Bestimmung der Parameter stützt sich auf Daten eines digitalen Oberflächenmodells. Als Ergebnis erhält man eine Menge von dreidimensionalen Primitiven, welche mittels der CSG-Operation der Bool'schen Vereinigung zu einem einzelnen Objekt zusammengefügt werden. Damit steht ein dreidimensionales geometrisches Modell des rekonstruierten Gebäudes zur Verfügung. Optional ist der Schritt der Texturierung, durch welchen die Oberflächen zusätzlich Bildinformation erhalten. Dadurch entsteht ein Modell, welches für Visualisierung, virtuelle Flüge oder allgemeine Anwendungen der virtuellen Realität (VR) eingesetzt werden kann.

Die folgenden Abschnitte gehen auf die algorithmischen Schritte der Modellauswahl und Bestimmung der Modellparameter ein. Textur wird in Kapitel 7 behandelt.

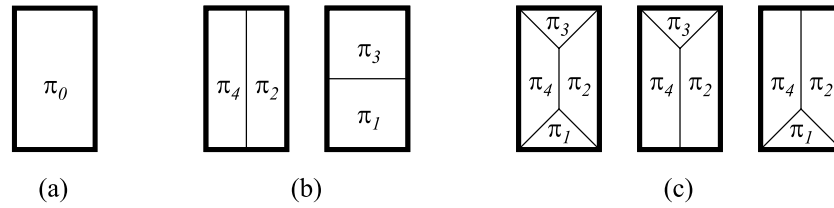


Abbildung 5.2: Dreidimensionale Primitive: (a) Flachdach, (b) Satteldach in zwei Orientierungen, (c) Walmdach in symmetrischer und unsymmetrischer Form.

5.1.1 Auswahl von Primitiven

Abb. 5.2 zeigt die verfügbare Palette an dreidimensionalen Primitiven, welche über einem rechteckigen Grundriss verwendet werden können. Es sind dies Flachdach, Satteldach, Walmdach und unsymmetrisches Walmdach. Die Primitive legen die Topologie des Dachs vollständig fest. Bei geneigten Dachformen (Sattel-, Walmdach) werden identische Dachsteigungen angenommen. Somit sind auch die Projektionen von First und Graten in die Ebene bekannt. Es ist daher möglich, die Projektionen π_i der Dachflächen Π_i anhand des zugrundeliegenden zweidimensionalen Rechtecks und des ausgewählten Primitivs zu bestimmen. Für jede Dachfläche Π_i lässt sich der zugehörige Normalenvektor bzw. seine Projektion in die Ebene angeben. Somit kann die Kompatibilität der Normalenvektoren von DOM-Punkten innerhalb einer Fläche π_i mit dem zugehörigen Flächennormalenvektor nach Gl. 3.9 und 3.10 bestimmt werden. Die folgenden Kriterien werden zur Auswahl von dreidimensionalen Primitiven eingesetzt:

- Bei Primitiven mit geneigten Dachflächen darf der relative Anteil von flachen DOM-Punkten (d.h. DOM-Punkten, welche nach Gl. 3.9 einen kleinen Winkel mit der z-Achse einschließen) einen Schwellwert nicht überschreiten.
- Die Zahl der normalenvektorkompatiblen DOM-Punkte (Kompatibilität des projizierten Normalenvektors nach Gl. 3.10) darf einen absoluten und relativen Schwellwert nicht unterschreiten.
- Nach Bestimmung der Dachparameter dürfen geneigte Dachflächen eine Mindestneigung nicht unterschreiten, sonst wird die Annahme eines Primitivs mit geneigten Dachflächen (Sattel-, Walmdach) verworfen.

Die eingesetzten Schwellwerte betreffen somit Winkel sowie relative und absolute Flächeninhalte. Sie sind demnach rein geometrischer Natur. Erfüllen verschiedene Primitive diese Kriterien, dann wird dasjenige gewählt, welches aufgrund der Parameterschätzung (folgender Abschnitt) den kleinsten Restfehler aufweist.

5.1.2 Bestimmung der Parameter von Primitiven

Die Parameter der dreidimensionalen Primitive werden durch vermittelnde Ausgleichung bestimmt. Der Ansatz ist unterschiedlich für jedes Primitiv. Generell werden zur Schätzung die Punkte des DOM als Beobachtungen herangezogen, jedoch nur, wenn die Normalenvektoren mit der jeweiligen Fläche konsistent sind. Dadurch wird ein robusteres Verhalten gegenüber Ausreißern bzw. nicht berücksichtigten Flächen erreicht. Die Schätzung der Parameter erfolgt in einem lokalen Koordinatensystem, wodurch die benötigten Gleichungen besonders einfach werden.

Flachdach. Hier ist nur die Bestimmung einer einzelnen Höhe a erforderlich. Die Parameterschätzung reduziert sich somit auf die Bestimmung der mittleren Höhe

$$\hat{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i, \quad (5.1)$$

wobei \hat{a} die geschätzte Höhe ist und die Summe über alle n DOM-Punkte $(x_i, y_i, z_i)^T$ gebildet wird mit $(x_i, y_i)^T \in \pi_0$ (Abb. 5.2(a)).

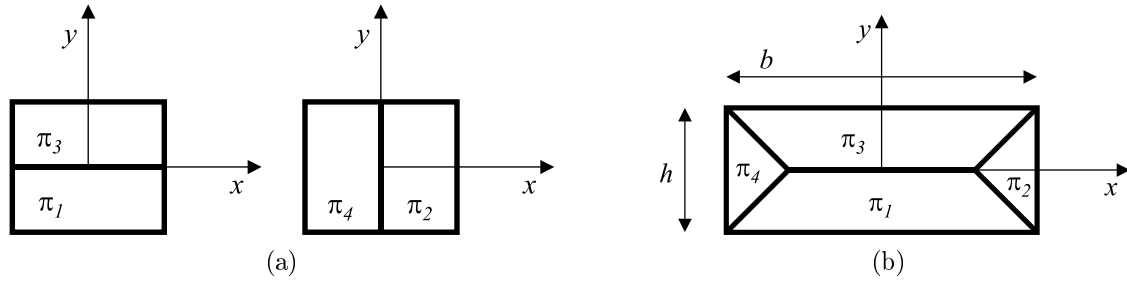


Abbildung 5.3: Lokales Koordinatensystem für Primitive. (a) Für ein Satteldach (zwei mögliche Orientierungen). (b) Für ein Walmdach mit den Rechteckdimensionen $b \times h$.

Satteldach. Hier müssen zwei Parameter bestimmt werden, die *Dachhöhe* und *Dachneigung*. Ein Ansatz, welcher die Beobachtungsgleichung explizit unter Verwendung des Neigungswinkels als Unbekannte formuliert, führt aufgrund der enthaltenen trigonometrischen Funktion zu einer nichtlinearen Gleichung. Zweckmäßigerweise werden deshalb die beiden Parameter der Giebelhöhe a_1 und Dachsteigung a_2 angesetzt. Im lokalen Koordinatensystem erhält man in Abhängigkeit der Orientierung (Abb. 5.3(a)) die Beobachtungsgleichungen

$$z_i + v_i = a_1 - a_2 \cdot |y_i| \quad \text{bzw.} \quad (5.2)$$

$$z_i + v_i = a_1 - a_2 \cdot |x_i|. \quad (5.3)$$

Die Gleichungen sind somit linear. Im gleichgewichteten Fall ergeben sich für Gl. 5.2 als Normalgleichungsmatrix und rechte Seite

$$A^T A = \begin{bmatrix} \sum_i 1 & -\sum_i |y_i| \\ -\sum_i |y_i| & \sum_i y_i^2 \end{bmatrix}, \quad A^T l = \begin{bmatrix} \sum_i z_i \\ -\sum_i z_i |y_i| \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

wobei die Summationen jeweils über alle $(x_i, y_i, z_i)^T$ erfolgen mit $(x_i, y_i)^T \in \pi_1 \cup \pi_3$. Aus der Lösung dieses Normalgleichungssystems erhält man die Schätzungen für die Parameter \hat{a}_1 und \hat{a}_2 .

Walmdach. Die Formulierung der Gleichungen für ein Walmdach ist ähnlich wie beim Satteldach. Sie ist jedoch abhängig von dem Verhältnis von Breite und Höhe des zugrundeliegenden Rechtecks. Für den in Abb. 5.3(b) gezeigten Fall $b > h$ ergeben sich die Beobachtungsgleichungen

$$z_i + v_i = a_1 - a_2 \cdot |y_i| \quad (5.5)$$

$$z_j + v_j = a_1 - a_2 \cdot \left(|x_j| - \frac{b-h}{2}\right), \quad (5.6)$$

wobei $(x_i, y_i)^T \in \pi_1 \cup \pi_3$ und $(x_j, y_j)^T \in \pi_2 \cup \pi_4$. Die Formulierung des Normalgleichungssystems erfolgt analog zu Gl. 5.4.

Unabhängig vom Primitivtyp werden die Gebäudewände als Ebenen modelliert, welche durch die Traufkanten gehen und sich abwärts erstrecken bis zu einer Grundhöhe. Diese wird aus dem DOM ermittelt. Da das DOM in der Nähe des Gebäudes nicht die Grundhöhen wiedergibt, wird die minimale Höhe des DOM in einer Umgebung verwendet. Diese wird aus dem Grundriss durch eine Pufferoperation gewonnen¹⁴.

5.1.3 Kombination von Primitiven

Die Kombination der einzeln rekonstruierten dreidimensionalen Primitive erfolgt durch die Bool'sche (CSG-) Operation der *Vereinigung*. Obwohl es angesichts der relativ einfachen dreidimensionalen Körper so erscheinen mag, ist die Durchführung von CSG-Operationen alles andere als trivial. Der Grund hierfür liegt in der grundsätzlich aufwendigen Berücksichtigung numerischer Probleme bei Algorithmen der *computational geometry*¹⁵. Bei der Vereinigung von Gebäudeprimitiven kommt erschwerend hinzu, dass die Primitive selbst durch

¹⁴Dazu wird der Grundriss in eine gerasterte Darstellung übergeführt, welche mittels Dilatation (Abschnitt 3.2) entsprechend vergrößert wird. In den gezeigten Beispielen wurden jeweils zwei Dilatationen durchgeführt (entsprechend einer Vergrößerung von etwa einem bzw. zwei Metern).

¹⁵Siehe auch die Bemerkungen in [Giezeman, Veltkamp & Wesselink 1999, Mehlhorn & Näher 1999].

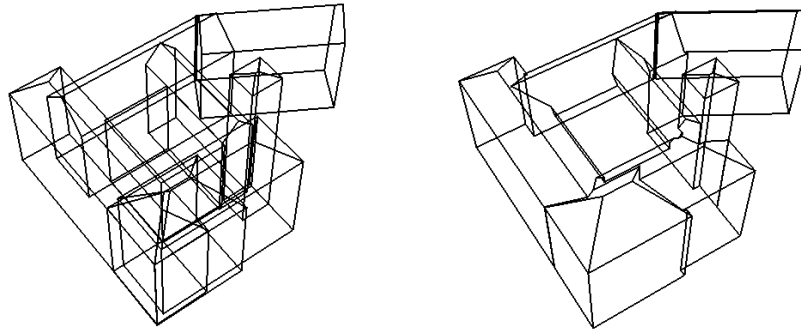


Abbildung 5.4: Beispiel für die Vereinigung von dreidimensionalen Primitiven. Links die einzelnen Primitive vor, rechts das CAD-Modell nach der Vereinigung.

Digitalisierung sowie *Parameterschätzung* und nicht durch *Konstruktion* entstanden sind. Deshalb tritt es relativ häufig auf, dass dicht benachbarte Punkte und fast identische Flächen existieren. Genau diese Fälle sind jedoch algorithmisch schwierig zu handhaben.

Nach eigenen Implementationen¹⁶ wurden deshalb zunächst frei verfügbare Modellierer betrachtet [Elber 1996, SvLis 1997, TWIN 1995]. Letztlich fiel die Wahl auf das kommerzielle Paket ACIS [ACIS 1999]. Dieses ist eine Sammlung von Routinen zur Modellierung von dreidimensionalen Körpern. Die Modellierung folgt dabei einem CSG-Ansatz, obwohl die interne Repräsentation der Objekte in Form einer Randdarstellung (BREP) vorgenommen wird. ACIS ist als dreidimensionaler CAD-Kern in vielen kommerziellen Anwendungsprogrammen enthalten¹⁷.

Die Einbindung erfolgt durch eine Umsetzung der internen Beschreibung von Primitiven in eine entsprechende CSG-Konstruktion. Im einfachsten Fall eines Flachdachs ist nur ein Quader der entsprechenden Breite, Höhe und Tiefe zu generieren, welcher anschließend entsprechend seiner Lage und Orientierung im dreidimensionalen Raum transformiert wird. Im Fall von Sattel- und Walmdach wird der Neigungswinkel der Dachflächen abgeleitet und die Flächen werden durch (CSG-) Differenzbildung mit entsprechend gedrehten “Werkzeugen” (*tool body*) gebildet.

Das Ergebnis kann in Form des ACIS-Dateiformats abgespeichert werden. Zusätzlich wurde ein Programm implementiert, welches über die Strukturen der ACIS-internen Repräsentation iteriert und die Oberfläche der Objekte in Form von ebenen, durch Polygone begrenzten Flächen ausgibt. Abb. 5.4 zeigt ein Beispiel für Primitive vor und nach der Vereinigung.

5.2 Semiautomatische Erweiterung

Das im vorigen Abschnitt vorgestellte automatische Verfahren zur Rekonstruktion von Gebäuden geht von der Rechteckzerlegung der Grundrisse aus. Details von Gebäuden, wie etwa Dachgauben, welche nicht einen entsprechenden Hinweis im Grundriss besitzen, werden daher durch das Verfahren nicht erfasst. Zur Korrektur falscher Rekonstruktionen und für die Modellierung zusätzlicher Details wurde eine semiautomatische Erweiterung des Verfahrens implementiert. Diese ist voll in den Rekonstruktionsprozess integriert und erlaubt den Eingriff an verschiedenen Stellen des Gesamtablaufs (Abb. 5.5):

- Modifikation der zweidimensionalen Primitive. Möglich sind
 - Das Erzeugen und Löschen von 2D Primitiven.
 - Das Verschieben und Rotieren.
 - Die Änderung von Breite und Höhe.

¹⁶ Auch andere Forschergruppen haben die Behandlung von CSG-Operationen für Gebäudeprimitive zunächst mittels spezialisierter Eigenentwicklungen durchgeführt, siehe [Englert 1996].

¹⁷ Beispielsweise AutoCAD, Inventor, Mechanical Desktop, CADKEY, TurboCAD Solid Modeler, Vellum Solids, IronCad (Quelle: Spatial Technology Inc.).

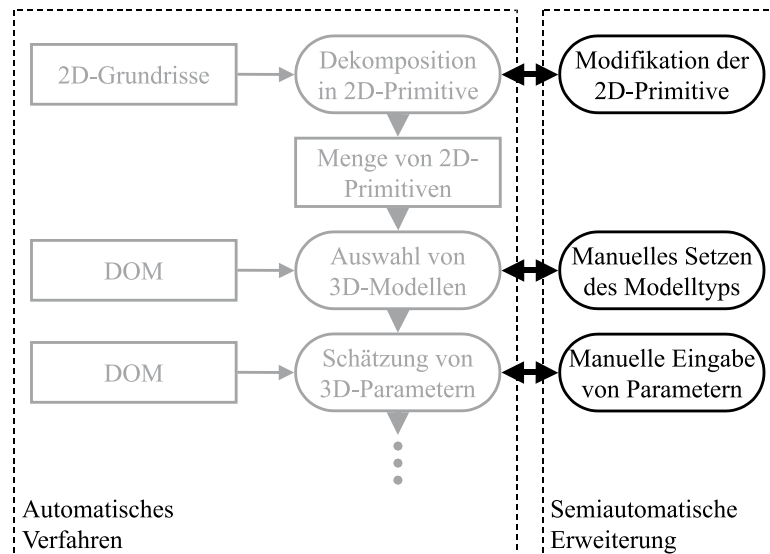


Abbildung 5.5: Erweiterung des vollautomatischen Verfahrens aus Abb. 5.1 um semiautomatische Komponenten.

- Veränderung der Menge von DOM-Punkten, welche für die Schätzung der Parameter des Primitivs herangezogen werden. Dies kann besonders in der Nähe von Sprungkanten eingesetzt werden, wo die Ausmasierung von (fehlerhaften) Punkten im Übergangsbereich zu einer Verbesserung der Schätzung führt.
- Der für die Rekonstruktion verwendete Modelltyp (Flach-, Sattel-, Walmdach) kann gesetzt werden.
- Alle Parameter können auch manuell eingegeben werden. Dadurch können beispielsweise die Höhen von Flachdachprimitiven, welche Bestandteil eines einzigen Flachdachs sind, exakt angeglichen werden.

Die Auswahl und Änderung der Primitive erfolgt dabei – ähnlich wie bei einem Zeichenprogramm – durch direkte Modifikation mittels einer Maus. Die jeweilige Funktionalität wird automatisch anhand der Klickposition selektiert: innerhalb des Primitivs wird eine Verschiebung durchgeführt, in Nähe der Seiten eine Veränderung von Breite bzw. Höhe und in Nähe der Eckpunkte eine Rotation um den Mittelpunkt. Die Veränderung der Menge von DOM-Punkten erfolgt in einem speziellen Modus. Die Funktionsweise entspricht der eines pixelorientierten Malprogramms. Jede Änderung stößt dabei eine Neuschätzung der Parameter des geänderten Primitivs an. Dadurch lassen sich die Auswirkungen von Veränderungen sofort betrachten und beurteilen.

Für die Interaktion mit dem Operator wurde eine graphische Benutzeroberfläche implementiert (Abb. 5.6). Sie besteht aus

- Einer beliebigen Anzahl von Fenstern, welche eine zweidimensionale Darstellung der Grundrisse und Primitive erlauben. Typischerweise können Orthobilder, gescannte Karten sowie DOM in Grauwertdarstellung unterlegt werden. Alle verwendeten Bilder müssen in derselben Auflösung (Rasterung des DOM) vorliegen. Die Selektion und Messung sowie die Modifikation von Punktmenen findet grundsätzlich in diesen Fenstern statt. Für die detaillierte Betrachtung existiert eine Zoomfunktion. Das Verhalten der einzelnen Fenster lässt sich getrennt einstellen, sie können entweder den Zoomeinstellungen anderer Fenster oder den Selektionen von Grundrissen und Primitiven folgen. Somit ist beispielsweise auch die gleichzeitige Sicht auf ein und dasselbe Bild in Zoom- und Übersichtsdarstellung (durch zwei getrennte Fenster) möglich.
- Einem Fenster, in dem das dreidimensionale Ergebnis der Rekonstruktion sowie das DOM in der Umgebung des rekonstruierten Gebäudes angezeigt wird. In diesem Betrachter lässt sich das Modell skalieren, verschieben und rotieren, so dass eine beliebige Ansicht erreicht werden kann. DOM und Rekonstruktion lassen sich getrennt ein- und ausblenden. Das momentan bearbeitete Primitiv wird farblich hervorgehoben.
- Einem Kontrollfenster. Dieses erlaubt die Auswahl von Grundrissen und Primitiven nach ihrer Nummer, die Selektion des Bearbeitungsmodus, sowie das explizite Setzen aller Parameter der Primitive.

Das semiautomatische Rekonstruktionstool baut auf einer Reihe von Programmen auf. Die Oberfläche wurde mittels der Software *XForms* [Zhao & Overmars 1995] erstellt. Sie verwaltet auch die für die zweidimensionale

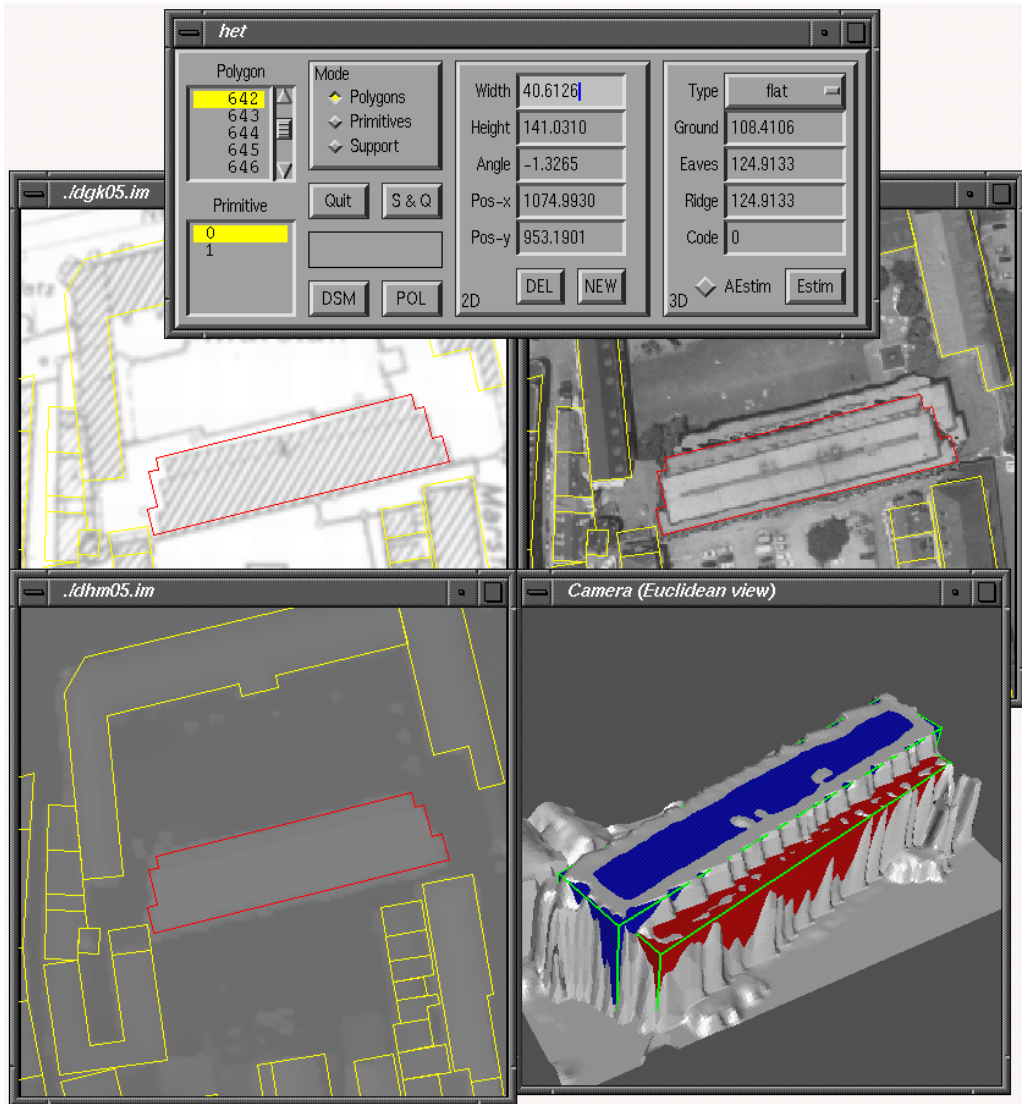


Abbildung 5.6: Grafische Benutzeroberfläche des Programms zur semiautomatischen Rekonstruktion. Die Grundrisse und 2D-Primitive können in einer beliebigen Anzahl von Fenstern angezeigt und mittels der Maus modifiziert werden. Daneben existiert eine dreidimensionale Ansicht (im Bild rechts unten), in welcher DOM und rekonstruierte Primitive überlagert dargestellt werden. Die Kontrolle erfolgt über ein separates Fenster, welches auch alle numerischen Werte anzeigt.

Anzeige eingesetzten Fenster, deren Inhalt jedoch durch Grafikfunktionen des Bildverarbeitungspaketes *KBVision (Gfx)* erzeugt wird [Amerinex 1996]. Die Verwaltung und Abspeicherung aller Daten erfolgt ebenfalls mittels KBV-Funktionen für die *intermediate symbolic representation (ISR)*. Die dreidimensionale Darstellung schließlich geschieht durch das Programm *geomview* [Phillips 1994], welches Geometrie und Befehle über eine UNIX-pipe erhält.

Abb. 5.7 zeigt Beispiele, welche mit dem semiautomatischen Editor erzeugt wurden. In allen Fällen wurden Fehler des automatischen Verfahrens korrigiert und zusätzliche Details wie Gauben und Dachaufbauten modelliert.

5.3 Ergebnisse des Verfahrens

Die Abb. 5.8–5.13 zeigen jeweils Grundrissdaten sowie die durch das automatische Verfahren erhaltenen dreidimensionalen Rekonstruktionsergebnisse. Tabelle 5.1 fasst die Daten der Projekte zusammen. Auf die Verbesserung des visuellen Eindrucks durch Hinzufügen von Geländemodellen und Textur geht Kapitel 7 ein.

Anhand von Tabelle 5.1 wird zunächst ein wesentlicher Vorteil des Verfahrens offensichtlich: Der Zeitbedarf

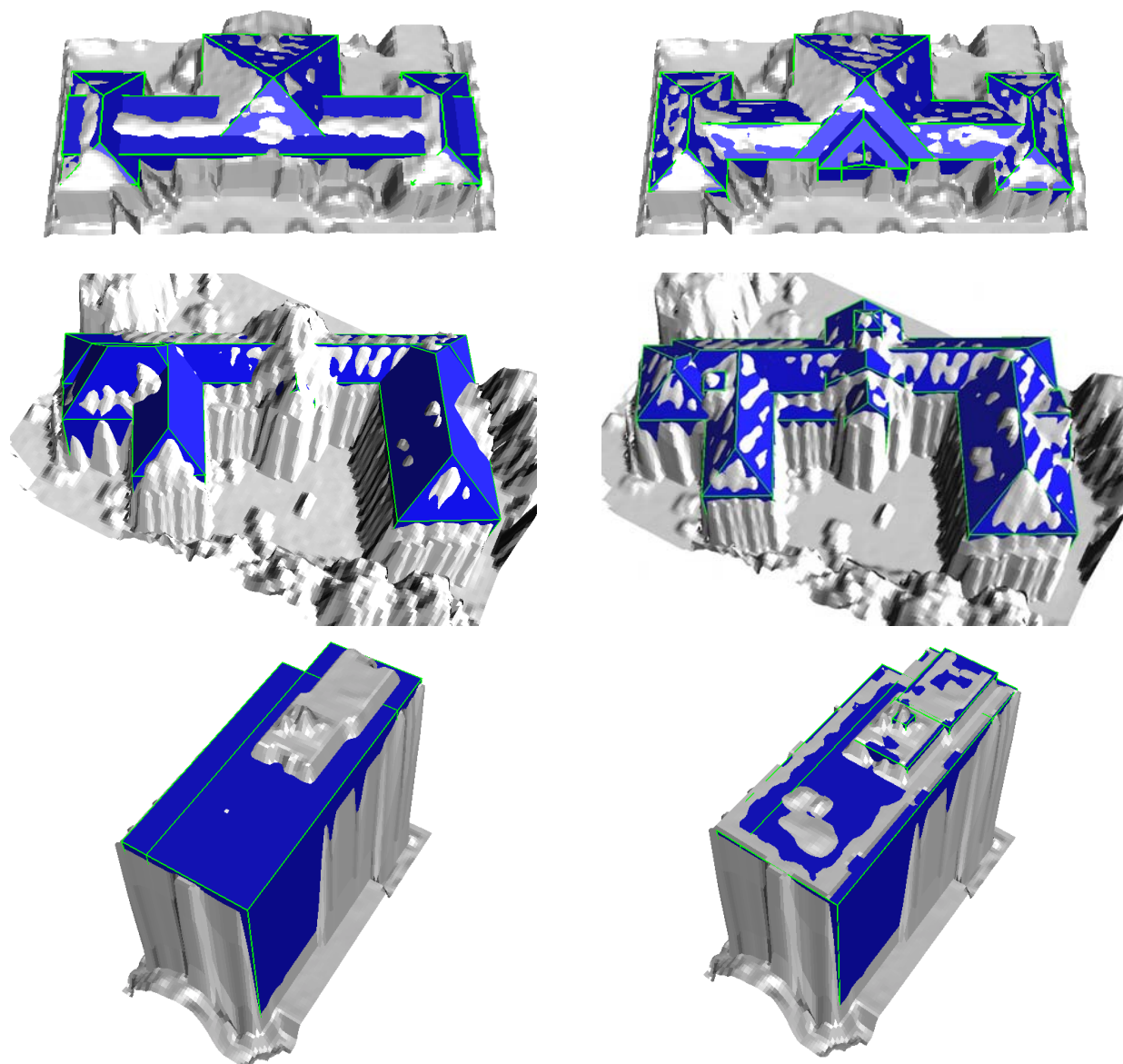


Abbildung 5.7: Drei Beispiele für die semiautomatische Bearbeitung von Rekonstruktionen. Dargestellt ist die Überlagerung des DOM und der rekonstruierten dreidimensionalen Primitive. Links das Ergebnis der automatischen Rekonstruktion, rechts die Rekonstruktion nach der manuellen Bearbeitung.

Projekt	Ausschnitt ca. m×m	Anzahl Grundrisse	Anzahl Primitive	Zeitbedarf ca. (Sekunden)	Zeit (Sekunden) pro Grundriss	Zeit (Sekunden) pro Primitiv
Karlsruhe (Durlacher Tor)	500×500	186	258	38.4	0.20	0.15
Heidelberg (Altstadt)	1150×780	1642	2173	246	0.15	0.11
Stuttgart (Zentrum)	1800×2300	5209	7087	424	0.08	0.06

Tabelle 5.1: Daten der in Abb. 5.8–5.13 gezeigten Projekte. Der Zeitbedarf bezieht sich auf die Ausführungszeit zur Ermittlung der dreidimensionalen Primitive auf einer Silicon Graphics O² Workstation mit MIPS R5000 Prozessor (180 MHz). Die Zeiten für die Vereinigung der Primitive durch den CAD-Kern ACIS sind nicht enthalten.

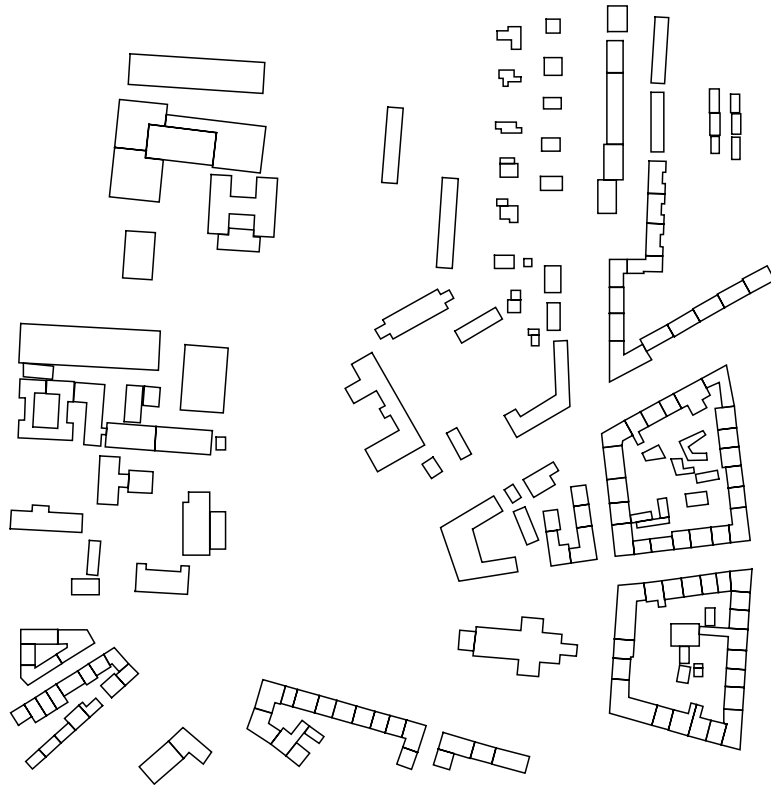


Abbildung 5.8: Grundrisse des Datensatzes "Karlsruhe".

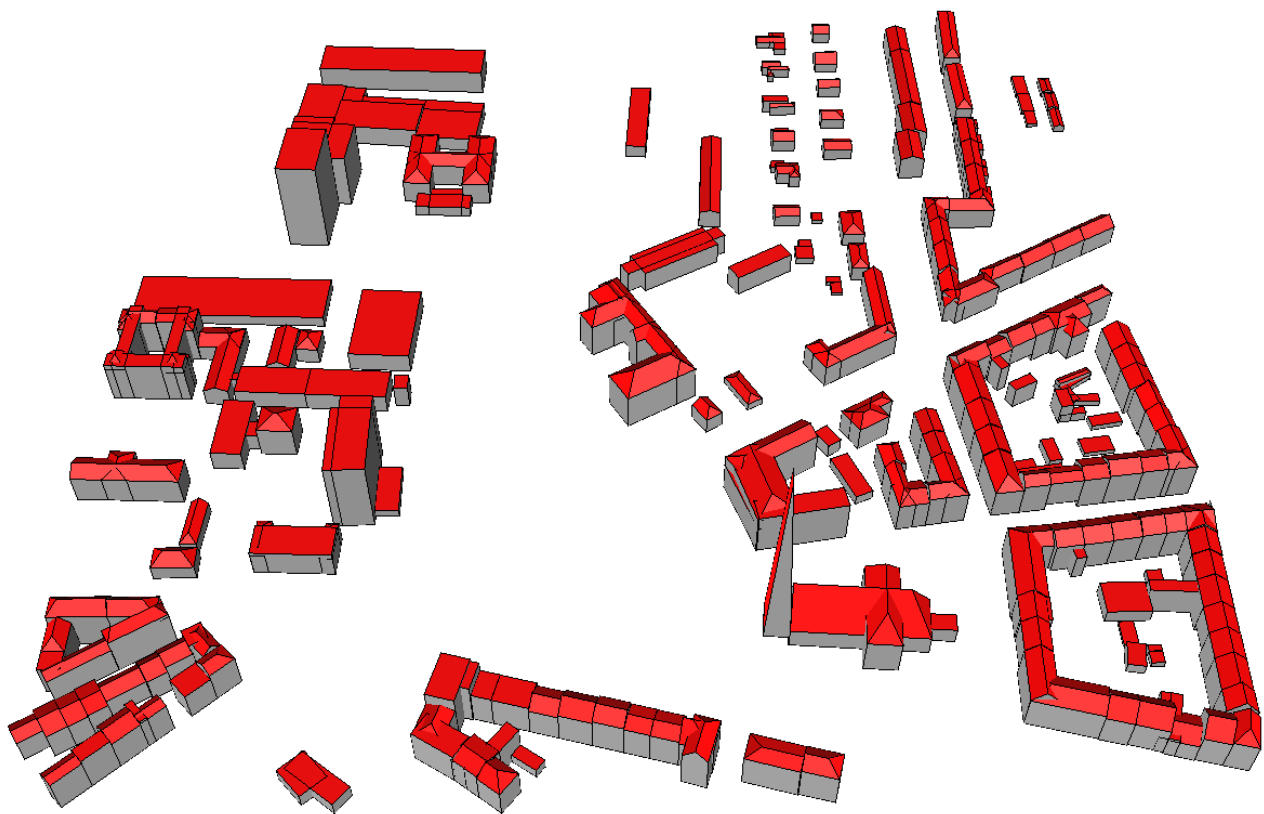


Abbildung 5.9: Ergebnis der automatischen Rekonstruktion für den Datensatz "Karlsruhe".



Abbildung 5.10: Grundrisse des Datensatzes "Heidelberg".

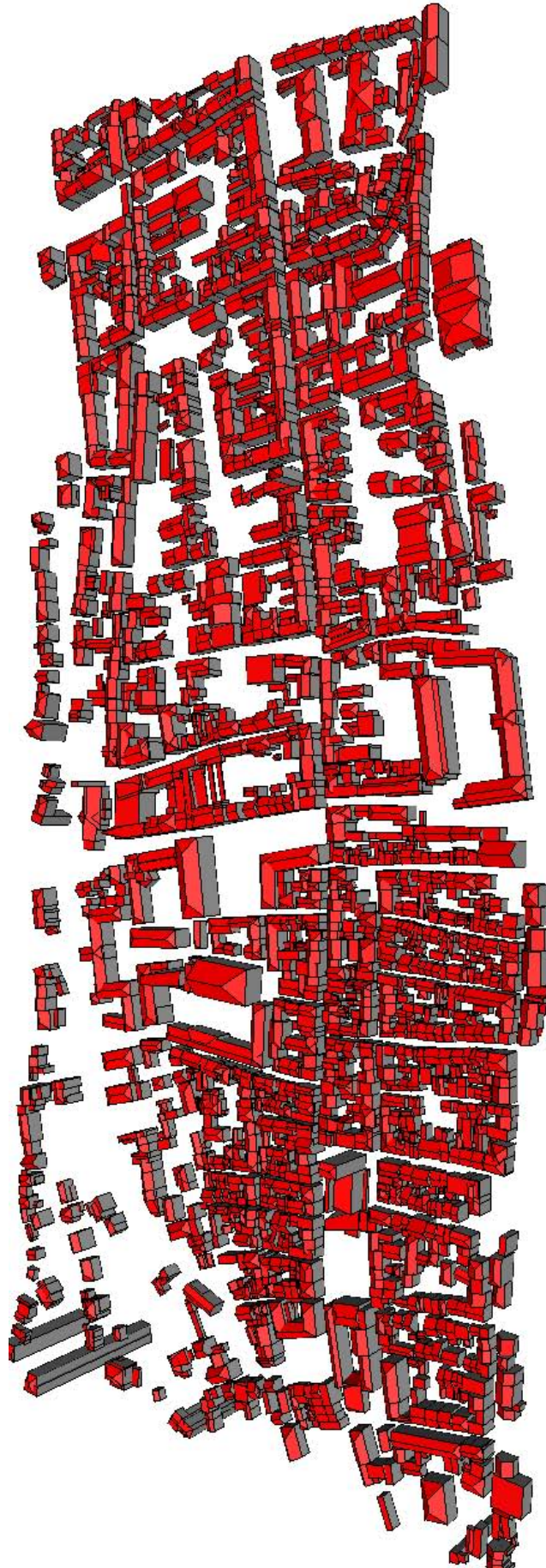


Abbildung 5.11: Ergebnis der automatischen Rekonstruktion für den Datensatz "Heidelberg".

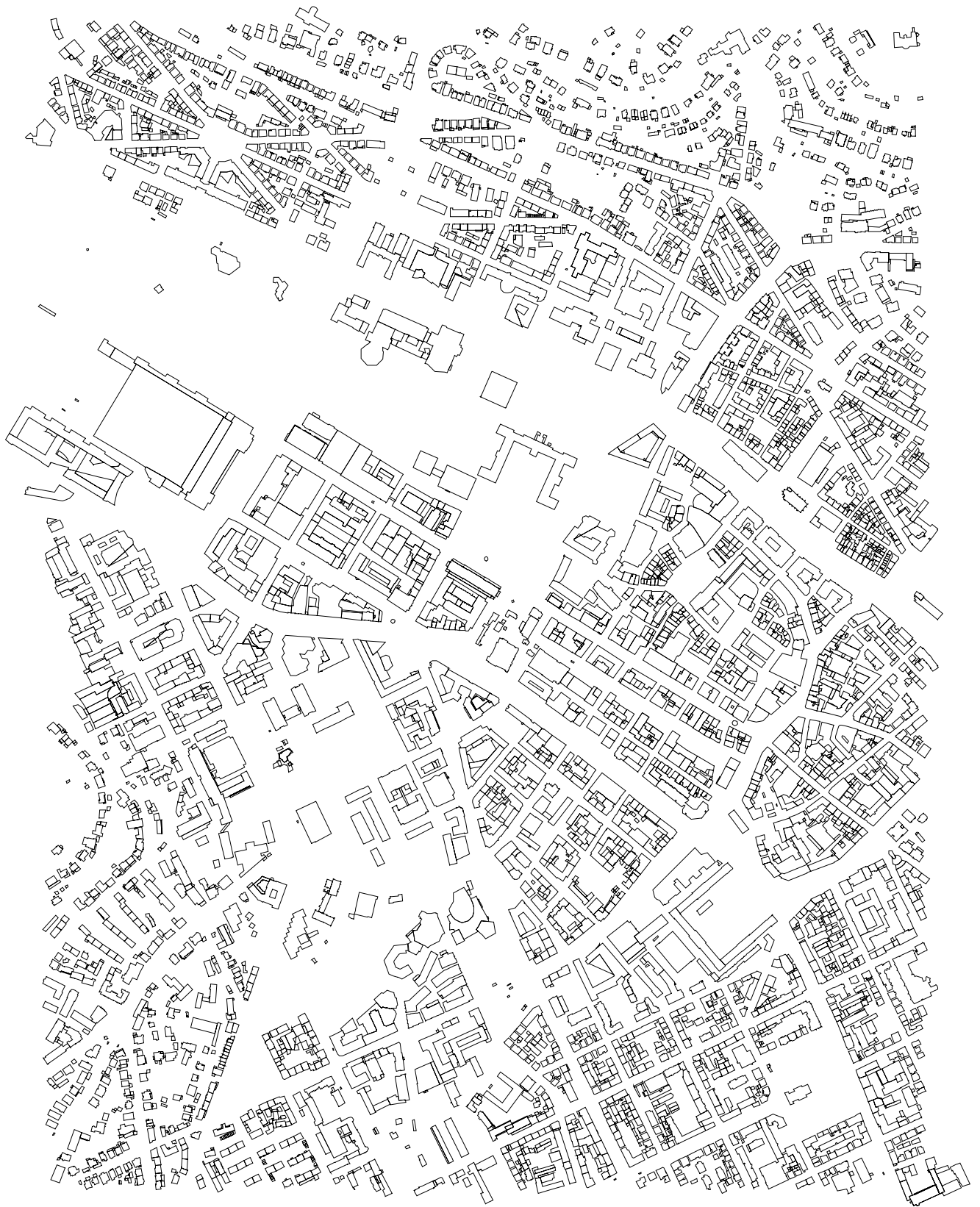


Abbildung 5.12: Grundrisse des Datensatzes "Stuttgart".



Abbildung 5.13: Ergebnis der automatischen Rekonstruktion für den Datensatz "Stuttgart".



Abbildung 5.14: Rekonstruktion "Stuttgart" nach semiautomatischer Nachbearbeitung.

ist – verglichen mit einer manuellen Vorgehensweise – extrem gering¹⁸. Dadurch ist eine inkrementelle Vorgehensweise möglich, welche zunächst innerhalb kürzester Zeit umfangreiche Modelle erzeugt, die dann selektiv korrigiert bzw. detailliert werden können. Die *Korrektur* wird sich dabei an einem für jedes Gebäude ermittelten Rekonstruktionsfehler (s.u.) orientieren. Die *Detaillierung* dagegen kann projektbezogen erfolgen. Beispielsweise können zunächst öffentliche Gebäude und Plätze behandelt werden oder Gebäude entlang eines virtuellen Flugpfads einer Animationssequenz.

Bei genauer Betrachtung der Abb. 5.9, 5.11 und 5.13 erkennt man die folgenden qualitativen Rekonstruktionsfehler:

- Bei Gebäuden mit *komplexen* und *nicht rechtwinkligen Grundrissen* führt die Dekomposition oft zu einer hohen Anzahl von Rechtecken, welche zur Überdeckung notwendig sind. Dadurch entstehen z.T. sehr “verschachtelte” Rekonstruktionen. Durch die anschließende Vereinigung können dennoch gute Dachformen erhalten werden, insbesondere wenn die beteiligten Primitive vom Typ Flachdach sind.
- Häufig besitzen *Flachdächer* zusätzliche Aufbauten, welche die Erkennung erschweren (vgl. Abb. 3.26 auf Seite 55). Durch die Fragmentierung ist der Prozentsatz der als senkrecht erkannten Punkte des DOM zu gering. Deshalb wird eine geneigte Dachform gewählt. Dieser Effekt tritt insbesondere dann auf, wenn Flachdächer ein zusätzliches, nach innen versetztes Stockwerk aufweisen. Die Rekonstruktion kann in diesen Fällen zu sehr spitzen Sattel- oder Walmdächern führen (siehe etwa Abb. 5.13, vgl. das Ergebnis der manuellen Nachbearbeitung in Abb. 5.14).
- Hohe und schlanke *Türme* werden häufig fehlerhaft rekonstruiert, weil nur sehr wenige (und oft im Bereich der steilen Kanten fehlerhafte) Beobachtungen für die Parameterschätzung zur Verfügung stehen. Aufgrund der kleinen Fläche und der geringen Messpunktdichte von Laserscandaten lässt sich eine Entscheidung über die Dachform nicht zuverlässig treffen.
- Daneben gelten die Bemerkungen zur Dekomposition aus Abschnitt 4.3.2. Gebäude, deren Grundrisse sich nicht in (hier lediglich rechteckige) zweidimensionale Primitive zerlegen lassen, können selbstverständlich auch mit dem darauf aufbauenden Rekonstruktionsansatz nicht sinnvoll behandelt werden.

Ein offensichtlicher Mangel des Verfahrens ist, dass das DOM zwar zur Modellwahl und Parameterschätzung der *dreidimensionalen* Primitive eingesetzt wird, nicht jedoch bei der Unterteilung des Grundrisses in *zweidimensionale* Primitive. Dadurch wird ein erheblicher Teil der Strukturierung unter ausschließlicher Verwendung von Grundrissen durchgeführt. In Kapitel 6 werden Verfahren vorgestellt, welche die Information des DOM stärker bei der Strukturierung berücksichtigen.

In der hier implementierten Form unterstützt das Verfahren keine Innenhöfe. Obwohl diesbezüglich keine prinzipiellen Einschränkungen bestehen, erfordert die durchgängige Speicherung und Berücksichtigung mehrerer Polygone pro Gebäude einen entsprechenden Mehraufwand bei Design und Implementierung der Verfahren. In manchen Fällen kann man sich durch eine geschickte Digitalisierung des Grundrisses behelfen, indem künstliche Unterteilungen des Grundrisses an willkürlich gewählten Stellen erfolgen. Problematisch ist dann jedoch häufig, dass diese Unterteilungsstellen in der dreidimensionalen Rekonstruktion sichtbar bleiben.

Eine quantitative Beurteilung des Ergebnisses kann durch den Vergleich der Rekonstruktion mit dem DOM erfolgen. Dazu wird für jeden Punkt des DOM, welcher sich innerhalb eines Grundrisses befindet und für welchen eine Rekonstruktion vorliegt, der Betrag des Abstands $|\Delta z_i|$ von der rekonstruierten Fläche berechnet. Die bildliche Darstellung von $|\Delta z_i|$ kann sehr gut in Verbindung mit der semiautomatischen Nachbearbeitung eingesetzt werden. Einerseits ist sofort sichtbar, welche Gebäude der Nachbearbeitung bedürfen, andererseits kann aus der Verteilung der Fehler innerhalb eines Gebäudegrundrisses auf die Ursache geschlossen werden. Fehlende oder falsch gewählte dreidimensionale Primitive können oft sofort erkannt werden. Abb. 5.15 zeigt eine Darstellung von $|\Delta z_i|$ für die automatisch rekonstruierten Gebäude des Datensatzes “Karlsruhe”, Abb. 5.16 dieselbe Darstellung, jedoch für die semiautomatisch nachbearbeitete Rekonstruktion.

¹⁸Der eingesetzte Code wurde in keiner Weise zeitoptimiert, so dass hier bei Bedarf noch Steigerungen erzielt werden können. Die kurzen Ausführungszeiten im Fall des “Stuttgart”-Datensatzes gehen auf die Verwendung eines DOM mit Rasterweite 1 m zurück (sonst 0.5 m).



Abbildung 5.15: Differenzbild für den Datensatz "Karlsruhe", automatische Rekonstruktion. Gezeigt ist der Betrag der Abweichung $|\Delta z_i|$ des DOM von der rekonstruierten Fläche. Der dargestellte Wertebereich ist von 0 m (weiß) bis 3 m (schwarz).

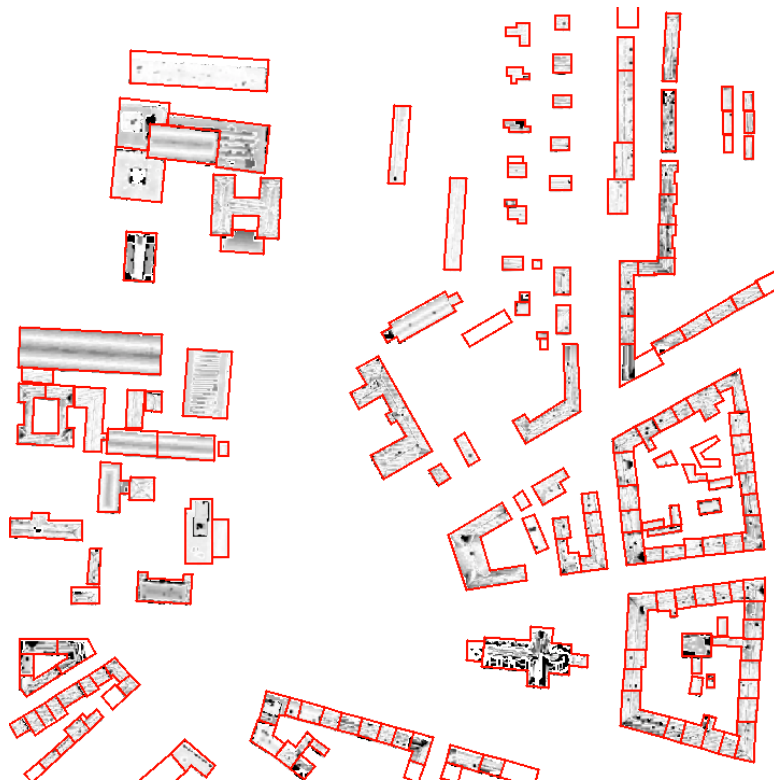


Abbildung 5.16: Differenzbild für den Datensatz "Karlsruhe", semiautomatische Nachbearbeitung. Darstellung wie in Abb. 5.15.

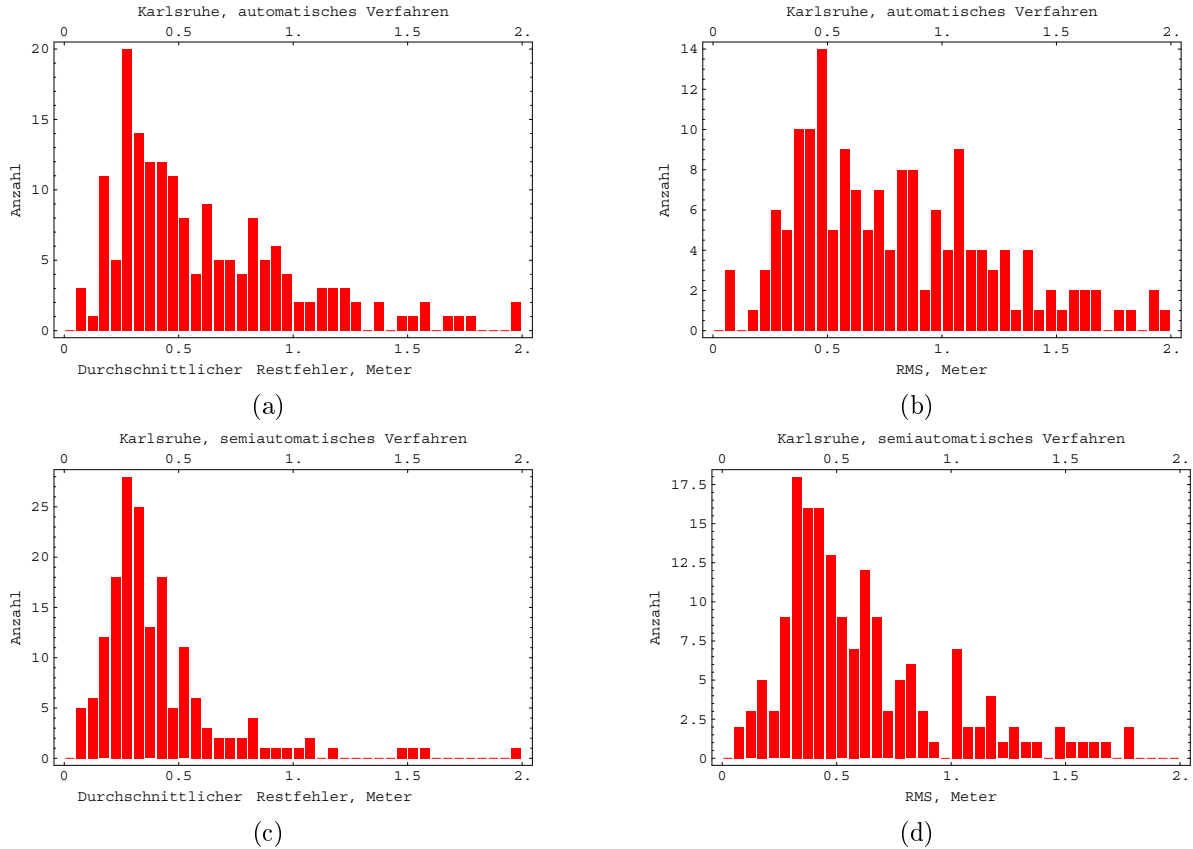


Abbildung 5.17: Histogramme von durchschnittlichem absoluten Restfehler und RMS für den Datensatz “Karlsruhe”. (a), (b): für die automatisch durchgeführte Rekonstruktion. (c), (d): für die semiautomatische Nachbearbeitung. Die Histogrammeinträge sind im Intervall 5 cm.

Aus den Werten $|\Delta z_i|$ werden *getrennt für jedes Gebäude* der durchschnittliche absolute Restfehler

$$m_j := \frac{1}{\#M_j} \sum_{i \in M_j} |\Delta z_i|, \quad (5.7)$$

sowie die RMS-Abweichung (*root mean square*)

$$\text{rms}_j := \left(\frac{1}{\#M_j} \sum_{i \in M_j} (\Delta z_i)^2 \right)^{1/2} \quad (5.8)$$

berechnet, wobei M_j die Menge aller Punktindizes darstellt, welche sich innerhalb des Grundrisses j befinden. In Abb. 5.17 sind Histogramme von durchschnittlichem absoluten Restfehler und RMS für den Datensatz “Karlsruhe” gezeigt. Dabei ist erkennbar, dass die größte Häufigkeit im Bereich eines durchschnittlichen absoluten Fehlers von 25–30 cm auftritt. Die RMS-Abweichung liegt bei etwa 0,5 m und ist damit (wie erwartet) etwas höher als die Angaben zur Genauigkeit von DOM aus Laserscanning (Abschnitt 2.2.2). Durch eine manuelle Nachbearbeitung der Rekonstruktion (vgl. Abb. 5.15 und 5.16) reduziert sich vor allem die Anzahl der groben Fehler, so dass die Häufigkeit durchschnittlicher absoluter Fehler größer 0,5 m abnimmt (Abb. 5.17(c)). Die größte Häufigkeit ergibt sich dann bei einer RMS-Abweichung von 30–35 cm.

Abb. 5.18 zeigt die zugehörigen Histogramme für die Datensätze “Heidelberg” und “Stuttgart”. Dabei ergeben sich im Vergleich zu “Karlsruhe” etwas schlechtere Ergebnisse für Heidelberg, sowie erheblich schlechtere Resultate für “Stuttgart”. Letzteres wird auf die Verwendung eines DOM mit Rasterweite 1 m zurückgeführt (0,5 m bei “Karlsruhe” und “Heidelberg”). Zur globalen Beurteilung werden die durchschnittlichen Größen aus Gl. 5.7 und 5.8 über alle Gebäude gebildet:

$$dm := \frac{1}{\#N} \sum_{j \in N} m_j$$

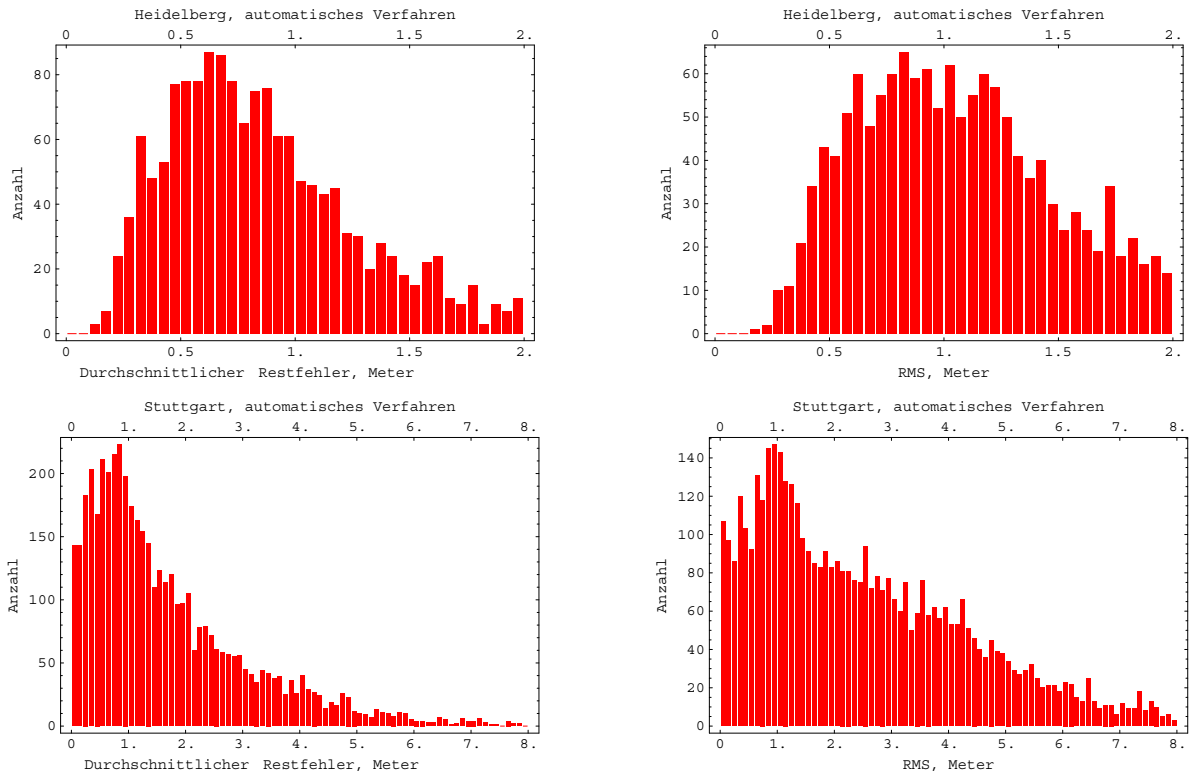


Abbildung 5.18: Histogramme von durchschnittlichem absoluten Restfehler und RMS für die Datensätze “Heidelberg” und “Stuttgart”.

Projekt	#N	dm (Meter)	drms (Meter)
Karlsruhe (automatisch)	179	0.767	1.157
Karlsruhe (manuell)	174	0.472	0.737
Heidelberg (automatisch)	1617	0.990	1.353
Stuttgart (automatisch)	4669	1.917	2.827

Tabelle 5.2: Tabelle globaler Größen zur Beurteilung der Rekonstruktion. Die Größen ‘dm’ und ‘drms’ sind in Gl. 5.9 definiert.

$$\text{drms} := \frac{1}{\#N} \sum_{j \in N} \text{rms}_j \quad (5.9)$$

wobei N die Menge aller Gebäudeindizes ist. Tabelle 5.2 zeigt die erhaltenen Werte für die vorgestellten Projekte. Die anhand der Histogramme ausgemachten Trends werden durch diese Tabelle bestätigt.

Bei der Beurteilung der Rekonstruktion mittels dieser Größen ist jedoch zu beachten, dass Fehler im DOM voll in die Maßzahlen nach Gl. 5.7, 5.8 und 5.9 eingehen. Es kann auch vorkommen, dass durch manuelle Nacharbeitung der Fehler vergrößert wird: Werden beispielsweise DOM-Punkte aus der Schätzung ausgeschlossen, weil sie auf dicht neben dem Gebäude stehende Vegetation oder Bebauung zurückzuführen sind, so wird die Rekonstruktion verbessert – die Maßzahlen für die Fehler erhöhen sich jedoch.

6 Verallgemeinerte Ansätze

6.1 Nicht-kanonische Dächer über Grundrissen

In Abschnitt 4.2.2 wurde das *Skelett* eines Polygons vorgestellt. Dieses korrespondiert mit der Konstruktion eines *kanonischen* Dachs, bei dem alle Dachflächen dieselbe Neigung besitzen. Des Weiteren wurde die Darstellung in Form eines Graphen G eingeführt. Die Frage, welche in diesem Abschnitt näher beleuchtet werden soll, ist, welche anderen Dächer über einem gegebenen Grundriss erzeugt werden können. Dabei soll die Grundannahme bestehen bleiben, dass nur eine Traufhöhe existiert und an jeder Traufkante genau eine Dachfläche entspringt.

Offensichtlich kann man durch die Variation von Dachneigungen *topologisch* verschiedene Graphen G (und damit Dächer) erzeugen. Da die Definition des Skeletts jedoch rein konstruktiv (ausgehend von P und gegebenen Dachneigungen) erfolgt, lässt sich die Zahl der topologisch verschiedenen Dächer damit nicht ohne weiteres ermitteln. Die Situation ist mit derjenigen bei *Aspektgraphen* vergleichbar. Auch dort liegen kontinuierliche Parameter vor (welche die Orientierung beschreiben), nicht jede Variation führt jedoch zu einem neuen Aspekt. Abschnitt 6.1.1 geht auf die Ermittlung der maximalen Anzahl topologisch verschiedener Dächer ein. In Abschnitt 6.1.2 wird die Generierung von "Repräsentanten" für gegebene Graphen betrachtet.

Daneben können jedoch auch andere Graphen G erzeugt werden, welche – trotz identischem Grundpolygon P und identischer Dachneigungen – vom Skelett verschieden sind. Hier ist also die Aufgabenstellung, *unter Beibehaltung der Dachneigungen* alle möglichen Topologien zu generieren. Dies wird in Abschnitt 6.1.3 behandelt.

6.1.1 Die maximale Anzahl erzeugbarer Topologien

Wäre es möglich, die Rekonstruktion von Dächern auf der Basis eines Ansatzes durchzuführen, welcher zunächst alle möglichen Graphen G erzeugt und anschließend denjenigen selektiert, welcher am besten zu gegebenen Daten (DOM, Luftbild) passt? Dies entspräche einem modellbasierten Vorgehen (*hypothesize-and-test*), welches – unabhängig von tatsächlich vorhandenen Dachneigungen – alle verschiedenen Topologien erzeugt und erst im zweiten Schritt versucht, eine Anpassung unter Erhalt der Topologie vorzunehmen.

Nach Abschnitt 4.2.2 (Seite 59) werden Skelette durch einen Algorithmus gebildet, welcher die beiden folgenden Ereignisse unterscheidet:

1. im Polygon P' besitzt eine Kante die Länge null und wird gelöscht (*Kantenereignis*)
2. ein Punkt in P' berührt eine Kante von P' . Dadurch wird P' in zwei Polygone P'' und P''' aufgespalten (*Unterteilungsereignis*).

In jedem Fall wird ein entsprechender Knoten des Graphen G erzeugt. Man kann diese Vorgehensweise etwas abstrahieren, indem man das Polygon mit den Kanten p_1, p_2, \dots, p_n durch die Folge $(1, 2, \dots, n)^{19}$ und die eingefügten Knoten $v_{i,j,k}$ durch $[i, j, k]$ bezeichnet. Dadurch können die Ereignisse in Form der folgenden Regeln formuliert werden:

1. Kantenereignis:

$$(1, \dots, i, j, k, \dots, n) \xrightarrow{[i,j,k]} (1, \dots, i, k, \dots, n),$$

mit $1 \leq j \leq n$, $i = j - 1$, $k = j + 1$.

2. Unterteilungsereignis:

$$(1, \dots, i, j, \dots, k, \dots, n) \xrightarrow{[i,j,k]} (j, \dots, k) \text{ und } (k, \dots, n, 1, \dots, i),$$

mit $1 \leq j \leq n$, $i = j - 1$, $1 \leq k \leq n$, $k \notin \{i - 1, i, j, j + 1\}$. Wegen der letzten Bedingung können Unterteilungsereignisse nur für $n \geq 5$ eintreten.

3. Ende:

$$(1, 2, 3) \xrightarrow{[1,2,3]} \emptyset.$$

¹⁹Diese Folge soll *zyklisch* sein, d.h. $(1, 2, \dots, n)$ und $(2, \dots, n, 1)$ etc. sind äquivalent.

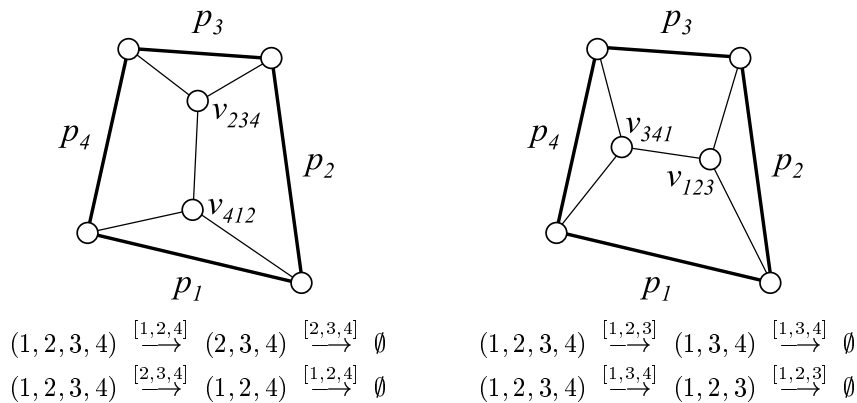
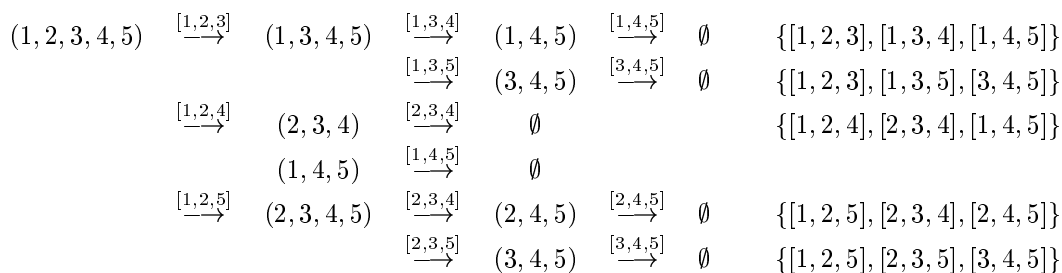


Abbildung 6.1: Die beiden topologisch verschiedenen Lösungen $\{[1, 2, 4], [2, 3, 4]\}$ und $\{[1, 2, 3], [1, 3, 4]\}$ über Grundrissen P mit $n = 4$ Seiten.



n	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$s(n)$	2	5	14	42	132	429	1430	4862	16796	58786	208012	742900

Abbildung 6.2: Die topologisch verschiedenen Lösungen für $n = 5$ (oben) sowie die maximale Anzahl verschiedener Lösungen für einige n (unten).

Beispielsweise erhält man für ein Polygon mit vier Seiten durch Anwendung dieser Regeln die in Abb. 6.1 gezeigten Resultate, wobei jedoch *nur zwei topologisch verschiedene* Lösungen erzeugt werden, welche durch die Knotenmengen $\{[1, 2, 3], [1, 3, 4]\}$ und $\{[1, 2, 4], [2, 3, 4]\}$ gekennzeichnet sind und den beiden möglichen Orientierungen des Dachgiebels entsprechen (Abb. 6.1). Zu beachten ist, dass die Anwendung dieser Regeln unabhängig von der (zweidimensionalen) Position der erzeugten Knoten stattfindet, welche durch Angabe der Dachsteigungen (und zusätzlicher Bedingungen) festgelegt wird. Ob eine Knotenmenge tatsächlich realisiert werden kann, hängt von der Geometrie von P ab (vgl. Abschnitt 6.1.2).

Wie viele verschiedene Knotenmengen erhält man für ein Grundpolygon von n Seiten? Abb. 6.2(oben) zeigt die fünf verschiedenen Lösungen, die sich für $n = 5$ ergeben. Bezeichnet $s(n)$ die Anzahl der Lösungen bei n Polygonseiten, so ergibt sich

$$\begin{aligned} s(3) &= 1 \\ s(4) &= s(3) + s(3) = 2 \\ s(5) &= s(4) + s(3) \cdot s(3) + s(4) = 2 + 1 + 2 = 5 \\ s(6) &= s(5) + s(3) \cdot s(4) + s(4) \cdot s(3) + s(5) = 5 + 2 + 2 + 5 = 14 \end{aligned}$$

bzw. allgemein die Rekursionsformel

$$s(n) = s(n - 1) + s(3) \cdot s(n - 2) + s(4) \cdot s(n - 3) + \dots + s(n - 2) \cdot s(3) + s(n - 1) \tag{6.1}$$

mit $s(n) = 0$ für $n < 3$ und $s(3) = 1$. Der erste und letzte Term rührt dabei von einem Kanteneignis, die dazwischenliegenden von Unterteilungseignissen her. $s(n)$ wächst sehr schnell, Abb. 6.2(unten) zeigt die Funktionswerte $s(n)$ für einige n . Da nach Gl. 6.1 gilt $s(n) \geq 2 \cdot s(n - 1)$, folgt $s(n) \geq 2^{n-3}$, d.h. es liegt ein exponentielles Wachstum vor. Das oben erwähnte, modellbasierte Vorgehen auf der Basis der Erzeugung *aller* möglichen Graphen G ist somit für größere n nicht erfolgversprechend.

wodurch $3(n-2)$ Gleichungen, $n-2$ neue Unbekannte z_{ijk} und $n-1$ neue Unbekannte s_l eingeführt werden (ein Wert $s_l \neq 0$ kann beliebig festgelegt werden)²³. Somit werden genau die gewünschten $3(n-2) - (n-2) - (n-1) = n-3$ Freiheitsgrade fixiert. Die dritte Beschränkung für Knotenpositionen lautet somit:

3. Jeder Knoten v_{ijk} ist die Projektion eines Punkts im dreidimensionalen Raum, welcher zugleich in den Ebenen Π_i , Π_j und Π_k liegt.

Diese Ebenenbedingung wurde vor allem im Bereich der Interpretation von Strichzeichnungen verwendet. Sugihara [1982] hat als erster notwendige und hinreichende Bedingungen formuliert, unter welchen Strichzeichnungen korrekte Projektionen von Polyedern darstellen²⁴.

Die Beschränkungen (2) führen auf ein Ungleichungssystem, welches linear in den unbekanntem Knotenpositionen ist. Dagegen enthalten die Beschränkungen (3) in Gleichung 6.2 Produkte unbekannter Größen. Somit lassen sich diese zwar als notwendige Kriterien einsetzen, die Möglichkeit einer Bestimmung von Knotenpositionen durch *lineare Programmierung* [Dantzig 1963] ist jedoch nicht gegeben. Alternativ kann eine Linearisierung durchgeführt werden, und die Positionen werden iterativ durch eine kleinste-Quadrate-Lösung mit Ungleichungen (*non-negative least squares*) bestimmt [Lawson & Hanson 1974].

6.1.3 Vom Skelett verschiedene Graphen

Sind sowohl das Grundpolygon P als auch die Dachneigungen gegeben, kann durch die Bildung des Skeletts auf eindeutige Weise der Graph G erhalten werden. Will man jedoch alternative Graphen gewinnen, so ist der Algorithmus für die Skelettbildung eher hinderlich. Gefordert ist eine Vorgehensweise, welche die *Suche* nach Lösungen in einem *Lösungsraum* erlaubt.

Dazu wird folgender Ansatz verwendet. Ignoriert man die degenerierten Fälle, so entstehen alle Dachpunkte im Raum durch Schnitt von jeweils drei Ebenen. Bei gegebenem Grundpolygon und Dachneigungen sind diese Ebenen bekannt. Die dreidimensionalen Schnittpunkte und die Lage ihrer zweidimensionalen Projektionen v_{ijk} können aus den Dachflächen Π_i , Π_j , Π_k berechnet werden. Bei n Polygonseiten erhält man so maximal $\binom{n}{3}$ mögliche innere Knoten, von denen jedoch nur $n-2$ für den Graphen G in Betracht kommen.

Zur Lösung dieses Problems werden die (projizierten) Ebenenschnittpunkte v_{ijk} sowie die Polygonpunkte v_{ij} , $j = i + 1$ durch Kanten verbunden. Dadurch werden sowohl die Kanten als auch die durch sie verbundenen Knoten für G akzeptiert. Es entsteht ein gültiger Graph, wenn die folgenden Eigenschaften erfüllt sind:

1. Da die Kanten Ebenenschnitten entsprechen, können zwei Punkte v_A ²⁵ und v_B nur dann durch die Kante e_C verbunden werden, wenn $C = A \cap B$ und $\#C = 2$.
2. Polygonpunkte müssen Knoten vom Grad 1 sein (d.h., Blätter), innere Knoten vom Grad 3. Alle Polygonpunkte müssen in G enthalten sein.
3. Der entstehende Graph G muss ein *ebener Graph* sein [Diestel 1996].

Die Erstellung des Graphen G erfolgt damit durch Auswahl geeigneter Kanten und Knoten. Somit liegt nun kein Konstruktions- sondern vielmehr ein Suchproblem vor. Abb. 6.4 und Abb. 6.5 zeigen Beispiele für Polygone mit vier und sechs Grundseiten.

Das Suchproblem lässt sich durch Tiefensuche (bzw. *backtracking*) lösen [Aho, Hopcroft & Ullman 1983]. Abb. 6.6 zeigt einen Grundriss und die zwei verschiedenen über ihm konstruierbaren Dächer (Graphen). Ein Nachteil dieses Vorgehens ist, dass die Lösung quasi "durch Probieren" ermittelt wird. Dies führt zu einer exponentiellen Komplexität der Suche und ist somit nur für sehr kleine n anwendbar. Möglichkeiten zur Verkleinerung des Suchraums werden im folgenden Abschnitt behandelt.

²³Die Unbekannten z_{ijk} entsprechen dabei den Höhen der dreidimensionalen Punkte über v_{ijk} , die Unbekannten s_l den Steigungen der Dachflächen Π_l .

²⁴Dieser Artikel enthielt einen Fehler, der durch eine Modifizierung von Sugihara [1984] behoben wurde.

²⁵In Mengenschreibweise, d.h. v_{ijk} entspricht v_A mit $A = \{i, j, k\}$.

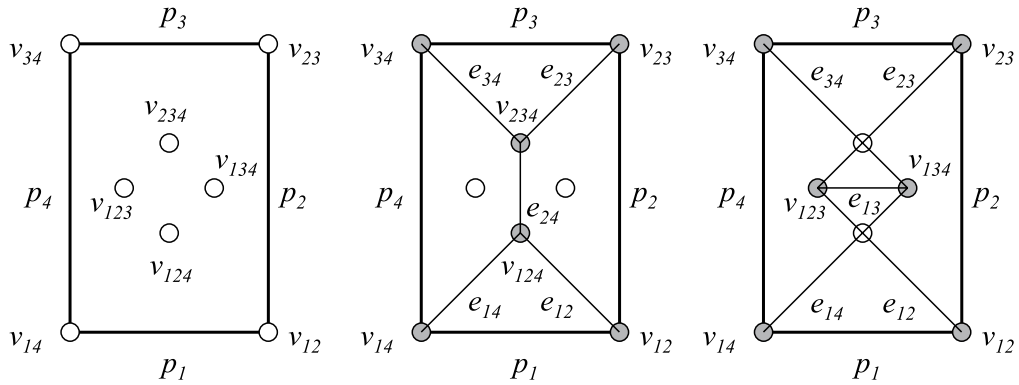


Abbildung 6.4: Bildung eines Graphen durch Auswahl von Kanten, für einen einfachen Grundriss mit $n = 4$ Seiten. Die $\binom{4}{3} = 4$ Schnittpunkte und die $n = 4$ Polygonpunkte müssen verbunden werden, so dass die inneren Knoten vom Grad 3 sind mit den Polygonpunkten als Blättern. Ist e_{24} Bestandteil von G , dann entsteht ein gültiger Graph, wird dagegen e_{13} verwendet, ist der Graph (bei den gegebenen Dachneigungen) nicht eben.

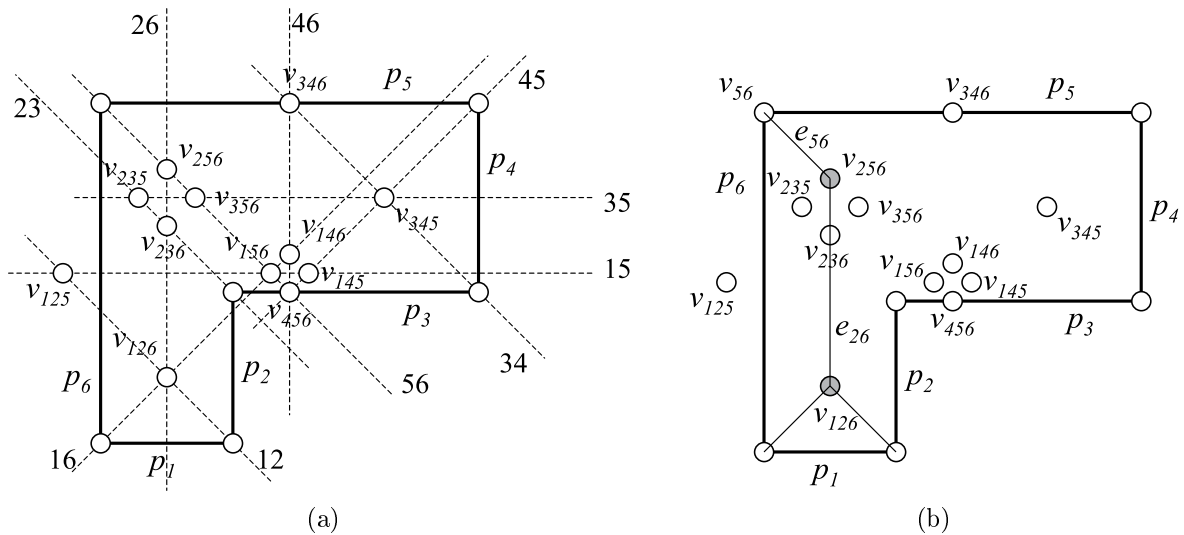


Abbildung 6.5: Beispiel für ein Polygon mit $n = 6$ Grundseiten. (a) Von den $\binom{6}{3} = 20$ möglichen Knoten entfallen die Schnitte $\Pi_1 \cap \Pi_3$ und $\Pi_2 \cap \Pi_4$, weil diese Ebenen jeweils parallel sind. Somit verbleiben 12 Schnittpunkte. Gestrichelt dargestellt sind die in die Grundebene projizierten Schnittlinien jeweils zweier Ebenen. (b) Beispiel für eine falsche Kantenwahl. Die Kante e_{26} verbindet v_{126} und v_{256} . Da die weitere Verbindung an v_{256} die Kante e_{56} ist, müsste als dritte Kante e_{25} gewählt werden. Hierfür kommen nur die Punkte v_{235} und v_{125} in Betracht, welche jedoch beide auf der falschen Seite von e_{26} liegen. Somit ist klar, dass sich mit den gezeigten Kanten kein ebener Graph mehr erzeugen lässt.

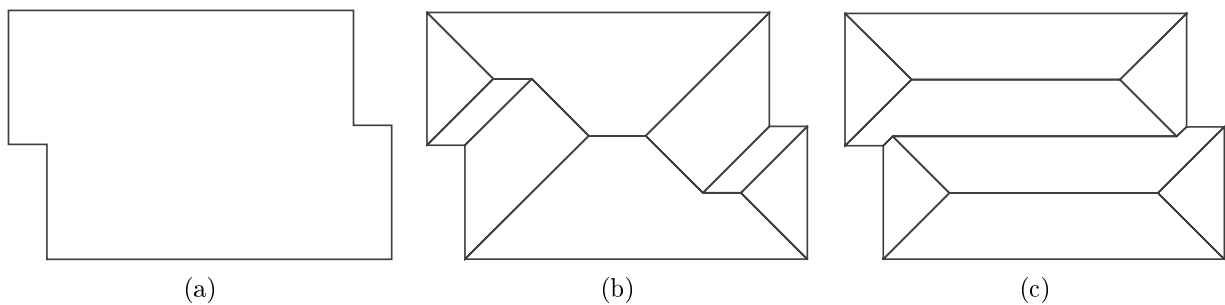


Abbildung 6.6: Verschiedene Dächer über einem Grundriss. (a) Der Grundriss mit $n = 8$ Seiten suggeriert zwei "ineinandergestellte" Häuser, etwa zwei Häuser einer versetzten Reihenhausanlage. (b) Mittels Skelettbildung und Suchverfahren gefundenes Dach. Hierdurch wird ein ungewöhnlich hohes Dach mit großem Volumen erzeugt. (c) Weiteres, nur vom Suchverfahren gefundenes Dach. Diese Lösung spiegelt eher die Interpretation zwei getrennter Häuser wider.

6.1.4 Reduktion des Suchraums durch Beschränkungen und diskrete Relaxation

Betrachtet man Abb. 6.5(b), so wird offensichtlich, dass eine erste Reduktion des Suchraums erzielt werden kann durch Entfernung von Punkten, welche sich außerhalb des Grundrisses befinden (v_{125}). Daneben lässt sich aber auch sehen, wie eine Beschränkung der Suche zur Reduktion des Suchraums führt: Der gezeigte Graph lässt sich zu keinem gültigen Graphen mehr ergänzen. Es ist demnach nicht nötig, weitere Kanten und Knoten hinzuzufügen, bis $n - 2$ innere Knoten und $2n - 3$ Kanten in G sind, vielmehr kann sofort eine der Kanten e_{26} bzw. e_{56} entfernt werden. Auf die Darstellung der Suche in Form eines Suchbaums bezogen bedeutet dies, dass ganze Teile des Baums entfallen können, wenn die Nichtrealisierbarkeit erkannt wird. Eine solche Vorgehensweise wird auch als Baumsuche mit Beschränkungen (*constrained tree search*) bezeichnet. Sie wird häufig eingesetzt, besonders in Verbindung mit geometrischen Beschränkungen [Grimson 1990].

An Abb. 6.5(b) wird jedoch auch ein Nachteil der Baumsuche mit Beschränkungen offensichtlich. Nimmt man an, die Nichtrealisierbarkeit des Graphen wird erkannt und in Konsequenz wird die Kante e_{26} entfernt. Sodann wird das Suchverfahren mit der Wahl anderer Kanten fortfahren. Man kann jedoch voraussehen, dass alle Versuche, welche den Knoten v_{256} beinhalten, fehlschlagen müssen, und zwar mittels folgender Argumentation:

- Der Knoten v_{256} muss über die Kanten e_{25} , e_{56} und e_{26} verbunden sein (um den Grad 3 zu besitzen).
- Die Kante e_{56} kann nur zum Knoten v_{56} hin erfolgen, weil v_{56} ein Blatt jedes gültigen Graphen sein muss.
- Die Kante e_{26} verläuft nach unten, entweder zu v_{236} oder zu v_{126} .
- Für e_{25} verbleibt jetzt als einzige Möglichkeit eine Kante zu v_{235} . Dieser Punkt liegt jedoch links von e_{26} . Anhand des Graphen erkennt man, dass die Fläche π_2 rechts von e_{26} ist. Andererseits ist π_5 rechts von e_{56} – somit würden π_2 und π_5 aneinanderstoßen, ohne dass eine Kante zwischen ihnen existieren würde.

Es kann also bereits *vor der Suche* ermittelt werden, dass der Knoten v_{256} nicht Bestandteil einer Lösung sein kann, weil die erforderliche Kombination von Kanten bei v_{256} nicht möglich ist. Der Schlüssel zur Beurteilung liegt bei der Einbringung von zusätzlicher Information, welche durch die Geometrie gegeben ist: Die Kante e_{ij} verbindet nicht nur zwei Knoten, sondern besitzt eine “linke” und “rechte” Fläche π_i und π_j , welche sie trennt. An jedem Knoten wiederum ist die Kombination der Kanten nicht beliebig. Im folgenden werden zunächst die Eigenschaften der Kanten, dann die der Knoten betrachtet.

Eine *Kante* e_{ij} ist die Projektion des Schnitts E_{ij} zweier Ebenen Π_i , Π_j (Abb. 6.7(a)). Der Schnitt kann, aus positiver z -Richtung betrachtet, entweder konkav (–) oder konvex (+) sein (Abb. 6.7(b)). Die Schnittart lässt sich nicht aus der relativen Lage der zugehörigen Traufkanten P_i , P_j bzw. Polygonseiten p_i , p_j ableiten. Bei einem konkaven Schnitt befindet sich jedoch π_i “links”, π_j “rechts” der Linie; bei konvexem Schnitt entsprechend umgekehrt (Abb. 6.7(c)). Die Art des Schnitts korrespondiert also eindeutig mit einer Zuordnung von π_i und π_j . Man kann daher e_{ij} weiter unterscheiden in eine konkave (e_{ij}^-) bzw. konvexe Kante (e_{ij}^+).

Ein *Knoten* v_{ijk} des Graphen ist die Projektion eines Schnitts V_{ijk} dreier Ebenen (Abb. 6.8(a)). Entsprechend besitzt der Knoten den Grad 3 und die eingehenden Kanten e_{ij} , e_{jk} und e_{ik} . Nach den eben erfolgten Betrachtungen lassen sich die Kanten jedoch weiter differenzieren – beispielsweise in e_{ij}^+ und e_{ij}^- . Auch die Knoten lassen sich weiter differenzieren. Bei näherer Betrachtung stellt sich heraus, dass nur die in Abb. 6.8(b) gezeigten acht Fälle von Knoten möglich sind. Beispielsweise entspricht Fall 0 der Sicht *auf* eine Würfecke (drei konvexe Kanten), Fall 7 der Sicht *in* eine Würfecke (drei konkave Kanten).

Die Auswirkungen der Differenzierung werden anhand eines einfachen Grundrisses erläutert (Abb. 6.9). Position und Projektionen der Schnittgeraden sind für den Punkt v_{124} bekannt (Abb. 6.9(a)). Die Frage ist nun, welche Kantenkombinationen an v_{124} auftreten können. Die Verbindung e_{12} zu v_{12} ist konvex, weil der Grundriss bei v_{12} einen konvexen Punkt besitzt. Die Kante ist also vom Typ e_{12}^+ , und eine entsprechende Kante muss bei v_{124} vorhanden sein. In Abb. 6.8(b) ist ersichtlich, dass dies nur für den Fall 0 zutrifft. Von den acht Möglichkeiten verbleibt demnach nur die in Abb. 6.9(b) gezeigte für v_{124} . Analog kann man für die Knoten v_{134} , v_{234} und v_{123} argumentieren und erhält so das in Abb. 6.9(c) gezeigte Ergebnis. Somit wird bereits durch Betrachtung der möglichen Kantenkombinationen klar, dass v_{123} und v_{134} nicht Bestandteil einer Lösung sein können, weil ihre Kanten e_{13}^+ nicht aufeinander zu gerichtet sind.

Man kann die möglichen Kantenkombinationen auch als *Interpretationen* \mathfrak{S} bezeichnen. Somit besitzt ein Knoten v_{ijk} maximal die Interpretationen $\mathfrak{S}(v_{ijk}) = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ aus Abb. 6.8(b). Jede Kante e_{ij} besitzt zwei

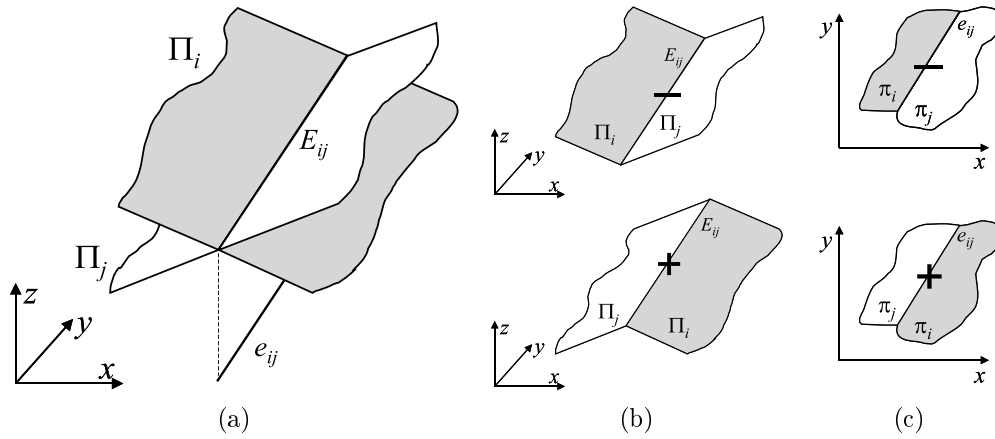


Abbildung 6.7: Schnitt zweier Ebenen. (a) Ebenenschnitt E_{ij} im Raum und seine Projektion e_{ij} . (b) Je nach Auswahl der beiden Halbebenen entsteht entweder ein konkaver oder ein konvexer Schnitt. (c) Dadurch liegt die "links" bzw. "rechts" der Projektion liegende Fläche π_i bzw. π_j fest.

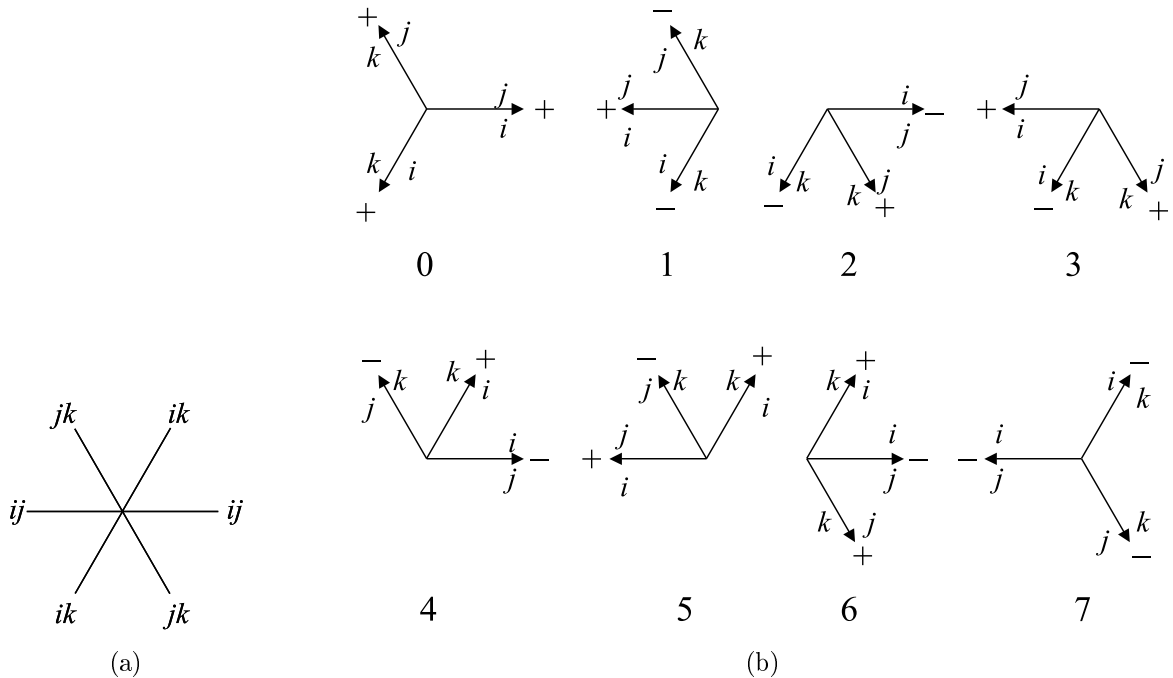


Abbildung 6.8: Die möglichen Kombinationen von Knoten und Kanten. (a) Die Projektion der Schnitte von drei Ebenen (in allgemeiner Lage). (b) Darauf aufbauend die acht möglichen Kombinationen von konkaven und konvexen Kanten.

mögliche Interpretationen, und zwar $\mathfrak{S}(e_{ij}) = \{e_{ij}^+, e_{ij}^-\}$. Man kann Kanten anhand ihrer Lage relativ zu einem Knoten noch weiter differenzieren. Die Kante e_{ij} heißt *positiv orientiert* bei v_{ijk} , wenn sie in Richtung der Kante e_{ij} der Interpretation 0 von v_{ijk} zeigt. Positive bzw. negative Orientierung werden kenntlich gemacht durch \vec{e}_{ij}^+ bzw. \vec{e}_{ij}^- . In Abb. 6.8(b) besteht also Interpretation 0 aus den Kanten $\vec{e}_{ij}^+, \vec{e}_{jk}^+, \vec{e}_{ik}^+$, Interpretation 1 aus $\vec{e}_{ij}^+, \vec{e}_{jk}^-, \vec{e}_{ik}^-$.

Durch Ausnutzung der begrenzten Anzahl von Interpretationen lässt sich die Suche nach einer Lösung erheblich vereinfachen. Dabei ist besonders die *Baumsuche mit Beschränkungen* und die *diskrete Relaxation* einsetzbar.

Die **Baumsuche mit Beschränkungen** wurde bereits eingangs des Abschnitts erwähnt. Sie kann folgendermaßen verwendet werden. Wird eine Kante e_{ij} während der Suche mit einer bestimmten Interpretation akzeptiert, dann wird die Zahl der Interpretationen für die Knoten v_{ijk} und v_{ijl} an beiden Kantenenden entsprechend verringert. In Abb. 6.9 führte beispielsweise die Kante e_{12}^+ zwischen v_{12} und v_{124} zu einer Reduktion auf $\mathfrak{S}(v_{124}) = \{0\}$. Nicht immer wird durch die Wahl einer Kante $\#\mathfrak{S}(v_{ijk}) = 1$. Generell reduziert die Lage der Kante relativ zum Knoten die möglichen Fälle von acht auf vier; je nach Interpretation

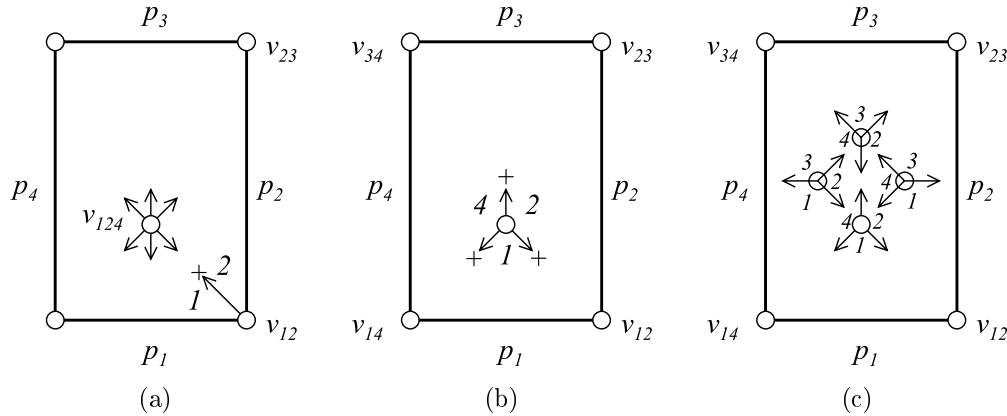


Abbildung 6.9: Interpretation von Knoten und Kanten. (a) Die acht möglichen Interpretationen werden bei Verwendung der Kante e_{12} von v_{12} nach v_{124} auf nur eine Interpretation reduziert (b). (c) Entsprechend erhält man die Interpretationen der anderen Knoten, aus denen ersichtlich ist, dass v_{134} und v_{123} nicht Bestandteil einer Lösung sein können.

der Kante verbleiben hiervon ein bzw. drei Fälle.

Bei der Baumsuche mit Beschränkungen erfolgt der Einsatz der Bedingungen *nur während der Suche*. Stellt sich die Wahl einer Kante im Laufe der Suche als falsch heraus, muss neben der Kante selbst natürlich auch die durch sie in den angrenzenden Knoten veränderte Interpretation zurückgenommen werden.

Demgegenüber kann die **diskrete Relaxation** vor der eigentlichen Suche durchgeführt werden. Sie besitzt damit den Vorteil einer polynomiellen (anstatt exponentiellen) Zeitkomplexität. Sie ersetzt jedoch die Suche i.a. nicht vollständig, sondern schränkt nur den Suchraum vorab ein.

Diskrete Relaxation wurde zuerst von Ullmann [1965], Ullmann [1966] beschrieben. Waltz [1975] (siehe auch [Winston 1987]) hat ihre Leistungsfähigkeit anhand des Problems der Interpretation von Strichzeichnungen demonstriert²⁶. Um die diskrete Relaxation zu formulieren, werden die folgenden Definitionen benötigt.

Die Menge der Kanten, welche von einem Knoten v_{ijk} der Interpretation n ausgehen, wird mit \mathcal{A}_{ijk}^n bezeichnet. Beispielsweise ist $\mathcal{A}_{ijk}^0 = \{\vec{e}_{ij}^+, \vec{e}_{jk}^+, \vec{e}_{ik}^+\}$. \mathcal{A}_{ijk}^n ist in Abb. 6.8(b) angegeben. Die Menge aller ausgehenden Kanten eines Knotens v_{ijk} ist

$$\mathcal{A}_{ijk} := \bigcup_{n \in \mathfrak{S}(v_{ijk})} \mathcal{A}_{ijk}^n,$$

und berücksichtigt somit die Menge der möglichen Interpretationen. Bei $\mathfrak{S}(v_{ijk}) = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ enthält \mathcal{A}_{ijk} 12 Kanten, bei nur einer Interpretation verbleiben drei Kanten. Die Menge der ausgehenden Kanten eines Knotens v_{ij} des Grundpolygons P ist entweder $\mathcal{A}_{ij} = \{\vec{e}_{ij}^+\}$ oder $\mathcal{A}_{ij} = \{\vec{e}_{ij}^-\}$, abhängig davon, ob P bei v_{ij} konvex oder konkav ist.

Eine Kante e_{ij} zwischen v_{ijk} und v_{ijl} ist *kompatibel* mit der Interpretation n von v_{ijk} , wenn (a) v_{ijl} in Richtung der Kante e_{ij} aus \mathcal{A}_{ijk}^n liegt, und (b) die Schnittart (konkav bzw. konvex) übereinstimmt. Eine Menge \mathcal{E} von Kanten *unterstützt* die Interpretation n von v_{ijk} , wenn für alle (drei) Kanten in \mathcal{A}_{ijk}^n (mindestens) eine entsprechende Kante in \mathcal{E} existiert, welche mit n kompatibel ist. Die Menge aller Interpretationen des Knotens v_{ijk} , welche von einer Kantenmenge \mathcal{E} unterstützt wird, wird mit $\mathfrak{S}_{ijk}(\mathcal{E})$ bezeichnet.

Die diskrete Relaxation lässt sich nun wie folgt formulieren:

1. Starte mit den maximalen Interpretationsmengen $\mathfrak{S}(v_A) = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ für jeden möglichen inneren Knoten v_A . Die Interpretation der Knoten v_{ij} auf P wird nicht berücksichtigt.
2. Wiederhole die folgenden Schritte, so lange sich mindestens eine Interpretationsmenge $\mathfrak{S}(v_A)$ ändert:
 - (a) Für jeden möglichen Knoten v_A :

²⁶Der Übergang von binären auf kontinuierliche Kriterien führt zur *kontinuierlichen Relaxation*, welche von Rosenfeld, Hummel & Zucker [1976] vorgestellt wurde.

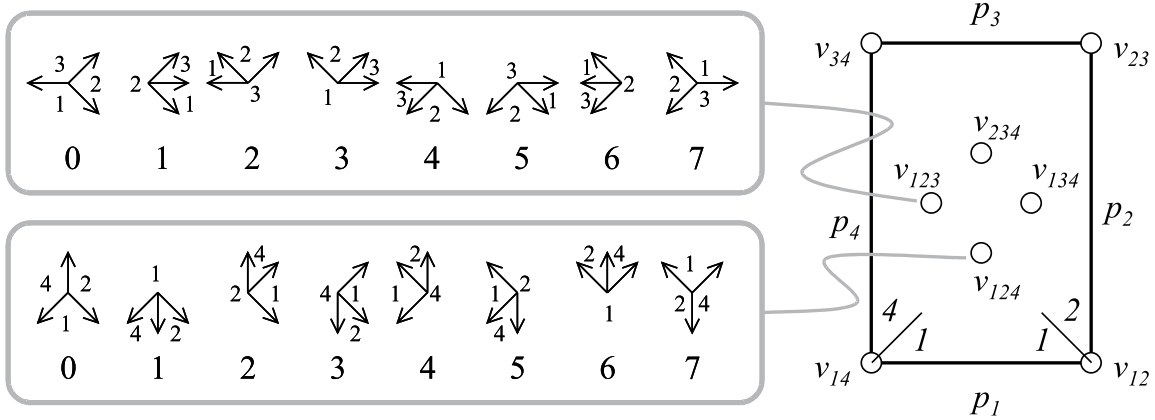


Abbildung 6.10: Beispiel zur Funktionsweise der diskreten Relaxation. Gezeigt ist ein Grundriss sowie die maximal möglichen Interpretationen von zwei inneren Knoten.

- i. Bestimme alle Kanten, welche v_A möglicherweise mit einem weiteren Knoten v_B verbinden:

$$\mathcal{E} = \bigcup_{\#(A \cap B)=2} \mathcal{A}_B.$$

- ii. Reduziere die bei v_A möglichen Interpretationen:

$$\mathfrak{S}(v_A) = \mathfrak{S}(v_A) \cap \mathcal{S}_A(\mathcal{E}).$$

Das Ergebnis der diskreten Relaxation ist eine Menge von Interpretationen $\mathfrak{S}(v_{ijk})$ für jeden Knoten v_{ijk} . Auf der Basis dieser Mengen kann im Anschluss eine Baumsuche mit Beschränkungen durchgeführt werden. Knoten mit $\mathfrak{S}(v_{ijk}) = \emptyset$ können sofort ausgeschlossen werden.

Die Anwendung der diskreten Relaxation lässt sich anhand eines Beispiels erläutern. In Abb. 6.9 wurde gezeigt, wie die Wahl einer Kante (während des Suchvorgangs) die Zahl der Lösungen auf nur eine reduziert. Im folgenden wird dargelegt, wie die diskrete Relaxation dasselbe Ergebnis ohne Suche erreicht. Abb. 6.10 (rechts) zeigt den bekannten Grundriss mit den vier möglichen Knoten v_{124} , v_{134} , v_{234} und v_{123} . Für v_{124} und v_{123} ist die maximale Menge möglicher Interpretationen angegeben. Die diskrete Relaxation geht von diesen Mengen aus, welche sie iterativ verkleinert.

Zunächst zum Knoten v_{124} : möglicherweise wird dieser mit v_{12} verbunden, dann wäre Interpretation 0 die einzige Lösung. Die Interpretationen 1, 2, 3 entfallen, weil sie die Kante e_{12}^- benötigen, der einzige Punkt in diese Richtung jedoch v_{12} ist, welcher e_{12}^+ fordert. Aufgrund derselben Argumentation mit dem Knoten v_{14} entfällt Interpretation 4. Die Interpretationen 5 und 7 entfallen ebenfalls, weil kein Knoten unterhalb v_{124} existiert, welcher mit einer Kante e_{24} verbunden werden könnte. Es verbleibt somit $\mathfrak{S}(v_{124}) = \{0, 6\}$.

Als nächstes wird der Knoten v_{123} betrachtet. Die Interpretationen 0, 2, 4, 6 entfallen, weil kein Knoten links von v_{123} existiert, 3 und 7, weil kein Knoten links oberhalb existiert. Die Interpretationen 1 und 5 entfallen auch, weil sie die Kante e_{12}^- erfordern, v_{12} bzw. v_{124} jedoch nur die Kante e_{12}^+ erlauben²⁷. Deshalb ist $\mathfrak{S}(v_{123}) = \emptyset$. Dadurch entfällt im nächsten Durchgang Interpretation 6 von v_{124} . Insgesamt verbleibt somit $\mathfrak{S}(v_{124}) = \{0\}$, $\mathfrak{S}(v_{234}) = \{0\}$, $\mathfrak{S}(v_{123}) = \emptyset$, $\mathfrak{S}(v_{134}) = \emptyset$. In diesem Fall findet die diskrete Relaxation also die Lösung, ohne dass eine anschließende Suche notwendig ist. Abb. 6.11 zeigt den Unterschied zwischen einer Suche mit und ohne vorhergehender diskreter Relaxation anhand einiger tatsächlicher Grundrisse.

6.2 Generierung von Graphen auf der Basis von DOM

In Abschnitt 6.1.3 wurde die Generierung von Dächern auf der Basis von Ebenenschnitten beschrieben. Das vorgestellte Verfahren erzeugt im ersten Schritt alle Punkte im dreidimensionalen Raum, welche sich durch den

²⁷Die einzige Möglichkeit für e_{12}^- wäre \overleftarrow{e}_{12} bei Interpretation 7 von v_{124} , dort gilt jedoch bereits $7 \notin \mathfrak{S}(v_{124}) = \{0, 6\}$.

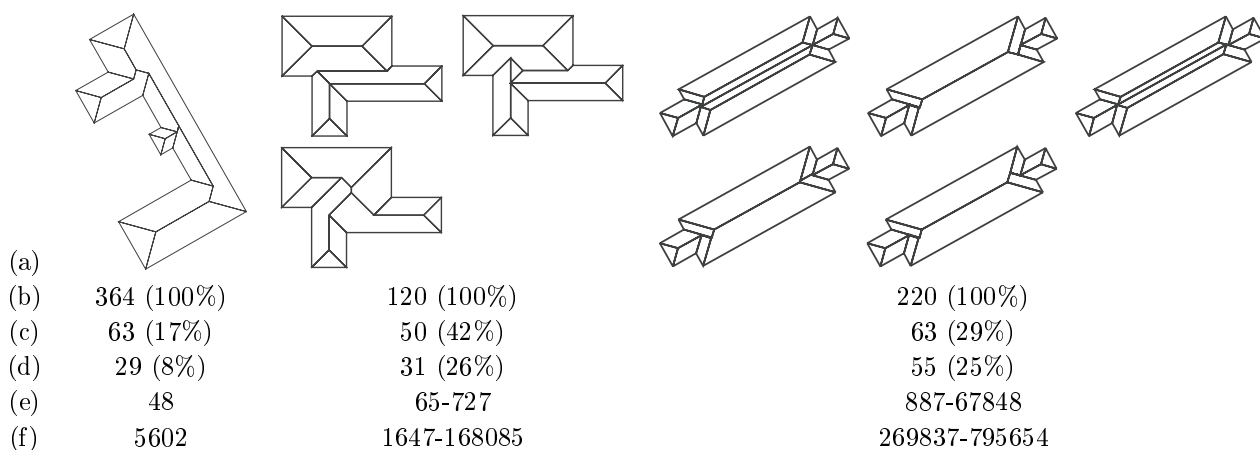


Abbildung 6.11: Beispiel für die Anwendung von Suche und diskreter Relaxation. (a) Grundrisse und die jeweils durch Suche gefundenen Dächer. (b) Anzahl der möglichen Knoten. (c) Anzahl der Knoten, welche innerhalb des Grundrisses liegen. (d) Anzahl der Knoten nach diskreter Relaxation. (e) Anzahl der Suchschritte, wenn diskrete Relaxation benutzt wird (Bereich, wenn mehr als eine Lösung existiert). (f) Anzahl der Suchschritte ohne diskrete Relaxation.

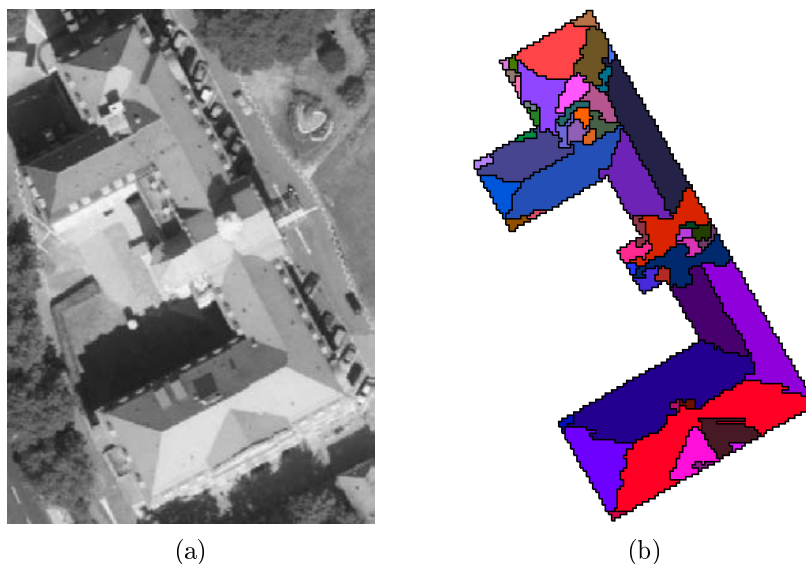


Abbildung 6.12: (a) Luftbild eines komplexen Gebäudes. (b) Zugehörige Segmentierung des DOM, gewonnen mittels der RANSAC-Methode (Abschnitt 3.4.4).

Schnitt von jeweils drei Ebenen ergeben. Im zweiten Schritt wird ein Suchverfahren eingesetzt, um auf der Basis dieser Punkte einen Graphen zu erhalten, welcher mit einem Dach korrespondiert. Die Verbesserung der Suche durch Beschränkungen und diskrete Relaxation wurde in Abschnitt 6.1.4 aufgezeigt.

Obwohl dieses Verfahren in Verbindung mit der Generierung von Dächern *aus Grundrissen* vorgestellt wurde, basiert es wesentlich auf dem Schnitt von Ebenen. Im Fall einer Generierung aus Grundrissen lassen sich diese bei Kenntnis der Polygonseiten und Dachneigungen angeben – sie können jedoch auch anderweitig gewonnen werden. In diesem Abschnitt wird die Segmentierung von DOM dazu benutzt, die benötigten Ebenengleichungen abzuleiten.

6.2.1 Ein grammatikalischer Ansatz zur Akzeptierung von Dachflächen

Betrachtet man Luftbild und Segmentierung in Abb. 6.12, so fällt auf, dass die Struktur des Gebäudes relativ gut wiedergegeben wird. Das Problem einer Rekonstruktion auf der Basis dieser Segmentierung besteht darin, die *richtigen* Regionen für die Rekonstruktion heranzuziehen. In der Regel helfen allgemeine Kriterien wie etwa die Größe oder Form von Regionen nur bedingt weiter. Dagegen bietet der Grundriss sehr wichtige Information zur Unterstützung der Selektion von Regionen.

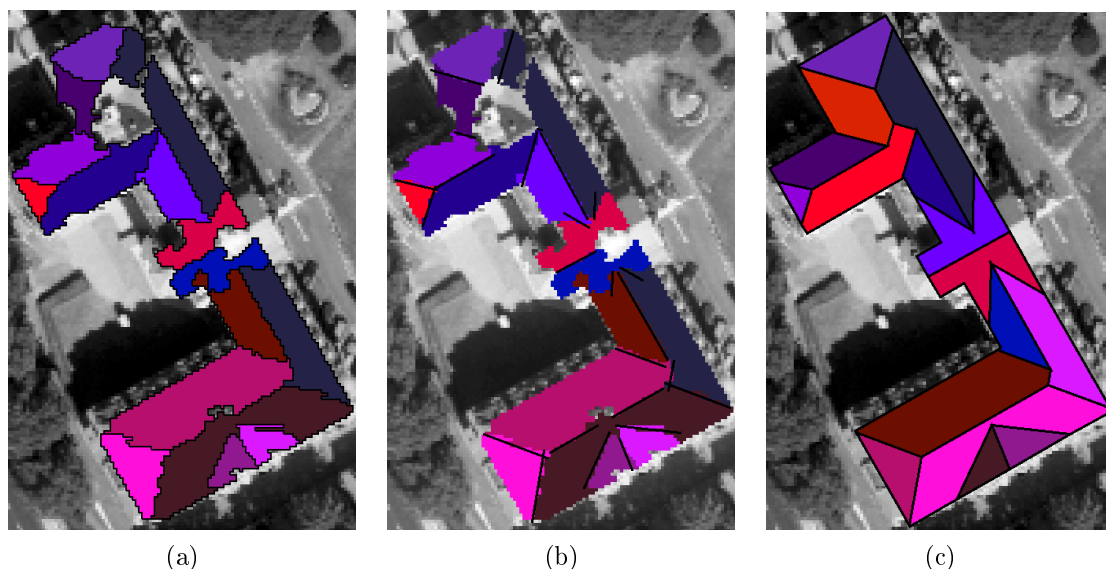


Abbildung 6.14: Akzeptierung von Regionen auf der Basis von Regeln. (a) Durch die Regeln (6.3–6.6) akzeptierte Regionen, aus der Gesamtmenge von Abb. 6.12. (b) Schnittlinien, berechnet an Stellen der Regionennachbarschaft. (c) Rekonstruierte Struktur der Dachfläche.

Es muss also zunächst die *Topologie* des Dachs ermittelt werden. Bei Einsatz von parametrischen Modellen stellt dies kein Problem dar, weil die Nachbarschaften von Flächen implizit durch das Modell gegeben sind. Bei einem generischen Ansatz ist man jedoch darauf angewiesen, die Nachbarschaften anhand der segmentierten Regionen zu bilden. Beispielsweise werden von Baillard & Zisserman [1999] die Grenzen von Dachflächen durch Linien definiert, welche sich durch den Schnitt “benachbarter” Ebenen ergeben. Ameri [2000] ermittelt die Begrenzungen der Dachflächen auf der Basis eines Regionenadjazenzgraphen (RAG), welcher aus den segmentierten Regionen gewonnen wird. Problematisch ist dabei, dass die segmentierten Regionen insbesondere an den Rändern unsicher sind – die Berührung der Ränder wird jedoch gerade zur Bildung der Nachbarschaftsrelationen herangezogen. Ameri [2000] versucht, das Problem von Lücken in der Segmentierung durch eine *Distanztransformation* zu lösen. Dabei werden nicht belegte Punkte der näherliegenden Region zugeschlagen. Auf der Basis dieser lückenfreien Segmentierung kann dann der Regionenadjazenzgraph bestimmt werden.

Die Grundproblematik ist dabei folgende: Einerseits stellt die Nachbarschaft von Regionen wichtige Hinweise für die tatsächliche Adjazenz von Dachflächen zur Verfügung, andererseits können Regionen benachbart sein, obwohl die zugehörigen Dachflächen dies nicht sind – und umgekehrt. Die korrekte Behandlung des Problems muss also Regionennachbarschaften und Dachtopologie voneinander entkoppeln. Die Regionennachbarschaft kann Hinweise geben, die letztliche Rekonstruktion kann jedoch auch andere Flächennachbarschaften enthalten.

Hierfür wird der folgende Ansatz verwendet. Auf der Basis der Nachbarschaften segmentierter Regionen werden Schnitte der zugehörigen Ebenen berechnet. Die Schnittlänge ergibt sich dabei aus der Projektion der benachbarten Regionenpunkte auf die Schnittgerade. Die Dachstruktur wird jedoch mittels des Algorithmus aus Abschnitt 6.1.3 und 6.1.4 berechnet. Die Schnittgeraden aus der Segmentierung gehen insofern in diesen Algorithmus ein, als dass während der Suche zunächst Kanten in den Graphen eingefügt werden, welche diesen Schnittgeraden entsprechen.

Abb. 6.14 zeigt Ergebnisse des Algorithmus. In Abb. 6.14(a) sind die akzeptierten Regionen gezeigt. Sichtbar ist die Lücke im oberen Teil des Gebäudes, die durch Entfernung der Regionen entsteht, welche durch die Regeln (6.3–6.6) nicht erklärt werden können. Die Bildung von Schnitten (Abb. 6.14(b)) kann in diesem Bereich dementsprechend keine Kantenkandidaten liefern. Dennoch wird das Dach dort rekonstruiert (Abb. 6.14(c)). Im oberen Teil werden hierfür drei Kanten eingefügt, welche aus den Regionennachbarschaften nicht ableitbar sind.

Weitere Beispiele befinden sich in Abb. 6.15. In Abb. 6.15(a) wird ein einfaches Satteldach gezeigt, dessen Struktur korrekt ermittelt wird. Ein ähnliches Resultat wäre jedoch auch mit den Verfahren aus Abschnitt 4.2.3 oder 5.1 erreichbar. Anders ist der Fall in Abb. 6.15(b), welche ein Gebäude zeigt, das im unteren Teil L-förmig ist. Der Grundriss liefert keinen Hinweis auf das dadurch entstehende, dreieckförmige Flächenstück. Dieses wird

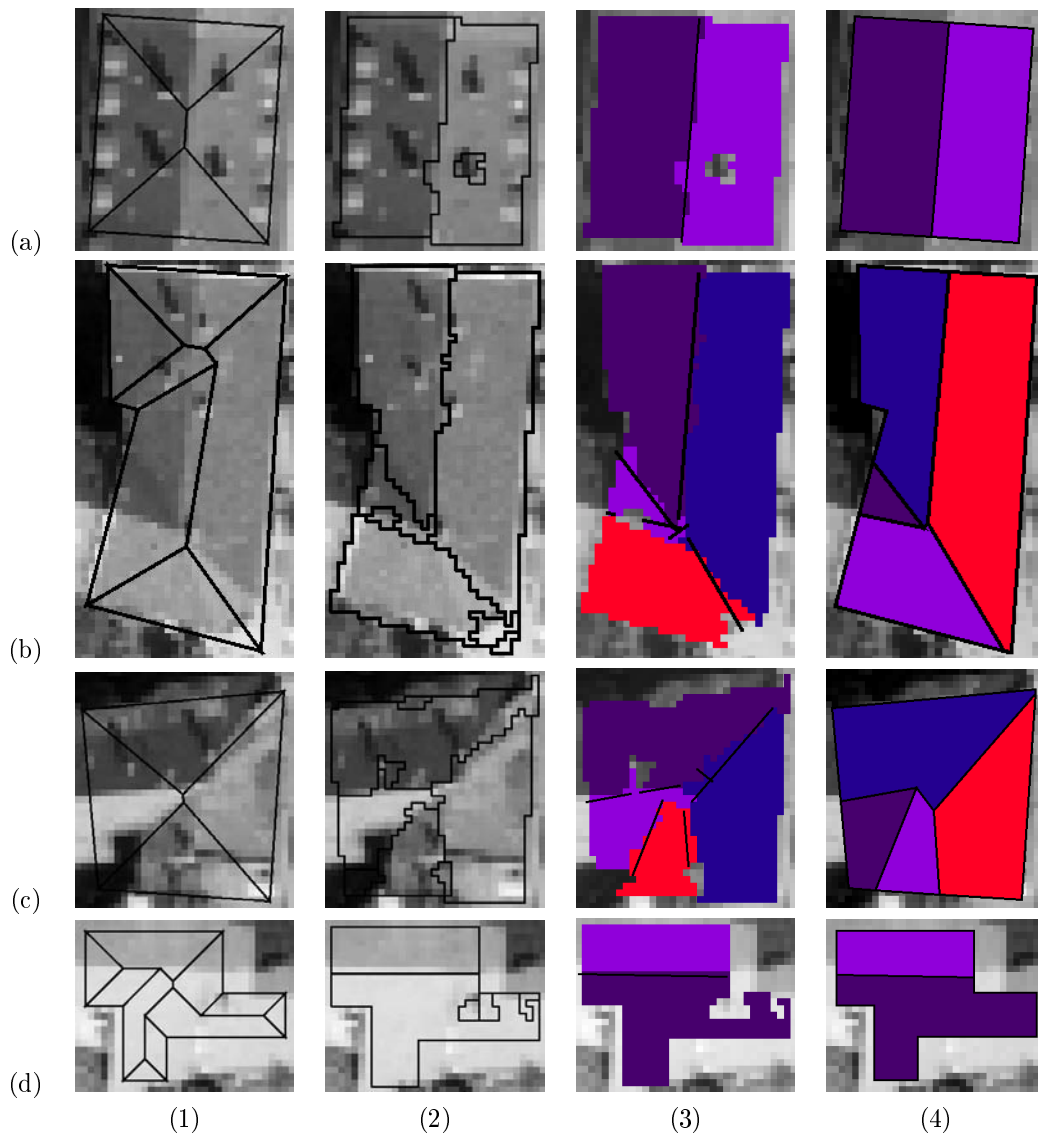


Abbildung 6.15: Rekonstruierte Dachstrukturen für verschiedene Gebäude (a-d). (1) Skelett, (ausschließlich) basierend auf dem Grundriss. (2) Segmentierte Regionen. (3) Durch die Regeln (6.3-6.6) akzeptierte Regionen, überlagert mit Schnittgeraden. (4) Rekonstruierte Dachstruktur.

jedoch korrekt segmentiert. Ein ähnliches Beispiel ist in Abb. 6.15(c) gegeben, welche ebenfalls ein L-förmiges Eckhaus zeigt, dessen Grundriss nur vier Seiten enthält. In diesem Fall ist aus den Schnitten ersichtlich, dass die Ebenenparameter nicht richtig bestimmt wurden. Dennoch ist die Struktur korrekt wiedergegeben. Schließlich zeigt Abb. 6.15(d) eine komplexe Struktur im Grundriss, das zugehörige Dach ist jedoch nur vom einfachen Typ Satteldach.

6.3 Ausgleich komplexer Dachformen

In Abschnitt 5.1.2 wurde die Bestimmung der Parameter einfacher geometrischer Primitive durch vermittelnde Ausgleichung behandelt. Die Beobachtungsgleichungen stellten dabei direkt den funktionalen Zusammenhang zwischen den beobachteten Punkten des DOM und den Parametern der Primitive her. Erfolgt die Rekonstruktion in allgemeiner Form, kann ein derartiger Zusammenhang nicht mehr formuliert werden.

Stattdessen ist es jedoch möglich, die Parameter von Ebenen zu bestimmen. Wie bereits in Abschnitt 6.1.2 erwähnt, sind die Ebenengleichungen (Gl. 6.2) Bindeglied zwischen Ebenenparametern und Knotenpositionen. Im folgenden wird ein Satz von Gleichungen beschrieben, welcher zur vermittelnden Ausgleichung komplexer Dächer dienen kann. Dabei werden die auftretenden Zusammenhänge explizit in Form von Gleichungen model-

liert²⁹. Die funktionalen Zusammenhänge enthalten Produkte von Unbekannten. Deshalb ist eine Linearisierung und iterative Lösung erforderlich. Die benötigten Startwerte lassen sich jedoch leicht gewinnen, indem die Ebenenparameter zunächst separat geschätzt werden (Abschnitt 3.4.1). Hieraus ergeben sich dann die Startwerte von Punktpositionen durch Verschneidung.

1. Fixierung der x - und y -Koordinaten der Blätter. Die Lagekoordinaten der Grundrisspunkte sollen auf den fest vorgegebenen Koordinaten gehalten werden. Dazu werden die folgenden Beobachtungsgleichungen für jeden Grundrisspunkt v_{ij} verwendet:

$$\begin{aligned} 0 + v &= \Delta v_{ij,x} + (v_{ij,x}^0 - \bar{v}_{ij,x}) \\ 0 + v &= \Delta v_{ij,y} + (v_{ij,y}^0 - \bar{v}_{ij,y}) \end{aligned} \quad (6.7)$$

Dabei sind $\Delta v_{ij,x}$, $\Delta v_{ij,y}$ die Unbekannten, $v_{ij,x}^0$, $v_{ij,y}^0$ die Startwerte und $\bar{v}_{ij,x}$, $\bar{v}_{ij,y}$ die Sollkoordinaten.

2. Fixierung der z -Koordinaten der Blätter. Die Höhe der Grundrisspunkte ist zwar variabel, aber für alle v_{ij} identisch. Für die Höhe wird eine neue Unbekannte z_t eingeführt. Existieren mehrere Traufhöhen, so kann dem durch Einführung mehrerer Unbekannter z_t , z'_t , ... Rechnung getragen werden. Für jeden Grundrisspunkt v_{ij} wird die folgende Gleichung angesetzt:

$$0 + v = \Delta v_{ij,z} - \Delta z_t + (v_{ij,z}^0 - z_t^0) \quad (6.8)$$

Dabei sind $\Delta v_{ij,z}$ bzw. Δz_t Unbekannte und $v_{ij,z}^0$ bzw. z_t^0 die zugehörigen Startwerte.

3. Alle Punkte liegen in ihren zugehörigen Ebenen. Hierfür wird die Ebenengleichung für die Dachfläche Π_l angesetzt in Hesse-Normalform mit den Koeffizienten $\pi_{l,a}$, $\pi_{l,b}$, $\pi_{l,c}$ und $\pi_{l,d}$:

$$\Pi_l : \pi_{l,a} \cdot x + \pi_{l,b} \cdot y + \pi_{l,c} \cdot z + \pi_{l,d} = 0.$$

Die linearisierte Beobachtungsgleichung enthält den senkrechten Abstand des Punkts zur Ebene als Beobachtung:

$$\begin{aligned} 0 + v &= \Delta \pi_{l,a} \cdot v_{A,x} + \Delta \pi_{l,b} \cdot v_{A,y} + \Delta \pi_{l,c} \cdot v_{A,z} + \Delta \pi_{l,d} \\ &+ \pi_{l,a} \cdot \Delta v_{A,x} + \pi_{l,b} \cdot \Delta v_{A,y} + \pi_{l,c} \cdot \Delta v_{A,z} \\ &+ (\pi_{l,a}^0 \cdot v_{A,x}^0 + \pi_{l,b}^0 \cdot v_{A,y}^0 + \pi_{l,c}^0 \cdot v_{A,z}^0 + \pi_{l,d}^0) \end{aligned} \quad (6.9)$$

Hierbei sind $\Delta \pi_{l,a}$, $\Delta \pi_{l,b}$, $\Delta \pi_{l,c}$, $\Delta \pi_{l,d}$, $\Delta v_{A,x}$, $\Delta v_{A,y}$, $\Delta v_{A,z}$ Unbekannte und $\pi_{l,a}^0$, $\pi_{l,b}^0$, $\pi_{l,c}^0$, $\pi_{l,d}^0$, $v_{A,x}^0$, $v_{A,y}^0$, $v_{A,z}^0$ ihre jeweiligen Näherungswerte. Die Gleichung wird für jede Paarung $l \in A$ aufgestellt, d.h. sowohl für die Blätter (Polygonpunkte) als auch für die inneren Knoten.

4. Der Normalenvektor jeder Ebene muss ein Einheitsvektor sein. D.h., für das Quadrat des Betrags muss gelten $(\pi_{l,a})^2 + (\pi_{l,b})^2 + (\pi_{l,c})^2 = 1$. Hierfür wird die linearisierte Beobachtungsgleichung

$$\begin{aligned} 0 + v &= 2\Delta \pi_{l,a} \cdot \pi_{l,a}^0 + 2\Delta \pi_{l,b} \cdot \pi_{l,b}^0 + 2\Delta \pi_{l,c} \cdot \pi_{l,c}^0 \\ &+ ((\pi_{l,a}^0)^2 + (\pi_{l,b}^0)^2 + (\pi_{l,c}^0)^2 - 1) \end{aligned} \quad (6.10)$$

angesetzt, mit den Unbekannten $\Delta \pi_{l,a}$, $\Delta \pi_{l,b}$, $\Delta \pi_{l,c}$ und ihren jeweiligen Näherungen $\pi_{l,a}^0$, $\pi_{l,b}^0$, $\pi_{l,c}^0$.

5. Die Punkte $(x_i, y_i, z_i)^T$ des DOM liegen in ihrer zugehörigen Ebene. Anhand der Projektionen x_i , y_i der Punkte sowie π_l der Dachflächen wird die Zuordnung von Punkten zu Flächen vorgenommen. Für jeden Punkt des DOM wird die Beobachtungsgleichung

$$\begin{aligned} 0 + v &= \Delta \pi_{l,a} \cdot x_i + \Delta \pi_{l,b} \cdot y_i + \Delta \pi_{l,c} \cdot z_i + \Delta \pi_{l,d} \\ &(\pi_{l,a}^0 \cdot x_i + \pi_{l,b}^0 \cdot y_i + \pi_{l,c}^0 \cdot z_i + \pi_{l,d}^0) \end{aligned} \quad (6.11)$$

aufgestellt, mit den Unbekannten $\Delta \pi_{l,a}$, $\Delta \pi_{l,b}$, $\Delta \pi_{l,c}$, $\Delta \pi_{l,d}$ und ihren jeweiligen Näherungswerten $\pi_{l,a}^0$, $\pi_{l,b}^0$, $\pi_{l,c}^0$, $\pi_{l,d}^0$.

²⁹In den Gleichungen symbolisiert allgemein der Platzhalter v die Verbesserung. Jede Gleichung besitzt eine eigene Variable v , obwohl dies nicht durch Indizes o.ä. deutlich gemacht ist. Allgemein bezeichnet Δx eine Unbekannte und x^0 einen Startwert. Aufgrund der Linearisierung sind die Unbekannten nur Zuschläge.

7 Textur

Wie in Abschnitt 1.1 ausgeführt, besteht eine wichtige Anwendung von Gebäudemodellen in ihrer visuellen Darstellung – sei es z.B. als virtuelles Bild, virtueller Flug oder im Rahmen eines anderen Systems zur Simulation oder Navigation. Bei Betrachtung der Abbildungen 5.9, 5.11, 5.14 wird sehr schnell deutlich, dass allein durch Präsentation der *Gebäudegeometrie* keine große “Realitätsnähe” erreicht werden kann.

In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, wie der Begriff der “Realitätsnähe” definiert und quantisiert werden soll. Natürlich handelt es sich dabei um einen subjektiven Begriff, welcher einerseits vom Betrachter, andererseits von der angestrebten Anwendung abhängig ist. Lange [1999] hat hierzu eine interessante Untersuchung präsentiert, bei der 75 Testpersonen³⁰ einen Satz von 90 Bildern nach deren Realitätsgrad bewerten mussten. Die Bilder bestanden aus 86 virtuellen (durch den Rechner generierten), 3 realen und einer hybriden Aufnahme. In den virtuellen Bildern wurden die folgenden Bildelemente manipuliert:

- Geländemodell: ohne Textur / mit Textur von LANDSAT TM-Bild (Auflösung 25 m) / mit Textur von LANDSAT TM-Bild und digitalem Orthobild (Auflösung 2.5 m)
- Gebäude: ohne Gebäude / mit Gebäudeblöcken / Gebäudeblöcke und Gebäude mit Textur
- Einzelbäume: ohne Bäume / mit texturierten Bäumen
- Wald: ohne Wald / Wald mit Textur.

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass der wichtigste Faktor für eine als realitätsnah empfundene Darstellung das Geländemodell mit überlagelter Textur aus dem (hochauflösenden) Orthobild ist, gefolgt von der Darstellung der Gebäude. Lange [1999] unterscheidet drei Arten von Szenen: “Hintergrund”, “Vordergrund” sowie “mittlerer Abstand”. Für die Szene “Hintergrund” sind Gebäudetexturen nicht von Bedeutung; der höchste Realitätsgrad wird bei Verwendung des Geländemodells mit Textur aus dem Orthobild empfunden. Dieser Eindruck lässt jedoch (bei Beibehaltung des Modells) mit zunehmender Nähe des Betrachters nach. In der Szene “Vordergrund” kann eine wesentliche Steigerung des empfundenen Realitätsgrads durch Hinzufügen von Textur zu den Gebäudemodellen erreicht werden.

Danahy [1999] unterscheidet ebenfalls drei verschiedene Aufnahmepositionen virtueller Bilder:

1. Aufnahmen aus großer Höhe (> 200 m), welche für *Übersichten* geeignet sind,
2. erhöhte Schrägaufnahmen (Höhe 200–2 m), welche für die Beurteilung der *räumlichen Verteilung von Objekten* verwendet werden können,
3. Aufnahmen in Augenhöhe (1.8–1 m), die zur Beurteilung des späteren *visuellen Eindrucks von Personen* dienen können.

Auch er kommt zum Schluss, dass für Fall 1. die Anwendung von Texturen aus Luftbildern geeignet ist, die Fälle 2. und 3. jedoch zusätzlich terrestrisch gewonnene Textur erforderlich machen. Danahy [1999] berichtet weiterhin davon, dass Betrachter virtueller Szenen die enthaltenen Texturen oftmals sehr genau untersuchen und Vereinfachungen und Ungenauigkeiten erkennen. Die Verwendung “exemplarischer” Texturen scheidet somit in den meisten Fällen aus.

Gruber, Pasko & Leberl [1995] stellen fest, dass Textur geeignet ist, einen Mangel an geometrisch detaillierter Modellierung auszugleichen. Dies gilt allerdings nur bis zu einem gewissen Grad – zu starke Abweichungen der modellierten Oberfläche von der tatsächlichen Geometrie führen schließlich zu einer als störend empfundenen Verzerrung der Textur. Als Beispiel wird das Dach eines Gebäudes mit unterschiedlicher Textur und geometrischer Modellierung vorgestellt. Für die Textur werden eine Standardtextur, die tatsächliche Textur aus dem Luftbild sowie die von Schatten befreite Luftbildtextur verwendet. Geometrisch werden die Modellierungen mit / ohne Schornsteinen unterschieden. Die Darstellung mit geometrisch modellierten Schornsteinen und korrigierter Textur ist die visuell ansprechendste, jedoch auch bei weitem aufwendigste Lösung. Gruber et al. [1995] weisen in diesem Zusammenhang auf die Wichtigkeit von automatisierten Verfahren zur Texturprozessierung hin.

³⁰Die Testpersonen wurden weiter differenziert in Laien und Experten, Ortskundige und Ortsunkundige.

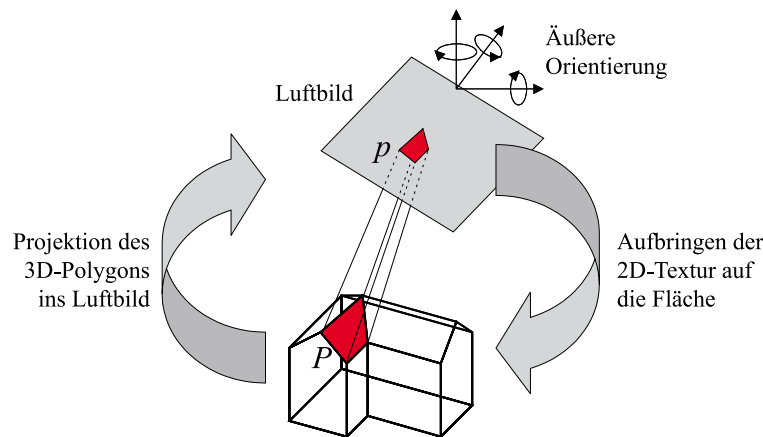


Abbildung 7.1: Gewinnung von Textur aus Luftbildern.

Für die Texturierung der Oberflächen eines virtuellen Modells kommen Luftbilder und terrestrische Bilder in Betracht (Abschnitt 2.1). Dabei werden Luftbilder zur Gewinnung von Gelände- und Dachtexturen, terrestrische Bilder für Fassadentexturen eingesetzt. Die folgenden Abschnitte gehen auf die Gewinnung von *Gebäudetexturen* mittels Luft- und terrestrischer Bilder ein. Generell führen die hier vorgestellten Verfahren zu einer punktwisen Definition von Helligkeitswerten (Farbwerten) auf Oberflächen. Es bleibt dem jeweils eingesetzten Programm zur Betrachtung (*viewer*) der virtuellen Szene überlassen, die Reflexionseigenschaften der Oberfläche zu simulieren. Da hierüber keine Information vorliegt, ist oftmals die Annahme diffuser Reflexion günstig. Die mangelnde Berücksichtigung von Reflexion und Beleuchtung führt häufig zu einem unwirklichen Eindruck der virtuellen Szene. Andererseits ist die Modellierung dieser Eigenschaften heute noch sehr aufwendig und wird deshalb praktisch nicht durchgeführt.

7.1 Textur aus Luftbildern

Die Gewinnung von Gebäudetextur aus Luftbildern ist methodisch einfach. Nach der Rekonstruktion liegt die Beschreibung der Gebäude in Form einer Randbeschreibung (BREP) von Polyedern vor (vgl. Abschnitt 2.3.2). Deshalb lassen sich die Flächen einzeln betrachten, wobei jede Fläche durch eine Menge von Punkten im dreidimensionalen Raum beschrieben ist, welche ein ebenes Umringspolygon P bilden (Abb. 7.1).

Aufgrund der ebenfalls bekannten äußeren Orientierung des Luftbilds lassen sich diese Punkte unter Verwendung der *Kollinearitätsgleichungen* in das Bild transformieren [Kraus 1994]. Dadurch wird das Polygon p im Bildraum erhalten. Durch Überprüfung der Orientierung von p lässt sich feststellen, ob die zugehörige Objektfläche dem Luftbild zugewandt ist. Ist sie negativ, so kann die Fläche im Luftbild nicht sichtbar sein. Die weiteren Schritte hängen von der Art der erzeugten Darstellung ab. Für eine Beschreibung in der *virtual reality modeling language* (VRML) [Bell, Parisi & Pesce 1995] müssen beispielsweise lediglich die Bildkoordinaten von p in relative Koordinaten (r, s) umgerechnet werden³¹. Das verwendete Betrachtungsprogramm entnimmt die Texturausschnitte dann automatisch.

Genau genommen ist die skizzierte Methode nicht ganz korrekt, weil Betrachtungsprogramme nicht die erforderliche *projektive Transformation* durchführen. Unter der Annahme von schwach perspektiven Luftbildern sind die Effekte dieser Vereinfachung jedoch nicht gravierend (siehe auch Abschnitt 7.2). Auch die Linsenverzeichnung des Objektivs braucht in der Regel nicht berücksichtigt zu werden.

Werden lediglich die Texturen von *Gebäudedächern* extrahiert, entfällt die Problematik der Betrachtung von Verdeckungen größtenteils³². Zudem muss die "Stückelung" von Texturen aus verschiedenen Bildern nicht durchgeführt werden, da aufgrund der Überlappung von Luftbildern Gebäude stets in einem Bild vollständig abgebildet sind. In Einzelfällen kann auch die Extraktion von Fassadentextur aus Luftbildern erfolgen. Aufgrund der Aufnahmerichtung kommen hierfür selbstverständlich nur Gebäude in Betracht, welche am Rand des Luftbilds

³¹ (r, s) werden auch als *Texturkoordinaten* bezeichnet. Ihre Angabe ist relativ zur Höhe und Breite des Bildes und somit $0 \leq r, s \leq 1$.

³² Selbstverständlich nicht in allen Fällen. Insbesondere bei senkrechten Aufbauten, etwa auf Flachdächern oder bei Türmen kann es zu Selbstverdeckungen und Schattenwurf kommen.



Abbildung 7.2: Luftbild mit überlagerter Rekonstruktion von Gebäuden.

abgebildet werden. Auch dann ist die aus dem Luftbild gewonnene Textur jedoch recht grob und kann meist für eine Visualisierung “in Augenhöhe” nicht herangezogen werden.

Abb. 7.2 zeigt einen Ausschnitt aus einem Luftbild mit überlagerten Polygonen rekonstruierter Gebäude. Auf der Basis der Bildpolygone p können die erforderlichen Texturkoordinaten berechnet werden. Abb. 7.3 und 7.4 zeigen jeweils Visualisierungen, welche ein texturiertes Geländemodell mit rekonstruierten Gebäudemodellen kombinieren. Die erforderlichen Texturen wurden ausschließlich aus Luftbildern entnommen. Abb. 7.4 verdeutlicht, dass in manchen Fällen die Texturierung von Fassaden auf der Basis von Luftbildern durchaus möglich ist.

7.2 Textur aus terrestrischen Bildern

7.2.1 Automatische Extraktion von Textur aus terrestrischen Bildern

Die Übertragung des im vorigen Abschnitt vorgestellten Ansatzes auf terrestrische Bilder ist nicht ohne weiteres möglich. Die Gründe hierfür sind:

- Objekte können gegenüber dem in einem Bild erfassten Ausschnitt groß sein. Deshalb muss die Möglichkeit vorgesehen werden, Textur *einer* Fläche aus *mehreren* Bildern zu gewinnen und entsprechend zu



Abbildung 7.3: Ausschnitt aus einem mit Dachtexturen versehenen Modell des Datensatzes "Stuttgart".



Abbildung 7.4: Ausschnitt aus einem mit Dach- und Fassadentexturen versehenen Modell des Datensatzes "Heidelberg".

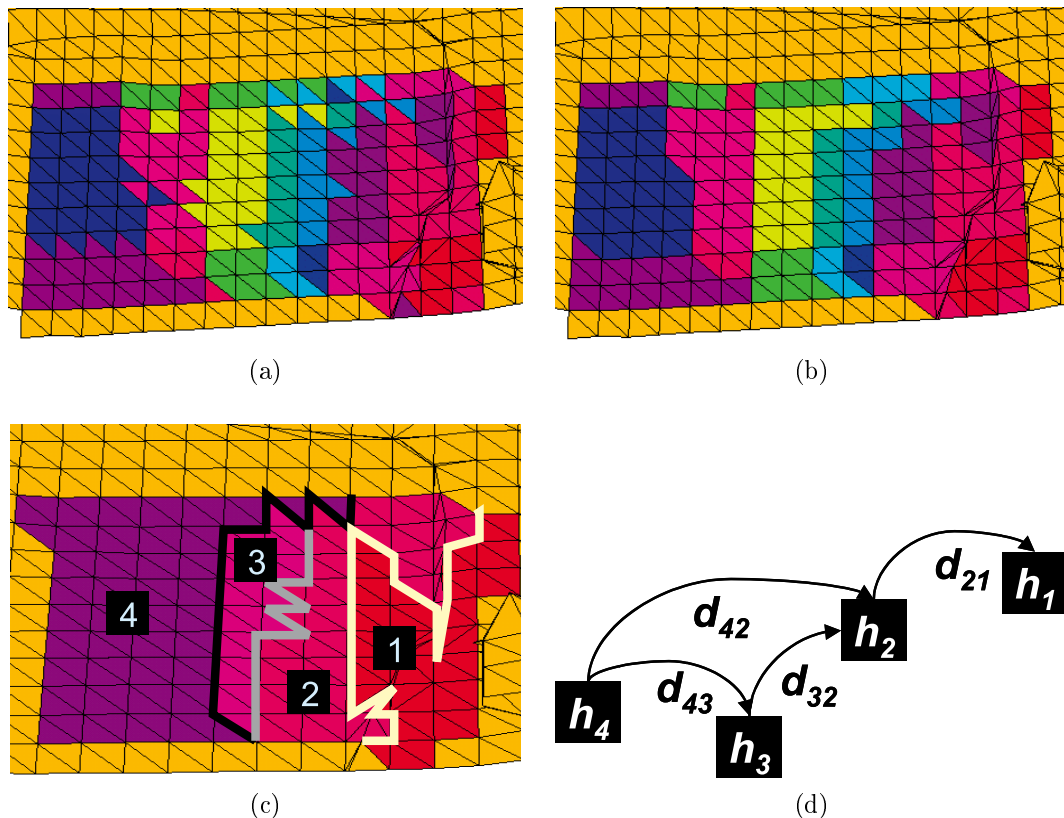


Abbildung 7.5: Ansatz zur Extraktion von Textur. (a) Jedes Dreieck der triangulierten Oberfläche wird einer Aufnahme zugeordnet (Farben entsprechen Bildnummern). (b) Lokale Änderung der Zuordnung zur Reduktion der Fragmentierung. (c) Radiometrische Unterschiede d_{ij} entlang von Dreieckskanten werden beobachtet. (d) Helligkeitskorrekturen h_i werden durch eine Ausgleichung berechnet, wobei h_i die Unbekannten, d_{ij} die Beobachtungen sind.

kombinieren. Hierfür bietet sich eine Triangulierung aller Oberflächen an.

- Die Annahme schwach perspektiver Bilder ist nicht mehr ausreichend. Sie führt zu Bildverzerrungen, welche insbesondere an Dreieckskanten einer Triangulierung deutlich sichtbar werden.
- Auch die Vernachlässigung der Linsenverzeichnung ist nicht mehr möglich. Dadurch entstehen Bildversätze, welche an Kanten zwischen Dreiecken sichtbar sind, deren Textur von verschiedenen Bildern stammt.
- Im Vergleich zum Luftbildfall werden terrestrische Aufnahmen oft mit sehr uneinheitlichen Maßstäben durchgeführt. Wird die Textur – wie im vorigen Abschnitt beschrieben – lediglich aus den Bildern “ausgeschnitten”, so resultiert ein Modell, welches Textur entsprechend der Aufnahmesituation unterschiedlich stark auflöst. Dies ist oft nicht wünschenswert, nicht nur aufgrund des visuellen Eindrucks, sondern auch, weil Speicherbedarf und Darstellungsgeschwindigkeit dadurch weniger gut kontrollierbar sind.

Ein Ansatz, welcher diese Punkte berücksichtigt, wurde von El-Hakim, Brenner & Roth [1998] vorgestellt. Dabei wird von einer triangulierten Oberfläche ausgegangen, sowie einer Menge von Aufnahmen, welche diese Oberfläche überlappend erfassen. Die Aufnahmen müssen mittels kalibrierter Kameras erfolgen, so dass die äußere und innere Orientierung jedes Bildes bekannt ist. Der Ansatz führt dann die folgenden Schritte durch:

1. Zuordnung jedes Dreiecks der Triangulierung zu einer Aufnahme, in der das Dreieck sichtbar ist. Bei mehreren Möglichkeiten wird ein Kriterium zur Auswahl eingesetzt, beispielsweise die (größte) Fläche (Abb. 7.5(a)).
2. Lokale Umordnung zur Reduktion der Fragmentierung dieser Zuordnung (Abb. 7.5(b)). Die Fragmentierung tritt vor allem an Regionrändern auf, wobei die dort liegenden Dreiecke in verschiedenen Bildern mit fast identischer Größe abgebildet werden.

3. Entnahme der benötigten Texturen aus den Bildern. Dabei wird die äußere und innere Orientierung (einschließlich Linsenverzeichnung) berücksichtigt.
4. Angleichung der Radiometrie zwischen verschiedenen Dreiecken. Dies wird durch ein globales und lokales Verfahren erreicht. Das globale Verfahren verwendet die radiometrischen Differenzen, welche entlang von Dreieckskanten auftreten (Abb. 7.5(c)) als Beobachtungen. Diese dienen dazu, Helligkeitskorrekturen für jedes Bild (nicht jedes Dreieck) zu ermitteln. Der Ansatz ist vergleichbar mit der Ausgleichung eines Höhennetzes (Abb. 7.5(d)). Zusätzlich wird über eine lokale Radiometrieangleichung versucht, die Helligkeit einzelner Dreiecke optimal anzupassen.

7.2.2 Manuelle Extraktion von Textur

Ein Nachteil des im vorigen Abschnitts vorgestellten Ansatzes ist die algorithmisch aufwendige Realisierung. Des weiteren führen sowohl Fehler in der geometrischen Rekonstruktion des Objekts als auch der äußeren oder inneren Orientierung zu fehlerhaften Texturen. Allerdings fallen hier mitunter selbst geringe geometrische Abweichungen visuell deutlich auf: Beispielsweise kann ein Fehler von nur einigen Zentimetern am Objekt dazu führen, dass eine Fassadentextur auch Teile des Hintergrunds (anderes Gebäude, Himmel, etc.) enthält.

Deshalb wird meist der folgende, einfachere Ansatz gewählt. Bilder von Fassaden werden terrestrisch mit (unkalibrierten) Kameras aufgenommen. Die äußere Orientierung ist nur ungefähr bekannt. Die Identifikation des jeweils mit Textur zu versehenen Polygons im Bild erfolgt durch manuelle Messung der (mindestens vier) Polygoneckpunkte. Durch Parameterschätzung werden daraus die Parameter p_1, \dots, p_8 einer projektiven Transformation

$$\begin{aligned} x' &= \frac{p_1 x + p_2 y + p_3}{p_7 x + p_8 y + 1} \\ y' &= \frac{p_4 x + p_5 y + p_6}{p_7 x + p_8 y + 1} \end{aligned}$$

abgeleitet, welche anschließend für die Entzerrung des Bildausschnitts verwendet wird. Vorteilhaft an diesem Ansatz ist, dass Bildentzerrung und Zuordnung zu einer Oberfläche getrennt erfolgen können. Für letzteren Schritt kann deshalb auch kommerziell verfügbare Software eingesetzt werden. Abb. 7.6 und 7.7 zeigen Beispiele für virtuelle Modelle, welche aus einer Kombination von (texturiertem) Geländemodell und Gebäuden bestehen, wobei die Dachtextur aus Luftbildern extrahiert und ausgewählte Fassaden zusätzlich mittels terrestrischen Aufnahmen texturiert wurden.

Obwohl diese Darstellungen ansprechend wirken, darf nicht vergessen werden, dass die manuelle Gewinnung von Texturen aus terrestrischen Bildern einen enormen Zeitaufwand bedeutet [Danahy 1999]. Ein Ansatz zur Reduktion dieses Aufwands könnte das in Abschnitt 7.2.1 vorgestellte Verfahren sein. Möglicherweise gewinnt hierzu die automatisierte flächendeckende Erfassung orientierter terrestrischer Bilder an Bedeutung [Sood & Fahrenhorst 1999]. Selbst wenn die Probleme einer ausreichend genauen Gebäuderekonstruktion und Bildorientierung gelöst sind, muss jedoch mit einem erheblichen verbleibenden Aufwand für die manuelle Nacharbeit der Bilder gerechnet werden, beispielsweise für die Entfernung von im Vordergrund befindlichen Objekten wie Verkehrsschildern, geparkten Fahrzeugen und Bäumen.



Abbildung 7.6: Visualisierung von Geländemodell und Gebäuden mit Luftbild- und terrestrisch gewonnener Textur am Beispiel "Stuttgart".

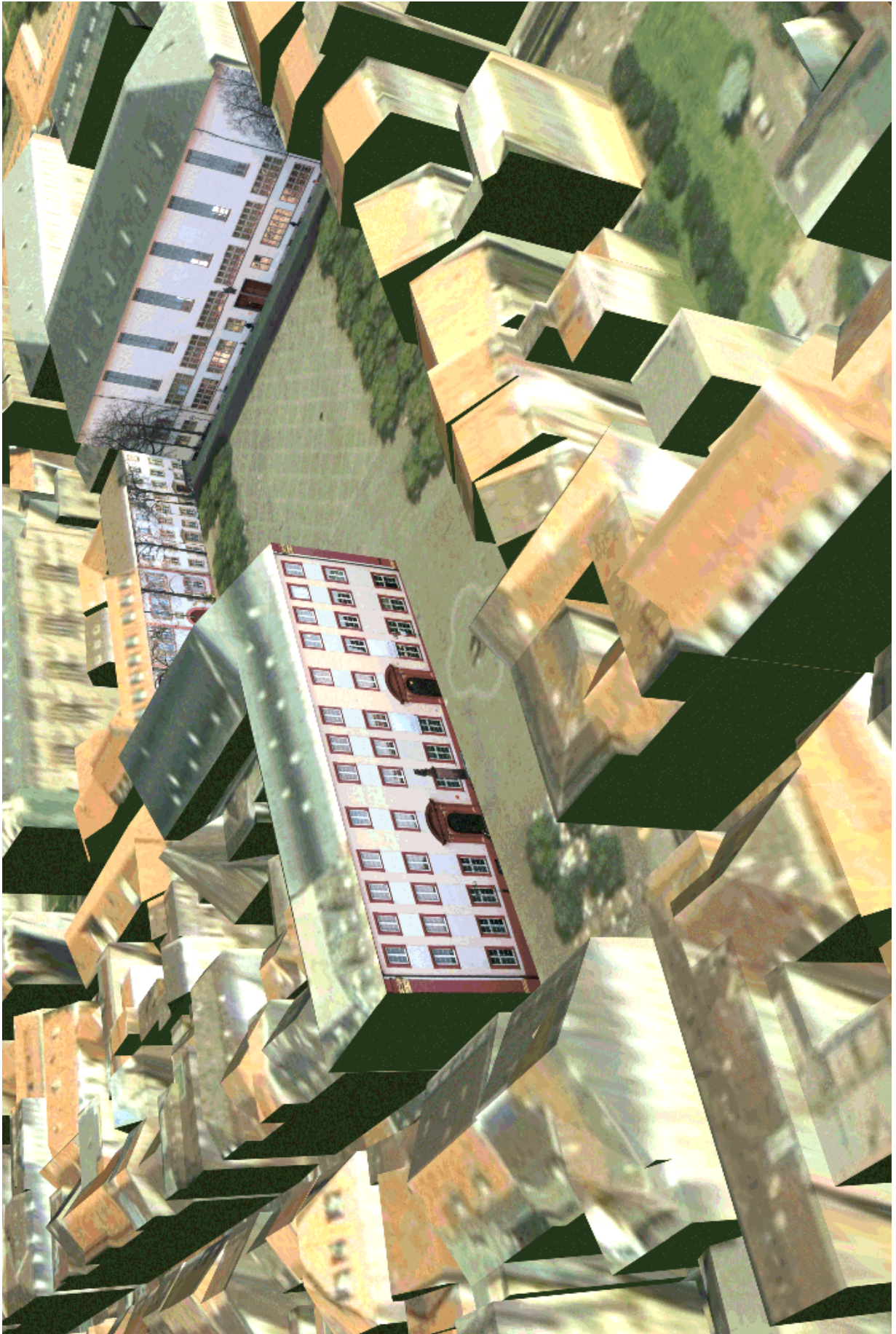


Abbildung 7.7: Visualisierung von Geländemodell und Gebäuden mit Luftbild- und terrestrisch gewonnener Textur am Beispiel "Heidelberg".

8 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden Verfahren zur automatischen Ableitung von Stadtmodellen aus DOM und digitalen Grundrissdaten untersucht. Hierfür wurden zunächst verschiedene Möglichkeiten der Segmentierung von DOM betrachtet. Dabei zeigt sich einerseits, dass Fragestellungen der *Detektion* und *Strukturierung* oftmals mittels DOM wesentlich leichter zu lösen sind als unter Verwendung von (panchromatischen) Luftbildern³³. Auf der anderen Seite ist die Messpunktdichte der verwendeten Laser-DOM relativ gering, so dass die alleinige Verwendung dieser Datenquelle nicht zu einer automatischen Rekonstruktion von Gebäuden führen kann.

Grundrissdaten sind in gewisser Weise komplementär zu DOM und stellen somit eine ideale Ergänzung dar. Gelingt es, die hohe Lagegenauigkeit von Grundrissen zu kombinieren mit einer automatischen Generierung der Dachtopologie auf Basis einer Segmentierung des DOM, so resultiert daraus ein Verfahren mit sehr hohem Automatisierungsgrad bei guter Lage- und Höhengengenauigkeit. Verschiedene Ansätze zur Kombination von DOM und Grundrissen wurden untersucht:

1. Das Verfahren in Abschnitt 4.2.3 rekonstruiert zunächst ein Skelett über dem Grundpolygon, welches anschließend anhand des DOM adaptiert wird.
2. Das Rechteckverfahren aus Abschnitt 5.1 zerlegt den Grundriss in Primitive, welche unter Verwendung des DOM einzeln strukturiert und rekonstruiert werden. Ihre Kombination ergibt dann das Gesamtmodell des Gebäudes. Für dieses Verfahren wurde auch eine semiautomatische Erweiterung vorgestellt.
3. Abschnitt 6.2 beschreibt eine Methode, welche Dächer aufgrund einer allgemeinen Ebenensegmentierung und eines grammatikalischen Ansatzes zur Akzeptierung segmentierter Regionen strukturiert. Die Generierung der Topologie erfolgt über eine Suche, wobei Baumsuche mit Beschränkungen und diskrete Relaxation zur Reduktion des Suchraums eingesetzt werden.

Die Verfahren unterscheiden sich in der unterschiedlichen Einbringung der beiden Datenquellen Grundrissdaten und DOM. Bei Verfahren (1.) ist die Rekonstruktion sehr stark an den Grundriss gebunden und das resultierende Dach kann nur eine einzige Traufhöhe besitzen. Die Rekonstruktion auf der Basis von Primitiven (2.) erlaubt dagegen verschiedene Traufhöhen und – insbesondere in der semiautomatischen Erweiterung – die Modellierung relativ komplexer Dachstrukturen, welche nicht unmittelbar aus dem Grundriss ersichtlich sind. Verfahren (3.) zielt dagegen auf eine noch allgemeinere Modellierung durch ebene Flächen ab. Prinzipiell wird dadurch die Klasse der allgemeinen, polyedrischen Gebäudeformen angestrebt, obwohl die möglichen Formen natürlich zunächst durch die verwendeten Regeln eingeschränkt sind.

In der oben gezeigten Reihenfolge entfernen sich die Verfahren also zunehmend von der modellgetriebenen Arbeitsweise, hin zu einem mehr datengetriebenen Ansatz. Dadurch sind sie aber auch vermehrt auf korrekte Information aus dem DOM angewiesen. Die Entscheidung, welches Verfahren eingesetzt werden soll, orientiert sich also hauptsächlich an der Qualität der Segmentierung des DOM.

Welcher Ausblick kann bezüglich der Rekonstruktionsverfahren gegeben werden?

Die heute veröffentlichten bzw. realisierten Ansätze entscheiden sich meist für jeweils eine Auswahl aus folgenden Punkten:

- Datenquelle: Luftbilder *oder* DOM
- Geometrisches Modell: Aufbau des Objekts aus Volumenprimitiven (CSG) *oder* generisches Modell, meist basierend auf ebenen Flächen
- Automatisierung: Manuell bzw. semiautomatisch *oder* vollautomatisch.

Dabei deuten die bis heute vorliegenden Forschungsergebnisse verschiedene Trends an. Beispielsweise haben sich viele Wissenschaftler und Gruppen mit der automatischen Extraktion von Gebäuden aus Luftbildern auseinandergesetzt, wobei teilweise sehr vielversprechende Ergebnisse präsentiert wurden. Oft mussten zur Erlangung

³³Dies impliziert natürlich nicht, dass Verfahren für Luftbilder grundsätzlich zu "schlechteren" Ergebnissen führen, sondern lediglich, dass der algorithmische Aufwand zur Lösung einer gegebenen Fragestellung abhängig von den eingesetzten Daten unterschiedlich ausfällt. Häufig werden die besten Ergebnisse bei Verwendung mehrerer Datenquellen erreicht, wie etwa bei der Detektion von Gebäuden auf der Basis von DOM und Farbbildern.

dieser Ergebnisse jedoch zusätzliche Voraussetzungen erfüllt sein, wie etwa die Verfügbarkeit von DOM, Klassifikationsergebnissen auf der Basis von Infrarotbildern, oder ungewöhnlich hohe Auflösung bzw. Überlappung der Luftbilder. Selbst unter diesen Voraussetzungen ist es bislang nicht gelungen, die Verfahren soweit zu entwickeln, dass ihr Einsatz in dicht bebautem Gebiet oder für Szenen mit vielen tausend Gebäuden erfolgen könnte. Damit muss man eingestehen, dass die Ansätze – trotz erheblicher Anstrengungen und Fortschritte auf diesem Gebiet – heute noch weit von der Interpretationsleistung eines menschlichen Operators entfernt sind.

Die Hinzunahme von zusätzlichen Datenquellen kann eine Verbesserung der Situation bewirken. Beispielsweise führt die explizite Repräsentation der Geometrie in DOM zu einer Vereinfachung der Interpretationsaufgabe, obwohl gleichzeitig von einer im Vergleich zur Auswertung mittels Luftbildern geringeren Genauigkeit ausgegangen werden muss (bei den in dieser Arbeit verwendeten DOM). Digitale Grundrisse bringen interpretierte Information in den Rekonstruktionsprozess mit ein, wodurch auch umfangreiche, dicht besiedelte Gebiete behandelt werden können.

Bei der geometrischen Modellierung zeichnet sich kein eindeutiger Trend ab. Generische Modelle sind in der Lage, allgemeine Hausformen zu beschreiben, bieten aber häufig zu wenig Einschränkungen für automatische Verfahren. Diese sind bei einer Modellierung mittels Volumenprimitiven gegeben. Auch semiautomatische Verfahren profitieren vom Einsatz volumetrischer Primitive, weil sich dadurch die Zahl der erforderlichen Messungen wesentlich reduzieren lässt. Ihr Nachteil ist jedoch die eingeschränkte Modellierfähigkeit, vor allem bei komplexen Objekten.

In naher Zukunft werden sich Rekonstruktionsverfahren, welche erfolgreich und wirtschaftlich auf umfangreichen, komplexen Szenen eingesetzt werden sollen, deshalb an den folgenden Punkten orientieren:

- Die Einbeziehung *unterschiedlicher Datenquellen*, so dass ein Einsatz des Verfahrens in möglichst vielen Projekten mit den jeweils verfügbaren Daten erfolgen kann.
- Ein *hybrides geometrisches Modell*, welches einerseits eine schnelle Erfassung mittels vorstrukturierter Primitive erlaubt, andererseits die Modellierfähigkeit nicht prinzipiell einschränkt.
- Eine *semiautomatische* Arbeitsweise, welche möglichst viele automatische Module integriert und dennoch stets eine strikt manuelle Modellierung von Gebäuden erlaubt. Dabei sollten sich die automatischen Komponenten sowohl auf die *Messung* als auch auf die *Strukturierung* von Objekten beziehen.

Welche weiteren Faktoren außerhalb des eigentlichen Rekonstruktionsverfahrens sind zu berücksichtigen?

Besonders hervorzuheben sind hier *die Verwaltung* der umfangreichen Datenmengen und die *Gewinnung von Textur* für photorealistische Modelle.

Dabei wurden bezüglich des ersten Punkts bereits erhebliche Fortschritte erzielt. Heutige GIS-Produkte sind in der Lage, die erzeugten dreidimensionalen Stadtmodelle zu verwalten. Es ist damit zu rechnen, dass sich auch die Visualisierungsmöglichkeiten dieser Systeme verbessert, so dass die klassische Trennung in Systeme zur Datenhaltung und anspruchsvollen Visualisierung verschwimmen wird. Verbleiben wird jedoch die Aufgabe, umfangreiche Modelle in angemessener Zeit zu übertragen und darzustellen [Kofler & Gruber 1998].

Die Gewinnung von Textur für Objekte der virtuellen Welt stellt sich als sehr aufwendig heraus, insbesondere wenn ein realistischer Eindruck in Bodennähe erzielt werden soll. Derzeit wird dieser Schritt praktisch durchweg manuell nach dem in Abschnitt 7.2.2 skizzierten Verfahren durchgeführt. Eventuell können hier Fortschritte erzielt werden, indem Bilder von Gebäuden automatisiert, mit hoher Flächendeckung sowie unter Aufzeichnung der genauen äußeren Orientierung erfasst werden. Sicherlich werden aufgrund von Ungenauigkeiten der Rekonstruktion oder Orientierung Restfehler verbleiben. Neben der Weiterentwicklung von Rekonstruktionsverfahren ist somit auch die automatische Registrierung von Fassadenbildern und bereits existierenden Objektmodellen ein Forschungs- und Entwicklungsthema für die kommenden Jahre.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Vision der Visualisierung eines zukünftigen Fahrzeugnavigationssystems.	9
2.1	Mögliche Datenquellen für die Gebäuderekonstruktion.	12
2.2	Zur Definition des DOM und DGM.	15
2.3	Darstellung eines DOM als Raster und als TIN.	15
2.4	Darstellung von regelmäßig gerasterten DOM.	16
2.5	Vergleich von DOM aus Bildzuordnung und Laserscanning.	19
2.6	Schritte der Objektextraktion.	21
2.7	Repräsentation eines Objekts in BREP und CSG.	22
2.8	Illustration zur Wahl von Modellen.	23
2.9	Geometrische Gebäudemodelle.	23
2.10	Gebäuderekonstruktion nach Haala.	26
2.11	Funktionsweise von ARUBA	27
2.12	Hierarchisches Modellierungskonzept.	28
2.13	Rekonstruktionsverfahren nach Baillard und Zisserman.	28
2.14	Funktionsweise von CyberCity Modeler.	29
2.15	Funktionsweise von ObEx.	30
3.1	Illustration morphologischer Operationen im eindimensionalen Fall.	35
3.2	Wirkung eines morphologischen Opening mit einem quadratischen Strukturelement.	36
3.3	Wirkung eines morphologischen Opening mit einem quadratischen Strukturelement.	37
3.4	Segmentierung durch Schwellwertbildung des Gradientenbetrags.	38
3.5	Gebäudeorientierung aus Richtungshistogrammen.	39
3.6	Illustration zum Prädikat $P(\cdot)$ bei Bereichswachstumsverfahren.	42
3.7	Ebenensegmentierungen basierend auf einem Bereichswachstumsverfahren.	42
3.8	Ergebnisse von Ebenensegmentierungen basierend auf dem Algorithmus von Jiang & Bunke.	43
3.9	Beispiel zum Versagen eines robusten, iterativen Schätzers.	44
3.10	Illustration zum Ablauf der Ebenensegmentierung mittels des RANSAC-Algorithmus.	45
3.11	Ergebnisse der Ebenensegmentierung mittels des RANSAC-Algorithmus.	46
3.12	Illustration zur regulären, parametrisierten Fläche.	46
3.13	Illustration zu Normalkrümmung und Krümmung des Normalschnitts.	47
3.14	Die verschiedenen Oberflächentypen in Abhängigkeit des Vorzeichens von K und H	48
3.15	Krümmungskarte eines DOM.	49
3.16	Illustration zur Approximation nach Besl.	50
3.17	Krümmungskarte unter Verwendung des Ausgleichungsansatz von Besl.	51
3.18	Illustration zur Regionenextraktion auf der Basis von Kernregionen.	52
3.19	Illustration zur Richtungssegmentierung.	52
3.20	Ergebnisse einer Richtungssegmentierung.	53

3.21 Höhenliniendarstellung eines DOM im 1 m-Intervall.	53
3.22 Illustration zum Prinzip der Höhenliniensegmentierung.	53
3.23 Zuordnung der DOM-Punkte zu Grundrisskanten bei der Höhenliniensegmentierung.	54
3.24 Ergebnisse der Höhenliniensegmentierung.	54
3.25 In der Höhenliniensegmentierung verwendete Grundrisse.	55
3.26 Ergebnis der Ebenensegmentierung bei einer fragmentierten Dachstruktur.	55
4.1 Deutsche Grundkarte DGK 5.	57
4.2 Schwierig nutzbare digitale Grundrisse.	58
4.3 Bezeichnungen bei Grundrissen und einfachen Dächern.	59
4.4 Mittelachstransformation und Skelett.	60
4.5 Konstruktion des Skeletts eines Polygons.	60
4.6 Eigenschaften des Skeletts bei ungleichen Dachneigungen.	61
4.7 Anwendung des Skeletts zur Dachrekonstruktion.	63
4.8 Anpassung eines Skeletts unter Verwendung des DOM (Detail).	64
4.9 Anpassung eines Skeletts unter Verwendung des DOM (Gesamtszene).	65
4.10 Empfindlichkeit des Skeletts.	66
4.11 Dekomposition von Formen.	66
4.12 Beispiel zur Dekomposition nach Shapiro und Haralick.	67
4.13 Algorithmus zur Rechteckzerlegung.	68
4.14 Beispiele für Rechteckzerlegungen.	69
5.1 Überblick über das Rekonstruktionsverfahren.	70
5.2 Dreidimensionale Primitive.	71
5.3 Lokales Koordinatensystem für Primitive.	72
5.4 Beispiel für die Vereinigung von dreidimensionalen Primitiven.	73
5.5 Semiautomatische Erweiterung.	74
5.6 Grafische Benutzeroberfläche des Programms zur semiautomatischen Rekonstruktion.	75
5.7 Beispiele für die semiautomatische Bearbeitung von Rekonstruktionen.	76
5.8 Grundrisse des Datensatzes "Karlsruhe".	77
5.9 Ergebnis der automatischen Rekonstruktion für den Datensatz "Karlsruhe".	77
5.10 Grundrisse des Datensatzes "Heidelberg".	78
5.11 Ergebnis der automatischen Rekonstruktion für den Datensatz "Heidelberg".	79
5.12 Grundrisse des Datensatzes "Stuttgart".	80
5.13 Ergebnis der automatischen Rekonstruktion für den Datensatz "Stuttgart".	81
5.14 Rekonstruktion "Stuttgart" nach semiautomatischer Nachbearbeitung.	82
5.15 Differenzbild für den Datensatz "Karlsruhe", automatische Rekonstruktion.	84
5.16 Differenzbild für den Datensatz "Karlsruhe", semiautomatische Nachbearbeitung.	84
5.17 Histogramme von durchschnittlichem absoluten Restfehler und RMS für "Karlsruhe".	85

5.18	Histogramme von durchschnittlichem absoluten Restfehler und RMS für "Heidelberg" und "Stuttgart".	86
6.1	Zwei topologisch verschiedene Lösungen.	88
6.2	Anzahl topologisch verschiedener Lösungen.	88
6.3	Zeichnungen von Graphen.	89
6.4	Bildung eines Graphen durch Auswahl von Kanten.	91
6.5	Beispiel für ein Polygon mit $n = 6$ Grundseiten.	91
6.6	Verschiedene Dächer über einem Grundriss.	91
6.7	Schnitt zweier Ebenen.	93
6.8	Die möglichen Kombinationen von Knoten und Kanten.	93
6.9	Interpretation von Knoten und Kanten.	94
6.10	Funktionsweise der diskreten Relaxation.	95
6.11	Beispiel für die Anwendung von Suche und diskreter Relaxation.	96
6.12	Luftbild und Segmentierung.	96
6.13	Bezeichnung von Regionen anhand der Seiten des Grundrisses.	97
6.14	Akzeptierung von Regionen auf der Basis von Regeln.	98
6.15	Rekonstruierte Dachstrukturen für verschiedene Gebäude.	99
6.16	Design-Matrix für die Ausgleichung eines einfachen Satteldachs.	101
7.1	Gewinnung von Textur aus Luftbildern.	103
7.2	Luftbild mit überlagerter Rekonstruktion von Gebäuden.	104
7.3	Ausschnitt aus einem mit Dachtexturen versehenen Modell des Datensatzes "Stuttgart".	105
7.4	Ausschnitt aus einem mit Texturen versehenen Modell des Datensatzes "Heidelberg".	106
7.5	Ansatz zur Extraktion von Textur.	107
7.6	Visualisierung mit terrestrisch gewonnener Textur am Beispiel "Stuttgart".	109
7.7	Visualisierung mit terrestrisch gewonnener Textur am Beispiel "Heidelberg".	110

Literatur

- ACIS [1999], *ACIS 3D Toolkit, Version 5.0*, Spatial Technology Inc., 2425 55th Street, Suite 100, Boulder, Colorado 80301-5704.
- Ackermann, F. [1979], Zur Genauigkeit Digitaler Höhenmodelle, *in*: 'Proc. of the 37th Photogrammetric Week, Stuttgart', Seiten 133–144.
- Ackermann, F. [1999], 'Airborne laser scanning – present status and future expectations', *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **54**, 64–67.
- Ackermann, F. & Hahn, M. [1991], Image Pyramids for Digital Photogrammetry, *in*: H. Ebner, D. Fritsch & C. Heipke, Hrsg., 'Digital Photogrammetric Systems', Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, Seiten 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.
- Ahn, S. & Schultes, M. [1997], A new circular coded target for the automation of photogrammetric 3D-surface measurements, *in*: K. Gruen, Hrsg., 'Optical 3-D Measurement Techniques IV', Zürich, Seiten 225–234.
- Aho, A. V., Hopcroft, J. E. & Ullman, J. D. [1983], *Data Structures and Algorithms*, Addison-Wesley.
- Aichholzer, O., Aurenhammer, F., Alberts, D. & Gärtner, B. [1995], 'A Novel Type of Skeleton for Polygons', *Journal of Universal Computer Science* **1**(12), 752–761.
- Ameri, B. [2000], Automatic Recognition and 3D Reconstruction of Buildings through Computer Vision and Digital Photogrammetry, Doktorarbeit, Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie.
- Amerinex [1996], *The KBVision System: Programmer's Reference, Release 3.2*, Amerinex Applied Imaging, Inc., 409 Main Street, Amherst, MA 01002, U.S.A.
- Anders, K.-H. & Sester, M. [1997], Methods of Data Base Interpretation – Applied to Model Generalization from Large to Medium Scale, *in*: W. Förstner & L. Plümer, Hrsg., 'Proc. SMATI'97: Semantic Modelling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps', Birkhäuser, Seiten 89–103.
- Atkinson, K. B., Hrsg. [1996], *Close Range Photogrammetry and Machine Vision*, Whittles Publishing.
- Axelsson, P. [1998], Integrated Sensors for Improved 3D Interpretation, *in*: 'IAPRS, Vol. 32 Part 4, Stuttgart'.
- Axelsson, P. [1999], 'Processing of laser scanner data – algorithms and applications', *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **54**, 138–147.
- Bahne, B. & Rathgeber, R. [1999], Anforderungen an digitale Gebäudemodelle seitens VIAG Interkom, *in*: 'Proc. Workshop "Generieren, Visualisieren und Verwalten von 3D-Stadtmodellen"', ETH Zürich, 9.2.1999'.
- Baillard, C. & Zisserman, A. [1999], Automatic reconstruction of piecewise planar models from multiple views, *in*: 'Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition', Seiten 559–565.
- Baillard, C., Schmid, C., Zisserman, A. & Fitzgibbon, A. [1999], Automatic Line Matching and 3D Reconstruction of Buildings from Multiple Views, *in*: 'IAPRS, Vol. 32 Part 3-2W5'.
- Baltsavias, E., Mason, S. & Stallmann, D. [1995], Use of DTMs/DSMs and Orthoimages to Support Building Extraction, *in*: A. Grün, O. Kübler & P. Agouris, Hrsg., 'Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images', Birkhäuser, Basel, Seiten 199–210.
- Baltsavias, E. P. [1991], Multiphoto Geometrically Constrained Matching, Doktorarbeit, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, Mitteilungen Nr. 49.
- Baltsavias, E. P. [1999a], 'Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources', *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **54**, 164–198.
- Baltsavias, E. P. [1999b], 'A comparison between photogrammetry and laser scanning', *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **54**, 83–94.
- Baltsavias, E. P., Wehr, A. & Lohr, U., Hrsg. [1999], *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Special Issue on Airborne Laser Scanning*, Vol. 54, Elsevier.
- Bamler, R. [1999], The SRTM Mission: A World-Wide 30m Resolution DEM from SAR Interferometry in 11 Days, *in*: D. Fritsch & R. Spiller, Hrsg., 'Photogrammetric Week 99', Wichmann Verlag, Seiten 145–154.
- Bell, G., Parisi, A. & Pesce, M. [1995], The Virtual Reality Modeling Language, Version 1.0 Specification, Technical report, Silicon Graphics, Inc. and InterVista Software, <http://vrml.wired.com/vrml.tech/vrmlspec.html>.
- Bergevin, R., Soucy, M. & Gagnon, H. [1996], 'Towards a General Multi-View Registration Technique', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **18**(5), 540–547.
- Bernsen, J. A. C. [1991], 'An objective and subjective evaluation of edge detection methods in images', *Philips Journal of Research* **46**(2-3), 57–94.

- Berthod, M., Gabet, L., Giraudon, G. & Lotti, J. [1995], High Resolution Stereo for the Detection of Buildings, *in*: A. Grün, O. Kuebler & P. Agouris, Hrsg., 'Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images', Birkhäuser Verlag, Basel, Boston, Berlin, Seiten 135–144.
- Besl, P. J. [1988], *Surfaces in Range Image Understanding*, Springer series in perception engineering, Springer Verlag. Revised ed. of Ph.D. thesis, University of Michigan.
- Besl, P. J. & Jain, R. C. [1988], 'Segmentation Through Variable-Order Surface Fitting', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **10**(2), 167–192.
- Besl, P. J. & McKay, N. D. [1992], 'A Method for Registration of 3-D Shapes', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **14**(2), 239–256.
- Bill, R. & Fritsch, D. [1991], *Grundlagen der Geo-Informationssysteme*, Vol. 1, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Bolles, R. C. & Fischler, M. A. [1981], A RANSAC-Based Approach to Model Fitting and its Application to finding cylinders in range data, *in*: 'Proc. of 7th Int. Conf. on Artificial Intelligence, IJCAI '81', Seiten 637–643.
- Bolles, R. C. & Horaud, P. [1986], '3DPO: A Three-Dimensional Part Orientation System', *The International Journal of Robotics Research* **5**(3), 3–26.
- Brandenburg, F., Jünger, M. & Mutzel, P. [1997], 'Algorithmen zum automatischen Zeichnen von Graphen', *Informatik-Spektrum* **20**(4), 199–207.
- Braun, C., Kolbe, T. H., Lang, F., Schickler, W., Steinhage, V., Cremers, A. B., Förstner, W. & Plümer, L. [1995], 'Models for Photogrammetric Building Reconstruction', *Computer & Graphics* **19**(1), 109–118.
- Burns, J. B., Hanson, A. R. & Riseman, E. M. [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**(6), 679–698.
- Carosio, A. [1995], Three-dimensional synthetic landscapes: Data acquisition, modelling and visualization, *in*: D. Fritsch & D. Hobbie, Hrsg., 'Photogrammetric Week '95', Herbert Wichmann Verlag, Seiten 293–302.
- Collins, R. T., Hanson, A. R., Riseman, E. M. & Schultz, H. [1995], Automatic Extraction of Buildings and Terrain from Aerial Images, *in*: A. Grün, O. Kuebler & P. Agouris, Hrsg., 'Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images', Birkhäuser, Basel, Seiten 169–178.
- Danahy, J. [1999], Visualization Data Needs in Urban Environmental Planning and Design, *in*: D. Fritsch & R. Spiller, Hrsg., 'Photogrammetric Week 99', Wichmann Verlag, Seiten 351–365.
- Dantzig, G. B. [1963], *Linear Programming and Extensions*, Princeton University Press.
- Diestel, R. [1996], *Graphentheorie*, Springer Verlag Berlin Heidelberg New York.
- Distler, H. K., Veen, H. A. H. C. V., Braun, S. J., Heinz, W., Franz, M. O. & Bühlhoff, H. H. [1998], Navigation in real and virtual environments: Judging orientation and distance in a large-scale landscape, *in*: M. Göbel, J. Landauer, U. Lang & M. Wapler, Hrsg., 'Virtual Environments '98, Proc. of the Eurographics Workshop, Stuttgart, Germany', Springer-Verlag, Wien, Seiten 124–133.
- do Carmo, M. P. [1992], *Differentialgeometrie von Kurven und Flächen*, 2. Aufl., Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig/Wiesbaden.
- Dorrer, E. [1975], 'Gedanken zum digitalen Geländemodell', *Bildmessung und Luftbildwesen (BuL)* **43**, 90–91.
- Douglas, D. & Peucker, T. [1973], 'Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature', *The Canadian Cartographer* **10**(2), 112–122.
- Duda, R. O. & Hart, P. E. [1973], *Pattern Classification and Scene Analysis*, John Wiley and Sons, New York.
- Eckstein, W. & Munkelt, O. [1995], Extracting Objects from Digital Terrain Models, *in*: T. Schenk, Hrsg., 'Remote Sensing and Reconstruction for Three-Dimensional Objects and Scenes', SPIE.
- El-Hakim, S. F., Brenner, C. & Roth, G. [1998], An Approach to Creating Virtual Environments using Range and Texture, *in*: 'Proc. ISPRS Comm. V Symposium, IAPRS Vol. 32 Part 5, Hakodate, Japan', Seiten 331–338.
- Elber, G. [1996], *IRIT Version 7.0 User's Manual*, <http://www.cs.technion.ac.il/~irit>.
- Englert, R. [1996], The System COBREP: Automatic Conversion of CSG Building Data to Boundary Representation, Technical Report IAI-TR-96-10, University of Bonn, Institute of Computer Science III, Römerstr. 164, D-53117 Bonn, Germany.
- Eppstein, D. & Erickson, J. [1999], 'Raising Roofs, Crashing Cycles, and Playing Pool: Applications of a Data Structure for Finding Pairwise Interactions', *Discrete & Computational Geometry* **22**, 569–592.

- Fischer, A., Kolbe, T., Lang, F., Cremers, A., Förstner, W., Plümer, L. & Steinhage, V. [1998], 'Extracting Buildings from Aerial Images using Hierarchical Aggregation in 2D and 3D', *Computer Vision and Image Understanding* **72**(2), 195–203.
- Fischler, M. A. & Bolles, R. C. [1981], 'Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography', *Communications of the ACM* **24**(6), 381–395.
- Flynn, P. J. & Jain, A. K. [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, Seiten 137–155.
- Förstner, W. [1986], A Feature Based Correspondence Algorithm for Image Matching, *in*: 'IAPRS, Vol. 26-3/3, Rovaniemi', Seiten 150–166.
- Förstner, W. [1999], 3D-City Models: Automatic and Semiautomatic Acquisition Methods, *in*: D. Fritsch & R. Spiller, Hrsg., 'Photogrammetric Week 99', Wichmann Verlag, Seiten 291–303.
- Fraser, C. [1999], Status of High-Resolution Satellite Imaging, *in*: D. Fritsch & R. Spiller, Hrsg., 'Photogrammetric Week 99', Wichmann Verlag, Seiten 117–123.
- Fritsch, D. [1991], *Raumbezogene Informationssysteme und digitale Geländemodelle*, Vol. C 369, Deutsche Geodätische Kommission, München.
- Fritsch, D. [1999], Virtual cities and landscape models – what has photogrammetry to offer?, *in*: D. Fritsch & R. Spiller, Hrsg., 'Photogrammetric Week 99', Wichmann Verlag, Seiten 3–14.
- Fuchs, C. [1998], Extraktion polymorpher Bildstrukturen und ihre topologische und geometrische Gruppierung, Doktorarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn, Institut für Photogrammetrie, DGK Reihe C, Nr. 502.
- Fucke, R., Kirch, K. & Nickel, H. [1989], *Darstellende Geometrie*, Verlag Harri Deutsch, Thun, Frankfurt/M, Kapitel 3.3. Dachausmittlung, Seiten 133–139.
- Giezeman, G.-J., Veltkamp, R. & Wesselink, W. [1999], *Getting Started with CGAL, Release 1.2, 1999*, <http://www.cs.uu.nl/CGAL>.
- Gillner, S. & Mallot, H. A. [1998], 'Navigation and acquisition of spatial knowledge in a virtual maze', *Journal of Cognitive Neuroscience* **10**, 445–463.
- Gonzalez, R. C. & Woods, R. E. [1992], *Digital Image Processing*, Addison-Wesley Reading, Mass.
- Grimson, W. E. L. [1990], *Object Recognition by Computer*, Series in Artificial Intelligence, MIT Press, Cambridge, Mass.
- Gruber, M., Pasko, M. & Leberl, F. [1995], Geometric versus Texture Detail in 3-D Models of Real World Buildings, *in*: A. Grün, O. Kübler & P. Agouris, Hrsg., 'Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images', Birkhäuser, Basel, Seiten 189–198.
- Grün, A., Baltsavias, E. & Henricsson, O., Hrsg. [1997], *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II)*, Birkhäuser, Basel.
- Grün, A. & Dan, H. [1997], TOBAGO – a topology builder for the automated generation of building models, *in*: A. Grün, E. Baltsavias & O. Henricsson, Hrsg., 'Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II)', Birkhäuser, Basel, Seiten 149–160.
- Grün, A. & Wang, X. [1998], CC-Modeler: A topology generator for 3-D city models, *in*: D. Fritsch, M. English & M. Sester, Hrsg., 'IAPRS, Vol. 32 Part 4, Stuttgart', Seiten 188–196.
- Grün, A. & Wang, X. [1999], Urban data management with a hybrid 3-D GIS, *in*: 'Proc. 21st Urban Data Management Symposium, Venedig, Italien, 21–23 April'.
- Grün, A., Kübler, O. & Agouris, P., Hrsg. [1995], *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images*, Birkhäuser, Basel.
- Gühring, J. [1997], Distanzdatensegmentierung und deren Anwendung zur Visualisierung digitaler Höhenmodelle, Studienarbeit (nicht veröffentlicht), Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie.
- Gülch, E. & Müller, H. [1997], Object-oriented software design in semiautomatic building extraction, *in*: D. M. McKeown, J. C. McGlone & O. Jamet, Hrsg., 'Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision III, SPIE Vol. 3072, Orlando, USA', Seiten 37–48.
- Gülch, E., Müller, H. & Läbe, T. [1999], Integration of Automatic Processes into Semi-Automatic Building Extraction, *in*: 'IAPRS, Vol. 32 Part 3-2W5, München'.
- Gülch, E., Müller, H., Läbe, T. & Ragia, L. [1999], On the performance of semi-automatic building extraction, *in*: 'ISPRS Comm. III Symposium, Columbus, Ohio'.

- Haala, N. [1994], Detection of Buildings by Fusion of Range and Image Data, *in*: 'IAPRS, Vol. 31 Part 3, München'.
- Haala, N. [1996], Gebäuderekonstruktion durch Kombination von Bild- und Höhendaten, Doktorarbeit, Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie, Deutsche Geodätische Kommission, C 460.
- Haala, N. [1999], Combining Multiple Data Sources for Urban Data Acquisition, *in*: D. Fritsch & R. Spiller, Hrsg., 'Photogrammetric Week 99', Wichmann Verlag, Seiten 329–339.
- Haala, N. & Brenner, C. [1997], Interpretation of Urban Surface Models using 2D Building Information, *in*: A. Grün, E. Baltsavias & O. Henricsson, Hrsg., 'Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II)', Birkhäuser, Basel, Seiten 213–222.
- Hahn, M. & Brenner, C. [1995], Area Based Matching of Colour Images, *in*: E. P. Baltsavias, Hrsg., 'Proc. ISPRS Intercommission Workshop 'From Pixels to Sequences', IAPRS Vol. 30 Part 5W1', Seiten 227–236.
- Hansen, C. & Henderson, T. C. [1989], 'CAGD-Based Computer Vision', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **11**(11), 1181–1193.
- Haralick, R. M. [1984], 'Digital Step Edge from Zero Crossings of Second Directional Derivatives', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **6**, 331–340.
- Haralick, R. M. & Shapiro, L. G. [1992], *Computer and Robot Vision, Vol. I*, Addison-Wesley.
- Haralick, R. M. & Shapiro, L. G. [1993], *Computer and Robot Vision, Vol. II*, Addison-Wesley.
- Haralick, R., Sternberg, S. & Zhuang, X. [1987], 'Image Analysis using Mathematical Morphology', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **9**(4), 532–550.
- Heckbert, P. [1997], Multiresolution Surface Modeling, *in*: 'Course Notes for SIGGRAPH'97, Los Angeles, CA'.
- Henricsson, O. [1995], Inferring Homogeneous Regions from Rich Image Attributes, *in*: A. Grün, O. Kübler & P. Agouris, Hrsg., 'Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images', Birkhäuser, Basel, Seiten 13–22.
- Henricsson, O. [1996], Analysis of Image Structures using Color Attributes and Similarity Relations, Doktorarbeit, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, Mitteilungen Nr. 59.
- Henricsson, O., Bignone, F., Willuhn, W., Ade, F., Kübler, O., Baltsavias, E., Mason, S. & Grün, A. [1996], Project AMOBE: Strategies, Current Status, and Future Work, *in*: 'IAPRS, Vol. 31, Part B3', Seiten 321–330.
- Henricsson, O. & Baltsavias, E. [1997], 3-D Building Reconstruction with ARUBA: A Qualitative and Quantitative Evaluation, *in*: A. Grün, E. Baltsavias & O. Henricsson, Hrsg., 'Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II)', Birkhäuser, Basel, Seiten 65–76.
- Hoffmann, C. M. [1989], *Geometric and Solid Modeling*, Morgan Kaufmann, Palo Alto, CA.
- Hoover, A., Jean-Baptiste, G., Jiang, X. Y., Flynn, P. J., Bunke, H., Goldgof, D. B., Bowyer, K., Eggert, D. W., Fitzgibbon, A. & Fisher, R. B. [1996], 'An Experimental Comparison of Range Image Segmentation Algorithms', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **18**(7), 673–689.
- Hopcroft, J. E. & Ullman, J. D. [1988], *Einführung in die Automatentheorie, formale Sprachen und Komplexitätstheorie*, Addison-Wesley (Deutschland).
- Huber, P. J. [1981], *Robust Statistics*, John Wiley and Sons, New York.
- Hug, C. [1997], Extracting Artificial Surface Objects from Airborne Laser Scanner Data, *in*: A. Grün, E. Baltsavias & O. Henricsson, Hrsg., 'Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II)', Birkhäuser, Basel, Seiten 203–212.
- Illert, A. [1990], Automatische Erfassung von Kartenschrift, Symbolen und Grundrißobjekten aus der Deutschen Grundkarte 1:5000, Doktorarbeit, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 166.
- Jain, A. K. & Flynn, P. J., Hrsg. [1993], *Three-Dimensional Object Recognition Systems*, Elsevier.
- Jiang, X. Y. & Bunke, H. [1992], Fast Segmentation of Range Images into Planar Regions by Scan Line Grouping, Technical Report IAM-92-006, Institute of Informatics and Applied Mathematics, University of Berne, Switzerland.
- Jiang, X. Y. & Bunke, H. [1994], 'Fast Segmentation of Range Images into Planar Regions by Scan Line Grouping', *Machine Vision and Applications* **7**(2), 115–122.
- Jolion, J.-M., Meer, P. & Bataouche, S. [1991], 'Robust Clustering with Applications in Computer Vision', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **13**(8), 791–802.
- Kersten, T. & Cuhe, L. [1999], Auf dem Weg zur virtuellen Stadt (Cyber City) – Photogrammetrische Datenerfassung für 3-D Stadtmodelle, *in*: 'Proc. Workshop "Generieren, Visualisieren und Verwalten von 3D-Stadtmodellen", ETH Zürich, 9.2.1999'.
- Kofler, M. & Gruber, M. [1998], 'Verwaltung und Visualisierung dreidimensionaler Stadtmodelle', *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, 2/1998 Seiten 44–57.

- Kraus, K. [1994], *Photogrammetrie, Band I*, 5. Aufl., Dümmler Verlag, Bonn.
- Lang, F. [1999], Geometrische und semantische Rekonstruktion von Gebäuden durch Ableitung von 3D-Gebäudeecken, Doktorarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn, Institut für Photogrammetrie, Shaker Verlag, Aachen.
- Lange, E. [1999], The Degree of Realism of GIS-Based Virtual Landscapes: Implications for Spatial Planning, *in*: D. Fritsch & R. Spiller, Hrsg., 'Photogrammetric Week 99', Wichmann Verlag, Seiten 367–374.
- Lawson, C. & Hanson, R. [1974], *Solving Least Squares Problems*, Vol. 15 of *Classics in Applied Mathematics*, SIAM – Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia.
- Lin, C., Huertas, A. & Nevatia, R. [1995], Detection of Buildings from Monocular Images, *in*: A. Grün, O. Kübler & P. Agouris, Hrsg., 'Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images', Birkhäuser, Basel, Seiten 125–134.
- Lowe, D. [1985], *Perceptual Organization and Visual Recognition*, Kluwer Academic Publishers, Boston, Mass.
- Luhmann, T. [2000], *Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden und Anwendungen*, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Maas, H.-G. [1992], Digitale Photogrammetrie in der dreidimensionalen Strömungsmesstechnik, Doktorarbeit, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, Mitteilungen Nr. 50.
- Maas, H.-G. [1997], Mehrbildtechniken in der digitalen Photogrammetrie, Habilitationsschrift, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, Mitteilungen Nr. 62.
- Maas, H.-G. [1999], 'Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data', *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **54**, 153–163.
- Malaka, R. [1999], Jahresbericht 1998/1999, Technical report, European Media Lab, Heidelberg.
- Mason, S., Baltsavias, E. & Stallmann, D. [1994], High Precision Photogrammetric Data Set for Building Reconstruction and Terrain Modelling, Interner Bericht, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich.
- Mason, S. & Baltsavias, E. [1997], Image-Based Reconstruction of Informal Settlements, *in*: A. Grün, E. Baltsavias & O. Henricsson, Hrsg., 'Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II)', Birkhäuser, Basel, Seiten 97–108.
- Mayer, H. [1993], Automatische wissensbasierte Extraktion von semantischer Information aus gescannten Karten, Doktorarbeit, Technische Universität München, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen.
- Mehlhorn, K. & Näher, S. [1999], *LEDA – A Platform for Combinatorial and Geometric Computing*, Cambridge University Press, <http://www.mpi-sb.mpg.de/~mehlhorn/LEDAbook.html>.
- Mercer, J. B. & Schnick, S. [1999], Comparison of DEMs from STAR-3i Interferometric SAR and Scanning Laser, *in*: 'Proc. ISPRS Comm. III Workshop, La Jolla, CA, November 9–11'.
- Moravec, H. P. [1977], Toward Automatic Visual Obstacle Avoidance, *in*: 'Proc. Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence'.
- Müller, H. [1998], Object-oriented modeling for the extraction of geometry, texture and reflectance from digital images, *in*: D. Fritsch, M. English & M. Sester, Hrsg., 'GIS – Between Visions and Applications, IAPRS Vol. 32 Part 4, Stuttgart', Seiten 403–410.
- Parvin, B. & Medioni, G. [1986], Segmentation of range images into planar surfaces by split and merge, *in*: 'Proc. of Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition', Seiten 415–417.
- Pavlidis, T. [1968], 'Analysis of set patterns', *Pattern Recognition* **1**, 165–178.
- Pavlidis, T. [1972], 'Representation of Figures by Labeled Graphs', *Pattern Recognition* **4**, 5–17.
- Phillips, M. [1994], *Geomview Manual, Version 1.5*, The Geometry Center, University of Minnesota, U.S.A.
- Phoenix [2000], 'Richtiges Modell für den Richtfunk', *Business Geomatics*, 6. März, **2/00**, 3.
- Photomodeler [2000]. Siehe Web-Seite: <http://www.photomodeler.com>.
- Ragia, L. & Winter, S. [1998], Contributions to a Quality Description of Areal Objects in Spatial Data Sets, *in*: D. Fritsch, M. English & M. Sester, Hrsg., 'GIS – Between Visions and Applications, IAPRS Vol. 32 Part 4, Stuttgart', Seiten 479–486.
- Regensburger, K. [1990], *Photogrammetrie – Anwendungen in Wissenschaft und Technik*, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- Riegl [2000]. Siehe Web-Seite: <http://www.riegl.co.at>.
- Rollei [1996], *RolleiMetric CDW, Close Range Digital Workstation*, Rolleifototechnik GmbH, Abteilung Rolleifototechnik, Braunschweig.

- Rosenfeld, A., Hummel, R. A. & Zucker, S. W. [1976], 'Scene Labeling by Relaxation Operations', *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* **6**, 420–433.
- Sester, M. [1995], Lernen struktureller Modelle für die Bildanalyse, Doktorarbeit, Universität Stuttgart, DGK Reihe C, Nr. 441.
- Sester, M., Anders, K.-H. & Walter, V. [1998], 'Linking Objects of Different Spatial Data Sets by Integration and Aggregation', *GeoInformatica* **4**, 335–358.
- Sester, M. & Förstner, W. [1989], Object Location Based on Uncertain Models, *in*: 'Proc. 11. DAGM Symposium, Hamburg, Informatik Fachberichte, Vol. 219', Springer Verlag, Seiten 457–464.
- Sester, M. & Klein, A. [1999], Rule Based Generalization of Buildings for 3D-Visualization, *in*: 'Proc. of the 19th International Cartographic Conference of the ICA, Ottawa, Canada', Seiten 214–224.
- Shapiro, L. G. & Haralick, R. M. [1979], 'Decomposition of Two-Dimensional Shapes by Graph-Theoretic Clustering', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **1**(1), 10–20.
- Sood, R.-A. & Fahrenhorst, C. [1999], Geocoded Image Sequences, *in*: D. Fritsch & R. Spiller, Hrsg., 'Photogrammetric Week 99', Wichmann Verlag, Seiten 313–316.
- Steeger, C. [1996], An Unbiased Detector of Curvilinear Structures, Technical Report FGBV-96-03, Forschungsgruppe Bildverstehen, Informatik IX, Technische Universität München.
- Steinborn, W. & Fritsch, D., Hrsg. [1999], *Geo-Information-Systeme, Laser-Scanning in Theorie und Praxis*, Vol. 12, Herbert Wichmann Verlag, Hühig GmbH.
- Stilla, U. & Jurkiewicz, K. [1999], Reconstruction of Building Models from Maps and Laser Altimeter Data, *in*: P. Agouris & A. Stefanidis, Hrsg., 'Integrated Spatial Databases, Digital Images and GIS, ISD'99', Springer LNCS1737, Seiten 34–46.
- Sugihara, K. [1982], 'Mathematical Structures of Line Drawings of Polyhedrons — Toward Man-Machine Communication by Means of Line Drawings', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **4**(5), 458–469.
- Sugihara, K. [1984], 'A Necessary and Sufficient Condition for a Picture to Represent a Polyhedral Scene', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **6**(5), 578–586.
- SvLis [1997], *SvLis User Manual*, University of Bath, UK.
- Taylor, R. W., Savini, M. & Reeves, A. P. [1989], 'Fast Segmentation of Range Imagery into Planar Regions', *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* **45**, 42–60.
- Technet [1996], *Programmsystem PICTRAN-D/PICTRAN-E, Programmbeschreibung und Benutzeranleitung*, Technet GmbH, Berlin.
- TWIN [1995], *TWIN Solid Modeling Package Reference Manual*, Computer Aided Design and Graphics Laboratory (CADLAB), School of Mechanical Engineering, Engineering Research Center for Collaborative Manufacturing, Purdue University.
- Uitermark, H., van Oosterom, P., Mars, N. & Molenaar, M. [1998], Propagating Updates: Finding Corresponding Objects in a Multi-source Environment, *in*: T. K. Poiker & N. Chrisman, Hrsg., 'Proc. 8th Symposium on Spatial Data Handling (SDH)', Seiten 580–591.
- Ullmann, J. R. [1965], 'Parallel Recognition of Idealised Line Characters', *Kybernetik* **2**, 221–226.
- Ullmann, J. R. [1966], 'Associating Parts of Patterns', *Information and Control* **9**, 583–601.
- Volz, S. & Klinec, D. [1999], NEXUS: The Development of a Platform for Location Aware Application, *in*: 'Proc. of the third Turkish-German joint Geodetic Days, Vol. 2, Istanbul, Turkey', Seiten 599–608.
- Volz, S. & Sester, M. [2000], NEXUS: Distributed Data Management Concepts for Location Aware Applications, *in*: 'Proc. International Workshop on Emerging Technologies for Geo-Based Applications 2000, Ascona, Schweiz'.
- Walter, V. [1998], Automatic Classification of Remote Sensing Data for GIS Database Revision, *in*: D. Fritsch, M. Englich & M. Sester, Hrsg., 'GIS – Between Visions and Applications, IAPRS Vol. 32 Part 4, Stuttgart', Seiten 641–648.
- Walter, V. [1999], Automated GIS data collection and update, *in*: D. Fritsch & R. Spiller, Hrsg., 'Photogrammetric Week 99', Wichmann Verlag, Seiten 267–280.
- Waltz, D. L. [1975], Understanding Line Drawings of Scenes with Shadows, *in*: P. H. Winston, Hrsg., 'Psychology of Computer Vision', McGraw-Hill, New York, Seiten 19–91.
- Wehr, A. [1991], Entwicklung und Erprobung von opto-elektronischen Entfernungsmesssystemen mit CW-Halbleitersensoren, Doktorarbeit, Universität Stuttgart, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen.
- Wehr, A. & Lohr, U. [1999], 'Airborne laser scanning – an introduction and overview', *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **54**, 68–82.

- Weidner, U. [1996], Gebäudeerfassung aus Digitalen Oberflächenmodellen, Doktorarbeit, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn, Institut für Photogrammetrie.
- Weidner, U. & Förstner, W. [1995], 'Towards Automatic Building Extraction from High Resolution Digital Elevation Models', *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **50**(4), 38–49.
- Winston, P. H. [1987], *Künstliche Intelligenz*, Addison-Wesley (Deutschland).
- Wolf, M. [1999], Photogrammetric Data Capture and Calculation for 3D City Models, *in*: D. Fritsch & R. Spiller, Hrsg., 'Photogrammetric Week 99', Wichmann Verlag, Seiten 305–312.
- Yang, H. S. & Kak, A. C. [1986], 'Determination of the identity, position and orientation of the topmost object in a pile', *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* **36**, 229–255.
- Zhao, T. C. & Overmars, M. [1995], *Forms Library - A Graphical User Interface Toolkit for X*, Department of Physics, University of Wisconsin-Milwaukee, Department of Computer Science, Utrecht University.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Claus Brenner
geboren am 21. August 1967 in Heilbronn-Sontheim

Schulbildung

1973–1977 Grundschule: Filderschule Stuttgart-Degerloch
1977–1986 Gymnasium: Wilhelms-Gymnasium Stuttgart-Degerloch
24.06.1986 Abitur

Studium

01.10.1987–20.09.1994 Studium der Informatik an der Universität Stuttgart
20.09.1994 Studienabschluß als Diplom-Informatiker

Beruf

seit 19.10.1994 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Photogrammetrie
der Universität Stuttgart
seit 1996 Gruppenleiter der Gruppe "Optische Inspektion" am Institut
für Photogrammetrie der Universität Stuttgart

Danksagung

Ich bedanke mich bei Herrn Prof. Dieter Fritsch, der diese Arbeit betreut hat und das Manuskript einer eingehenden Korrektur unterzog. Daneben bedanke ich mich für die stets sehr offene Atmosphäre und die vielfältigen Entwicklungsmöglichkeiten, die mir durch Herrn Professor Fritsch gegeben wurden.

Herrn Prof. Armin Grün danke ich für die freundliche Übernahme des Korreferats. Auch seine Anmerkungen und Hinweise haben die Arbeit verbessert.

Eine Arbeit wie diese entsteht selten ohne die tatkräftige Mithilfe von Kollegen und Freunden. Zunächst möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Michael Hahn bedanken, der mich seinerzeit bei meinen ersten Veröffentlichungen unterstützt hat. Des weiteren habe ich Herrn Dr. Norbert Haala zu danken, der mir beim Einstieg in die photogrammetrische Bildverarbeitung geholfen hat und es auch verstand, mein Interesse an der Gebäuderekonstruktion zu wecken. In der Folge ergab sich eine fruchtbare Zusammenarbeit, welche zu etlichen rekonstruierten Stadtlandschaften (wie auch Veröffentlichungen) geführt hat. Herr Dr. Haala hat auch das Mapping von Textur aus Luftbildern beigesteuert und so wesentlich zur visuell ansprechenden Darstellung der Ergebnisse beigetragen.

Insbesondere wenn man “virtuelle Flüge” durch rekonstruierte Stadtmodelle erzeugt, ist die in dieser Arbeit vorgestellte Gebäuderekonstruktion nur ein Teilaspekt der insgesamt durchzuführenden Arbeiten. Bilder müssen gescannt und orientiert, Geländemodelle gerechnet, Laserscan- und Grundrissdaten vorbereitet werden. Grobe Rekonstruktionsfehler müssen semiautomatisch nachbearbeitet, terrestrische Fassadenbilder müssen gewonnen, entzerrt und manuell aufgebracht werden. Selbst der fertige Film muss in der Regel bearbeitet oder für verschiedene Medien konvertiert werden. In diesem Zusammenhang habe ich zu danken (in alphabetischer Reihenfolge): Jan-Martin Bofinger, Jan Böhm, Markus Englich, Jens Gühring, Esther Hinz, Antje Quednau, Werner Schneider, Dr. Monika Sester, Christian Stätter und Steffen Volz.

Schließlich möchte ich allen weiteren Kollegen des Instituts für Photogrammetrie für die stets angenehme und fruchtbare Arbeitsatmosphäre danken.

Besonders möchte ich meinen Eltern danken für die Unterstützung, die sie mir über all die Jahre zukommen ließen.