

DEUTSCHE GEODÄTISCHE KOMMISSION
bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 594

Eberhard Steinle

**Gebäudemodellierung und -änderungserkennung
aus multitemporalen Laserscanningdaten**

München 2005

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

ISSN 0065-5325

ISBN 3 7696 5033 6

Gebäudemodellierung und -änderungserkennung
aus multitemporalen Laserscanningdaten

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
von der Fakultät für
Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)
genehmigte
Dissertation

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Eberhard Steinle
aus Stuttgart

München 2005

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:

Deutsche Geodätische Kommission

Alfons Goppel-Straße 11 ÿ D 80 539 München

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

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

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing.habil. Dr.h.c. Hans-Peter Bähr

Korreferent: Prof. Dr.habil. Hans-Gerd Maas

Tag der mündlichen Prüfung: 15. Februar 2005

© 2005 Deutsche Geodätische Kommission, München

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

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit entstand in einem Teilprojekt des Sonderforschungsbereichs 461, der sich u. a. mit der Schadensminderung nach Erdbeben beschäftigt. Ein wesentlicher Beitrag zu einer effektiveren Rettungstätigkeit besteht in der Bereitstellung eines zuverlässigen Schadensberichts betroffener Gebiete kurz nach Auftreten eines Erdbebens, da damit eine optimierte Einsatzplanung erfolgen kann. Zur Generierung des Schadensberichts kann die automatisierte Analyse von multitemporalen Laserscanningdaten eingesetzt werden. Es müssen zunächst aus den Daten betroffene Gebäude extrahiert werden, für die dann eine Detailanalyse anhand von Referenzmodellen früherer Aufnahmezeitpunkte realisierbar ist.

In dieser Arbeit werden zwei Bereiche im Kontext dieses Themas behandelt. Zum einen wird ein objekt-orientiertes Verfahren zur Detektion von signifikanten Gebäudeänderungen präsentiert. Dafür wurden zuerst Untersuchungen über generell auftretende Änderungen in multitemporalen Laserscanningdatensätzen urbaner Gebiete durchgeführt. Es konnten dabei drei verschiedene Änderungsarten festgestellt werden: *temporale*, *sensorbedingte* und *permanente Änderungen*. Die permanenten Änderungen werden in der Änderungsdetektion weiter behandelt, sie konnten in die Untergruppen *abgerissene*, *zurückgebaute*, *aufgestockte* und *neue Gebäude* klassifiziert werden.

Der zweite Themenbereich umfasst die Modellierung von Gebäuden aus Laserscanningdaten. Es wurde ein ebenenbasiertes Verfahren entwickelt, das zu Vektormodellen der Gebäude führt. Die Ergebnisse wurden mit tachymetrisch erfassten Soll-Modellen verglichen. Die Analyse zeigte gute Modellierungsgenauigkeiten, aber auch systematische Effekte der in verschiedenen Messmodi des Laserscanning-Verfahrens erfassten Datensätze. Deshalb wird die Fusion von Gebäudemodellen aus beiden Datenarten vorgeschlagen. Eine Abschätzung der erreichbaren Genauigkeiten zeigt das enorme Verbesserungspotenzial gegenüber der Verwendung nur einer Datenart.

Summary

This work is based on a project of the collaborative research center 461 (SFB 461) at Karlsruhe University. The SFB is a bundle of research projects that deals, among other tasks, with the reduction in losses after the occurrence of strong earthquakes. An essential improvement of rescue activities can be achieved by the provision of a detailed damage report rapidly after the event, as such information can serve as the basis of an optimized resource planning. In order to derive the necessary information, automatic analysis of multi-temporal laserscanning data is suitable. Firstly, the affected buildings must be detected. They can then be analyzed further by a comparison with reference models created of laserscanning data of an earlier acquisition date.

In this work, two different aspects in the context of the described topics are discussed. One is the detection of possibly damaged buildings in laserscanning data, realized by an object-oriented approach. Firstly, an examination about the generally occurring changes in multitemporal laserscanning data of urban areas was conducted. Three classes of changes have been identified: *temporal*, *sensor based* and *permanent changes*. The permanent changes are regarded further in the change detection methodology. It was possible to divide them into four subclasses: *demolished*, *reduced*, *added-on* and *new buildings*.

The second aspect is the modelling of buildings restricted to laserscanning data. A tool was developed based on the extraction of plane roof parts which creates vector models of the buildings. For checking purposes, the results were compared to building models acquired by tachymetric measurements. The analysis showed good modelling accuracies, but also systematic effects depending on the measurement mode in which the laserscanning acquisition was carried out. Consequently, the fusion of the two vector models extracted from data of the different types is suggested. A first estimation of the achievable accuracy improvement shows the enormous potential of that fusion.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	7
1.1	Motivation.....	7
1.2	Ziele der Arbeit	8
2	Laserscanning-Messverfahren	9
2.1	Grundlagen und Begriffe	9
2.1.1	Terrestrisches und flugzeuggetragenes Laserscanning.....	10
2.1.2	Entfernungsmessung.....	11
2.1.3	Positions- und Orientierungsbestimmung.....	13
2.1.4	Messpunkterfassung	15
2.1.4.1	Footprint.....	15
2.1.4.2	Scanmuster	17
2.1.5	Aufbereitung der Messdaten	19
2.1.5.1	Georeferenzierung der Messpunkte	19
2.1.5.2	Digitale Höhenmodelle	20
2.2	TopoSys-Sensoren.....	22
2.3	Verwendete Datensätze	25
3	Grundlagen zur Objektmodellierung	26
3.1	Objektextraktion.....	26
3.1.1	Objektextraktionsverfahren aus Laserscanningdaten des IPF	29
3.1.1.1	Segmentation von Objekten aus dem nDOM	29
3.1.1.2	Klassifikation der segmentierten Objekte	32
3.2	Geometrische Modellierung.....	42
3.2.1	Modellierungsverfahren.....	43
3.3	Topologische Modellierung	46
3.3.1	Nachbarschaftsbeziehungen.....	46
3.3.2	Repräsentation der Nachbarschaftsbeziehungen	47
4	Gebäudemodellierung	50
4.1	Extraktion der Objektbestandteile	50
4.1.1	Flächenextraktion	51
4.1.1.1	Bestimmung des Kristallisationsbereichs.....	51
4.1.1.2	Homogenitätsprädikat	53
4.1.1.3	Ausreißerflächen.....	56
4.2	Topologie-Ermittlung.....	58
4.2.1	Flächenadjazenz	58
4.2.1.1	Mathematische Morphologie.....	59
4.2.1.2	Lagenachbarschaft	61
4.2.1.3	Höhennachbarschaft.....	62
4.2.1.4	Nachbarschaften von Vertikalflächen	66

4.2.2	Linienadjazenz	67
4.3	Objektgenerierung.....	69
4.3.1	Dachflächen	70
4.3.2	Wände	70
4.3.3	Gebäudekanten	70
4.3.4	Gebäudeecken	71
4.3.5	Gebäudemodelle.....	72
4.3.5.1	Deskriptionsmodell.....	73
4.3.5.2	Visualisierungsmodell.....	74
4.4	Beispiele und Ergebnisse	77
4.4.1	Semantische Korrektheit	78
4.4.2	Geometrische Korrektheit	82
4.4.2.1	Untersuchung der Lagegenauigkeit	83
4.4.2.2	Untersuchung der Höhengenaugkeit.....	84
4.4.2.3	Diskussion der Ergebnisse.....	86
5	Änderungen an urbanen Objekten.....	89
5.1	Definition des Änderungsbegriffs	89
5.2	Mögliche Arten von Veränderungen in urbanen Gebieten	90
5.2.1	Sensorbedingte Änderungen	90
5.2.2	Temporäre Änderungen	93
5.2.3	Permanente Änderungen.....	95
5.3	Beschreibung und Erfassung.....	96
5.4	Diskussion der Ergebnisse der Änderungserkennung	101
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	105
6.1	Zusammenfassung der Arbeit	105
6.2	Ausblick.....	106
7	Literatur	107

1 Einführung

Die vorliegende Arbeit entstand aus einem der Teilprojekte des Sonderforschungsbereichs (SFB) 461 („*Starkbeben: Von geowissenschaftlichen Grundlagen zu Ingenieurmaßnahmen*“, s. <http://www-sfb461.physik.uni-karlsruhe.de>). Dabei handelt es sich um einen von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Verbund verschiedener wissenschaftlicher Projekte, deren gemeinsame Ziele das Verstehen von Erdbebenmechanismen sind und die Entwicklung von vorbeugenden Maßnahmen und verbesserten Hilfsaktionen zur Schadensminderung im Katastrophenfall.

In den letzten Jahren gab es eine Reihe schwerer Erdbeben mit hohen Verlusten an Menschenleben und Sachwerten. Vor allem nach einer Häufung von Schadensereignissen im Jahr 1999 (u. a. im Januar in der Stadt Armenia in Kolumbien, im August in der Nähe von Izmit und im November in der Nähe von Düzce in der Türkei, sowie im September in der Nähe von Athen in Griechenland und nahe Taipeh in Taiwan) kam es zu der Diskussion, ob die Starkbebenereignisse zunehmen würden. Dies ist zwar nicht der Fall (vgl. z. B. [ZANETTI ET AL., 2000]), jedoch nehmen die Verluste bei Naturkatastrophen zu. Diese Tendenz beruht vor allem darauf, dass sich in vielen erdbebengefährdeten Gebieten *Megastädte* entwickeln, wie z. B. Tokyo oder Mexico City (vgl. [MUNICHRE, 2004]). Derartige Städte, die nach Definition der Vereinten Nationen mindestens zehn Millionen Einwohner besitzen müssen, sind durch die hohe Bevölkerungs- und Wirtschaftskonzentration extrem anfällig. Zudem führt der Bevölkerungsdruck in solchen Regionen oft dazu, dass auch als gefährdet bekannte Gebiete besiedelt werden, die früher gemieden wurden.

In dicht besiedelten Gebieten kann die Bewältigung einer Katastrophe immens schwierig werden, da hierfür ganz erhebliche Mengen an Ressourcen benötigt werden. Im Allgemeinen herrscht deshalb im Katastrophenfall ein Mangel an diesen Mitteln, wodurch ihre optimale Nutzung essenziell zur Rettung möglichst vieler Personen wird. Eine wesentliche Grundlage zur Optimierung der Ressourcennutzung ist eine fundierte Planung der Rettungseinsätze, wofür wiederum genaue Informationen über die aktuelle Schadenslage notwendig sind. Im Bereich der Informationsgewinnung nach Katastrophen bestehen heute aber generell noch erhebliche Defizite (vgl. [COMFORT, 2000]).

Aus diesen Gründen beschäftigt sich ein Teilbereich des SFBs mit der Entwicklung von Methoden zur schnellen Informations-Erfassung und -Interpretation als Grundlage eines *Disaster-Management-Tools* (DMT, vgl. [MARKUS ET AL., 2004]), mit dessen Hilfe u. a. ein optimierter Rettungseinsatz bewerkstelligt werden kann. Da sich die größten Schäden in Städten ergeben, konzentrieren sich die Arbeiten auf urbane Gebiete und dort insbesondere auf die Beurteilung von Gebäudezuständen.

1.1 Motivation

Verfahren zur Informationsgewinnung über die Schadenslage urbaner Gebiete im Rahmen eines DMTs müssen unter ganz speziellen Randbedingungen einsatzfähig sein. Es müssen die in die Verfahren integrierten Erfassungssysteme robust gegenüber den Aufnahmebedingungen sein, d. h. wetterunabhängig und unter verschiedenen Beleuchtungsverhältnissen einsetzbar. Sie müssen auch die Möglichkeit zur Erfassung ausgedehnter Gebiete in kurzer Zeit bieten. Die auf den ermittelten Daten aufbauenden Verfahren zur Informationsextraktion müssen Ergebnisse in kurzer Zeit und mit hoher Zuverlässigkeit liefern. Diese Randbedingungen machen den Einsatz von Sensoren der Fernerkundung sinnvoll, da sie große Gebiete in relativ kurzer Zeit erfassen können. Es sind insbesondere aktive Sensoren zu bevorzugen, da sie ihr eigenes Messsignal erzeugen und damit von den Beleuchtungsverhältnissen unabhängig sind. Werden die aufge-

nommenen Daten in digitaler Form abgelegt, so können sie direkt durch automatische Verfahren weiterverarbeitet und daraus Informationen extrahiert werden. Die Automation der Auswerteverfahren ermöglicht eine sehr schnelle Informationsgewinnung.

Um eine optimierte Einsatzplanung durchführen zu können, reicht es nicht, wenn Gebäude nur in *geschädigt* oder *intakt* klassifiziert werden. Es muss das konkrete *Schadensbild* ermittelt werden. Darunter ist zu verstehen, dass z. B. bei Erdbeben charakteristische Arten von Gebäudeänderungen auftreten, die in vordefinierte Klassen eingeteilt werden können. Die Einteilung richtet sich danach, mit welchen Hilfsmitteln eine Bergung verschütteter Personen erfolgen muss, und basiert auf den Erfahrungen internationaler Rettungsorganisationen (vgl. hierzu [MARKUS ET AL., 2000]).

Aus diesen Notwendigkeiten heraus wurde am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) der Universität Karlsruhe ein Projekt zur Informationsgewinnung definiert. Der Ansatz basiert auf der automatischen Auswertung von Laserscanningdaten, die aus einem Flugzeug heraus aufgenommen wurden. Die Methodik sieht vor, dass Laserscanningdaten eines erdbebengefährdeten Gebiets als Referenzdaten vorgehalten werden. Im Katastrophenfall erfolgt eine weitere Laserscanningbefliegung, die aufgrund der Eigenschaften des Systems zu jeder Tages- oder Nachtzeit und unter fast allen Wetterbedingungen ausgeführt werden kann. Lediglich bei dichtem Nebel oder starken Niederschlägen kann mit diesen Systemen keine Datenerfassung erfolgen.

Laserscanningssysteme liefern die Messdaten direkt in digitaler Form. Dadurch können die Daten direkt einem automatisierten Post-Processing zugeführt werden, und auf den resultierenden Daten aufbauende Analyseverfahren können sie automatisiert weiterverarbeiten; dies stellt einen ganz wesentlichen Vorteil bei zeitkritischen Anwendungen dar. Typischerweise werden die Laserscanningdaten zu digitalen Höhenmodellen in Rasterform aufbereitet. Eine direkte Beurteilung der Gebäudezustände auf Rasterbasis ist aber nicht möglich. Einige Schadensbilder machen die Beurteilung einzelner Dachflächen nötig, um z. B. Änderungen der Flächenneigung zu detektieren. Aus diesem Grund ist es von Vorteil, Gebäude für die Schadenserken- nung als Vektormodelle zu repräsentieren.

1.2 Ziele der Arbeit

Basierend auf dem zuvor beschriebenen Umfeld wurden die Ziele für diese Arbeit definiert. Es sollte ein Verfahren zur Extraktion von Vektormodellen aus Laserscanning-Datensätzen entwickelt werden, das, in Hinsicht auf die Modellierung auch geschädigter Strukturen, im Modellierungsprozess keine geometrischen Restriktionen benutzt, also z. B. die Parallelität von Gebäudekanten voraussetzt. Die Modellierung sollte für möglichst jede Geometrie durchführbar sein, wobei leichte Generalisierungen zugelassen werden konnten. Als Ausgangsdaten sollten einzig die Laserscanningdatensätze benutzt werden. Ein weiteres Ziel war es deshalb zu untersuchen, inwieweit sie zur Detektion und Modellierung der Gebäude ausreichen und abzuschätzen, welche Genauigkeiten dabei erreichbar sind.

Für die Detektion geschädigter Gebäude ist es wichtig zu wissen, welche anderen Arten von Änderungen an Gebäuden in urbanen Gebieten auftreten können. Hierzu sollten Untersuchungen durchgeführt werden. Darüber hinaus war ein Verfahren zu entwickeln, mit dem es möglich ist, die Bereiche potenziell geschädigter Gebäude aufzufinden. In Hinblick auf eine laufende Fortführung des Referenzdatensatzes sollten dabei auch solche Bereiche detektiert werden, die zwar eine dauerhafte Änderung von Gebäudestrukturen enthalten, welche aber nicht mit Schäden korrespondieren, wie z. B. Aufstockungen der Gebäude oder Neubauten.

2 Laserscanning-Messverfahren

Das mit *Laserscanning* (oder auch *Laser scanning*) bezeichnete Messverfahren ist unter verschiedenen Bezeichnungen in der Literatur bekannt. Gebräuchlich sind auch die Begriffe *LIDAR* (*LIght Detection and Ranging*), vor allem im amerikanisch-englischen Sprachraum benutzt, *LADAR* (*LAser Detection and Ranging*), *ALS* (*Airborne Laser Scanning*), sowie eine Reihe weiterer Begriffe, die z.T. von einzelnen Herstellern geprägt wurden, wie z. B. *ALTM* (*Airborne Laser Terrain Mapper*) von der Firma Optech. In dieser Arbeit wird der Begriff *Laserscanning* benutzt.

Seit Mitte der neunziger Jahre ist das flugzeuggetragene Laserscanning-Verfahren operationell. Es entstanden in dieser Zeit die ersten Firmen, die Datensätze, welchem mit diesem Verfahren gewonnen wurden, kommerziell vermarkten. Seither entwickelte sich das Laserscanning rapide und findet heute breite Anwendung.

Die Basisidee dieses Messverfahren ist die Ermittlung der Distanz zwischen einem Sensorsystem und dem zu vermessenden Punkt mit Hilfe von Laserlicht. Dies ist ein Messprinzip, dass in ähnlicher Form z. B. bei Tachymetern seit Längerem eingesetzt wird, dort als elektronische Distanzmessung (EDM) bekannt ist und sich bewährt hat. Eine der größten Herausforderungen zur Anwendung dieses Verfahren als flugzeuggetragenes System besteht aber darin, die Position und Orientierung des Sensors zum Aufnahmezeitpunkt genau kennen zu müssen. Diese Angaben werden zur Berechnung der Messpunktkoordinaten benötigt und bestimmen die Genauigkeit der Koordinatenermittlung wesentlich mit. Eine geeignete Erfassung dieser Parameter wurde erst durch die Entwicklung von hochgenauen Inertialnavigationssystemen (INS) und dem Global Positioning System (GPS) ermöglicht; die Grundlagen hierfür waren zu Beginn der neunziger Jahre geschaffen.

Zum Ende des letzten Jahrhunderts wurde das Laserscanning schon breit eingesetzt, und es gehört mittlerweile zu den am häufigsten eingesetzten Messverfahren zur Ermittlung geometrischer Daten größerer Gebiete. Oft wird es z. B. zur Bestimmung von Geländemodellen für hydrographische Anwendungen, als Grundlage zur Schaffung dreidimensionaler Stadtmodelle oder zur Überwachung von Hochspannungsleitungen benutzt (s. [LOHR, 1999]). Es ermöglichte aber auch Anwendungen, die zuvor nur unter sehr erheblichem Aufwand machbar waren, wie z. B. den Einsatz von Oberflächen- und Geländemodellen von Wäldern für forstwirtschaftliche Aufgaben (s. z. B. [HYYPÄ ET AL., 2004] und [WEINACKER ET AL., 2004]).

Im Folgenden wird detaillierter auf das Messverfahren im Allgemeinen eingegangen. Danach werden die TopoSys-Sensoren näher beschrieben, da mit diesen Systemen die in dieser Arbeit benutzten Datensätze erfasst wurden. Es wird außerdem auf die Weiterverarbeitung der Rohdaten eingegangen, da in dieser Arbeit nicht direkt die koordinierten Messpunkte, sondern digitale Höhenmodelle als Ausgangsdaten dienen.

2.1 Grundlagen und Begriffe

Beim Laserscanning-Verfahren handelt es sich um ein Messverfahren, bei dem mit einem aktiven Sensor eine quasi-punktweise Abtastung der zu vermessenden Objekte mit Hilfe von Laserlicht vorgenommen wird. Der jeweilige Messpunkt kann über die Ermittlung der Entfernung zwischen ihm und dem Messsystem sowie über eine bekannte Abstrahlgeometrie relativ zum Sensorsystem koordiniert werden. Das Abtasten des Objektes ist automatisiert und erfolgt deshalb mit einer sehr viel höheren Frequenz, als dies von einem Operateur interaktiv vorgenommen werden könnte, z. B. bei tachymetrischer Erfassung.

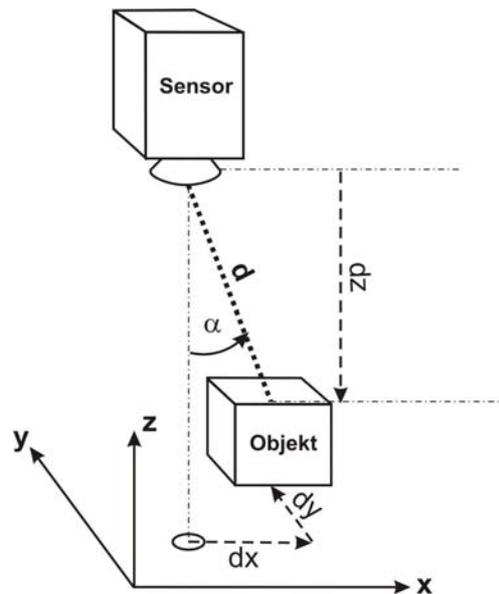


Abb. 1: Prinzipskizze zum Laserscanning-Verfahren

In der Abb. 1 ist dieses Messprinzip skizziert. Von dem Sensor wird ein Lasersignal abgestrahlt (gepunktete Linie) und an einem Objekt reflektiert. Die Entfernung zwischen dem Sensor und dem Objekt (d) kann mit verschiedenen Methoden ermittelt werden, worauf später eingegangen werden wird. Da die Abstrahlcharakteristik des Sensors bekannt ist (angedeutet durch einen Abstrahlwinkel α), kann die Messung am Objekt relativ zur Sensorposition (durch Ellipse angedeutet) koordiniert werden (dx, dy, dz).

2.1.1 Terrestrisches und flugzeuggetragenes Laserscanning

Das im Vorangegangenen erläuterte Prinzip gilt sowohl für das *terrestrische* als auch für das *flugzeuggetragene* Laserscanning. Bei dem zuerst genannten Verfahren wird die Vermessung eines Objektes mit einem bodengebundenen System vorgenommen, ähnlich der tachymetrischen Vermessung. Es kann aber auch in Fahrzeugen installiert sein, muss sich also nicht statisch an einer Position befinden (s. z. B. [Talaya et al., 2004]). Diese Systeme haben im Allgemeinen die Eigenschaft, dass der Messstrahl mindestens in zwei unabhängig voneinander modifizierbare Richtungen abgelenkt werden kann. Dadurch kann eine flächenhafte Abtastung eines Objektes durch eine große Anzahl von Einzelpunktmessungen erfolgen, auch wenn der Sensor seine Position nicht ändert (s. z. B. [ABMAYR ET AL., 2004], [BRENNER & DOLD, 2004]). Die Messpunktabstände können bei den meisten Systemen vorgegeben werden, so dass das Abtastmuster weitgehendst vom Nutzer explizit bestimmt werden kann.

Bei den flugzeuggetragenen Systemen ist die Ablenkung des Messstrahls meist nur in einer Richtung bzw. nur in voneinander abhängigen Richtungen möglich. Ein flächenhaftes Abtastmuster wird bei diesen Systemen durch die Überlagerung der Messstrahlablenkung und der Flugbewegung erreicht (siehe Abb. 2). Es kann von einem Nutzer daher einerseits direkt über die Abstrahleigenschaften bestimmt werden, enthält aber auch einen Anteil, der nur indirekt über die Flugbewegung beeinflusst werden kann, so dass das Abtastmuster insgesamt nicht so präzise vorgebar ist wie bei den terrestrischen Systemen. Während die terrestrischen Systeme überwiegend in statischem Zustand benutzt werden, der Sensor seine Position also während eines Messvorgangs nicht ändert, unterliegen die flugzeuggetragenen Systeme sehr schnellen Positions- und Orientierungswechseln. Da die Messpunktkoordinaten aber im Allgemeinen alle in einem Koordinatensystem angegeben werden sollen, ist bei den flugzeuggetragenen Systemen im Prinzip eine kontinuierliche Positions- und Orientierungsbestimmung des Sensors notwendig.

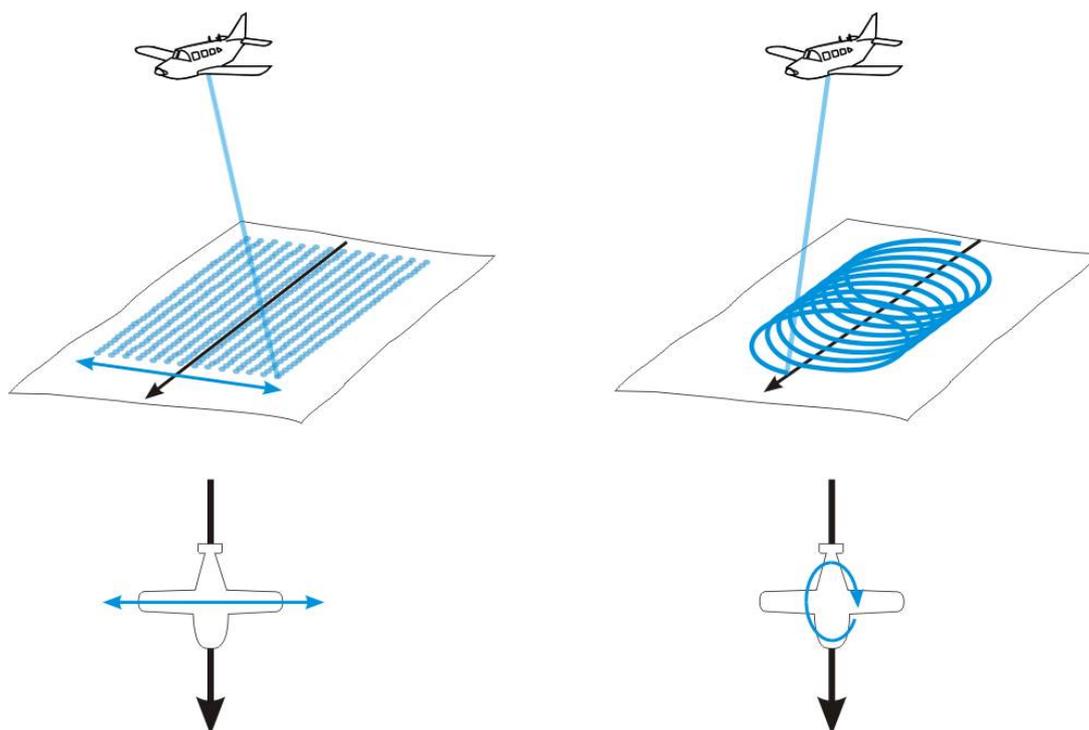


Abb. 2: Messstrahlablenkung (blaue Pfeile) bei flugzeuggetragenen Systemen in Bezug auf die Flugrichtung (schwarze Pfeile); links: Ablenkung orthogonal (z. B. TopoSys-Systeme), rechts: ellipsenförmige Ablenkung (z. B. ScaLars)

Aus diesem Grund sind Positionierungs- und Orientierungssysteme fester Bestandteil der flugzeuggetragenen Laserscanning-Systeme, im Allg. sind dies GPS und INS.

Bei den flugzeuggetragenen Systemen fällt eine erhebliche Datenmenge an, da im Prinzip drei Messsysteme zum Einsatz kommen (Entfernungsmessungs-, Positionierungs- und Orientierungssysteme). Da aus Gründen der Synchronisation die Datenspeicherung zeitkritisch ist, sind für dieses Messverfahren schnelle und große Datenspeicher wichtig. Dies lässt sich auch an der Entwicklung des flugzeuggetragenen Laserscannings sehen, da am Anfang noch keine flächenhafte Erfassung möglich war, sondern nur sog. Laser-Profilmessungen, also nur die Erfassung entlang einer Linie in Flugrichtung (vgl. [LINDENBERGER, 1993]). Es folgte dann die Entwicklung von Sensoren, die flächenhaft erfassen konnten (s. [BALTSAVIAS, 1999 b]), aber noch Kompromisse hinsichtlich der Punktdichte oder des erfassbaren Anteils des Messpunktreflexionssignals machen mussten. Eine der neuesten Entwicklungen ist ein Laserscanning-System, das sowohl flächenhaft mit dichten Messpunktabständen, als auch gleichzeitiger Aufzeichnung des gesamten Reflexionssignales arbeiten kann (s. [HUG ET AL., 2004]). Die Entwicklung der Laserscanning-Systeme verlief parallel mit der enormen Weiterentwicklung von Computerhardware, vor allem mit der Einführung großer und schneller Datenspeicher.

Im Folgenden werden weitere Grundprinzipien anhand flugzeuggetragener Systeme diskutiert, einige Prinzipien können aber wiederum auf beide Arten des Laserscannings verallgemeinert werden.

2.1.2 Entfernungsmessung

Das Kernstück der Laserscanning-Systeme ist der eigentliche Laserscanner. Seine Aufgabe besteht im wesentlichen aus der Ermittlung der Entfernung zwischen Messpunkt und System. Dabei wird Laserlicht

eingesetzt, da es in der Realisierung Licht mit einem ganz engen Frequenzspektrum darstellt (in der Theorie ist es sogar Licht mit einer ganz bestimmten Frequenz). Ein vom Laserscanner ausgesandtes und zurückgeworfenes Signal kann relativ leicht detektiert werden, da nur gezielt nach Signalen im bekannten Frequenzband gesucht werden muss. Laserlicht besitzt zudem im Vergleich zu elektromagnetischen Wellen anderer Lichtquellen eine hohe Leistungsdichte, d. h. es bewirkt hohe Strahlungsintensitäten auf beleuchteten Flächen, wodurch es im Empfangsteil eines Laserscanners ebenfalls besser detektiert werden kann als Signale anderer Lichtquellen.

Die operationellen Laserscanning-Systeme benutzen entweder die *Phasendifferenzmessung* oder das *Laufzeitmessverfahren* zur Ermittlung der Entfernung zwischen Sensor und Messpunkt. Laserscanner, die mit dem erstgenannten Verfahren arbeiten, enthalten Laserlichtquellen, die auch als *continuous wave (CW) laser* bezeichnet werden, da sie kontinuierlich Laserlicht abstrahlen. Dahingegen werden die Laserlichtquellen der anderen Systeme als *pulsed laser* bezeichnet, da sie kurze Laserlichtimpulse abstrahlen.

Das Messprinzip der Phasendifferenzmessung wird im Bereich des Laserscannings selten genutzt, es wird aber z. B. bei dem System ScaLars eingesetzt (s. z. B. [HUG, 1996], [WEHR & LOHR, 1999]). Dabei wird kontinuierlich Laserlicht im Infrarotbereich abgestrahlt, dieses sog. Trägersignal aber durch zwei Sinussignale mit unterschiedlicher Frequenz, den so genannten Messsignalen, in der Amplitude moduliert (vgl. Abb. 3). Dabei besitzt eines der Messsignale eine große Wellenlänge von ca. 300 m, das andere eine kleinere von ca. 50 m.

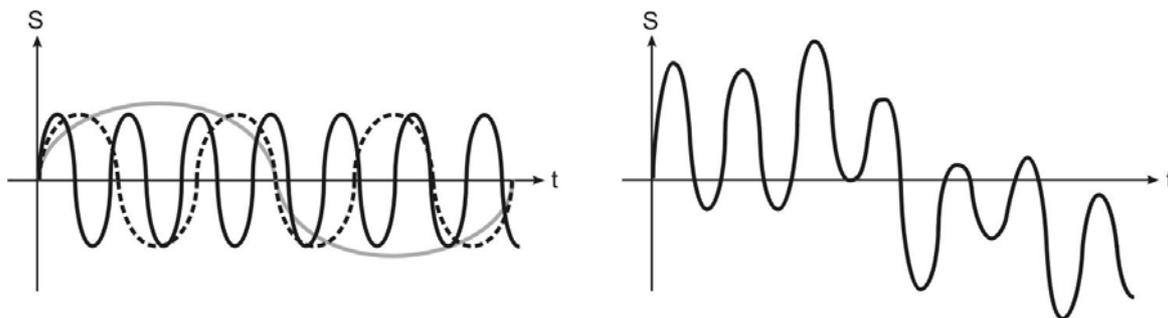


Abb. 3: Prinzipskizzen zum Amplitudenmodulationsverfahren; links: Trägersignal (schwarz), niederfrequentes (hellgrau) und höherfrequentes Messsignal (gestrichelt); rechts: durch Überlagerung des Trägersignals mit den Messsignalen resultierende Signal

Das an einem Objekt reflektierte (resultierende) Signal wird vom Sensor empfangen und mit demjenigen verglichen, das aktuell vom System erzeugt wird. Aus einem Vergleich der beiden Signale kann eine Phasenverschiebung ermittelt werden, die proportional zu dem vom Signal zurückgelegten Weg ist.

Durch die Veränderung des Trägersignals in der Amplitude können im Prinzip Phasenverschiebungen zwischen sechs Signalen bestimmt werden. Dies sind zum einen das reflektierte und momentan erzeugte Trägersignal sowie die jeweils aufmodulierten Messsignale. Die Auswertung des Trägersignals selbst ist zur Entfernungsbestimmung nicht sinnvoll, da die Wellenlänge extrem klein ist und eine Entfernungsbestimmung immer nur relativ zur Signalwellenlänge vorgenommen werden kann. Durch die Kombination mit den Messsignalen ist aber eine Entfernungsbestimmung möglich. Mit dem hochfrequenten Anteil ist die Verschiebung gegenüber dem Referenzsignal im Zentimeterbereich zu ermitteln, aber auch nur im Zentimeterbereich. Es ist nicht möglich, den gesamten zurückgelegten Weg zu bestimmen, da die Phasenverschiebung, wie schon erwähnt, immer nur ein relatives Verhältnis der Signale bezüglich einer ganzen Wellenlänge angibt. Deshalb ist ein niederfrequentes zweites Messsignal wichtig, da hierüber viel größere Entfernungen bestimmt werden können, wenn auch mit geringerer Distanzauflösung, was aber durch die Kombination mit dem höherfrequenten Anteil geheilt wird (vgl. [HUG, 1996]).

Diesem Messverfahren gegenüber steht die *direkte* Messung der Signallaufzeit (*Laufzeitmessung*), die bei pulsartig abstrahlenden Laserscanningsystemen zum Einsatz kommt. Dabei wird im Prinzip bei der Abstrahlung eines Laserpulssignals eine Zeitmessung gestartet, die beim Empfang des zurückgestrahlten Signals beendet wird. Die Entfernung d von Sensor und Messpunkt ist dann proportional zur Hälfte des insgesamt zurückgelegten Weges s und lässt sich mithilfe der Lichtgeschwindigkeit c bestimmen:

$$c = \frac{s}{dt} \Rightarrow d = c * \frac{dt}{2} \quad (1)$$

wobei mit dt die gemessene Zeitdifferenz bezeichnet ist.

Die bei diesem Verfahren maximal erreichbare Entfernungsauflösung hängt wesentlich von der Genauigkeit der Zeitmessung ab. Sie wird aber auch durch die Qualität der Empfangseinheit im System beeinflusst, da ein wesentlicher Punkt die Erkennung des Reflexionssignals im Spektrum des natürlichen Hintergrundrauschens darstellt, was dann die Beendigung der Zeitmessung auslöst.

2.1.3 Positions- und Orientierungsbestimmung

Die Möglichkeit zur Bestimmung der Sensor-Position und -Orientierung zum Zeitpunkt der Entfernungsmessung vom Messsystem zum Messpunkt ist eine wesentliche Voraussetzung für die Einsetzbarkeit des Laserscanning-Verfahrens. Dabei besteht die Schwierigkeit, dass sich, durch den Einsatz eines aktiv scannenden Systems in einem Flugzeug, die Sensor-Position und -Orientierung zwischen zwei Einzelmessungen im Prinzip unterscheiden und für jede Einzelmessung separat bestimmt werden müssten. Durch die hohen Scanraten moderner Laserscanning-Systeme können aber gewisse Vereinfachungen vorgenommen werden, es reicht z. B. bei zeilenweise scannenden Systemen im Allgemeinen die Bestimmung einer Sensor-Position und -Orientierung für die Messung einer Scanzeile aus um Punktgenauigkeiten zu erreichen, die für die meisten Anwendungen akzeptabel sind.

Für die Bestimmung der Position und Orientierung müssen weitere Sensoren eingesetzt werden, direkt aus den Messdaten lassen sie sich nicht bestimmen. Das meist verwendete Prinzip zur *direkten* Bestimmung der Äußeren Orientierungsparameter, auch als *direkte Georeferenzierung* bezeichnet, ist die Nutzung einer Kombination von GPS- und INS-Sensoren (s. z. B. [CRAMER, 2001]). Mit den GPS-Sensoren lässt sich die Position des Laserscanning-Systems bestimmen, mit den INS-Sensoren seine Position und zusätzlich seine Orientierung.

INS-Systeme basieren im Allgemeinen auf Beschleunigungsmessern und Kreiselssystemen (vgl. z. B. [Salychev, 2004]). Sie enthalten mehrere dieser Komponenten, und zwar jeweils einen Beschleunigungsmesser und ein Kreiselssystem pro Raumachse bezüglich der die Orientierung und Position bestimmt werden sollen. Die alleinige Nutzung von INS-Systemen ist beim Laserscanning nicht möglich, auch wenn sie scheinbar alle nötigen Parameter der äußeren Orientierung liefern. Dies liegt zum einen daran, dass mit diesen Systemen nur eine relative Positionierung – durch Aufintegration der Beschleunigungen – und Orientierung bestimmt werden können, also die Anfangs- oder Initial-Position und -Orientierung bekannt sein müssen und nicht mit den INS-Systemen bestimmt werden können. Zum anderen unterliegen INS-Systeme großen zeitabhängigen Fehlereinflüssen, so genannten *Driften*. Auch bei sehr hochwertigen Systemen betragen diese bereits bis zu 2 cm für eine Positionsbestimmung und $0,3 \cdot 10^{-3}^\circ$ für eine Neigungsbestimmung *pro Sekunde*.

Zur Positionsbestimmung eignet sich das GPS-Verfahren besonders gut, da es zum einen nahezu weltweit rund um die Uhr verfügbar ist und zum anderen eine direkte absolute Positionsbestimmung möglich macht. Es basiert auf der Positionsbestimmung bezüglich speziellen Navigationsatelliten, die kontinuierlich Signale abstrahlen, wobei diese Signale jeweils für einen Satelliten typisch und eindeutig zuordenbar sind. Aus der

Analyse der Phase des Trägersignals und bzw. oder der Analyse aufmodulierter weiterer Signale kann die Entfernung zu einem Satelliten bestimmt werden. Durch Bestimmung der Entfernungen zu mehreren Satelliten kann daraus die Position des GPS-Empfängers ermittelt werden (weitere Details siehe z. B. [Hofmann-Wellenhof et al., 2001]). In der Anwendung als Positionierungskomponente eines Laserscanning-Systems ist aber die relative Positionierung bezüglich eines auf einem Referenzpunkt installierten GPS-Empfängers, so genanntes *differenzielles GPS (DGPS)*, vorteilhaft, da hiermit höhere Genauigkeiten, bis in den Zentimeterbereich, erreicht werden können.

Die Integration von GPS- und INS-Sensoren in einem Positionierungs- und Orientierungssystem bietet den Vorteil, dass die jeweiligen Systemnachteile im hybriden Ansatz durch das jeweils andere System ausgeglichen werden können. Problematisch beim Laserscanning ist z. B. die bezogen auf die Flugbewegung relativ geringe Messrate von GPS-Sensoren im Bereich von 1-10 Hz, wohingegen INS-Sensoren mit einer Messrate von 100-200 Hz arbeiten können. Die GPS-Messungen können wiederum zur Verbesserung der INS-Fehler benutzt werden, da sie in regelmäßigen Abständen die Absolutposition liefern und somit ein neuer Initialisierungsschritt für die Navigationslösung der INS-Sensoren gegeben ist. Die Kombination der beiden Systeme wird rechentechnisch z. B. durch *Kalmanfilter* realisiert (Details s. z. B. [KUSCHE, 1994]). Bei diesem Verfahren wird die Position des Sensors mithilfe der INS-Daten bestimmt, gleichzeitig aber aus den zurückliegenden Messungen eine Verbesserung dieser Daten geschätzt und bei der Positionierung berücksichtigt. Die mit dem GPS bestimmten Positionen dienen dabei als Referenzpunkte. Aus den Messungen des INS wird jeweils eine Prädiktion der GPS-Position bestimmt und aus dem Vergleich mit der wahren Position Korrekturterme für die INS-Messungen ermittelt.

Sowohl die GPS- als auch die INS-Messungen werden nicht zu bestimmten Zeitpunkten separat ausgelöst, die Systeme nehmen sie vielmehr in regelmäßigen Zeitabständen vor. Ähnlich verhält es sich bei den Laserscanning-Systemen mit der Komponente zur Entfernungsmessung, die ebenso mit bestimmten Messraten arbeitet. Es liegen deshalb im Allgemeinen zu unterschiedlichen Zeitpunkten Messungen der drei Komponenten vor (vgl. hierzu Abb. 4).

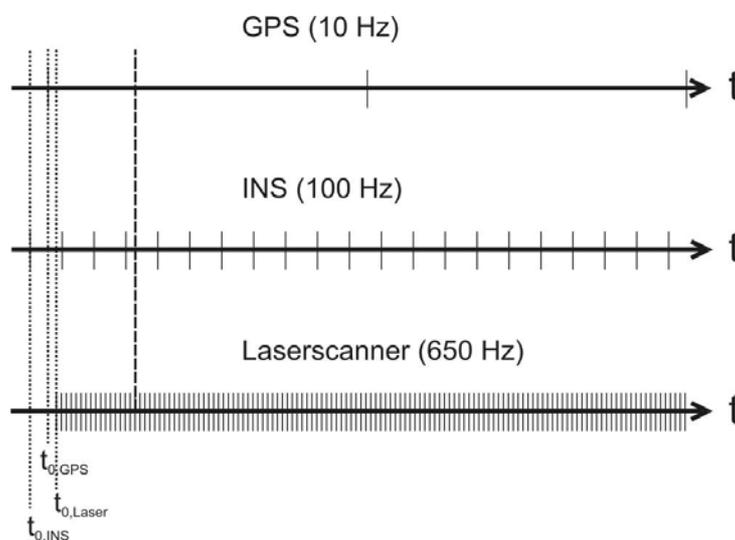


Abb. 4: Messraten verschiedener Systeme; die Striche symbolisieren Messungen zu bestimmten Zeitpunkten auf der Zeitachse

Da aber exakt zum Zeitpunkt der Entfernungsmessung die Position und Orientierung bekannt sein müssen, werden sie aus Interpolation der regelmäßig bestimmten Messungen berechnet (angedeutet durch die gestrichelte Linie in Abb. 4, die den Zeitpunkt einer Zeilenmessung des Laserscanningssystems repräsentiert). Dazu ist aber auch eine Synchronisierung der Systeme notwendig, d. h. es müssen die Abweichungen der

jeweiligen sensorinternen Zeitsysteme zueinander bekannt sein; in der Abb. 4 ist dies durch die verschiedenen Nullzeitpunkte der Systeme angedeutet. In der Praxis wird dies z. B. dadurch erreicht, dass bei der Auslösung einer Laserscannermessung die jeweiligen sensorinternen Zeiten der Positionierungs- und Orientierungssysteme mit aufgezeichnet werden.

2.1.4 Messpunkterfassung

Das Prinzip des Laserscannings lässt sich nur vereinfacht als Punktmessung darstellen. Auf dem Weg vom Sensor zur Erd- bzw. Objektoberfläche wird das Lasersignal durch Streuung „aufgeweitet“, d. h. je größer die Entfernung des Sensors von der Reflexionsfläche ist, desto mehr Fläche beleuchtet das am Reflexionsobjekt auftreffende Lasersignal. Dadurch ergeben sich eine Reihe von Effekten, die zum einen die Entfernungsmessung ungenauer werden lassen, zum anderen aber auch die Möglichkeit zur Erfassung weiterer Informationen bieten, zusätzlich zur reinen Entfernungsermittlung.

2.1.4.1 Footprint

Mit dem Begriff *Footprint* wird die vom Messsignal beleuchtete Fläche am Messobjekt bezeichnet. Ihre Größe ist im Wesentlichen abhängig von der Entfernung des Objekts vom Messsystem sowie dessen Oberflächenneigung bezüglich der Strahlmittelachse. Die entfernungsabhängige Aufweitung des Footprints entsteht durch die Streuung des Laserlichts an der Atmosphäre und lässt sich, in Abhängigkeit von der ausgestrahlten Wellenlänge, als Strahldivergenzwinkel γ ausdrücken.

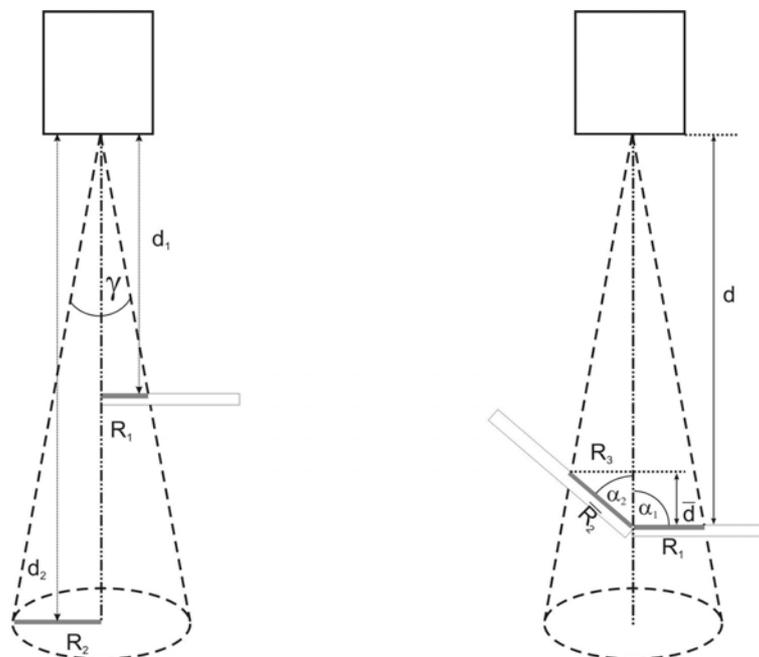


Abb. 5: Footprint-Größen in Abhängigkeit von Sensorentfernung (links) und Oberflächenneigung (rechts)

Da im Allgemeinen keine bevorzugte Streuungsrichtung besteht, ergibt sich auf einer gegenüber dem Messstrahl lot im Winkel von 90° geneigten planen Fläche ein kreisförmiger Leuchtfleck. Für den Radius R dieses Footprints gilt in guter Näherung (vgl. [BALTSAVIAS, 1999 a]):

$$R = d * \tan \frac{\gamma}{2} \cong d * \frac{\gamma}{2} \quad (2)$$

Wobei mit d die Entfernung zwischen Sensor und reflektierender Fläche bezeichnet ist. Da γ sehr klein ist, kann obige Vereinfachung vorgenommen werden. Auf der linken Seite der Abb. 5 ist der entfernungsabhängige Aufweitungseffekt skizziert.

Die Größe des Footprints ist aber nicht nur von der Entfernung zum Sensor abhängig, sondern auch von der Oberflächenorientierung des reflektierenden Objekts gegenüber dem Messstrahl. Das Messsignal resultiert durch die Streuung in einen Messkegel, weshalb sich die Form eines Footprints durch einen Kegelschnitt ergibt. Ist die beleuchtete Fläche gegenüber der Kegellachse gekippt, dann ergibt sich ein ellipsenförmiger Footprint, dessen Fläche gegenüber einem kreisförmigen Schnitt deutlich größer ist. Auf der rechten Seite der Abb. 5 ist dies skizziert. Für die dort dargestellte Situation gilt:

$$\tan \frac{\gamma}{2} = \frac{R_3}{d - \bar{d}} \quad (3)$$

$$\sin \alpha_2 = \frac{R_3}{R_2} \Rightarrow R_3 = \bar{R}_2 \sin \alpha_2 \quad (4)$$

$$\cos \alpha_2 = \frac{\bar{d}}{R_2} \Rightarrow \bar{d} = \bar{R}_2 \cos \alpha_2 \quad (5)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen (4) und (5) in Gleichung (3) ergibt sich nach Umformung:

$$\bar{R}_2 = \frac{d \tan \frac{\gamma}{2}}{\cos \alpha_2 \tan \frac{\gamma}{2} + \sin \alpha_2} \quad (6)$$

Für $\alpha_2 = 90^\circ (= \alpha_1)$ ergibt sich Gleichung (2). Falls α_2 gegen 0 geht, geht der Kosinus des Winkels gegen 1 und der Sinus gegen 0. Dadurch wird der Nenner der Gleichung (6) kleiner, \bar{R}_2 also größer. Das bedeutet, dass mit zunehmender Inkliniation der illuminierten Fläche gegenüber der Achse des Messstrahlkegels die beleuchtete Fläche zunimmt, da sich die große Halbachse der Ellipse (\bar{R}_2) verlängert.

Durch die nicht punktförmige Beleuchtung des Messobjekts treten eine Reihe von Effekten auf das resultierende Reflexionssignal auf, die sowohl positiver als auch negativer Natur sein können. In Abb. 6 ist auf der linken Seite ein eher positiver Effekt zu sehen. Der Messstrahlkegel ist dort hellgrau unterlegt. Er beleuchtet einen Bereich, in dem sich verschiedene Objekte befinden, in diesem Fall ein Haus und ein Baum. Befinden sich innerhalb dieses Bereiches nun Objektteile mit signifikanten Reflexionen in unterschiedlichen Höhen, so treffen am Sensor mehrere Signalantworten oder *Echos* ein. Die meisten Laserscanning-Systeme sind in der Lage, zwischen dem ersten Echo – *First Echo (FE)* oder auch *First Pulse* – und letzten Echo – *Last Echo (LE)* oder auch *Last Pulse* – zu unterscheiden und diese aufzuzeichnen. Dadurch kann z. B. eine Messung von durch nicht zu dichte Vegetation verdeckte Objekte erfolgen, wie z. B. die Bestimmung der Geländehöhe oder Dachhöhen unter Bäumen. In der Abbildung ist dies durch die symbolische Darstellung einiger Messstrahlanteile skizziert. Die durchgezogenen Linien symbolisieren Reflexionen am Blätterdach, die gestrichelten Linien Reflexionen am Boden und die gepunkteten Linien Reflexionen an einem durch den Baum verdeckten Dach. Die Detektion verschiedener Reflexionen setzt aber einen gewissen Mindest-

Höhenunterschied zwischen den Objekt(teilen) voraus, da sonst durch Überlagerung der eingehenden Signale keine Differenzierung der Echos vorgenommen werden kann (vgl. [KATZENBEISSER, 2003]). Vor allem bei Laubbäumen ist die Unterscheidung von First und Last Echo aber sehr oft möglich, weshalb einerseits die First-/Last-Echo Differenz als Hinweis zur Detektion von Laubbäumen einsetzbar ist. Zum anderen kann aber auch aus der Höhendifferenz eine Abschätzung der Biomasse für forstwirtschaftliche Anwendungen vorgenommen werden kann.

Ein eher nachteiliger Effekt der Footprint-Ausweitung ist auf der rechten Seite der Abb. 6 dargestellt. Am Sensor eingehende Echos können von ganz unterschiedlichen Objekt(teil)en innerhalb des Messkegels stammen und somit auch von unterschiedlichen Orten innerhalb des Kegels. Der Sensor kann aber nicht den Ursprungsort einer Reflexion innerhalb des Messkegels bestimmen, womit dies bei der Auswertung der Messdaten nicht berücksichtigt werden kann. Eine Entfernungsmessung wird so in Messpunktskoordinaten umgerechnet, als ob sich der Ursprung der Reflexion in der gemessenen Entfernung vom Sensor auf der Kegelachse befinden würde (in der Abbildung mit einem grauen Kreuz gekennzeichnet). Falls sich der „wahre“ Ort der Reflexion (grauer Strich) aber eher am Rand des Messkegels befindet, dann kann es zu signifikanten Lage- (dx, dy) und Höhenfehlern (dz_1) der berechneten Messpunktskoordinaten gegenüber dem „wahren“ Ort kommen. Außerdem kann die „wahre“ Höhe der Objekt(teil)e an der *berechneten* Position ganz wesentlich von der (falsch) berechneten Höhe abweichen. Da man sich bei der Laserscannermessung meist auf die Auswertung der First- und Last-Echos beschränkt und nicht mehrere Echos aufzeichnet, kann sich an der ermittelten Position ein Objektteil befinden, dessen Reflexion nicht registriert wird, da sie weder das First- noch Last-Echo darstellt. Es wird diesem Objekt dann die zum First- oder Last-Echo rechnerisch zugehörige Höhe zugewiesen, und es liegt damit im Prinzip ein Höhenfehler (dz_2) an dieser Stelle vor.

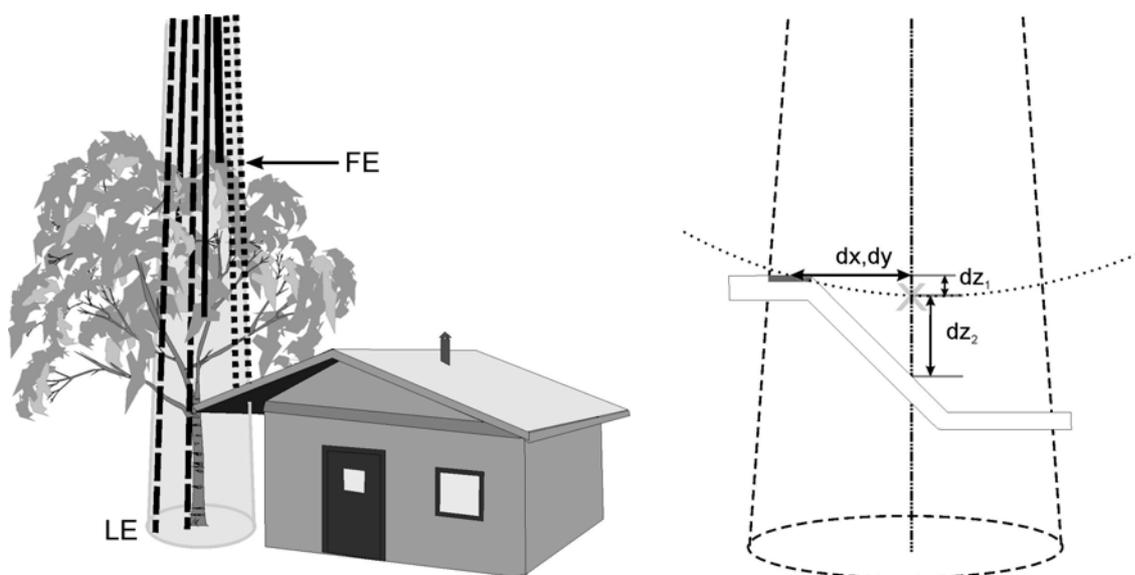


Abb. 6: Mehrfachreflexionen und Referenzproblematik innerhalb eines Footprints

2.1.4.2 Scanmuster

Mit dem Begriff *Scanmuster* wird das vom Sensor erzeugte Abtastmuster bezeichnet. Es entsteht aus der Überlagerung der Abstrahlgeometrie und der Flugbewegung. Abhängig von der Scanfrequenz des Sensors, der Aussendeoptik und den Flugparametern verteilen sich die vom Sensor ausgestrahlten Messkegel auf den abgetasteten Oberflächen, wovon die räumliche Auflösung des Laserscannings wesentlich abhängt. In der Abb. 7 sind in schematischer Darstellung die Scanmuster verschiedener Laserscanningsysteme exemplarisch wiedergegeben.

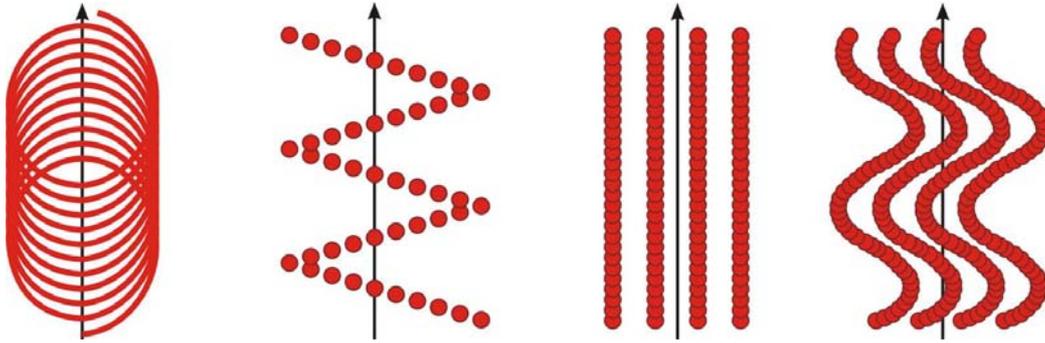


Abb. 7: Schematische Darstellungen von Scanmustern verschiedener Laserscanningsysteme; von links nach rechts: ellipsenförmiges Abtastmuster (ScaLars), „Zickzack“-Muster (Optech ALTM), linienförmiges Muster (TopoSys I), sinusförmige Linienmuster (TopoSys II); die Pfeile geben die jeweilige Flugrichtung an

An dieser Stelle soll nicht auf die Sensormechanismen eingegangen werden, die zu den jeweiligen Scanmustern führen. Informationen darüber findet man z. B. in WEHR & LOHR (1999), BALTSAVIAS (1999 a) oder KATZENBEISSER & KURZ (2004). Vielmehr sollen die Beispiele zeigen, dass durch unterschiedliche Laserscanningsysteme unterschiedliche Bereiche schwächer oder stärker durch Messungen abgedeckt werden. Z. B. besteht das Scanmuster von ScaLars aus einer Überlagerung von in Flugrichtung verzerrten Ellipsen, wodurch die Randbereiche des gescannten Streifens mehrfach abgetastet werden. In der Mitte des Scanstreifens ist die Punktdichte aber wesentlich niedriger. Dahingegen haben die Messpunkte im Randbereich des Scanstreifens bei Benutzung des ALTM von Optech in der Tendenz sehr viel größere Punktabstände als in der Mitte des Streifens. Die effektive Auflösung der Laserscanningmessungen variiert bei diesen Systemen also quer zur Flugrichtung; während sie bei ScaLars zum Rand des Scanstreifens hin ansteigt, fällt sie in der Tendenz bei dem ALTM von Optech zum Rand hin ab. Die Scannersysteme der Firma TopoSys lassen sich dahingegen dadurch charakterisieren, dass die Messpunktdichte quer zur Flugrichtung, im Unterschied zu den beiden erstgenannten Systemen, kaum variiert. Sie ist aber in Flugrichtung stark unterschiedlich als quer dazu. In Flugrichtung sind die Messpunktabstände sehr viel geringer (vgl. Abb. 7 und Kapitel 2.2).

Das Abtastmuster wird durch die Sensoreigenschaften relativ bestimmt, d. h. die Messpunktabstandsunterschiede innerhalb des Scanstreifens werden dadurch bestimmt. Die Abtastmuster werden aber durch die Flugbewegung skaliert, und zwar durch die Fluggeschwindigkeit in Flugrichtung und durch die Flughöhe quer dazu. Die Flughöhe bestimmt, abhängig vom jeweiligen Sensoröffnungswinkel, ebenfalls die *Breite des Scanstreifens* (SW) – auch als *Schwadbreite* bezeichnet – und es gilt folgender Zusammenhang (vgl. [BALTSAVIAS, 1999 a]):

$$SW = 2h \tan \frac{\Theta}{2} \quad (7)$$

wobei h die Flughöhe und Θ der Öffnungswinkel des Systems ist.

Da bei größeren Flughöhen breitere Scanstreifen entstehen, stellt das Abtastmuster immer auch einen Kompromiss zwischen der benötigten Flugzeit zur Vermessung eines Gebiets, der resultierenden Auflösung der Abtastung bezüglich der Lagekoordinatenebene und der Akzeptanz von Abschattungsbereichen dar. Abschattungsbereiche entstehen vor allem durch schräges Auftreffen der Messstrahlen, d. h. sie sind in aller Regel an den Rändern der Scanstreifen zu finden. Die meisten Laserscanningsysteme haben zwar variabel einstellbare Öffnungswinkel ihrer optischen Systeme, trotzdem werden in aller Regel sehr kleine Öffnungswinkel gewählt um die Abschattungseffekte so gering wie möglich zu halten, also nur Quasi-Nadir-Ausstrahlwinkel der einzelnen Messstrahlen zu erreichen.

2.1.5 Aufbereitung der Messdaten

Beim Laserscanning werden verschiedene Informationen erfasst, die zur Bestimmung von 3D-Koordinaten der Messpunkte benutzt werden. Da sich die direkt aus den Messdaten berechenbare Koordinaten auf bezüglich der Erde definierte Koordinatensysteme beziehen, kann bei der Umrechnung der relativen (vgl. Anfang des Kapitels 2.1) in absolute Koordinaten von einer *Georeferenzierung* gesprochen werden. Meist werden die gewonnenen Daten aber nicht in Punktkoordinaten-Form genutzt, d. h. nicht die mehr oder weniger regelmäßig verteilten Einzelpunkte (dies wird als *Punktwolke* bezeichnet), sondern vielmehr *Digitale Höhenmodelle* daraus bestimmt. Dies wird im Folgenden beschrieben.

2.1.5.1 Georeferenzierung der Messpunkte

Aus den Messungen der Laserscanningsysteme können 3D-Koordinaten der Messpunkte ermittelt werden. Dazu wird zuerst eine relative Koordinierung der Messpunkte bezüglich der Sensorposition vorgenommen, wie sie bereits zu Beginn des Kapitels 2.1 erwähnt wurde. Die relativen Koordinaten sind im Prinzip Koordinatenunterschiede zur Sensorposition und können deshalb zur Berechnung von Absolutkoordinaten benutzt werden, indem sie zur Position des Sensors hinzugerechnet werden, die über die in Kapitel 2.1.3 beschriebenen Verfahren bestimmt wird. Damit sind die Messpunkte im bei dem GPS-Verfahren benutzten Koordinatensystem (WGS 84) bestimmt, da sich die äußere Orientierung, also die Sensor-Position und -Orientierung, auf dieses beziehen.

Die Abkürzung WGS 84 steht für *World Geodetic System – 1984* und bezeichnet ein vom *United States Department of Defense* der USA definiertes erdfestes Referenzsystem. Es besteht zum einen aus einem geozentrischen Koordinatensystem, also einem Koordinatensystem dessen Ursprung im Massenmittelpunkt der Erde liegt. Die Z-Achse des Systems weist in nördliche Richtung, entlang der genäherten mittleren Erdrotationsachse. Seine X-Achse zeigt in Richtung des Schnittpunkts des Meridians von Greenwich mit der auf die Z-Achse bezogenen Äquatorebene, die Y-Achse steht senkrecht auf den beiden Achsen und komplettiert das Koordinatensystem zu einem Rechtssystem. WGS 84 enthält zum anderen aber auch die Parameter eines Referenzellipsoids inklusive Korrekturparameter für das Erdgravitationsfeld, also ein *Geoid* (weitere Details siehe z. B. [EUROCONTROL & IfEN, 1998]). Damit lassen sich in diesem System außer *kartesischen* (X,Y,Z) auch *geographische Koordinaten*, also *Länge*, *Breite* und *Höhe über dem Geoid* angeben.

Aus Gründen der praktischen Nutzung der gemessenen Laserscanningdaten, z. B. zu Planungszwecken, ist üblicherweise die Koordinierung bezüglich eines lokalen Koordinatensystems, meist bezüglich eines Landeskoordinatensystems, vorteilhaft. Aus diesem Grund werden die im WGS 84-System ermittelten Koordinaten z. B. in *Gauß-Krüger-Koordinaten* umgerechnet.

Werden Gebiete in mehreren Streifen befliegen, dann ist ein Streifenabgleich sinnvoll. Bei einer Befliegung wird in aller Regel so geflogen, dass sich die Scanstreifen im Randbereich überlappen. Aufgrund von möglichen Fehlern in der Positionierung bzw. Orientierungsermittlung kann es in den Randbereichen zu einer Abweichung zweier Scanstreifen in der Höhenkomponente und auch zu Lageabweichungen kommen. Diese Abweichungen lassen sich aber nicht durch einen direkten Vergleich der Messpunkte erkennen, da im Allg. keine Punktidentitäten in den Streifenrändern bestehen. Eine mögliche Lösung des Problems findet sich z. B. in MAAS (2001). Dort wird zum einen vorgeschlagen, die Messpunkte eines Streifens mit interpolierten Punkten an denselben Positionen im anderen Streifen zu vergleichen. Dazu wird der zweite Streifen trianguliert und der Höhenwert des interpolierten Punktes über die Höhe des entsprechenden Dreiecks an dieser Position bestimmt. Dieses Verfahren ist aber nur dort sinnvoll anwendbar, wo eine signifikante Höhentextur, also Variationen in den gemessenen Höhen, vorliegt. Deshalb schlägt MAAS (2001) die Einbeziehung der Intensitätswerte von Reflexionsantworten vor, sofern sie beim Laserscanning miterfasst wurden. Diese Werte sind nahezu höhenunabhängig, sie hängen vielmehr im Wesentlichen von der Art des

getroffenen Materials und seinen Reflexionseigenschaften ab. Damit sind sie grundsätzlich anderer Natur als die gemessenen Höhenwerte und können in Bereichen variieren, in denen die Höhenwerte nahezu homogen sind. Zum Beispiel entlang von Straßen, bei denen sich der Straßenbelag und Fahrbahnmarkierungen deutlich im Reflexionsverhalten, aber nicht in der Höhe unterscheiden. Der eigentliche Streifenabgleich kann dann z. B. durch eine *Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate* geschehen, bei Verwendung der Intensitätswerte getrennt nach Lage (über die Intensitätswerte) und Höhe (über die gemessenen Laserscanning-Höhen). Einen Vergleich dieser Methode mit anderen Arbeiten findet man in MAAS (2003), weitere Arbeiten zum Streifenabgleich z. B. in TORLEGÅRD & NELSON (2001).

2.1.5.2 Digitale Höhenmodelle

Durch die Homogenisierung der Scanstreifen entsteht aus den einzelnen Scanstreifen ein zusammenhängendes Gebiet. Dieses besteht aus Einzelpunkten mit sehr unterschiedlicher räumlicher Dichte, an den Randbereichen ist sie durch die Streifenüberlappung sehr hoch. Zur Weiterverarbeitung der Daten ist aber oft eine andere Datenrepräsentation vorteilhaft, nicht zuletzt deshalb, da durch die Bereiche mit sehr hoher Datenredundanz die Datenmenge insgesamt sehr groß sein kann. Eine Methode zur Datenreduktion in dicht besetzten Gebieten und Informationserhöhung in dünn besetzten Bereichen stellt die Interpolation auf ein regelmäßiges Gitter, also eine Rasterung dar. Dies wird sehr oft gemacht, auch deshalb, weil dadurch Datensätze entstehen, die sich leicht visualisieren lassen, z. B. als grauwertcodiertes Höhenbild.

Sobald für die gemessenen Laserscanning-Punkte durch eine Rasterung oder eine andere Art der Verma- schung, z. B. durch Triangulation, topologische Beziehungen geschaffen worden sind, bezeichnet man die Höhendatensätze als *Digitale Höhenmodelle (DHM)*. Die Lage der einzelnen berechneten Punkte tritt dabei in den Hintergrund, da sie z. B. in den Rasterdaten implizit enthalten ist. Dadurch wird die Höhen- information in den Datensätzen betont, die damit der in der DIN 18709-1 : 1995-10 (Nr. 11.3.5.1, [DIN, 1998]) festgelegten Definition von Digitalen Höhenmodellen entsprechen:

„Menge der digital gespeicherten Höhen ... von regelmäßig oder unregelmäßig verteilten Geländepunkten, die die Höhenstruktur eines Objektes, z. B. des Geländes hinreichend repräsentieren.“



Abb. 8: Schematische Darstellung zur DOM-Erzeugung; oben: Originalszene mit Laserscanning-Messpunkten (Kreise); unten: DOM (schwarz umrandet) aus Interpolation der Höhenwerte auf überlagertem regelmäßigem Gitter

Im Bereich des Laserscannings wird überwiegend ein speziellerer Begriff verwendet. Aus den zu einem DHM aufbereiteten Messungen entstehen direkt *Digitale Oberflächenmodelle (DOM)*. Solche DHMs enthalten *Höhenwerte von Punkten auf den Oberflächen von Objekten*, im Fall des Laserscannings sind diese Objekte u. a. Gelände, Vegetation und Gebäudedächer (vgl. Abb. 8).

Eine weitere spezielle Art von DHMs – und eine Spezialisierung von DOMs – sind *Digitale Geländemodelle (DGM)*. Sie enthalten *nur die Höhenwerte von Geländepunkten*, d. h. sie repräsentieren direkt die Erdoberfläche. Zur Extraktion von DGMs verwendet man üblicherweise Datensätze die im Last-Echo-Modus erfasst wurden, da hierin im Allg. sehr viel mehr Geländemessungen enthalten sind als in den First-Echo-Datensätzen. In bebauten Gebieten enthalten sie aber immer mindestens auch Gebäude, so dass zur Bestimmung eines DGMs zunächst eine Filterung des DOMs vorgenommen werden muss. In der Literatur finden sich ganz verschiedene Ansätze dazu (z. B. [WEIDNER & FÖRSTNER, 1995], [KRAUS & PFEIFER, 1997], [VOSSelman, 2000] und [SCHIEWE, 2001]). Für diese Arbeit wurde das *Verfahren der konvex-konkaven Hülle* von VON HANSEN UND VÖGTLE (1999) verwendet.

Bei dem Verfahren der konvex-konkaven Hülle wird zunächst eine konvexe Hülle an die tiefsten Punkte des Höhendatensatzes angepasst (vgl. Abb. 9, linker Teil; in der Darstellung ist zur besseren Verständlichkeit nur ein Profil gezeigt). Dabei beginnt das Verfahren am globalen Minimum des Höhendatensatzes (Kreuz), und verbindet von dort ausgehend diesen Punkt mit anderen Punkten durch Dreiecke (in der Abbildung Linien), wobei aber kein anderer Punkt unterhalb eines solchen Dreiecks zu liegen kommen darf. Die dabei entstehende Form wird als *konvexe Hülle* bezeichnet, da sie, bezogen auf die Aufnahme-richtung, den Datensatz konvex einhüllt.

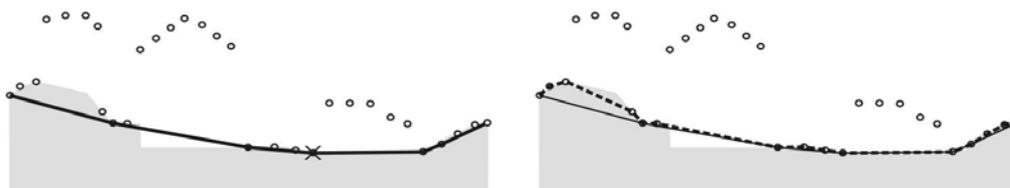


Abb. 9: Prinzipskizzen zum Verfahren der konvex-konkaven Hülle, gleiche Szene wie in Abb. 8; links: Anpassen einer konvexen Hülle (Linien) an den Datensatz; rechts: Verdichtung der konvexen Hülle durch konkave Teilstücke (gestrichelte Linien)

Ist das Verfahren an den Rändern des Datensatzes angelangt, dann beginnt ein Prozess der Verfeinerung der entstandenen Teildreiecke durch konkave Formen. Hierzu wird ein Schwellwert benutzt, der die zulässige Höhe eines Punktes über dem Dreieck vorgibt. Weicht die Höhe eines Punktes um nicht mehr als diesen Schwellwert von der Höhe des jeweiligen Teildreiecks an derselben Stelle ab, so wird dieses Dreieck aufgelöst und unter Einbeziehung des Punktes weitere Teildreiecke eingeführt (vgl. Abb. 9, gestrichelte Linien im rechten Bildteil). Das Verfahren wird solange fortgeführt, bis keine weiteren Teildreiecke mehr gebildet werden können. In der Abb. 10 ist das Ergebnis der Geländeextraktion, das DGM, für die in Abb. 8 und Abb. 9 gezeigte Szene schraffiert dargestellt.

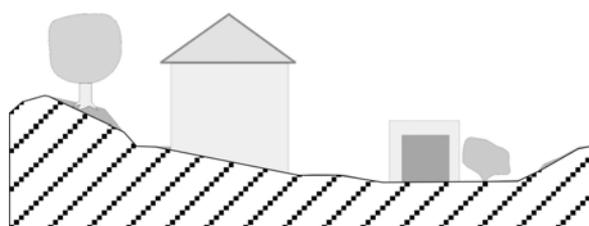


Abb. 10: Ergebnis der Geländeextraktion: DGM (schraffiert dargestellt)

In dieser Arbeit werden DGMs als Zwischenstufe zur Gewinnung von $nDOMs$ benutzt. Mit dieser Abkürzung werden *normalisierte Digitale Oberflächenmodelle* bezeichnet. Sie entstehen durch Subtraktion eines DGMs von einem DOM:

$$nDOM(x, y) = DOM(x, y) - DGM(x, y) \quad (8)$$

Die Gewinnung eines $nDOMs$ ist aus Rasterdaten sehr einfach, da zu jedem Höhenwert eines DOMs auch an entsprechender Position im DGM ein Höhenwert existiert. Werden die Daten aber durch ein TIN (= Triangulated Irregular Network) vermascht, dann ist diese Korrespondenz an vielen Stellen nicht von vornherein gegeben. Das DGM enthält *nur* die Geländepunkte des DOMs, es gibt also nur an wenigen Stellen sowohl Punkte im DOM und DGM. In diesem Fall kann das Verfahren zur $nDOM$ -Gewinnung zusätzlich z. B. eine Interpolation des Höhenwertes im DGM an entsprechenden Positionen von DOM-Punkten enthalten. In der Abb. 11 sind die schematischen Darstellungen eines DOMs, DGMs und $nDOMs$ abgebildet. Auf der linken Seite der Abbildung ist die Überlagerung des DOMs (kariert) und des DGMs (schraffiert) zu sehen, rechts daneben das $nDOM$ (schwarze Linie) und die Objekte, deren Höhen in diesem Fall im $nDOM$ repräsentiert werden. Im Allg. enthält ein $nDOM$ die Höhen aller Objekte über der Erdoberfläche, die Höhe eines Gebäudes über dem Gelände kann z. B. direkt abgelesen werden. Bei sehr stark bewegtem Gelände können diese Höhen aber durch Abzug interpolierter Geländehöhen vom DOM, z. B. unter Gebäuden, auf verschiedenen Seiten von Objekten unterschiedlich sein, auch wenn das Objekt gleichmäßige Absoluthöhen aufweist, wie dies auch im Beispiel der Fall wäre. Deshalb sollte bei einer Objektmodellierung nicht alleine auf ein $nDOM$ zurückgegriffen werden, sondern das ursprüngliche DOM mit einbezogen werden.

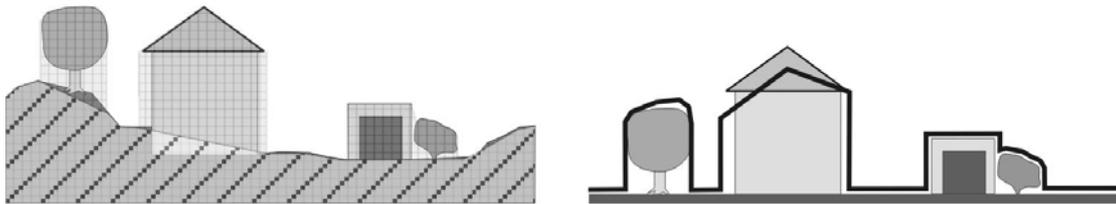


Abb. 11: Schematische Darstellung der Überlagerung eines DOM und DGMs (links) und daraus berechnetes $nDOM$ (rechts)

2.2 TopoSys-Sensoren

In dieser Arbeit wurden Datensätze verwendet, die mit *TopoSys I* oder *TopoSys II* erfasst wurden. Diese Sensoren sind eine Eigenentwicklung der Firma TopoSys. Sie zeichnen sich vor allem durch ihren besonderen Scanmechanismus aus. Aktive Scansysteme enthalten sehr oft bewegliche Spiegel unterschiedlichster Form, mit deren Hilfe das Messsignal beim Aussenden in eine bestimmte Richtung abgelenkt wird. Ein gewisser Nachteil dieser Systeme besteht darin, dass durch die hohe Beanspruchung der mechanischen Bauteile Variationen in der Aussendegeometrie auftreten können. Um trotzdem hohe Punktgenauigkeiten erreichen zu können, müssen diese Systeme sehr oft neu kalibriert werden. Bei den Systemen der Firma TopoSys wird dies dadurch umgangen, dass zwar auch ein beweglicher Spiegel zum Aussenden des Messsignals benutzt wird, er es aber lediglich auf ein weiteres Bauteil umlenkt, das der Aussendeoptik vorgeschaltet ist. Dieses Bauteil ist ein Glasfaserbündel, das gegenüber dem rotierenden Spiegel kreisförmig, an seinem anderen Ende aber als lineare Scanzeile angeordnet ist (vgl. Abb. 12). Durch diesen fixen Aufbau werden die einzelnen Messsignale unter stets denselben Winkeln abgestrahlt. Sie unterliegen keinen Variationen aufgrund von Schwankungen in der Spiegelrotationsachse, die Aussendegeometrie bleibt also

über lange Zeit stabil (vgl. z. B. [LOHR & EIBERT, 1995] oder [WEHR & LOHR, 1999]). Das Bündel enthält 128 Fasern, von denen eine aber als Referenzfaser genutzt wird und nicht zur Messung zur Verfügung steht.

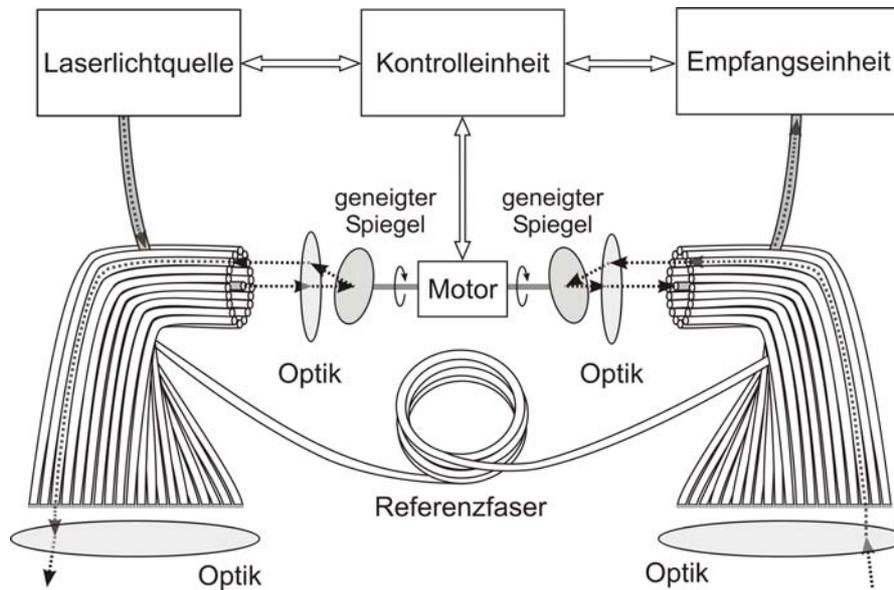


Abb. 12: Prinzip der TopoSys-Laserscanningensysteme

Beide Systeme enthalten eine Laserlichtquelle, die Laserlicht mit einer Wellenlänge von 1560 nm abstrahlt, also kurzwelliges Infrarot. Es wird als kurzer Lichtpuls von 5 ns Dauer abgegeben, mit einer Frequenz von 83 kHz. Eine einzelne Distanzmessung kann mit einer Entfernungsauflösung von ca. 2 cm durchgeführt werden.

Die Scanrate beider Systeme liegt bei ca. 650 Hz, das bedeutet, dass jedes einzelne Scanelement bzw. jede Glasfaser 650mal in der Sekunde beleuchtet wird, oder, in anderen Worten, 650 komplette Scanzeilen pro Sekunde abgetastet werden. In Flugrichtung überlappen sich die Scanzeilen sehr stark, da für den Streifenabstand $d_{Scanzeilen}$ – bei der Vermessung einer zur Sensorblickrichtung orthogonalen Ebene – gilt:

$$d_{Scanzeilen} = \frac{s_{Flugzeug}(\Delta t)}{N_{Scanzeilen}(\Delta t)} = \frac{v_{Flugzeug} * \Delta t}{f_{Scan} * \Delta t} \quad (9)$$

wobei $s(\Delta t)$ den in einem Zeitintervall Δt vom Flugzeug zurückgelegten Weg, $v_{Flugzeug}$ seine Geschwindigkeit, f_{Scan} die Scanfrequenz und $N_{Scanzeilen}(\Delta t)$ die Anzahl der in dieser Zeit abgetasteten Scanzeilen bezeichnet. Ein typischer Wert im Falle der TopoSys-Systeme ist:

$$d_{Scanzeilen, TopoSys} = \frac{70 \frac{m}{s} * 1s}{630Hz * 1s} \approx 0,11m \quad (10)$$

Die Footprint-Größe bzw. dessen Radius ist bei einer typischen Flughöhe von 850 m (vgl. 2.1.4.1) und der Strahldivergenz von 1mrad für TopoSys-Sensoren:

$$R = 850 \text{ m} * \frac{0,001}{2} = 0,425 \text{ m} \quad (11)$$

Da sich der Streifenabstand auf die Mittelpunkte der Footprints bezieht, überlappen sich einzelne Footprints in Flugrichtung sehr stark, da ihr Abstand nur ca. ein Viertel ihres Radius beträgt. Quer zur Flugrichtung ist der Abstand der Footprints ($d\bar{y}_{\text{Scanelemente}}$) deutlich größer (vgl. Abb. 7). Es gilt:

$$d\bar{y}_{\text{Scanelemente}} = \frac{SW}{N_{\text{Scanelemente}}} \quad (12)$$

Und mit der Formel für die Streifenbreite aus Kapitel 2.1.4.2:

$$d\bar{y}_{\text{Scanelemente}} = \frac{2h \tan\left(\frac{\Theta}{2}\right)}{N_{\text{Scanelemente}}} \quad (13)$$

Für typische Flugdaten bei Nutzung der TopoSys-Sensoren:

$$d\bar{y}_{\text{Scanelemente, TopoSys}} = \frac{2 * 850 \text{ m} * \tan\left(\frac{14^\circ}{2}\right)}{127} \approx 1,64 \text{ m} \quad (14)$$

Quer zur Flugrichtung beträgt der Footprintabstand also ca. ein Vierfaches des Footprint-Radius, die einzelnen Footprints überlappen sich in dieser Richtung nicht.

Die TopoSys-Sensoren unterscheiden sich in den erwähnten Eigenschaften nicht, sondern vielmehr in der Qualität der Empfangsoptik. TopoSys II kann sehr viel schwächere Messsignale detektieren als TopoSys I. Dadurch ist eine größere Flughöhe möglich – maximal 1600 m gegenüber maximal 1000 m bei TopoSys I – und größere Gebiete können in kürzerer Zeit erfasst werden. Allerdings nimmt dabei die Punktdichte ab, da sich, wie bereits erwähnt, die Flughöhe direkt auf die Punktabstände quer zur Flugrichtung auswirkt. Ein weiterer positiver Effekt der gestiegenen Sensitivität ist, dass schwach reflektierende Oberflächen erfasst werden können, an denen es bei Messungen mit TopoSys I zu keinen verwertbaren Reflexionsantworten kam (vgl. Kapitel 5.2.1). Das System TopoSys II enthält im Unterschied zu TopoSys I außer dem Laserscanner auch noch einen RGB-Zeilenscanner als festen Bestandteil des Systems (weitere Details s. z. B. [PFLUG ET AL., 2004]).

Aktuell wird bei der Firma TopoSys das System TopoSys II eingesetzt. Mitte des Jahres 2003 ist es modifiziert worden und arbeitet nun mit dem so genannten *Schwing-Modus*. Das bedeutet, dass die Scanzeile in eine leichte Schwingung versetzt wird, so dass am Boden das in Abb. 7 ganz rechts gezeigte Scanmuster entsteht, im Gegensatz zu dem früheren Muster, das in der selben Abbildung links daneben zu sehen ist und aus einzelnen Linien in Flugrichtung bestand. Dadurch können linienhafte Objekte, wie z. B. Starkstromleitungen, besser erfasst werden, da sie nicht zufällig vollständig zwischen den Messpunkten liegen können und damit nicht vermessen werden. Die in dieser Arbeit verwendeten Datensätze stammen aus Messungen vor 2003, sie wurden also noch nicht mit dem Schwing-Modus erfasst.

2.3 Verwendete Datensätze

Für diese Arbeit wurden Daten verwendet, die mit den TopoSys-Sensoren im Stadtgebiet Karlsruhes erfasst wurden. Das Gebiet ist insgesamt ca. 8 km in West-Ost-Richtung und 2 km in Nord-Süd-Richtung groß, und umfasst die Innenstadt sowie große Gebiete von angrenzenden Stadtteilen und damit sehr unterschiedlich bebaute und unbebaute Bereiche.

Insgesamt fanden drei Befliegungen statt, zwei davon unter Verwendung des Sensors TopoSys I und eine mit dem System TopoSys II. Im Sommer des Jahres 1997 fand die erste Befliegung statt. Sie wurde mit TopoSys I im First-Echo-Modus durchgeführt. Eine zweite Befliegung war im darauf folgenden Januar, bei der im Last-Echo-Modus erfasst wurde. Die dritte Befliegung schließlich fand im Frühjahr 2002 mit dem System TopoSys II statt, es wurde gleichzeitig im First- und Last-Echo-Modus registriert. Die Flughöhen lagen jeweils zwischen 750 m und 850 m.

Die aus den Befliegungsdaten ermittelten Messpunktkoordinaten im WGS 84 System wurden von der Firma TopoSys in Gauß-Krüger-Koordinaten mit dem Referenzmeridian 9° (Bessel-Ellipsoid) transformiert und zu Digitalen Oberflächenmodellen in 1m-Raster-Form weiterverarbeitet. Dabei wird der Höhenwert eines Gitterelements aus den innerhalb des Pixels liegenden Messpunkten gebildet. Hier wurde jeweils die Höhe des höchsten (bei First-Echo-Daten) bzw. des tiefsten (bei Last-Echo-Daten) Messpunktes als repräsentativer Höhenwert benutzt, aber nur wenn er bei einer Plausibilitätsprüfung nicht als Ausreißer erkannt wurde. Für Rasterzellen in die kein Messpunkt fiel wurde eine Interpolation aus den umgebenden Pixeln durchgeführt (weitere Details s. z. B. [LÖFFLER, 2003]). Die Genauigkeit der Laserscanning-Datensätze wird von der Firma mit 0,5 m in der Lage und 0,15 m in der Höhe angegeben und in einigen Veröffentlichungen bestätigt (vgl. z. B. [MAAS, 2003]).

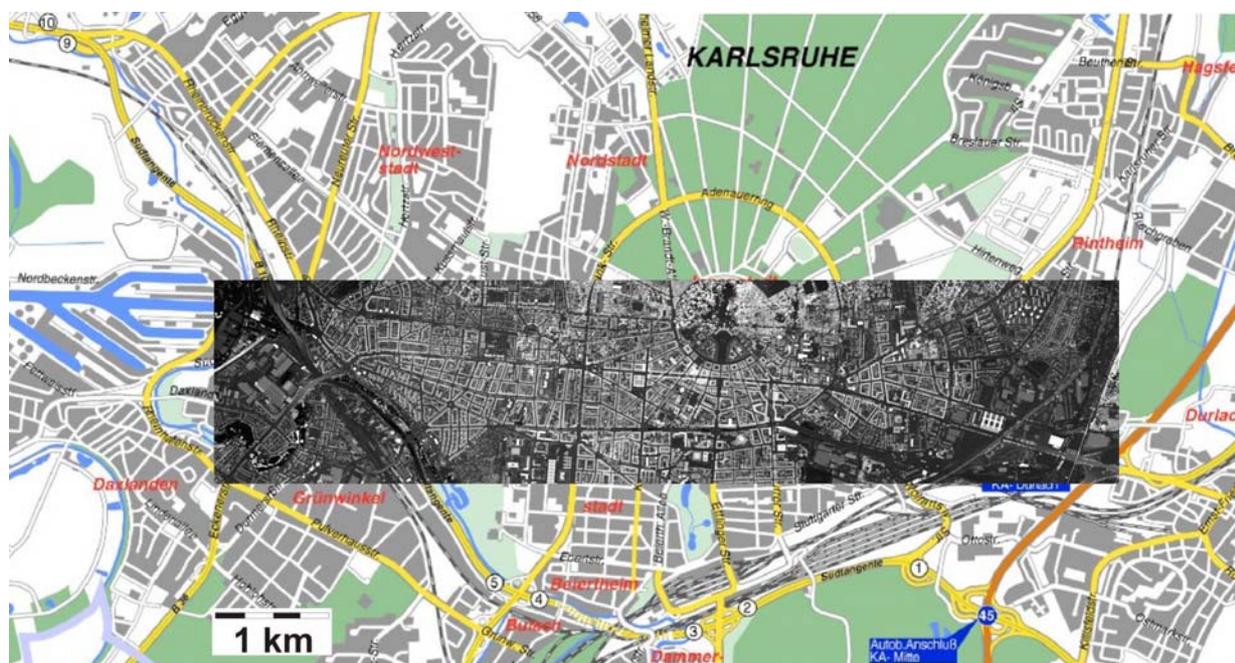


Abb. 13: Testgebiet „Karlsruhe“; im Bild Überlagerung eines Stadtplans (© Stadt Karlsruhe) und grauwertkodierter (First Echo) Laserscanningdaten des Testgebiets

3 Grundlagen zur Objektmodellierung

In urbanen Räumen gibt es eine große Vielzahl unterschiedlicher Objekte. Hierunter fallen alle Dinge, die nicht der Geländeoberfläche angehören. Man kann sie grob in natürliche und künstliche Objekte einteilen; unter den natürlichen Objekten sollen solche verstanden werden, die nicht vollständig von Menschen geschaffen wurden, wie z. B. Bäume, Flüsse oder Felsen. Dahingegen würden künstliche Objekte ohne den Menschen nicht existieren; dies sind Objekte wie Häuser, Verkehrsanlagen oder dekorative Elemente, wie z. B. Brunnen und Statuen. Eine scharfe Abgrenzung ist hierbei aber problematisch, da die Übergänge fließend sein können. Auch die natürlichen Objekte einer Stadt sind selten vom Menschen unbeeinflusst und z. T. auch massiv durch ihn gestaltet, wie z. B. bei Flussbegradigungen oder Anpflanzung und Schnitt von Bäumen und Hecken.

Zu Zwecken der Planung und Dokumentation in städtischen Bereichen ist meist das Ziel, alle vorkommenden größeren Objekte zu erfassen. In der Vergangenheit beschäftigte man sich dabei überwiegend mit einer Klassifizierung der Objekte (z. B. aus Luftbildern) und der zweidimensionalen geometrischen Erfassung vor allem von Gebäuden, Verkehrswegen und Wasserflächen. In den letzten Jahren gab es nun eine verstärkte Nachfrage nach einer dreidimensionalen Beschreibung von Städten (3D-Stadtmodelle). Zuerst wurden hauptsächlich Methoden zur 3D-Erfassung und -Darstellung von Gelände und Gebäuden entwickelt. Sehr schnell entstanden Anwendungsmöglichkeiten und damit auch eine Nachfrage nach dreidimensionalen Stadtmodellen (vgl. z. B. [FÖRSTNER, 1999], [HAALA, 2001], [ZLATANOVA, 2000]). Deutlich sichtbar wurde dies auch durch den Beginn der regelmäßigen Veranstaltung von Konferenz- und Workshop-Reihen, die sich vorwiegend mit diesem Thema befassen. Hier ist z. B. der Internationale Workshop „Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images“ hervorzuheben, der in loser Folge vom Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich veranstaltet wird (siehe [GRÜN ET AL., 1995], [GRÜN ET AL., 1997] und [BALTSAVIAS ET AL., 2001]). In jüngster Zeit wird zunehmend versucht, auch andere Objekte zu modellieren, am häufigsten Bäume (s. z. B. [STRAUB & HEIPKE, 2001], [VOSSELMAN, 2003], [WEINACKER ET AL., 2004]). Im Gegensatz zu der Gebäudemodellierung, bei der überwiegend eine möglichst exakte Wiedergabe der Objektgeometrie das Ziel ist, wobei der Maßstab bzw. Abstraktionsgrad hierbei von der konkreten Anwendung abhängt, dient Letzteres überwiegend der verbesserten, realistischeren Visualisierung von Stadtmodellen oder der Bestimmung bestimmter Parameter, wie z. B. dem Stammvolumen von Bäumen zur Ermittlung der nutzbaren Biomasse (z. B. [HYYPÄ & HYYPÄ, 2001]).

Das Ziel in dieser Arbeit ist es, den momentanen Status eines Gebäudes zu ermitteln, also seine Geometrie möglichst genau zu erfassen und wiederzugeben. Die Visualisierung der Gebäudemodelle ist zur Interpretation der Ergebnisse wichtig, stellt aber nicht den Schwerpunkt dar. Im Folgenden werden theoretische Grundlagen sowie nötige Vorarbeiten zur Gebäudemodellierung vorgestellt.

3.1 Objektextraktion

Eine wesentliche Voraussetzung zur Modellierung urbaner Objekte ist es, sie zunächst aus den Ausgangsdaten zu extrahieren. Viele Verfahren gehen dabei so vor, dass erst grundsätzlich Objekte segmentiert werden, d. h. die Teile der Ausgangsdaten werden extrahiert, die nicht dem Gelände entsprechen. In einem zweiten Schritt werden diese Objekte dann klassifiziert, d. h. in die verschiedenen Objektgruppen unterteilt. Zum Teil sind diese beiden unterschiedlichen Schritte aber nicht so scharf getrennt, da bereits eine grobe Klassifikation die Objektsegmentationsverfahren wesentlich unterstützen kann; angewandt wird dies z. B. innerhalb der Software eCognition (siehe im Internet: <http://www.definiens-imaging.de>).

Die Objektsegmentation ist sehr stark von den Ausgangsdaten und dem gewünschten Grad der Automation abhängig. Grundsätzlich dient sie aber der Reduzierung der Ausgangsdatenbasis mit dem Ziel der Konzentration auf die gewünschten Objekte. Dazu sind Modellvorstellungen über die gesuchten Objekte notwendig. Sie dienen als Grundlage zur Definition der spezifischen Eigenschaften, anhand derer die gesuchten Objekte im Ausgangsdatensatz erkannt werden können. Sehr oft werden dabei Merkmale (features) benutzt, die später direkt zur Modellierung der Gebäude herangezogen werden können. Bei der Verwendung von Luftbildern werden z. B. meistens Linien und Ecken gesucht, die dann später als Gebäudeecken und -kanten für die Gebäudemodelle direkt zur Verfügung stehen. Da sie als einzelne geometrische Elemente noch keine Aussage über das Objekt liefern können zu dem sie gehören, werden sie im Allgemeinen *nach* ihrer Extraktion, nach bestimmten Modellen, gruppiert. Die zusammengesetzten geometrischen Figuren werden klassifiziert und damit wird ermittelt, welche von ihnen als die gesuchten Objekte weiter behandelt werden. Beispiele für diese Art der Extraktionsverfahren sind in MAYER (1998) zusammengestellt.

Werden als Ausgangsbasis ausschließlich Laserscannerdaten verwendet, dann sind die Extraktionsverfahren etwas anders aufgebaut. Bei der Verwendung von Datensätzen, die mit optischen Sensoren erfasst wurden, können die radiometrischen Eigenschaften der Bestandteile einer Szene direkt verwendet werden, wie z. B. Farbe, Rückstrahlintensität und Textur, bis auf solche Bereiche, die durch Rauschen, Sensorfehler oder Schattenwurf verfälscht sind. Einzelne Szenenbestandteile überlagern sich in dem direkt abgebildeten Merkmal nicht vollständig, d. h. es kommt im Allgemeinen nicht zu einer Vermischung der radiometrischen Eigenschaften zweier unterschiedlicher Elemente über deren gesamte abgebildete Fläche hinweg. Derartige Effekte treten meist nur an Objektträgern oder über sehr kleine Objekte hinweg auf.

In den durch Laserscanning erzeugten Höhendatensätzen ist das anders. Dort kommt es in aller Regel zur Überlagerung und Vermischung unterschiedlicher Szenenelemente in der abgebildeten Eigenschaft, in diesem Fall ist das die Höhe. So findet man z. B. nicht direkt die Gebäudehöhe von Häusern in den DOMs (vgl. Kapitel 2), sondern vielmehr die Summe der Gebäudehöhe und der Geländehöhe an dieser Stelle. Befinden sich Objekte übereinander, dann kommt es im Prinzip zu einem ähnlichen Effekt wie bei Mischpixeln. Die Abb. 14 und Abb. 15 zeigen ein solches Beispiel.



Abb. 14: Luftbild (links) und Ausschnitt aus einem First-Echo-DOM (rechts); Beispiele zur Objektüberlagerung u. a. auf einem Podium (gestrichelt umrandet) durch eine Statue (Kreis)

In Abb. 14 ist ein Platz sowohl in einem Luftbild als auch in einem Teil eines aus First-Echo-Laserscanning gewonnenen DOM dargestellt. Die untere Bildhälfte zeigt ein Podium (gestrichelt umrandet) in einem Innenhof, auf dem sich unter anderem eine Statue (Kreis) befindet. Abb. 15 zeigt nun die Auswirkungen auf die gewonnen Höhen exemplarisch an einem Profilschnitt, der in Abb. 14 als weiße Linie im rechten Teilbild (durch Kreuze begrenzt) angedeutet ist. Im Profil sind die Anteile der Messwerte, die über das Geländeniveau (grau unterlegt) hinausgehen zur besseren Anschauung mit dem Faktor 2,5 skaliert dargestellt.

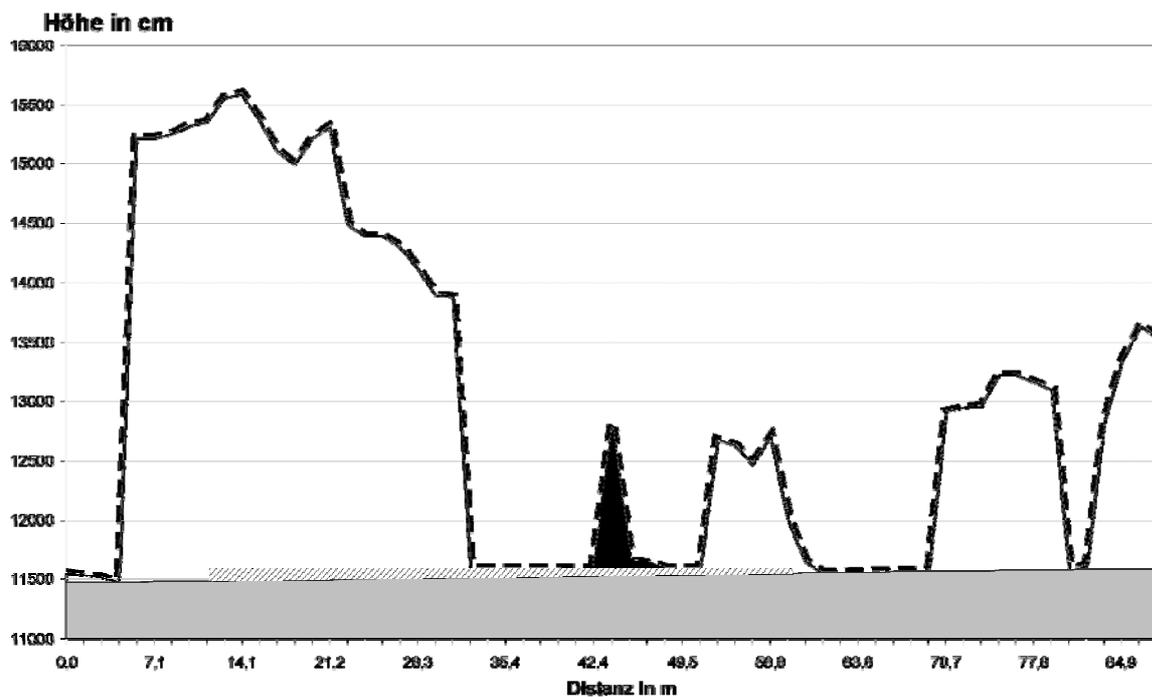


Abb. 15: Höhenverlauf im DOM entlang der weißen Linie (mit Kreuzen begrenzt) im rechten Teil der Abb. 14, vom unteren Bildrand nach oben; das Podium ist schraffiert, die Statue schwarz gefüllt dargestellt; die im DOM abgebildete Oberfläche ist gestrichelt gezeigt

Die Statue ist im Profil schwarz, das Podium schraffiert kenntlich gemacht. Man kann nun im Bereich der Statue sehen, dass die dort gemessenen Höhen die Summe dreier verschiedener Elemente an dieser Stelle sind. Das Gelände liefert einen Beitrag von ca. 115 m, das Podium von ca. 0,5 m und die Statue im Maximum von 4,5 m. Gemessen wird nun aber die Absoluthöhe der Oberflächenpunkte, die im Maximum 120 m beträgt (in Abb. 15, aufgrund der Überhöhung, beträgt sie 127,5 m), also die Summe aus allen drei Komponenten.

Aus diesem Grund wird aus Laserscanning-DOMs meistens zuerst die Geländeoberfläche herausgefiltert und vom DOM subtrahiert, so dass ein nDOM entsteht (vgl. Kapitel 2.1.5.2). Damit sind in einem ersten Schritt die Objekte von der Geländeoberfläche getrennt, und die übrig gebliebenen Messwerte geben mehrheitlich an jedem einzelnen Punkt lediglich die Objekthöhe an (bis auf solche wie oben erwähnte Sonderfälle). Diese Höhenwerte werden dann im Allgemeinen gruppiert und die entstandenen Segmente klassifiziert.

In der vorliegenden Arbeit dienen ebenfalls ausschließlich aus Laserscanning entstandene Höhendaten als Ausgangsbasis. Die genaue Methodik, die zur Objektextraktion benutzt wurde, wird im Folgenden vorgestellt; es handelt sich dabei um ein am IPF der Universität Karlsruhe entwickeltes Verfahren.

3.1.1 Objektextraktionsverfahren aus Laserscanningdaten des IPF

Am IPF wird seit einiger Zeit auch auf dem Gebiet der Objektextraktion aus Laserscanningdaten geforscht, ohne Verwendung weiterer Datenquellen (vgl. z. B. [STEINLE & VÖGTLE, 2001] und [VÖGTLE & STEINLE, 2003]). Dies wird vor allem vor dem Hintergrund einer Anwendbarkeit von Objekt-Extraktions- und Objekt-Modellierungsverfahren auch unter ungünstigen Bedingungen durchgeführt, wie z. B. Befliegungen bei Nacht, bei denen die meisten zu photogrammetrischen Zwecken verwendeten Sensoren nicht eingesetzt werden können. Zudem sollen die Verfahren auch zur Erfassung und Dokumentation von Veränderungen in städtischen Gebieten dienen, so dass weitere mögliche Datenquellen, wie z. B. Katasterdaten, aus Gründen der Abbildung unterschiedlicher (Bebauungs-)Zustände des Gebiets meist ebenfalls entfallen.

Wie im vorigen Kapitel erwähnt, ist der erste Schritt die Reduktion des DOM auf ein nDOM. Dies wird mit dem in Kapitel 2.1.5.2 beschriebenen Verfahren erreicht. Aus dem so gewonnenen nDOM werden nicht alle vorhandenen Objekte extrahiert, sondern gezielt Gebäude, da sich diese Forschungsarbeit überwiegend mit der Analyse urbaner Räume beschäftigt, insbesondere mit der Untersuchung von Gebäudeveränderungen in Stadtgebieten.

Im Allgemeinen werden mithilfe eines nDOM insbesondere Gebäude, aber auch Bäume extrahiert, da diese beiden Objektarten die wichtigsten Elemente zur Erstellung realistisch anmutender digitaler Stadtmodelle sind. Dies bestätigt ZLATANOVA (2000), die den Aufbau von 3D-Geoinformationssystemen behandelt; diese Systeme enthalten in aller Regel auch ein 3D-Stadtmodell. Sie berichtet unter anderem von Untersuchungen verschiedener Wissenschaftler über für 3D Stadtmodelle wichtige Objekte. In Zusammenfassung ergab sich, dass 3D-Stadtmodelle aus *Bauwerken*, *Vegetation* und *Gelände* bestehen sollten, wobei nicht alle Studien Letzteres genannt hatten.

Bäume und Bauwerke unterscheiden sich von anderen Objekten im Höhendatensatz vor allem dadurch, dass sie eine gewisse Mindesthöhe und Mindestgrundfläche überschreiten. Diese Eigenschaften werden zu ihrer Extraktion ausgenutzt.

3.1.1.1 *Segmentation von Objekten aus dem nDOM*

Das Verfahren zur Objektsegmentation ist als Flächenwachstumsverfahren realisiert. In Kapitel 4.1.1 wird diese Art der Verfahren ausführlich vorgestellt. Die Grundidee dabei ist es, ausgehend von einem kleinen Bereich, der die gewünschten Eigenschaften hat (Zugehörigkeitskriterien), in alle Richtungen im Bild zu suchen, ob benachbarte Pixel ebenfalls diese Eigenschaften besitzen. Lassen sich solche detektieren, dann werden sie zu dem Segment hinzugefügt, das ursprünglich nur aus dem Startbereich besteht. Auf diese Weise „wächst“ das Segment, bis keine geeigneten Punkte mehr gefunden werden können.

Als Startbereich werden kleine Pixelgruppen gesucht, meist eine 4er- (N^4) oder 8er- (N^8) Nachbarschaft, in denen alle Pixel eine bestimmte Höhe über Grund besitzen (die im nDOM direkt gegeben ist). Da vorwiegend Gebäude von Interesse sind, wird hier die Gebäudeminsthöhe als Schwellwert gewählt. In aller Regel ist dies die übliche Geschosshöhe plus einer gewissen (Sicherheits-)Toleranz für den Dachaufbau, so dass ein Wert von 2 m bis 2,50 m allgemein anwendbar ist.

Ausgehend von der Startregion werden nun alle benachbarten Pixel dahingehend überprüft, ob sie zum jeweils benachbarten Element der Startregion um nicht mehr als einen bestimmten Betrag abweichen. Dahinter steht die Annahme, dass es auf Dächern i. Allg. keine abrupten Höhensprünge gibt, sondern kontinuierliche Höhenverläufe vorherrschen. Damit sind benachbarte Punkte in der Regel nur bis zu einem bestimmten Höchstbetrag unterschiedlich hoch, der von der Dachneigung abhängt.

Die Neigung von Gebäudedächern ist genauso wie die Mindestgebäudehöhe eine Größe, die abhängig ist vom Untersuchungsgebiet und dem Untersuchungszeitpunkt. Verschiedene Kulturen benutzen unterschiedliche Gebäude- und Dachformen, worauf TSAY (2002) in seinem Artikel über 3D Stadtmodelle in Taiwan

hinweist. Dort existiert eine große Bandbreite an unterschiedlichsten Baustilen, unter anderem gibt es auch viele traditionelle chinesische Bauten (einige Beispiele zeigt die Abb. 16).

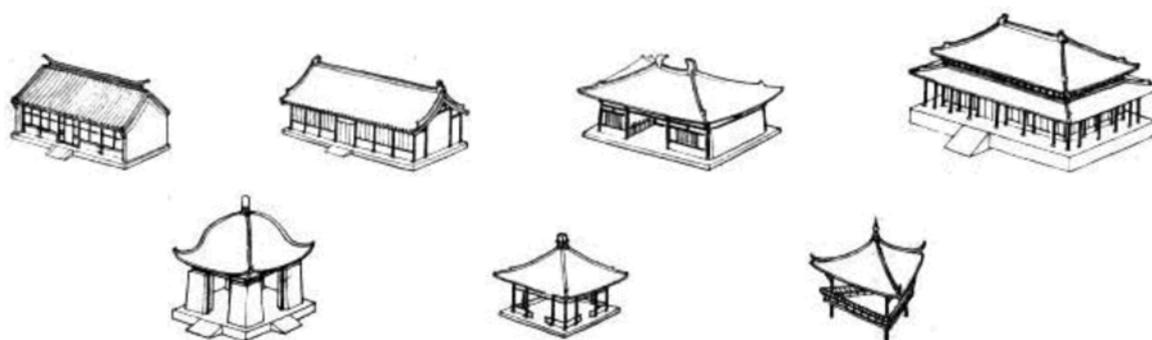


Abb. 16: Traditionelle chinesische Dachformen nach TSAY (2002) (vgl. auch: http://www.geocities.com/black_homework [Stand: 18. 11. 2003])

Trotzdem kann auch für diesen Schwellwert ein Maximalbetrag begründet werden, der z. B. 1,75 m betragen kann. Es lässt sich über einfache trigonometrische Beziehungen herleiten, dass bei diesem Höhenunterschied zwischen zwei Pixeln, die aufgrund der Rastergröße in den hier verwendeten Daten einen Meter voneinander entfernt sind, eine Dachneigung von ca. 60° vorliegen muss.

Bei steileren Dächern beträgt der Höhenunterschied zwischen zwei benachbarten Punkten in diesem Fall schon mehr als 2 m. Bei diesem Wert kann man dann nicht mehr sicher sein, einen kontinuierlichen Höhenverlauf zu betrachten, da 2 m bereits einer Geschosshöhe entsprechen können und damit auch ein Übergang zwischen zwei Gebäuden mit unterschiedlicher Stockwerkzahl vorliegen könnte.

Beim hier verwendeten Flächenwachstumsverfahren wird aber nicht nur die Höhendifferenz zum segmentierten Bereich abgeprüft, sondern auch die Höhe über Grund des potenziellen Segmentelements. Liegt sie unter einem vordefinierten Wert, z. B. unter der zuvor behandelten Gebäudemindesthöhe, dann wird das betrachtete Pixel ebenfalls nicht zum Segment hinzugenommen. Damit versucht man das „Überspringen“ des Verfahrens auf die Grundebene des nDOMs, d.h. auf die Ebene mit Höhe „0“, und Geländeobjekte zu verhindern. Mit *Geländeobjekte* sind solche Bereiche des Geländes gemeint, die sich durch hohe Kanten im DOM vom übrigen Gelände deutlich abgrenzen, wie z. B. Felsen oder Erdwälle. In Abb. 18, Abb. 19 und Abb. 20 ist hierfür ein Beispiel zu sehen. Es handelt sich dabei um zwei mit Bäumen und Büschen bewachsene Erdwälle. Sie sind im aus Last-Echo-Daten generierten nDOM (Abb. 18) deutlich als bogenförmige Objekte zu erkennen und werden bei der Segmentierung als Objekte erkannt (Abb. 19).

In Sonderfällen kann es vorkommen, dass ein relativ kontinuierlicher Höhenübergang bis auf das Geländeniveau, also die Grundebene des nDOMs, vorliegt, z. B. wenn an das Gebäude Bäume und Büsche angrenzen oder andere entsprechend gestaltete Objekte. Die Abb. 17 zeigt einige Beispiele, in denen der segmentierte Bereich durch eine dicke schwarze Linie symbolisiert wird. Auf der linken Seite der Abbildung springt die Segmentierung durch Einbeziehung anderer Objekte auf das Grundniveau über, während im rechten Teil das Überspringen auf ein benachbartes Geländeobjekt (dunkelgraues Fünfeck am rechten Bildrand) stattfindet.

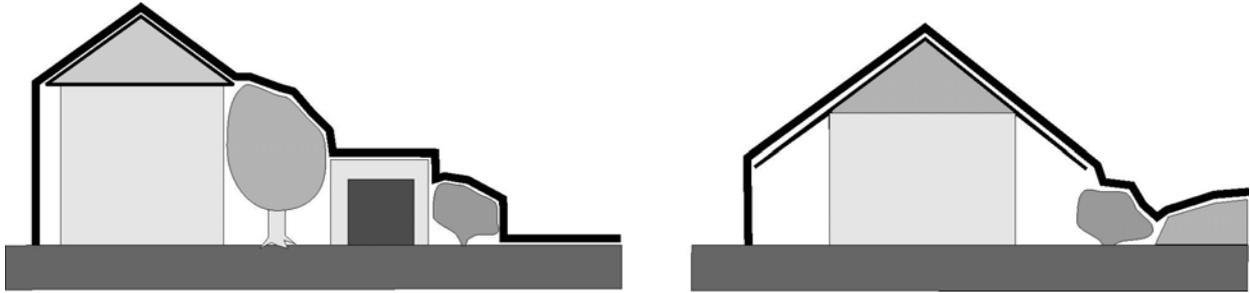


Abb. 17: Problem der Einbeziehung des Grundniveaus des nDOMs und anderer Objekte bei der Objektsegmentation

Zusammenfassend lautet das Prüfkriterium – oder das Homogenitätsprädikat H_R (vgl. Kapitel 4.1.1.2) – zur Entscheidung über die Zugehörigkeit eines Nachbarpixels zu einem Objekt-Segment:

$$H_R = \begin{cases} g(x_P, y_P) \in R: & g(x_P, y_P) > t_{MinG} \vee g(x_P, y_P) - g(x_{R,i}, y_{R,i}) \leq t_{MaxN} \\ g(x_P, y_P) \notin R: & sonst \end{cases} \quad (15)$$

wobei:

- $g(x_P, y_P)$ Höhe des aktuell geprüften Pixels
- $g(x_{R,i}, y_{R,i})$ Höhe des zu R gehörenden Pixels, dessen Nachbarn geprüft werden
- R aktuelles Segment (auch Region genannt)
- t_{MinG} Mindesthöhe über Gelände
- t_{MaxN} Maximal zulässige Höhenabweichung zu den Nachbarpixeln

Das mit diesem Verfahren erzeugte Ergebnis enthält in den einzelnen Segmenten überwiegend Gebäude, zum Teil aber auch größere Bäume bzw. Baumgruppen und in wenigen Einzelfällen manchmal auch noch Geländeobjekte.



Abb. 18: Ausschnitt aus einem nDOM, basierend auf Last-Echo-Daten; die beiden gestrichelt umrandeten Objekte sind Erdwälle



Abb. 19: Ergebnis der Objektsegmentation für die Szene aus Abb. 18, die Erdwälle sind wiederum gestrichelt markiert



Abb. 20: Fotografien der Erdwälle (weiß gestrichelt) aus Abb. 18

3.1.1.2 Klassifikation der segmentierten Objekte

Zur Unterscheidung der drei wesentlichen Klassen (Gebäude-, Vegetations- und Gelände-Objekte), denen die Objekte angehören können, die mit dem im vorigen Kapitel beschriebenen Verfahren segmentierten wurden, wird eine Reihe von Merkmalen aus dem Höhendatensatz abgeleitet, die bei den verschiedenen Klassen unterschiedlich ausgeprägt sind. Sie beziehen sich im Wesentlichen auf die Form und den Hohenvverlauf innerhalb der Objekte. Im Folgenden werden einige mögliche Merkmale kurz vorgestellt und die eigentliche Klassifikation beschrieben.

First- und Last-Echo-Differenz

Bei simultaner Registrierung im First- und Last-Echo-Modus (vgl. Kapitel 2) kommt es, außer an Hohenkanten, in der Regel an Objekten mit lückenlosen festen Oberflächen, wie z. B. Gebäuden, zu keinen großen Abweichungen zwischen den beiden Datensätzen. Bei Bäumen hingegen kann es extreme Höhenunterschiede geben. Laubbäume werden meist von Teilen des Lasersignals durchdrungen, d. h. sie besitzen genügend große Lücken im Blätterdach, so dass das Lasersignal oft bis auf die Geländeoberfläche vordringen kann. Aus diesem Grund können Bäume im First-Echo DOM vorhanden sein und im Last-Echo DOM fast vollständig fehlen.

Abb. 21 zeigt eine Szene mit einem Gebäudekomplex, einem einfachen Gebäude und einer Brücke in einem sonst dicht bewaldeten Gebiet. Im Last-Echo-Datensatz treten die Bauwerke deutlich hervor, da dort nahezu keine Bäume erfasst wurden, die das kleinere Gebäude und die Brücke sonst – zumindest teilweise – überdecken würden (wie im First-Echo-Datensatz zu sehen). Insbesondere Nadelbäume können im Last-Echo-Datensatz aber dennoch vorhanden sein. Im Beispiel sind zwei Nadelbäume, im unteren Bereich des rechten Bildrandes, zu sehen (weiße Stellen im Last-Echo-Bild). Solche Bäume sind in der Regel weniger gut mittels Laserscanning durchdringbar als Laubbäume. Das soll heißen, dass bei Nadelbäumen kaum Lücken in der Krone existieren, in denen das Lasersignal bis zum Boden vordringen und wieder zurückgestrahlt werden kann, ohne dass es durch Reflexionen an den Nadeln zu stark gestreut wird und damit keine signifikante Messsignalstarke mehr am Sensor ankommt. Die Differenz zwischen First- und Last-Echo-Datensatz (vgl. Abb. 22) kann somit zur Trennung von Gebäuden und (Laub-)Bäumen verwendet werden, wobei Fehlentscheidungen bei Nadelbaumgruppen möglich sind.

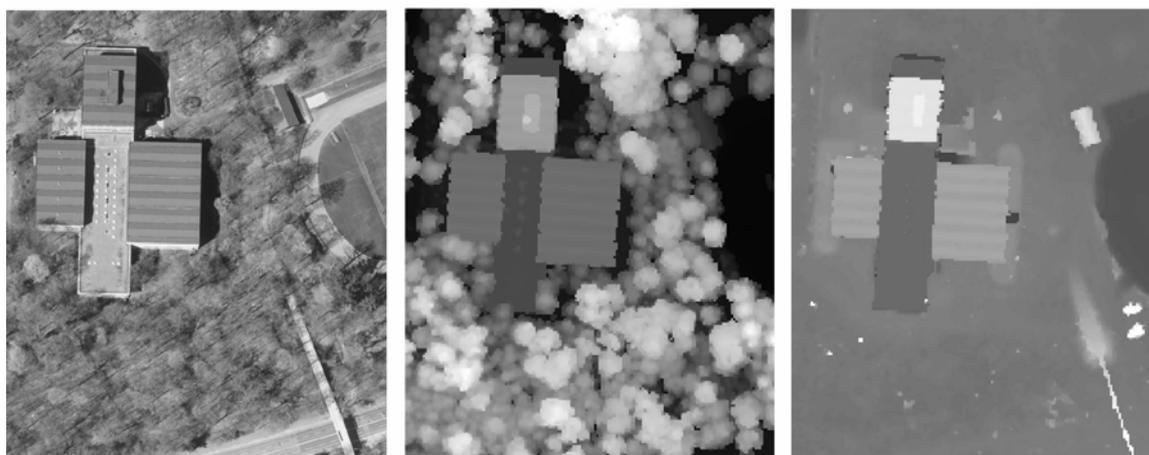


Abb. 21: Luftbild (links), First-Echo (Mitte) und Last-Echo (rechts) Datensätze eines Gebiets mit dichter Vegetation



Abb. 22: Grauwertcodiertes Differenzbild, entstanden aus Subtraktion des Last-Echo vom First-Echo-DOM; je heller Pixel sind, desto höher ist die Differenz an dieser Stelle

Höhentextur

Mit Textur wird in der Bildverarbeitung im Allgemeinen eine charakteristische Abfolge von verschiedenen Grau- oder Farbwerten bezeichnet, also ein bestimmtes Farb- oder Grauwertmuster (vgl. [HARALICK & SHAPIRO, 1992]). Stellt man die mit dem Laserscanning gemessenen DOMs als Grauwertbilder dar, so wird deutlich, dass es auch bei diesen Daten etwas Analoges zur spektralen Textur gibt: die Höhentextur. Darunter soll die Änderung der Höhenwerte in Bezug auf die benachbarten Pixel verstanden werden. In Abb. 23 und Abb. 24 sind ein Baum bzw. ein Gebäude dargestellt, bei denen jeweils Pixel gleicher Höhe mit demselben Grauwert dargestellt sind, der jeweilige Grauwert ist aber zufällig gewählt. Dadurch wird die Höhenverteilung und damit auch -änderung innerhalb der Objekte deutlich. Bei dem Gebäude ändert sich die Höhe quer zur Längsachse gleichmäßig, wohingegen sich beim Baum ein viel stärker heterogener Höhenverlauf zeigt.

Diese Eigenschaft kann man sich durch die Berechnung von Parametern zunutze machen, welche die Art der Höhendifferenz eines Pixels bezüglich seiner Umgebung wiedergeben. Im Folgenden werden als Beispiele möglicher Parameter die *Lokale Krümmung* und die *Anzahl der Randgradienten* bezogen auf die Objektfläche vorgestellt; diese beiden Parameter haben sich in der Praxis besonders bewährt (vgl. [TÓVÁRI & VÖGTLE, 2004]).



Abb. 23: Symbolisches Höhenbild eines Laubbaumes

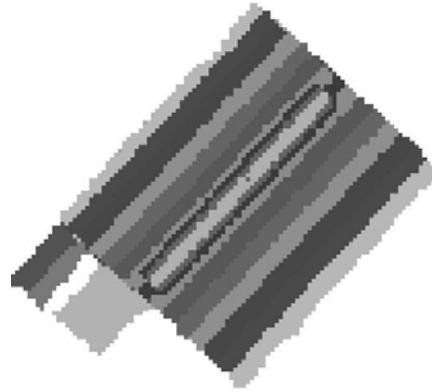


Abb. 24: Symbolisches Höhenbild eines (Satteldach-)Gebäudes

Lokale Krümmung

Die Berechnung der *Lokalen Krümmung* soll der Unterscheidung von Gebäuden und Vegetation im Höhenbild dienen. Sie ist der häufig benutzten *Laplace-Filterung* sehr ähnlich. Der Laplace-Operator einer beliebigen Funktion f lautet:

$$\Delta f(x_0, \dots, x_i) = \text{div}(\text{grad } f(x_0, \dots, x_i)) = \sum_i \frac{\partial^2 f(x_0, \dots, x_i)}{\partial x_i^2} \quad (16)$$

Er bezeichnet die Summe der zweiten partiellen Ableitungen, somit auch „die Differenz der Differenzen“. Bei der diskreten Anwendung des Laplace-Operators in der Laplace-Filterung können Bearbeitungsmasken verwendet werden, bei denen die Diagonalelemente aufgrund der größeren Distanz vom Zentralpixel weniger stark gewichtet sind als die Horizontal- und Vertikalelemente. Das Zentralpixel wird mit dem aufsummierten Wert der Einzelgewichte multipliziert und von seinen Nachbarpixeln subtrahiert. Der diskrete Laplace-Operator kann also z. B. folgendermaßen aussehen:

$$\Delta = \begin{pmatrix} 10 & 14 & 10 \\ 14 & -96 & 14 \\ 10 & 14 & 10 \end{pmatrix} \quad (17)$$

Eine Sonderform der Laplace-Filterung ist die Berechnung der *Lokalen Krümmung*. Dazu werden Höhen-Doppeldifferenzen in den vier möglichen Nachbarschaftsrichtungen des Zentralpixels ermittelt. Als mögliche Nachbarschaftsrichtungen sollen dabei die in Abb. 25 mit Pfeilen gekennzeichneten Richtungen gelten (1-5, 2-6, 3-7, 4-8).

Zur Berechnung der Steigungsänderung – und damit der Krümmung – werden zunächst die Grauwertdifferenzen der beiden in der jeweiligen Richtung liegenden Pixel zum Zentralpixel gebildet (bezogen auf die Lagedifferenz ihrer Mittelpunkte), und danach die Differenz dieser beiden Werte ermittelt.

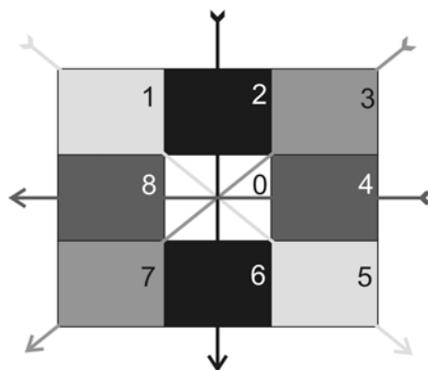


Abb. 25: Die vier Hauptrichtungen in einer 3x3-Pixel Umgebung

Es wird also die Differenz der beiden in der Richtung auftretenden Steigungen berechnet, d. h. die Steigungsänderung. Als Wert für die Lokale Krümmung (LK) wird die maximale Steigungsänderung der vier Hauptrichtungen gewählt:

$$LK = \text{Max}(|\Delta_i|), \quad i = 1..4 \quad (18)$$

$$\text{mit } \Delta_i = \left(\frac{g_{i+4} - g_0}{\sqrt{(x_{i+4} - x_0)^2 + (y_{i+4} - y_0)^2}} \right) - \left(\frac{g_0 - g_i}{\sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2}} \right), \quad i = 1..4 \quad (19)$$

wobei g_j der Grauwert des Pixels an der Position j bedeutet; die verschiedenen Pixelpositionen sind in der Abb. 25 angegeben.

Im Unterschied zur Lokalen Krümmung glättet der Laplace-Operator gleichzeitig, d. h. ein sehr großer Krümmungswert kann durch benachbarte geringere Krümmungswerte deutlich abgeschwächt werden. Hier ist dieses Verhalten aber nicht erwünscht, da im DOM die Gebäude in aller Regel nicht „verrauscht“ sind.

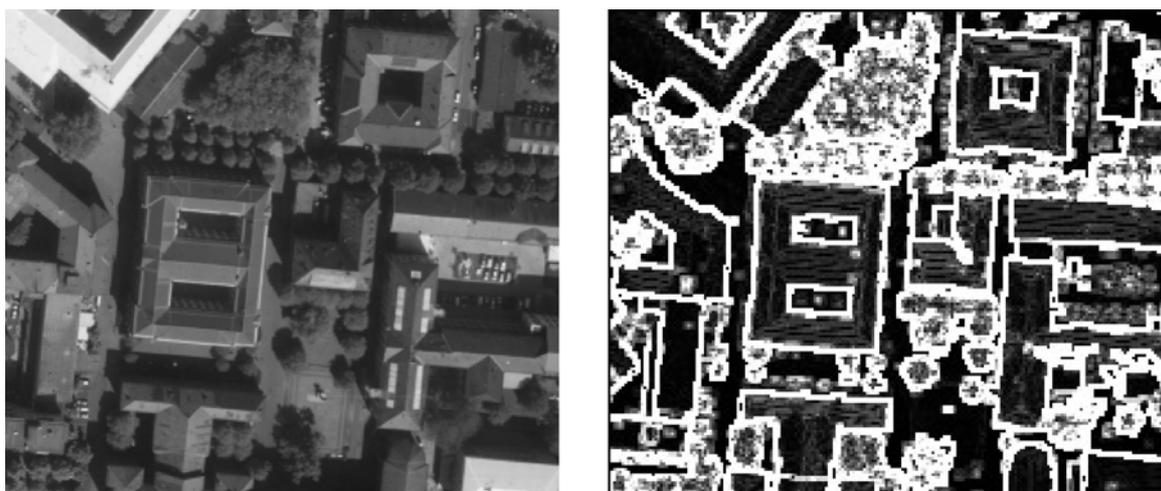


Abb. 26: Luftbild (links) und grauwertcodiertes Ergebnis der Lokalen Krümmung-Berechnung (rechts; je höher der Wert der Lokalen Krümmung, desto heller der Bildpunkt)

Das bedeutet, dass an ihnen keine großen Krümmungen auftreten, z. B. aufgrund zufälliger Messfehler, die als Ausreißer verstanden werden müssen und durch Glättung in ihrem Einfluss auf das Klassifizierungsergebnis abgeschwächt werden sollten. Insofern ist es vorteilhaft, die an Bäumen auftretenden größeren Krümmungswerte mit dem Parameter der *Lokalen Krümmung* deutlich herauszustreichen (vgl. Abb. 26) und damit eine eindeutigere Zuordnung vornehmen zu können.

Die *Lokale Krümmung* kann, genauso wie die Laplace-Filterung, als *Kantendetektor* eingesetzt werden, also zur Extraktion von Pixeln mit starkem Neigungswechsel. Das bedeutet aber, dass diese Parameter am Rand eines Gebäudes große Werte liefern. Zur Klassifikation der segmentierten Objekte werden die Parameterwerte aller Pixel eines Segments zusammengenommen, um eine Gesamtaussage für dieses Objekt zu generieren. Hier würden die Parameterwerte der Randpunkte unter Umständen extreme Störungen verursachen, da z. B. bei kleinen Gebäuden diese Pixel einen relativ großen Anteil der Gesamtpixel ausmachen können. Da zudem in aller Regel sowohl Bäume als auch Gebäude diese Randgradienten aufweisen, werden zur Bestimmung des Parameterwertes für die Klassifikation der Objekte die Randbereiche nicht berücksichtigt, sondern nur solche Pixel, die vollständig innerhalb der Objektfläche liegen.

Randgradienten

Bei der Berechnung der *Lokalen Krümmung* werden die Randbereiche der Objekte nicht berücksichtigt, da hierdurch erhebliche Verfälschungen der Parameterwerte auftreten würden und somit beispielsweise kleine Gebäude und Bäume sehr ähnliche Ergebnisse ergeben könnten. Man kann die Randgradienten aber auf andere Weise zur Klassifikation nutzen, vor allem zur Unterscheidung von Gebäuden/Bäumen und Geländeobjekten.

Künstliche Bauwerke haben in den meisten Fällen an allen Seiten abrupte Übergänge von ihren Dächern zum umgebenden Gelände, d. h. vertikale (objektbegrenzende) Außenwände signifikanter Höhe. Geländeobjekte hingegen besitzen oft mindestens an einer Seite einen kontinuierlichen Übergang auf das umgebende Gelände. Bei der Objektsegmentation (vgl. Kapitel 3.1.1.1) werden Objekte mit teilweise schwachen Randgradienten dort begrenzt, wo die zu segmentierenden Pixel eine zu geringe Höhe über dem Gelände besitzen.

In der Folge gibt es also Objekte, an deren Ränder große Höhendifferenzen auftreten und solche, deren Randgradienten zum Teil sehr gering sind. Die Abb. 27 zeigt zwei Beispiele.

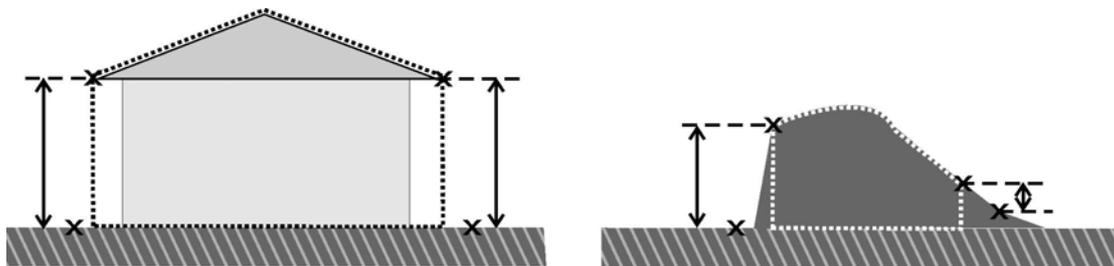


Abb. 27: Randgradienten an einem Gebäude und einem Erdwall

Das Grundniveau des nDOMs ist in der Abbildung schraffiert dargestellt, die extrahierten Objekte mit einem gepunkteten Umriss gekennzeichnet. Am Rand der Objekte ist das jeweils äußerste Pixel durch ein Kreuz symbolisiert, sowie das erste außerhalb des Objekts gelegene. Die Höhe der Randgradienten ist durch Doppelpfeile wiedergegeben. Bei dem Gebäude im linken Bildteil treten sehr deutliche Höhendifferenzen am Rand auf, bei dem Erdwall rechts ist das nur auf der linken Seite der Fall.

Die Eigenschaft der unterschiedlich stark ausgeprägten Randgradienten lässt sich nun zur Klassifizierung nutzen, indem der Anteil der signifikanten Randgradienten zu der Gesamtzahl der Randpunkte in Beziehung gesetzt wird:

$$RG = \frac{A_{B,S}}{A_B} \quad \text{mit} \quad \begin{cases} A_{B,S} : \text{Anzahl der signifikanten Randgradienten } (|t_i| > t_{MinG}) \\ A_B : \text{Gesamtanzahl der Randpunkte} \end{cases} \quad (20)$$

Übersteigt RG einen bestimmten Wert, dann kann man mit großer Sicherheit davon ausgehen, dass es sich dabei nicht um ein Geländeobjekt handelt (in der Praxis ergab sich als Grenzwert 0,7).

Objektform

Die Parameter zur Objektform beziehen sich auf den (zweidimensionalen) Umriss der Objektsegmente. Für Gebäude gilt, ähnlich wie bei der Höhentextur, dass sie im Allgemeinen in ihrer Form regelmäßiger als andere Objekte sind. Das bedeutet, dass sie z. B. lange gerade Seiten, viele nahezu parallele bzw. orthogonale Begrenzungslinien und relativ wenige Eckpunkte pro umschlossene Fläche besitzen. Damit stehen sie im Gegensatz insbesondere zu Bäumen, die oft unregelmäßige Umrisslinien aufweisen, d. h. sie besitzen kurze Linien, kaum parallele Linienpaare und es treten häufig Richtungswechsel auf, die viele Eckpunkte bedingen.

Zur Bestimmung der die Objektform beschreibenden Kenngrößen müssen zuerst die Objektumrisse aus den Höhendaten ermittelt werden. Dazu werden die durch die Rasterung relativ unregelmäßigen Begrenzungslinien extrahiert und anschließend geglättet. Für die resultierenden Umrisse erfolgen dann die jeweiligen Parameterberechnungen.

LINIENEXTRAKTION

Zur Bestimmung der Segmentgrenzen wird zuerst eine Konturverfolgung ausgeführt. Dazu wird im symbolischen Ergebnisbild der Objektsegmentation indexweise nach einem Pixel gesucht, das nicht vollständig von Pixeln mit demselben Index umgeben ist. Davon ausgehend wird entlang des Objektrandes solange fortgeschritten, bis der Algorithmus wieder am Ausgangspixel anlangt.

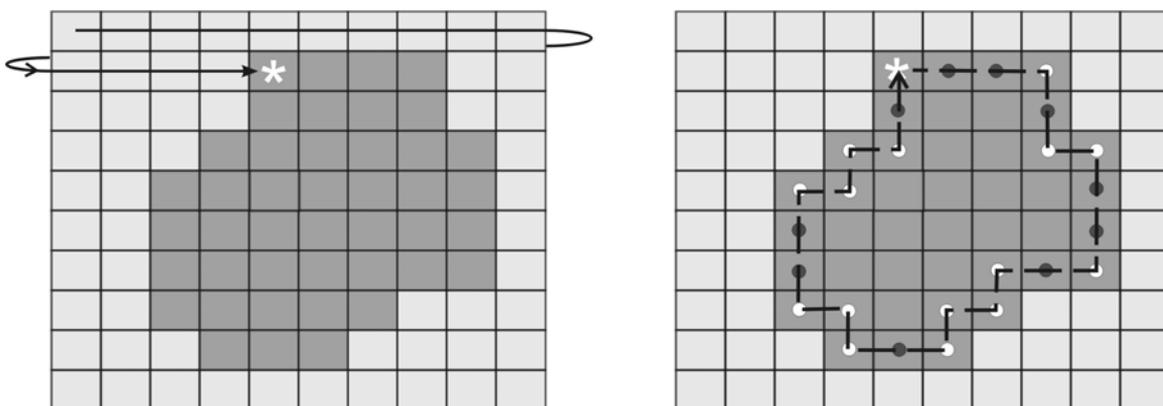


Abb. 28: Konturverfolgung für ein Segment

Die Abb. 28 zeigt dies beispielhaft. In der linken Bildhälfte ist das Auffinden des Anfangspixels (*) für die dunkelgraue Fläche dargestellt, das durch sequenzielle Untersuchung (angedeutet durch die Pfeile) der Bildelemente gefunden wird. Rechts ist die Konturverfolgung symbolisiert (Pfeile), es wird solange nach Randpunkten (gefüllte Kreise) gesucht, bis der Ausgangspunkt wieder erreicht wurde. Dabei werden aber nur solche Pixel als neue Randpunkte der Umrisslinie hinzugefügt, an denen eine Richtungsänderung vorliegt (weiße Kreise). Somit erfolgt gleichzeitig eine gewisse Ausdünnung der Objektkonturen, da nicht alle Randpunkte explizit als Begrenzungspunkte geführt werden. Trotzdem entstehen dabei meist Umrisslinien mit vielen Punkten und kurzen Teillinien, Beispiele hierfür sind in der Abb. 29 im linken Bild zu sehen.

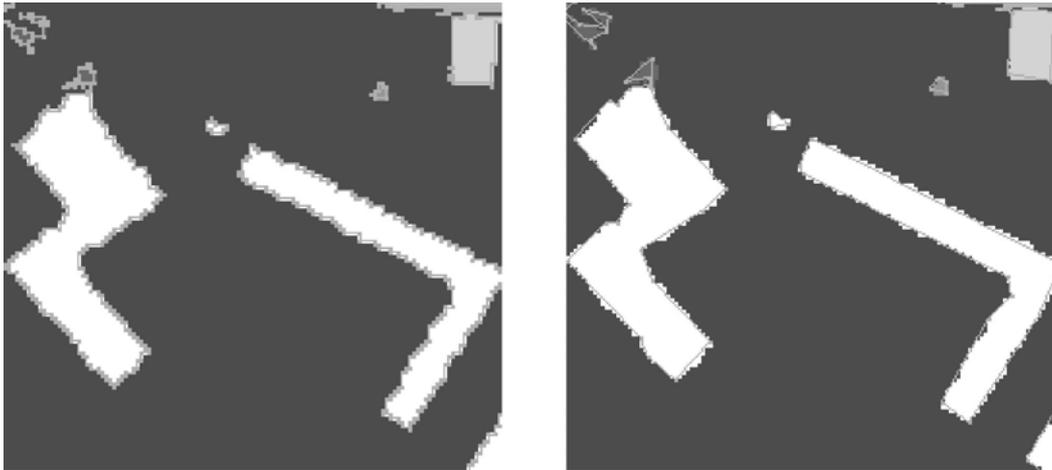


Abb. 29: Extrahierte Objektumrisse; links: direkt aus dem nDOM abgeleitete Umrisse, rechts: Umrisse nach der Glättung

UMRISSGLÄTTUNG

Zur weiteren Ausdünnung der Umrisslinien, die im vorangegangenen Kapitel beschrieben wurden, wird das Verfahren von DOUGLAS-PEUCKER (1973) benutzt. Es handelt sich dabei um ein Generalisierungsverfahren für Polygone.

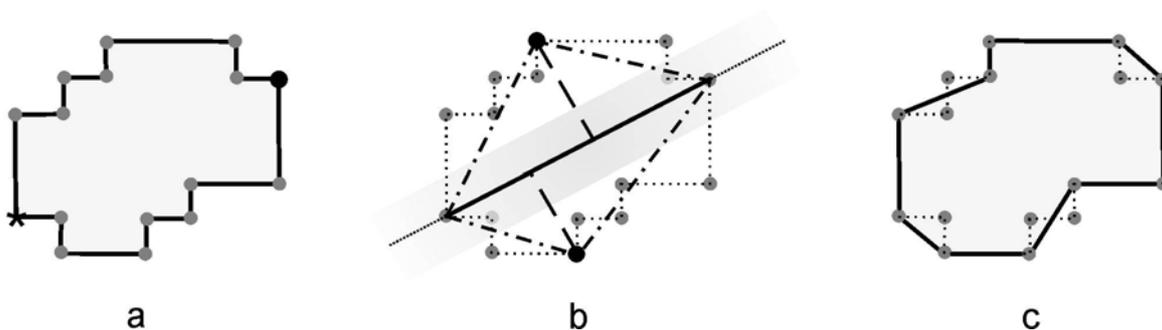


Abb. 30: Konturglättung nach dem Douglas-Peucker-Verfahren; a) Originalumrisslinie; b) Ermittlung der Extrempunkte; c) Resultierender Umriss

Abb. 30 zeigt ein Beispiel zu diesem Verfahren. Im Bildteil (a) soll ein aus Rasterdaten abgeleitetes Ausgangspolygon dargestellt sein. Im Weiteren werden nur die Stützpunkte dieses Polygons verwendet.

Zuerst wird zufällig ein Punkt gewählt (in der Abbildung mit einem Stern bezeichnet), und dann der Punkt der Punktwolke ermittelt, der vom Ausgangspunkt den größten räumlichen Abstand hat (schwarzer Punkt im Abbildungsteil a). Durch diese beiden Punkte wird eine Verbindungslinie gezogen, wie sie im Mittelteil (b) als durchgezogene schwarze Linie zu sehen ist. Nun werden die Lotabstände aller restlichen Punkte zu dieser Linie berechnet, auch *Pfeilhöhen* genannt (aus diesem Grund wird diese Art der Verfahren auch als *Pfeilhöhenverfahren* bezeichnet). Die beiden Gruppen oberhalb und unterhalb der Geraden werden jeweils separat weiterbearbeitet. Außerdem werden die Punkte vernachlässigt, die im Toleranzbereich der Linie liegen, d. h. nicht mehr als um einen definierten, festen (Abstands-)Wert entfernt liegen (im Bild ist dieser Bereich grau hinterlegt). Die beiden Punkte mit dem größten Lotabstand (gestrichelt gezeigt), werden nun als neue Stützpunkte zum Umrisspolygon hinzugenommen, falls diese größten Lotabstände nicht bereits kleiner als der vorgegebene Toleranzwert sind. Dabei wird die ursprüngliche Verbindungslinie gelöscht und durch jeweils zwei neue Linien ersetzt (im Bild strichpunktiert dargestellt).

Danach wird das Verfahren an allen vier neu entstandenen Linien entsprechend wiederholt. Jeder der verbliebenen Punkte wird bezüglich der Linie beurteilt, zu der er die geringste Pfeilhöhe aufweist. Dies wird so lange fortgeführt, bis es keine Punkte mehr gibt, die um mehr als das Toleranzmaß von einer Umrisslinie entfernt liegen (Abb. 30 c). Mit dem Toleranzwert lässt sich also somit der Grad der Generalisierung steuern. Das Douglas-Peucker-Verfahren reduziert dabei die Umrisslinie auf die zu ihrer Repräsentation wesentlichen Punkte innerhalb der vorgegebenen Toleranz.

FORMPARAMETER

Für die mit dem Douglas-Peucker-Verfahren geglätteten und auf die wesentlichen Punkte reduzierten Umrisse können nun Formparameter berechnet werden. Untersuchungen mit aus der Literatur bekannten Parametern wie z. B. *Rundheit* und *Rechtwinkligkeit* (vgl. z. B. [Castleman, 1979]), zeigten, dass diese hier nicht zur Unterscheidung der relevanten Objekte genügen, da die aus den Laserscanning-Daten extrahierten Objekte meist keine große Regelmäßigkeit aufweisen. Daher wurden weitere Parameter entwickelt, wie z. B.:

$$p_{Form,1} = \frac{\text{Summe der Seitenlängen der } n \text{ längsten Seiten}}{\text{Anzahl der Konturpunkte}} \quad (21)$$

$$p_{Form,2} = \frac{\text{Segmentfläche}}{\text{Summe der } n \text{ längsten Seiten}} \quad (22)$$

$$p_{Form,3} = \frac{\text{Segmentfläche}}{\text{Anzahl der Konturpunkte}} \quad (23)$$

In Versuchen ergab sich, dass diese Parameter unterschiedlich gut zur Unterscheidung der Objekte geeignet sind¹. Der Parameter $p_{Form,1}$ kann z. B. zur Trennung von Gebäuden und Bäumen benutzt werden, aber zumeist nicht zur Unterscheidung zwischen Gebäuden und Geländeobjekten. Das ist wiederum mit dem Parameter $p_{Form,2}$ möglich, allerdings nur für eher kleine Gebäude. Große Hallen z. B. können in dieser Komponente stark den Geländeobjekten ähneln.

Die Objektform kann bei der Objektklassifikation nur unterstützend zur Entscheidungsfindung herangezogen werden, da sich die verschiedenen Objektarten in den berechneten Parameterwerten oft nicht deutlich

¹ Zu diesem Thema wurden am IPF einige Diplom- und Studienarbeiten durchgeführt.

voneinander abgrenzen lassen. Eine signifikante Aussage allein auf Basis der Objektform ist daher meist nur für Extrembeispiele möglich, wie z. B. eine sehr unregelmäßig begrenzte Baumgruppe oder ein großes, rechteckig geformtes Gebäude.

Klassifikation

Zur Klassifikation der Objekte wird ein Verfahren auf Basis der *Fuzzy-Logik* benutzt (vgl. [VÖGTLE & STEINLE, 2003]). Das Konzept der Fuzzy Logik wird im Allgemeinen auf L. A. Zadeh zurückgeführt, der diese Theorie erstmals in einem Aufsatz mit dem Titel „Fuzzy Sets“ (Fuzzy-Mengen) vorstellte ([ZADEH, 1965]). Er schlug in diesem Artikel die Erweiterung der existierenden Mengentheorie um Objektklassen vor, deren Elemente über einen bestimmten *Zugehörigkeitsgrad* verfügen sollten, im Gegensatz zu den üblicherweise benutzten Objektklassen, bei denen die Elemente nur entweder *dazugehören* oder *nicht dazugehören* konnten. Dies begründete er damit, dass in der „Realität“ oft keine *präzisen* Zugehörigkeitskriterien angegeben werden könnten, z. B. sei es nicht möglich, Klassen wie „Lebewesen“, „schöne Frauen“ und „große Menschen“ präzise zu definieren (s. hierzu auch [BÄHR & LENK, 2002]).

Im letzten Jahrzehnt erfuhr die Fuzzy-Mengentheorie eine erhöhte Aufmerksamkeit, und es wurden sehr viele Verfahren auf dieser Basis entwickelt, z. B. in der Regelungstechnik und Mustererkennung. Aufbauend auf den Erfahrungen aus diesen Projekten beschreibt BIEWER (1997) die Eigenschaften der Fuzzy-Mengentheorie folgendermaßen:

„... Modellierung imperfekten Wissens ... subsumiert ... sowohl unscharfes als auch unsicheres Wissen. Die Fuzzy-Mengentheorie bietet ein vielfältiges Repertoire an allgemeinen Formalismen und konkreten Vorschlägen zur Modellierung beider Wissensarten, sie kann daher als Basis der Modellierung imperfekten Wissens dienen, sowohl der Unsicherheits- als auch der Unschärfemodellierung.“

Für das vorliegende Problem eignet sich die Fuzzy-Mengentheorie deshalb so gut, da hier die benutzten Merkmalsbereiche *unscharfe* Ränder besitzen, d. h. es gibt Wertebereiche, in denen nicht eindeutig entschieden werden kann, zu welcher Objektgruppe das untersuchte Objekt gehört (vgl. die Ausführungen bei den Beschreibungen der einzelnen Merkmale).

Wird ein Verfahren zur Klassifikation auf Basis der Fuzzy-Logik entwickelt, so enthält es immer auch die zwei folgenden unterschiedlichen Verfahrensschritte: die *Fuzzyifizierung* und den *Inferenzprozeß*. Unter der Fuzzyifizierung versteht man den Schritt der Abschätzung der Zugehörigkeitsgrade aller untersuchten Objekte zu den benutzten Klassen, der für jedes Merkmal getrennt durchgeführt wird. Dafür benötigt man die *Zugehörigkeitsfunktionen* (*membership functions*). Diese Zugehörigkeitsfunktionen geben den Zugehörigkeitsgrad zu einer bestimmten Klasse, basierend auf dem konkreten Wert in einem Merkmal, als Zahl im Wertebereich zwischen 0 (*keine Zugehörigkeit*) und 1 (*gesicherte Zugehörigkeit*) an. Eine Fuzzy-Menge A , d. h. hier eine bestimmte Klasse, lässt sich somit beschreiben durch:

$$A = \{x \in X \mid 0 \leq \mu_A(x) \leq 1\} \quad (24)$$

In Gleichung (24) ist die Zugehörigkeitsfunktion mit $\mu_A(x)$ bezeichnet. Sie gibt den Zugehörigkeitsgrad zur Klasse A in Abhängigkeit eines Merkmalswertes x an.

Zur Veranschaulichung sind in der folgenden Grafik die Zugehörigkeitsfunktionen im Merkmal *Anzahl signifikanter Randgradienten* (RG aus Gleichung (20)) für die Klassen *Gebäude/Bäume* und *Gelände* dargestellt.

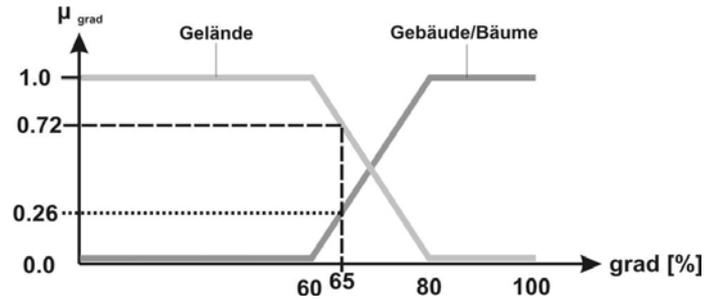


Abb. 31: Zugehörigkeitsfunktionen für die Klassen Gebäude, Bäume und Gelände im Merkmal signifikante Randgradienten

In der Abb. 31 ist für den konkreten Wert 65% Randgradienten ein Beispielswert eingezeichnet. Für ein Objekt mit diesem Merkmalswert besteht der Zugehörigkeitsgrad von 0,72 zu der Klasse Gelände und 0,26 zu den Klassen Gebäude und Bäume. Es handelt sich also wahrscheinlicher um ein Gelände- als ein Baum- oder Gebäude-Objekt.

Im *Inferenzprozeß* wird, aufbauend auf den ermittelten Zugehörigkeitsgraden zu den Klassen, eine Entscheidung über die Zugehörigkeit der Objekte zu den Klassen getroffen. Dies geschieht aufgrund von Regeln, in denen die Zugehörigkeitsgrade in den einzelnen Merkmalen zu einem Gesamt-Zugehörigkeitsgrad, getrennt für jede Klasse, verknüpft werden. Dies kann z. B. aufgrund logischer Operationen oder gewichteter Summenbildung der Zugehörigkeitsgrade geschehen. Hier wurde Letzteres gewählt:

$$\mu_A(S) = \frac{\sum_i w_{i,A} \mu_A(x_i(S))}{\sum_i w_{i,A}} \quad (25)$$

mit $w_{i,A}$ – Gewichtungsfaktor des Merkmals x_i bezüglich der Klassenzugehörigkeit zu A
 $x_i(S)$ – Wert des Merkmals x_i für das Segment S

Dies bedeutet, dass der Zugehörigkeitsgrad eines Segmentes S (in dieser Arbeit werden die gesuchten 3D-Objekte segmentiert, s. Abschnitt 3.1.1.1) zur Klasse A aus der gewichteten Summe der Einzelzugehörigkeitsgrade seiner Merkmale x_i zur Klasse A berechnet wird. Dadurch wird die Festlegung der klassen- und merkmalspezifischen Gewichtsfunktionen $w_{i,A}$ nötig, die ähnlich den Zugehörigkeitsfunktionen als stückweise lineare Funktionen definiert werden können (s. Abb. 32). Über diese Gewichtsfunktionen definiert man die Bedeutung des jeweiligen Merkmals bei der Entscheidungsfindung, abhängig von seinem konkreten Wert für das betrachtete Objekt.

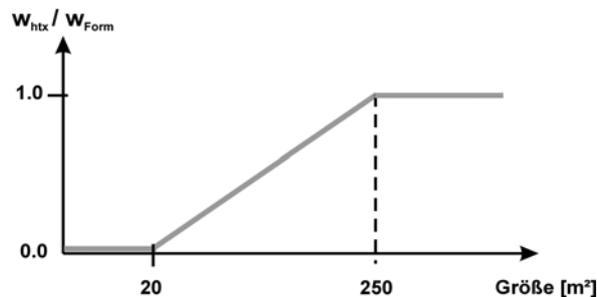


Abb. 32: Gewichtungsfunktion für die Merkmale Höhentextur und Form in Abhängigkeit von der Segmentgröße für die Klasse Gebäude

Abschließend muss nun aus den Einzelentscheidungen für jede Klasse eine Zuweisung der Objekte zu einer der vordefinierten Klassen erfolgen. Dies wird hier mithilfe des *max*-Operators (Maximum-Operator) vorgenommen, d. h. ein Objekt S wird der Klasse K_i zugewiesen, für welche es den höchsten Zugehörigkeitsgrad erreicht:

$$S \in K_i, \quad \text{wenn} \quad \mu_{K_i}(S) = \max(\mu_{K_n}) \quad \forall \quad n=1..N \quad (26)$$

In obiger Gleichung steht N für die Anzahl aller Klassen.

3.2 Geometrische Modellierung

In BILL & ZEHNER (2001) wird der Begriff geometrisches Modellieren folgendermaßen definiert:

„Unter geometrischem Modellieren versteht man die Beschreibung, Bearbeitung und Speicherung der zugrundeliegenden Geometrie von raumbezogenen Objekten, in dem analytische und approximierende Verfahren eingesetzt werden.“

Das Ziel der geometrischen Modellierung eines Objektes ist es also auch, seine Form in geeigneter Weise zu beschreiben. Dabei ist nicht allgemein definiert, was „geeignet“ bedeutet. Dies hängt von der jeweils konkreten Anwendung ab, für welche die geometrischen Modelle erzeugt werden. Hierbei wird auch nicht nur die rein technische Vorgehensweise angesprochen („Bearbeitung und Speicherung“), also ob z. B. das Ergebnis der Modellierung in Form einer CAD-Datei oder einer ASCII-Textdatei vorliegen soll, sondern auch die Konzeption und grundlegenden Annahmen zur Modellierung, wie z. B. der gewählte Abstraktionsgrad, die implizit in den „analytischen oder approximierenden Modellierungsverfahren“ zum Ausdruck kommen.

Bei einer geometrischen Modellierung „realer Objekte“, d. h. von Objekten, die nicht nur virtuell existieren, sondern z. B. konkret gebaut wurden, besteht keine Eindeutigkeit der Modellierung. Damit ist gemeint, dass z. B. bei einer Vermessung oder Nachbearbeitung einer Vermessung in einem CAD-System für ein und dasselbe Gebäude unterschiedliche Modelle entstehen können, z. B. wenn verschiedene Operateure die Modellierung vornehmen. Das liegt unter anderem daran, dass verschiedene Abstraktionen vorgenommen werden oder aber verschiedene Gebäudeelemente als repräsentativ für die Gebäudegeometrie betrachtet werden. Es kann z. B. bei einer tachymetrischen Vermessung ein Operateur die Dachbegrenzung am Rand der untersten Dachziegelreihe ansetzen, ein anderer sieht sie aber im Gegensatz dazu am Rand einer darunter installierten Regenrinne.

Die Wahl der Aufnahmemethode hat ebenfalls großen Einfluss auf den Abstraktionsgrad. Während bei z. B. bei einer Tachymeteraufnahme der Abstraktionsgrad schon bei der Datenaufnahme vom Operateur durch die Wahl der vermessenen Punkte ganz wesentlich bestimmt wird, ist die Beschränkung auf einen bestimmten Abstraktionsgrad bei anderen Aufnahmemethoden wesentlich geringer. In dieser Arbeit werden Laserscanner-DOMs verwendet, die aus Laserscanningmessungen generiert wurden. Die eigentliche Messung führt hier zu einer Punktwolke, die aus mehr oder weniger regelmäßig verteilten Punkten besteht und nicht nur aus markanten Punkten, z. B. Dachecken. Bei dieser Messung wird also nur eine geringe Abstraktion vorgenommen, die vor allem durch die Wahl der Flughöhe, und damit dem Messpunktabstand, bestimmt wird.

Zudem genügt die Realität meist nicht den allgemein akzeptierten Modellvorstellungen eines Objektes. So haben Dächer im Allgemeinen keine eindeutig bestimmbar Dacheckpunkte. Zum Beispiel wird ein Dachfirst sehr oft von tonnenförmigen Dachziegeln begrenzt und ist deshalb kein linienförmiges Objekt, was wiederum im Allgemeinen bei der Modellierung eines Daches angenommen wird. Deshalb unterliegt jede Modellierung von vornherein einer gewissen Modellierungsungenauigkeit gegenüber der „Realität“.

In dieser Arbeit sollen ausschließlich Gebäude behandelt werden. Häuser können aber auch über die oben erwähnten Modellierungsmehrdeutigkeiten hinaus in vielen unterschiedlichen Abstraktionsstufen modelliert werden. Am gebräuchlichsten ist eine relativ stark abstrahierende Repräsentation, welche die räumliche Ausdehnung, prinzipielle Dachform und signifikante Details enthält. Ein Beispiel hierfür sind die Bauvorschriften in Bebauungsplänen, die z. B. die Art der Dachform und Größe des Gebäudes, sowohl in der horizontalen als auch vertikalen Ausdehnung vorschreiben können. Aber auch die immer häufiger vorgehaltenen digitalen Stadtmodelle (siehe z. B. [FÖRSTNER, 1999], [GRÜN ET AL., 2000] oder [BRENNER & HAALA, 1998]) enthalten Gebäude meist in stark abstrahierter Form. Hierbei wird überwiegend die Dachgeometrie grob gemessen und in vereinfachter Form dargestellt, z. B. ohne Dachgauben oder Schornsteine. Der Gebäudekörper wird meist durch die Projektion der Dachränder in die Geländeebene und Ergänzung der dadurch entstehenden vertikalen Wandflächen *konstruiert*, d. h. er wird nicht direkt gemessen, weshalb die konstruierte Geometrie im Einzelfall stark von der realen Form abweichen kann. Im Grunde genommen beschränken sich diese Gebäudemodelle damit auf die Wiedergabe der realen Dachformen, was im Einzelfall einer starken Abstraktion gleichkommt. Beispiele für im Gegensatz hierzu sehr detaillierte Gebäudebeschreibungen sind Gebäudeinformationssysteme (z. B. [SCHRADER, 1995]), bei denen auch Innenräume und Versorgungseinrichtungen der Gebäude dargestellt werden.

In dieser Arbeit wurde eine Gebäudemodellierung ähnlich der Luftbild-Erfassung für 3D-Stadtmodelle durchgeführt, d. h. die Dächer der betrachteten Objekte wurden geometrisch analysiert und der Gebäudekörper konstruktiv ergänzt. Aufgrund der gewählten Methodik zur Datenerfassung, dem flugzeuggetragenen Laserscanning, sind auch nur die Gebäudedächer aus den Ausgangsdaten ableitbar, da die Sicht auf die Gebäudekörper aufgrund der quasi Nadir-Blickrichtung zumeist durch die Dächer (Dachüberstand) verdeckt ist. Es gibt verschiedene, in der Methodik grundsätzlich unterschiedliche Modellierungsverfahren, die zu Gebäudemodellen führen; die momentan gebräuchlichsten werden im Folgenden kurz vorgestellt.

3.2.1 Modellierungsverfahren

Die Verfahren zur Modellierung von Gebäudegeometrien unterscheiden sich im Wesentlichen dadurch, wie gut sie die durch eine Vermessung gewonnenen Daten eines Gebäudes wiedergeben können oder sollen. Es gibt Varianten, bei denen die Messwerte nur die Entscheidungsgrundlage dafür liefern, welchem Prototyp ein Gebäude am ehesten entspricht. Der entsprechende Prototyp wird ausgewählt und an die gemessenen Daten angepasst, z. B. in seinen Dimensionen und der Dachneigung; diese Verfahren werden als modellgetrieben bezeichnet. Dem entgegen stehen die datengetriebenen Methoden. Dabei ist das Ziel, die Daten möglichst gut zu repräsentieren und nur sehr allgemeine Modellvorstellungen zu benutzen. Diese Verfahren sind sehr flexibel und können auch zur Modellierung außergewöhnlicher Gebäudeformen eingesetzt werden (z. B. bei Gebäuden mit dreieckigem Grundriss, vgl. Abb. 33); deshalb werden sie oft auch als generische Verfahren bezeichnet.



Abb. 33: Ausschnitt aus einem Luftbild, in dem ein Gebäudekomplex mit teilweise dreieckigem Grundriss abgebildet ist

Die heute gebräuchlichsten Modellierungsverfahren (s. z. B. [BALTSAVIAS ET AL., 2001]) lassen sich bezüglich der resultierenden Modelle einteilen in:

1. **Parametrisierte Prototypen:** Es werden Prototypen für Gebäudeformen vorgehalten, z. B. Gebäude mit Flachdach, Satteldach oder Walmdach. Der am Besten angepasste Grundtyp wird gesucht und dessen Parameter so gesetzt, dass die Abweichungen zu den gemessenen Daten, im Falle des Laserscannings z. B. zu der gemessenen Punktwolke, möglichst gering wird (s. z. B. [LÄBE & GÜLCH, 1998] oder [HANSON ET AL., 2001]). Die Entscheidung über den geeignetsten Grundtyp wird dabei entweder interaktiv von einem Operateur getroffen oder aber z. B. über einen Best-Fit-Algorithmus gesucht, bei dem die Variante mit den geringsten Abweichungen zu den Messdaten gesucht wird. Es ist *nicht* möglich, Geometrien wiederzugeben, zu denen kein Grundtyp besteht. Sind z. B. keine Grundformen für kuppelförmige Dächer vorgesehen, so können entsprechend gestaltete Dächer nur durch die im Prototypensatz bestanpassende Form repräsentiert werden, wodurch es zu extremen Verfälschungen kommen kann. Diese Verfahren werden heute vor allem dort eingesetzt, wo semi-automatische Verfahren für großflächige Modellierungsaufgaben, z. B. größere Stadtgebiete, benutzt werden (vgl. [WANG, 1999]).
2. **CSG-Modelle:** Laut BILL & FRITSCH (1994) bedeutet dies *Konstruktion mit Raumprimitiven (Constructive Solid Geometry)*. Hierfür wird ein Satz geeigneter geometrischer (Elementar-)Grundformen, wie z. B. Quader, Zylinder und Kegel vorgehalten, die durch Schnitt- und Vereinigungsoperationen zur gesuchten Geometrie zusammengesetzt werden (s. z. B. [ENGLERT & GÜLCH, 1996]). Damit ist im Prinzip jede Gebäudegeometrie wiederzugeben, es können aber z. T. sehr aufwendige Konstruktionsoperationen nötig sein. Vor allem bei der Visualisierung so modellierter Objekte kann deshalb erhebliche Rechenzeit benötigt werden. Es ist aber eine stark intuitive Art der Modellierung. Durch die Nutzung von verschiedenen Grundformen werden gewisse Eigenschaften zwangsweise vorgegeben, wie z. B. Rechtwinkligkeit oder Parallelität von Seiten. Es wird außerdem schon implizit eine Interpretation der Modelle durch die Nutzung bekannter Grundelemente zur Verfügung gestellt. Bei bestimmten Anwendungen führt dies zu großen Vereinfachungen, CSG-Modelle sind z. B. bei Konstruktionsaufgaben in CAD-Systemen sehr beliebt.
3. **Prismatische Modelle:** Repräsentation der Gebäude durch einen polygonalen Grundriss, vertikalen Wänden an seinen Rändern und einem ebenen, im Allgemeinen horizontalen (Flach-)Dach. Hier können die Gebäude, abhängig von der realen Dachform, gegebenenfalls stark verfälscht wiedergegeben werden. Allerdings wird der jeweilige Grundriss exakt, und mit der berechneten mittleren Dachhöhe (die dann als Höhe der Dachfläche benutzt wird) ein für das Gebäude repräsentativer Wert wiedergegeben. Je nach Anwendung hat diese Technik enorme Vorteile, da relativ einfache und damit bei großflächigen Anwendungen schneller analysierbare Gebäudemodelle entstehen (s. z. B. [STILLA, 2000]).
4. **Polyeder:** Beschreibung durch einen „Vielflach“ (Polyeder), d. h. durch einen Satz ebener Randflächen. Dies ist eine der allgemeinsten Darstellungsmöglichkeiten, die nur Gebäude mit stark gekrümmten Dachflächen ausschließt bzw. entsprechend stärker abstrahiert wiedergibt. Da aber die Granularität, d. h. die Größe der kleinsten verwendeten Flächenstücke, meist variabel wählbar ist, sind gute Approximationen, die dann aus entsprechend mehreren kleinen ebenen Flächenstücken bestehen, im Allgemeinen möglich (s. z. B. [AMERI, 2000] oder [STEINLE & VÖGTLE, 2001]).

Die Auswirkungen der verschiedenen Modellierungsansätze auf die resultierende Gebäudebeschreibung werden in Abb. 34 dargestellt. Die modellgetriebenen Techniken, parametrisierte Prototypen (Abb. 34 b) und CSG-Modellierung (Abb. 34 c), führen zu sehr regelmäßigen und im Allgemeinen relativ einfachen Modellen. Im Gegensatz dazu führen die datengetriebenen Ansätze, Prismatische Modelle (Abb. 34 d) und Polyeder (Abb. 34 e), meist zu viel komplexeren und teilweise asymmetrischen Geometrien. Das rührt daher, dass sie sich stärker den gemessenen Daten anpassen (sollen) und damit auch deren Fehler, Unsicherheiten und Zufälligkeiten wiedergeben, was in einer Verzerrung der Gebäudegeometrien münden kann und meist auch den Komplexitätsgrad ansteigen lässt. Zum anderen weisen reale Gebäude aus unterschiedlichsten Gründen manchmal erhebliche Asymmetrien auf. Wie stark diese Effekte zum Tragen kommen, hängt aber

ganz wesentlich vom gewählten Abstraktionsgrad ab. Werden die Gebäude sehr stark abstrahiert, d. h. nur grob erfasst und modelliert, also in geringer Auflösung bearbeitet, entstehen wiederum tendenziell einfache und eher symmetrische Modelle.

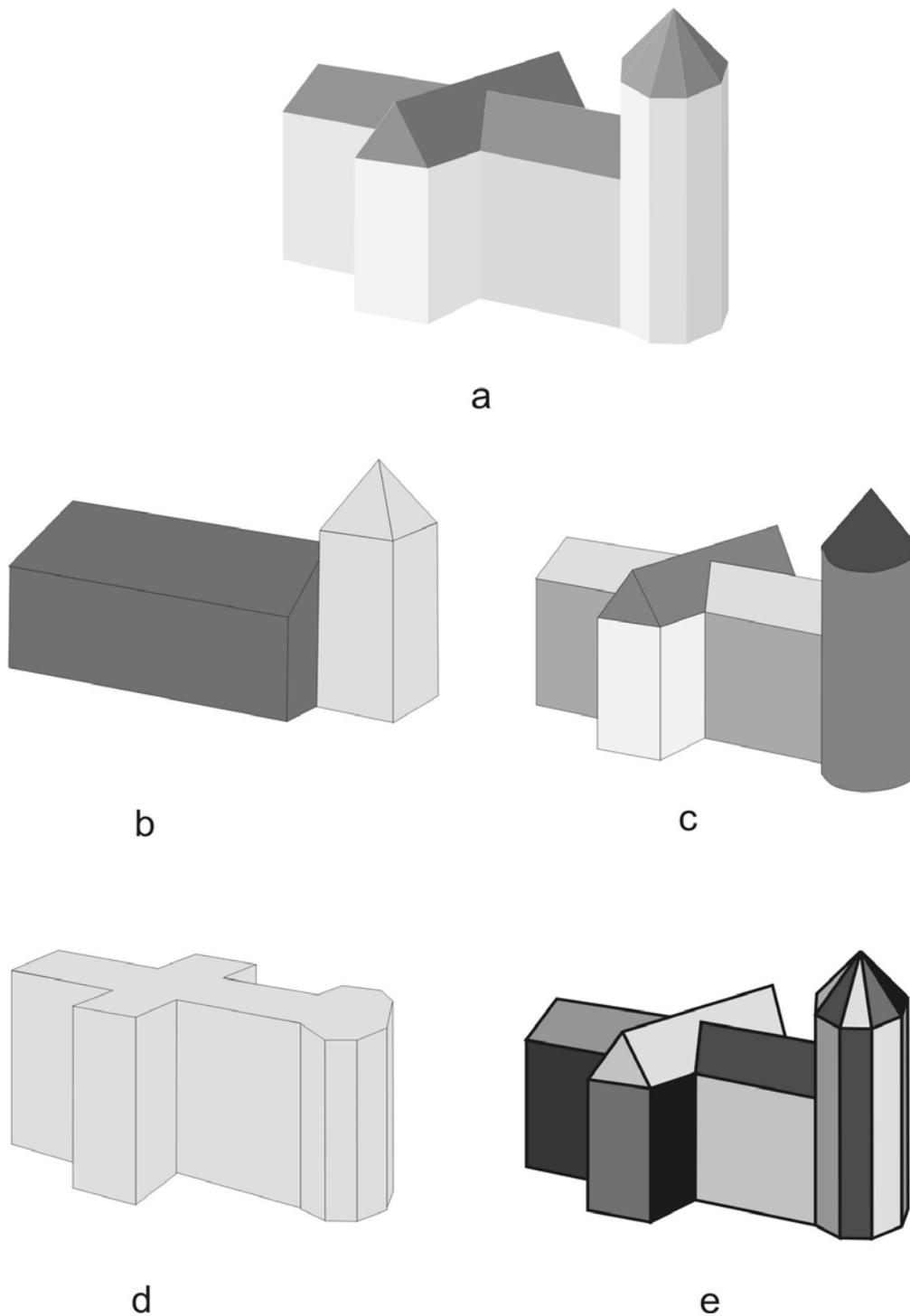


Abb. 34: Verschiedene Modellierungstechniken; a) Original, b) parametrisierte Prototypen, c) CSG-Modell, d) prismatisches Modell, e) Polyeder-Modell; die einzelnen Modellteile sind jeweils in einem anderen Grauton eingefärbt (außer bei a: Grauwerte wurden nach den Beleuchtungsverhältnissen gewählt)

3.3 Topologische Modellierung

Die topologische Modellierung kann als Teil der geometrischen Modellierung aufgefasst werden. Sie wird aber aufgrund ihrer Komplexität und der eingesetzten, ganz unterschiedlichen Methodiken in dieser Arbeit gesondert behandelt.

Neben der Ermittlung von geometrischen Grundbestandteilen eines Objekts, den geometrischen Primitiven, sind die Erfassung und Abbildung deren Beziehungen untereinander zur vollständigen Modellierung eines Objekts notwendig. Es ist dieser Teilaspekt, den man als topologisches Modellieren bezeichnet (s. [BILL & ZEHNER, 2001]):

„Unter topologischem Modellieren versteht man die Beschreibung, Bearbeitung und Speicherung der Beziehungen von räumlichen Objekten. Als Hilfsmittel dienen dabei topologische Invarianten und Konsistenzbedingungen.“

Die möglichen Beziehungen von räumlichen Objekten können aus der Definition der topologischen Eigenschaften abgelesen werden:

„Topologische Eigenschaften: Eigenschaften, die eine relative Beziehung/Abhängigkeit zwischen räumlichen Elementen in einer Datenbank definieren. Sie enthalten Nachbarschaften, Verbundenheit und Enthaltensein (Adjazenz, Konnektivität, Containment), aber nicht Winkel und Länge/Entfernung. Also ist die relative Position geographischer Phänomene unabhängig von ihrer exakten Lage ...“ (ebenfalls [BILL & ZEHNER, 2001]).

Topologische Beziehungen beschreiben also Nachbarschaft, Verbundenheit und Enthaltensein. Bei der Gebäudemodellierung in dieser Arbeit werden nur Nachbarschaftsbeziehungen behandelt. Aufgrund des speziellen Segmentierungsansatzes werden Objekte stückweise durch disjunkte Flächen approximiert, wodurch es keine Enthaltensein-Beziehungen geben kann, d. h. die Flächen können sich nicht überlagern. Die Verbundenheits-Beziehungen werden nicht explizit geführt, da sie nötigenfalls aus den Nachbarschaftsbeziehungen abgeleitet werden könnten. Zudem dienen Verbundenheitsbeziehungen im Allgemeinen der Wegesuche in Graphen. In Kapitel 4.2.2 wird zwar eine so genannte Kreissuche durchgeführt, die eine ganz bestimmte Art von Wegesuche ist, sie kann aber rein aufgrund der Überprüfung von Nachbarschaften durchgeführt werden.

3.3.1 Nachbarschaftsbeziehungen

Der Hauptaspekt der topologischen Modellierung sind die Nachbarschaften zwischen Objekten. Die Formulierung und Analyse der Nachbarschaftsbeziehungen ist Aufgabe der *Graphentheorie*, einem Teilgebiet der algebraischen Topologie (vgl. [BILL & ZEHNER, 2001]). Man unterscheidet in der Graphentheorie zwischen Nachbarschaften gleichartiger Objekte, was als *Adjazenz* bezeichnet wird, und Nachbarschaften zwischen verschiedenartigen Objekten, *Inzidenz* genannt.

Im vorliegenden Modellierungsansatz treten Adjazenzbeziehungen und Inzidenzbeziehungen nicht unabhängig voneinander auf. Als geometrische Primitive werden Flächen, Linien und Punkte benutzt. Sie folgen einer hierarchischen Ordnung, das bedeutet sie stehen in definierter Beziehung zueinander, bei der es höhere Objekte gibt, die sich aus Primitiven niedriger Ordnung aufbauen. Das Primitiv niedrigster Ordnung stellt der Punkt dar. Aus Punkten können Linien zusammengesetzt werden, die wiederum zur Darstellung von Flächen benutzt werden.

Die Gebäudemodellierung in dieser Arbeit ist flächenbasiert, d. h. aus den Basisdaten werden Flächen abgeleitet. Sie sind aber immer durch Linien begrenzt, die wiederum aus Punkten bestehen. Die Primitive können also nie unabhängig voneinander auftreten, so dass es für Adjazenzbeziehungen auch immer zugehörige Inzidenzbeziehungen gibt. Darüber hinaus repräsentieren andersartige Primitive stets die Verbindung zwischen Gleichartigen. Dazu sei das Beispiel in Abb. 35 näher betrachtet, in der ein schematisches Gebäudemodell und seine Primitive dargestellt sind. Flächen sind in der Grafik mit Zahlen, Linien bzw. Kanten mit Kleinbuchstaben und Punkte bzw. Ecken oder Knoten mit Großbuchstaben beschriftet. Hier sind z. B. die Flächen 1 und 4 adjazent. Sie sind dies über ihre gemeinsame Kante e, die auch die adjazenten Punkte C und D verbindet. Die Linie e ist also zu 1,4, C und D inzident und stellt jeweils die geometrische Realisierung der Adjazenzbeziehungen dar.

Zu beachten ist, dass in dem hier beschriebenen Modellierungsansatz die im Vorangegangenen beschriebene Primitivehierarchie nicht mit der Extraktionsreihenfolge verwechselt werden darf. Bei der Primitiveextraktion wird in *diesem* Ansatz die Objekthierarchie gleichsam umgedreht, d. h. es werden zuerst die Primitive der höchsten Hierarchiestufe – die Ebenen – extrahiert, darauf aufbauend die Linien und schließlich die Punkte, also die Primitive der niedrigsten Hierarchiestufe.

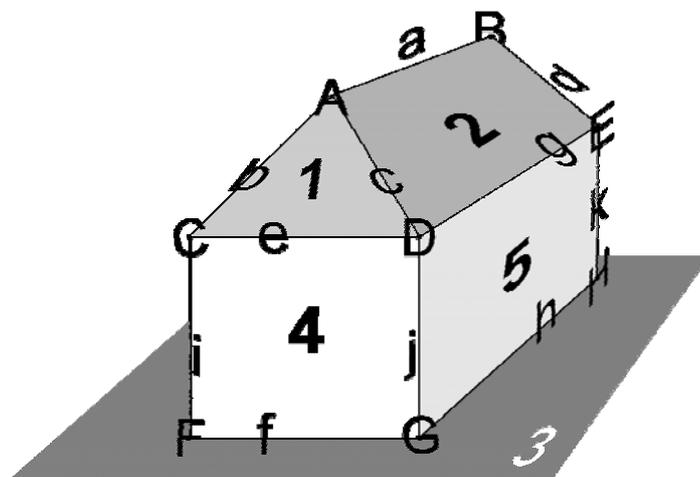


Abb. 35: Schematisches Gebäudemodell mit beschrifteten geometrischen Primitiven

3.3.2 Repräsentation der Nachbarschaftsbeziehungen

Es gibt vielfältige Möglichkeiten zur Abbildung von Nachbarschaftsbeziehungen. Visuell am leichtesten interpretierbar ist die Darstellung als Graph. Ein Beispiel hierzu ist in Abb. 36 zu sehen. Es handelt sich dabei um eine übliche Darstellung der topologischen Beziehungen zwischen Gebäudeprimitiven, wobei in der Abbildung hauptsächlich der Zusammenhang zwischen Flächen und ihren Kanten (mit Kleinbuchstaben bezeichnet) wiedergegeben ist (die Grafik gibt einen Teil des in Abb. 35 dargestellten Gebäudes wieder).

Hier werden allerdings nur die Nachbarschaften zwischen verschiedenartigen Primitiven explizit dargestellt (Verbindungslinien, vgl. [BÄHR, 2001]), die Beziehungen zwischen gleichartigen Elementen sind nur implizit enthalten. Als Beispiel sei die Fläche 2 herausgegriffen. Sie ist mit den Flächen 1 und 5 benachbart. Dies kann man über die gemeinsamen Kanten ermitteln, in diesem Fall über die mit 1 gemeinsame Kante c bzw. die mit 5 gemeinsame Kante g.

Es sind aber z. B. auch Darstellungen in tabellarischer oder Listenform möglich, bei denen jeweils die Nachbarpaare explizit angegeben werden.

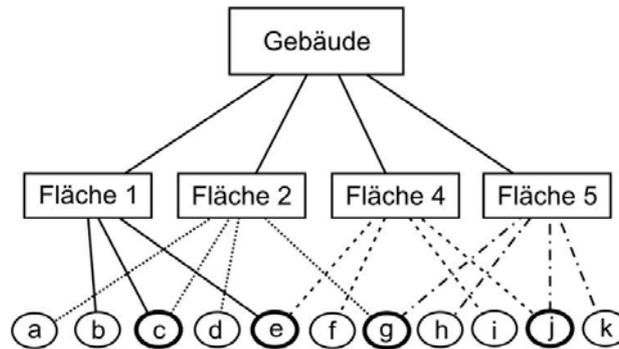


Abb. 36: Ausschnitt aus der Darstellung der geometrischen Primitive eines Gebäudes und ihrer Topologie als Graph (zur besseren Darstellung sind die zu einer Fläche gehörenden Nachbarbeziehungen jeweils andersartig gestrichelt, und Kanten mit mehreren anliegenden Flächen fett eingekreist dargestellt)

Um die Topologie im Computer, also mathematisch, abzubilden, sind im Allgemeinen Inzidenz- und Adjazenzmatrizen besonders vorteilhaft. Sie enthalten in codierter Form die wechselseitigen Beziehungen der Primitive. Die Inzidenzmatrix lässt sich nach VOLKMANN (1991) in einer allgemeinen Form, beispielhaft für die Beziehungen zwischen Punkten und Linien, bzw. Knoten und Kanten, folgendermaßen definieren:

$$b_{ij} = \begin{cases} 0: & X_i \text{ und } k_j \text{ nicht inzident} \\ 1: & X_i \text{ ist Anfangspunkt von } k_j, k_j \text{ ist keine Schlinge} \\ -1: & X_i \text{ ist Endpunkt von } k_j, k_j \text{ ist keine Schlinge} \\ -0: & X_i \text{ und } k_j \text{ nicht inzident, } k_j \text{ ist eine Schlinge} \end{cases} \quad (27)$$

Dabei bezeichnet X_j einen Knoten, k_j eine Kante und b_{ij} das Element der Inzidenzmatrix an der Stelle i, j , also die Beziehung zwischen dem i . Knoten und der j . Kante. Als „Schlinge“ werden Kanten bezeichnet, die von einem Punkt ausgehen und wieder im selben Punkt enden.

In der vorliegenden Arbeit wird die topologische Modellierung etwas vereinfacht, es ist z. B. meist nicht notwendig gerichtete Kanten, also Kanten unter Berücksichtigung ihrer Laufrichtung, zu nutzen. Lediglich bei der Erstellung der Visualisierungsmodelle aus den Deskriptionsmodellen werden gerichtete Kanten benötigt (siehe Kapitel 4.3.5). Die Visualisierungsmodelle werden aber nicht weiter analysiert, so dass die oben angesprochene Vereinfachung möglich ist.

Außerdem können bei dem gewählten Ansatz keine Schlingen auftreten. Somit vereinfacht sich (27) zu:

$$b_{ij} = \begin{cases} 0: & X_i \text{ und } k_j \text{ nicht inzident} \\ 1: & X_i \text{ ist Endpunkt von } k_j \end{cases} \quad (28)$$

Hierbei wird der Begriff Endpunkt nicht im Sinne eines gerichteten Graphen verstanden, d. h. beide eine Kante begrenzenden Punkte werden so bezeichnet.

Im Folgenden ist beispielhaft eine Inzidenzmatrix für die in Abb. 35 dargestellte Figur aufgeführt. Es ist die Kanten-Knotenmatrix angegeben, d. h. die Inzidenzmatrix, die in Spaltenrichtung die Kanten und in Zeilenrichtung die Knoten enthält; zur besseren Lesbarkeit sind die Kanten- und Knotenbezeichnungen angeschrieben, dies ist aber eigentlich nicht Teil der Matrix. Einzig die Ziffern stellen die Inzidenzmatrix dar, die im Folgenden in Tabellenform wiedergegeben ist:

	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
A	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
B	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
C	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0
D	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0
E	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1
F	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
G	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0
H	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1

Tab. 1: Kanten-Knoten-Inzidenzmatrix zu der in Abb. 35 dargestellten Figur in Tabellenform

Die Adjazenzmatrix (A) lässt sich aus der Inzidenzmatrix (B) berechnen. Dabei ist dies jeweils für die Elemente möglich, die bei der Inzidenzmatrix in Zeilenrichtung angegeben werden, im obigen Beispiel wären dies die Knoten. Die Adjazenzmatrix lässt sich berechnen zu:

$$A = B^T B \quad (29)$$

Im Allgemeinen lautet die Vorschrift zur Aufstellung der Adjazenzmatrix (der auch die berechnete Adjazenzmatrix genügt):

$$a_{ij} = \begin{cases} 0: & i \text{ und } j \text{ sind nicht adjazent, } i \neq j \\ 1: & i \text{ und } j \text{ sind adjazent, } i \neq j \\ n: & \text{Anzahl der Elemente, zu denen } i \text{ adjazent ist, } i = j \end{cases} \quad (30)$$

Bei der Verwendung dieser Matrizen ist es immer notwendig, die Zuordnung der Elemente zu der jeweiligen Zeile oder Spalte mit abzulegen, da die Matrizen sonst nicht benutzt werden können. Dies kann dann z. B. in Vektorform geschehen, bei der die jeweilige Position im Vektor der Position in der Matrixzeilen- oder -spaltenrichtung entspricht.

Die Adjazenzmatrix der Knoten des Beispiels, berechnet aus der zuvor gezeigten Inzidenzmatrix, lautet:

	A	B	C	D	E	F	G	H
A	3	1	1	1	0	0	0	0
B	1	2	0	0	1	0	0	0
C	1	0	3	1	0	1	0	0
D	1	0	1	4	1	0	1	0
E	0	1	0	1	3	0	0	1
F	0	0	1	0	0	2	1	0
G	0	0	0	1	0	1	3	1
H	0	0	0	0	1	0	1	2

Tab. 2: Knoten-Knoten-Adjazenzmatrix

Aus dieser Matrix lässt sich nun die Adjazenz der Knoten ablesen. Man kann z. B. aus dem Diagonalelement für Knoten D ablesen, dass er als einziger zu vier anderen Knoten adjazent ist. Welche dies sind, kann man anhand der mit 1 bezeichneten Elemente in seiner Spalte bzw. Zeile ablesen. Hier sind dies also die Knoten A, C, E und G (vgl. Abb. 35).

4 Gebäudemodellierung

Die Gebäudemodellierung, die für diese Arbeit entwickelt wurde, ist den datengetriebenen Verfahren vom Typ *Polyeder-Modellierung* zuzuordnen (vgl. Kapitel 3.2.1). Es wurde darauf geachtet, möglichst geringe Einschränkungen in Bezug auf die Modellierbarkeit unterschiedlichster Geometrien vorzunehmen. Im Wesentlichen ist das Verfahren auf die Repräsentation von Objekten mit planen Randflächen beschränkt, was aber auf die meisten künstlich geschaffenen Objekte, wie Gebäude, ohnehin in Näherung zutrifft.

Das gewählte Verfahren gibt nicht explizit einen genauen Abstraktionsgrad der Dachgeometriemodellierung vor. Vielmehr kann er durch die Vorgabe maximal zulässiger Abweichungen von den gemessenen Laserscannerdaten von einem Nutzer des Verfahrens gesteuert werden. Somit lässt sich das Verfahren an die jeweiligen Vorgaben in einer konkreten Anwendung anpassen.

Methodisch lässt sich das Verfahren grob in die Unterpunkte *Extraktion der Objektbestandteile*, *Topologie-Ermittlung* und *Objektgenerierung* unterteilen. Die Beispiele im Folgenden zeigen durchgehend Gebäude; das Verfahren ist aber nicht auf sie beschränkt.

Modelle bestehen im Allgemeinen aus Teilobjekten oder Einzelmerkmalen, die entsprechend dem gewählten Modellansatz zusammengefügt werden. Zum Beispiel kann ein bestimmtes mathematisches Modell, wie z. B. eine Transformationsformel, aus Matrizen, Vektoren und Skalaren bestehen, die durch mathematische Operationen verbunden sind. Bei geometrischen Modellen gibt es im Allgemeinen geometrische Primitive, die durch die Topologie, also der Beschreibung ihrer gegenseitigen Lage zueinander, verknüpft werden.

Das wichtigste geometrische Primitiv ist in dieser Anwendung die Fläche, worauf der Begriff des Polyeders schon hinweist. Dazu werden unter Benutzung eines speziellen Segmentierungsalgorithmus Ebenen direkt aus mittels Laserscanning-Verfahren erfassten DOMs extrahiert. Aufgrund der topologischen Beziehungen werden die gefundenen Ebenen miteinander geschnitten, wodurch Gebäudekanten sowie Gebäudeecken, und somit letztendlich abgegrenzte Ebenen, also Flächen, entstehen. Die so gefundenen geometrischen Grundprimitive, also Punkte, Linien und Flächen, werden in einem letzten Schritt zu einem Vektormodell zusammengesetzt, das z. B. in dem im CAD-Bereich weit verbreiteten dxf-Format (**d**rawing **e**xchange **f**ormat, s. Kapitel 4.3.5) abgespeichert wird.

4.1 Extraktion der Objektbestandteile

Die Extraktion der Objektbestandteile umfasst die Ermittlung aller geometrischen Primitive, welche die Gebäudegeometrie hinreichend beschreiben. Aufgrund der Modellannahme, dass sich Gebäude durch plane Flächen approximieren lassen, können Linien und Punkte nur als begrenzende Elemente der Flächen auftreten, nicht als eigenständige Objektbestandteile. Das bedeutet, würde man z. B. Antennen als Bestandteil von Gebäuden ansehen, dann würden sie durch kleine Flächenstücke und nicht als einfache Linien modelliert werden müssen.

Als Ausgangsdaten werden hier digitale Oberflächemodelle mit einer Rasterweite von 1m verwendet (vgl. Kapitel 2.1.5). Es wäre zwar möglich, in diesen Datensätzen nach Linien und Punkten zu suchen, sie können aber nur sehr ungenau bestimmt werden. Durch die Rasterung werden z. B. Gebäudeänder, je nach ihrer Orientierung bezüglich des Bildrasters, nicht als geradlinige Konturen, sondern stufenartig dargestellt. Davon hängt auch sehr stark ab, ob eine entsprechende Kante überhaupt als eine durchgehende Linie interpretiert werden kann, oder ob man sie unter Umständen als mehrere verschiedenartig orientierte Linienstücke auffassen müsste (vgl. Abb. 37).



Abb. 37: Problematik unscharfer Gebäudeänder in Laserscanning-Datensätzen; links: Ausschnitt aus DOM, exemplarisch angedeutet ist extrahierbarer Gebäuderand (gestrichelte Linie); rechts: Luftbild des Bereichs (© Stadt Karlsruhe)

Gebäudeecken sind somit auch nicht eindeutig bzw. nicht direkt mit hoher Genauigkeit erfassbar. Es sind vielmehr meist mehrere Pixelpositionen möglich. Deshalb wurde hier auf eine direkte Extraktion dieser Primitive verzichtet und nur die Ebenen aufgrund einer robusten Bestimmung auf der Basis sehr vieler Beobachtungen direkt aus den DOMs extrahiert. Weitere geometrische Primitive werden dann – ausgehend von diesen Ebenen – abgeleitet, also indirekt ermittelt und nicht direkt gemessen; sie können so aber deutlich zuverlässiger bestimmt werden – trotz Störeinflüssen wie Rauschen, Messfehlern und Ausreißern (z. B. Antennen, Kamine, etc.).

4.1.1 Flächenextraktion

Zur Bestimmung der Dachflächen wird die in einem Bild repräsentierte Grauwertdarstellung der DOMs benutzt. In diesen Höhenbildern werden einzelne plane Ebenenstücke gesucht, die als Dachflächen(-stücke) interpretiert werden können. Dazu wird ein spezielles Flächen-segmentierungsverfahren benutzt, also ein Verfahren zur Unterteilung des Bildes in zusammengehörende Bereiche (auch Segmente genannt). Es wurde als Flächenwachstumsverfahren, oder auch *region-growing*-Verfahren, realisiert.

Bei Flächenwachstumsverfahren wird zunächst ein Kristallisationspunkt oder auch eine Kristallisationsfläche gesucht. Dies ist ein Pixel oder ein Verbund benachbarter Pixel, die einer Ausgangsbedingung genügen müssen, wie z. B. geringen Grauwertdifferenzen zueinander. Ausgehend vom jeweiligen Kristallisationsbereich werden alle benachbarten Bildelemente einzeln mit dem *Homogenitätsprädikat* für das betrachtete Segment auf ihre Zugehörigkeit geprüft. Dies bedeutet, dass ein Bildelement innerhalb gewisser Grenzen der jeweiligen Modellannahme für das Segment entsprechen muss, bei einer Hinzunahme also die Homogenität der Fläche gewährleistet bleibt, um als Mitglied des Segments interpretiert und entsprechend ausgewiesen zu werden.

4.1.1.1 Bestimmung des Kristallisationsbereichs

Im vorliegenden Fall wurde ein Kristallisationsbereich gewählt. Innerhalb eines Bearbeitungsbereichs – dessen Größe variabel gewählt werden kann, meist aber zu 3 x 3 Pixel festgelegt wird – wird zuerst die

mittlere Höhenabweichung (dh_m) aller Pixel zum Zentralpixel ($g(c_0, r_0)$) berechnet, und dann die Anzahl der Pixel ermittelt, die nicht mehr als die mittlere Höhenabweichung zusätzlich einem Toleranzfaktor (dh_t) von der Höhe des Zentralpixels abweichen:

$$dh_m = \frac{\sum_{r=-b_r}^{b_r} \sum_{c=-b_c}^{b_c} (g(c_0 + c, r_0 + r) - g(c_0, r_0))}{(2 * b_r + 1)(2 * b_c + 1)} \quad (31)$$

$$Anz = \sum_{r=-b_r}^{b_r} \sum_{c=-b_c}^{b_c} \{ 1 \mid g(c_0 + c, r_0 + r) - g(c_0, r_0) < (dh_m + dh_t) \} \quad (32)$$

In diesen Formeln bezeichnet g einen Grauwert im Bild – das ist hier der Höhenwert eines Elements – b_c und b_r stehen für die Zeilen- und Spaltenbreite des Bearbeitungsbereichs. In Formel (32) ist ausgedrückt, dass die Variable Anz (Pixel-Anzahl) jedes Mal um eins erhöht wird, wenn ein Pixel innerhalb des Bearbeitungsbereichs nicht mehr als die berechnete mittlere Höhendifferenz zusätzlich eines Toleranzfaktors von der Zentralpixelhöhe abweicht.

Die mittlere Höhenabweichung ist zwar kein geeignetes Maß zur direkten Entscheidung über die Flächenzugehörigkeit eines Punktes, gibt aber in erster Näherung die Flächenneigung wieder. Außerdem sind bei stark geneigten Flächen die Einzelpunkt-Höhenunterschiede insgesamt relativ groß, so dass kein absolut gesetzter Schwellwert benutzt werden kann, falls auch die Segmentierung dieser Flächen erwünscht ist.

Das Toleranzmaß wird nicht nur wegen der zu erwartenden Abweichungen an den höchsten und tiefsten Stellen der Dachflächen im Bearbeitungsbereich eingeführt, sondern auch weil eine gewisse Generalisierung der Dachgeometrie erwünscht ist. In der Realität sind Dachflächen nicht notwendigerweise plan, sie können leicht gekrümmt, unregelmäßig oder mit kleinen Unstetigkeitsstellen behaftet sein. Zusätzlich ist die spezifische Charakteristik der Laserscannermessungen zu beachten, d. h. systematische (z. B. durch die Footprint-Problematik, s. Kapitel 2.1.4.1) und zufällige Messunsicherheiten. Bei einer genauen Modellierung der gemessenen Laserdaten könnten deshalb – bedingt durch die erwähnten Effekte – gegebenenfalls sehr viele kleine Ebenenstücke zu bilden sein, die aber aufgrund ihrer geringen Größe nur sehr ungenau bestimmt werden könnten. Es wird deshalb eine gewisse Vereinfachung zugelassen.

Das Toleranzmaß wird aus der zu erwartenden Messgenauigkeit und der (nutzerdefinierten) zulässigen Abweichung der Dachpunkte von ebenen Approximationen der Dachflächen abgeleitet. Gerade der zuletzt erwähnte Faktor ist aber insofern unscharf, da er im Prinzip vom jeweiligen Anwender abhängt. Im vorliegenden Fall wurde versucht, ihn empirisch aus verschiedenen realen Dachgeometrien zu gewinnen.

Abb. 38 zeigt beispielhaft die Fotografie eines Daches, an dessen unterem Rand eine schmale Fläche existiert, die in der Ausrichtung von der übrigen Fläche leicht abweicht. Da sie aber nur relativ gering unterschiedlich ist, soll sie hier zur größeren Fläche (in der Abbildung weiß, transparent unterlegt) dazugezogen werden. Das bedeutet aber, dass die Abweichungen ihrer Flächenpunkte zur Verlängerung der größeren Dachfläche in diesen Bereich akzeptiert werden sollen; in der Abbildung symbolisieren die weißen Doppelpfeile diese Abweichung bezüglich der Verlängerung einer Falllinie der größeren (weiße gestrichelte Linie) und einer Falllinie der kleineren Fläche (schwarze gestrichelte Linie).

Im vorliegenden Fall wurde ein Toleranzmaß von 70 cm gewählt; es besteht aus der angenommenen Messgenauigkeit der DOM-Punkte von ca. ± 20 cm in der Höhe und einer Abweichung von höchstens ± 50 cm der Dachpunkte von planaren (approximierten) Dachflächen.



Abb. 38: Foto eines Daches mit „gekrümmt auslaufendem“ Rand

4.1.1.2 Homogenitätsprädikat

Nach Bestimmung des Kristallisationsbereichs wird für alle benachbarten Pixel der jeweilige Wert der Homogenitätswahrscheinlichkeit bei Hinzunahme des Punktes zur aktuell betrachteten Region ermittelt. Das bedeutet, es wird die Wahrscheinlichkeit bestimmt, mit welcher der Höhenwert des betrachteten Punktes eine Beobachtung der Region an den Punktkoordinaten darstellt.

Der Ansatz beruht auf der Annahme, dass sich die in einem Bild dargestellten Grauwerte aus dem „Wert“ der Region, zu der sie gehören, an der jeweiligen Stelle ergeben. Im Prinzip spielt es hier keine Rolle, welcher Art dieser Wert ist, d. h. es wird hier nicht explizit von Spektralwerten ausgegangen. Die jeweiligen Grauwerte stellen vielmehr – ganz abstrakt – diskrete numerische Realisierungen der zugrunde liegenden Funktionen dar, d. h. sie müssen sich aus den mathematischen Beschreibungen der Regionen berechnen lassen; aus diesem Grund kann der Segmentierungsansatz auch für Höhenwerte benutzt werden. In diesem Fall muss sich also ein Pixelwert aus der mathematischen Ebenengleichung der Fläche berechnen lassen, die an dieser Stelle abgebildet wird und damit die zugrunde liegende Region darstellt. Es muss also die Höhe der Ebene an dieser Position in dem Pixel repräsentiert sein.

Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass der jeweilige Funktionswert aber nicht direkt beobachtet werden kann, sondern vielmehr durch additives, normalverteiltes und mittelwertfreies Rauschen verfälscht ist. Der einzelne Grauwert g an der Stelle x_k, y_k (wobei k der Index des betrachteten Pixels ist) ergibt sich somit zu:

$$g(x_k, y_k) = I(x_k, y_k) + n_w \quad (33)$$

wobei $I(x_k, y_k)$ den Funktionswert, oder analog zu Spektralwerten die Intensität, der zugrunde liegenden Region R an der Stelle x_k, y_k der Bildmatrix darstellt und n_w den Wert des Rauschens an dieser Stelle.

Eine Ebene im \mathbb{R}^3 lässt sich nach [BRONSTEIN ET AL., 1991] in Parameterform darstellen als:

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (34)$$

Ein im DOM abgebildeter Höhenwert kann im Bereich eines Daches als Höhenwert der entsprechenden Dachfläche an der betrachteten Position angesehen werden, weshalb nach Umformung ein ungestörter Grauwert in der Höhenmatrix an dieser Stelle folgendermaßen beschrieben werden kann:

$$I(x_k, y_k) = \frac{a}{-c} x_k + \frac{b}{-c} y_k + \frac{d}{-c} = a_0 + a_1 x_k + a_2 y_k \quad (35)$$

Da die Grauwerte aber als mit Rauschen überlagert angesehen werden müssen, lassen sich aus ihnen nicht die wahren Parameter der Ebenengleichungen ableiten, sondern nur Näherungswerte:

$$\hat{I}(x_k, y_k) = \hat{a}_0 + \hat{a}_1 x_k + \hat{a}_2 y_k \quad (36)$$

Bei der Segmentierung werden immer mehr als drei Punkte für jede Ebene gefunden, somit können die Ebenenparameter mit Hilfe einer Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen (nach dem Gauß-Markoff-Modell) bestimmt werden. Ziel dabei ist die Minimierung der Fehlerfunktion ε . Als Fehler werden hier die Abweichungen bzw. Differenzen zwischen den beobachtbaren und den mit den gefundenen Ebenenparametern berechneten Grauwerten angesehen:

$$d(x_k, y_k) = \hat{I}(x_k, y_k) - g(x_k, y_k) \quad (37)$$

Damit lautet die Bedingung:

$$\varepsilon^2 = \bar{\mathbf{d}}^T \bar{\mathbf{d}} = \sum_k (\hat{I}(x_k, y_k) - g(x_k, y_k))^2 \rightarrow \min \quad (38)$$

$$\Rightarrow \varepsilon^2 = \sum_k (\hat{a}_0 + \hat{a}_1 x_k + \hat{a}_2 y_k - g(x_k, y_k))^2 \rightarrow \min \quad (39)$$

wobei $\{k \mid g(x_k, y_k) \in R\}$. Gesucht werden die Ebenenparameter \hat{a}_0 , \hat{a}_1 und \hat{a}_2 , so dass folgende Linearisierung vorgenommen wird:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial \hat{a}_0} \\ \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial \hat{a}_1} \\ \frac{\partial \varepsilon^2}{\partial \hat{a}_2} \end{pmatrix} = 2 \sum_k (\hat{a}_0 + \hat{a}_1 x_k + \hat{a}_2 y_k - g(x_k, y_k)) \begin{bmatrix} 1 \\ x \\ y \end{bmatrix} = \vec{0} \quad (40)$$

Durch Umformung dieser Gleichung lässt sich schreiben:

$$\begin{pmatrix} \hat{a}_0 \\ \hat{a}_1 \\ \hat{a}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_k 1 & \sum_k x_k & \sum_k y_k \\ \sum_k x_k & \sum_k x_k^2 & \sum_k x_k y_k \\ \sum_k y_k & \sum_k x_k y_k & \sum_k y_k^2 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \sum_k g(x_k, y_k) \\ \sum_k g(x_k, y_k) x_k \\ \sum_k g(x_k, y_k) y_k \end{pmatrix} \quad (41)$$

Bei Hinzunahme eines Punktes zu einer Fläche bzw. einem Segment werden diese Ebenenparameter neu geschätzt. Die Schreibweise in (41) ist hier besonders vorteilhaft, da die einzelnen Matrizenelemente durch einfache Addition der neuen Koordinaten und des zugehörigen Grauwerts erweitert werden können.

Zur Bestimmung der Homogenitätswahrscheinlichkeit wird nun für den betrachteten Punkt seine mögliche Zugehörigkeit zur aktuell geschätzten Fläche beurteilt, was ebenfalls basierend auf die in Gleichung (37) definierte Differenz zwischen dem Erwartungswert der Fläche an der jeweiligen Stelle und dem dort tatsächlich gemessenen Höhenwert erfolgen kann. Dazu wird ein so genannter *t*-Test durchgeführt, bei dem die *t*- oder *Student-Verteilung* zugrunde gelegt wird.

Es wird dazu angenommen, dass der betrachtete Punkt im Falle der Zugehörigkeit zur Fläche eine Untergruppe der gleichen Grundgesamtheit darstellt, zu der die bisher aufgenommenen Punkte gehören. Zum Test der Zugehörigkeit zweier Stichprobenmengen zur gleichen Grundgesamtheit mit unterschiedlichem Stichprobenumfang können ihre jeweils empirisch ermittelten Mittelwerte für die Unbekannte betrachtet und nach SACHS (1972) die Testgröße *t* folgendermaßen formuliert werden:

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\left[\frac{n_1 + n_2}{n_1 n_2} \right] \left[\frac{(n_1 - 1) s_1^2 + (n_2 - 1) s_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \right]}} \quad (42)$$

Hierbei bezeichnen \bar{x}_1, \bar{x}_2 die jeweils ermittelten Mittelwerte, n_1, n_2 die Stichprobenumfänge und s_1, s_2 die empirisch bestimmten Varianzen, welche Schätzungen der „wahren“ Varianz σ darstellen. Im vorliegenden Fall besteht die zweite Stichprobenmenge aus nur einem Punkt ($n_2=1$) und der gesuchte Parameter x soll die in Gleichung (37) formulierte Abweichung sein. Damit kann für Gleichung (42) geschrieben werden:

$$t = |\bar{d}_k - d_p| \sqrt{\frac{n_k}{(n_k + 1) s_k^2}} \quad (43)$$

Der Index k zeigt die Berechnung des jeweiligen Wertes für die Gesamtheit der bisher in die Region oder Fläche aufgenommenen Punkte an, n_k bezeichnet also die momentane Anzahl von Pixeln in dieser Region. p symbolisiert Werte für den neu betrachteten Punkt; da die zweite Stichprobenmenge nur aus einem Punkt besteht, ergibt die Berechnung des Mittelwerts für d direkt den Wert selbst. Die Schätzung s für die Varianz ist die mittlere quadratische Abweichung der Flächenpunkte:

$$s_k^2 = \frac{1}{n_k - 3} \sum_k (d(x_k, y_k) - \hat{I}(x_k, y_k))^2 \quad (44)$$

Für die Testgröße t wird nun geprüft, ob sie unterhalb eines bestimmten Signifikanzniveaus liegt, d. h. ob die Hypothese erfüllt ist:

$$|t| < t_{1-\frac{\alpha}{2}, f} \quad (45)$$

Der in obiger Gleichung auf der rechten Seite angegebene Wert ist das Quartil der Student-Verteilung für das Signifikanzniveau α und den Freiheitsgrad f . Der Freiheitsgrad ist hier $f = f_k + f_p = n_k - 3$, da nur Überbestimmung erreicht wird, falls mehr als 3 Punkte, die zur eindeutigen Bestimmung der unbekanntenen Ebenenparameter a_0, a_1, a_2 benötigt werden, als zur Ebene gehörend betrachtet werden.

Aus obiger Ungleichung kann mit Hilfe der Verteilungsfunktion für die Student-Verteilung die Wahrscheinlichkeit für die Prüfgröße t ermittelt werden zu:

$$P(t) = 2 \left(1 - F_f(|t|) \right) \quad (46)$$

Diese Wahrscheinlichkeit ist nun ein Maß für die Zugehörigkeit des betrachteten Punktes zur Fläche und damit die gesuchte Homogenitätswahrscheinlichkeit. Liegt sie unterhalb der bei der Segmentierung vorgegebenen Mindestwahrscheinlichkeit P_{min} für einen Punkt der Fläche, so wird er nicht zur Fläche dazugenommen.

$$H_R = \begin{cases} g(x_p, y_p) \in R: & P(t) \geq P_{min} \\ g(x_p, y_p) \notin R: & \text{sonst} \end{cases} \quad (47)$$

4.1.1.3 Ausreißerflächen

Im Vorangegangenen wurde die Flächenextraktion des Modellierungsansatzes beschrieben, allerdings ohne Behandlung der Punkte einer betrachteten Szene (bzw. eines Gebäudes), die nicht einer der Dachflächen zugewiesen werden können. Solche Punkte oder Pixel können als Ausreißer bezeichnet werden, da sie keiner der Modellannahmen der Szene genügen. Dabei sollen hier unter den Modellannahmen die Ebenengleichungen der Segmente verstanden werden, da der Modellierungsansatz für Gebäude darauf aufbaut, dass Gebäude durch plane Teilflächen modellierbar sind. Deshalb wird erwartet, dass die Pixelhöhen im Bereich eines Gebäudes im Höhenbild den jeweiligen Funktionswert der (mathematischen) Ebenengleichung der an dieser Stelle liegenden Fläche wiedergeben.

Es gibt zwei Arten von Ausreißern, die auch im Modellierungsprozess getrennt behandelt werden müssen. Zum einen gibt es Ausreißer beim Messvorgang selbst, also im Prinzip Messfehler durch so genannte *Messsysteminsuffizienz* (sie werden als *Fehlstellen* bezeichnet, Details folgen im Text), zum anderen kleinflächige Objekte, die aufgrund ihrer geringen Größe nicht mit dem im Vorhergehenden vorgestellten Ebenensegmentierungsansatz klassifizierbar sind (sie werden nicht näher bezeichnet, sondern weiterhin nur *Ausreißer* genannt). In der Realität entsprechen Ausreißer beim Segmentierungsprozess meist kleinflächigen Dachaufbauten (z. B. Schornsteinen), Objektüberlagerungen (z. B. über Dächer ragende Bäume oder Baukräne) oder Verschleifungseffekten an Bruchkanten. In Abb. 39 sind einige Beispiele für verschiedene Arten von Problemfällen dargestellt.

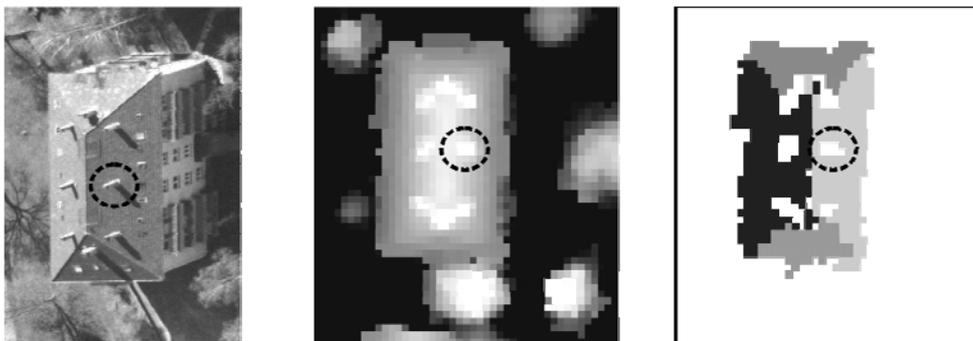


Abb. 39: Schornsteine auf einem Dach; links: Ausschnitt aus einem Luftbild (© Stadt Karlsruhe), Mitte: Ausschnitt aus der Grauwertdarstellung eines First-Echo-Laserscanner-DOMs, rechts: Ergebnis der Dachflächensegmentation (weiß bedeutet „nicht segmentiert“); ein Schornstein ist zur besseren Identifikation mit einem Kreis gekennzeichnet

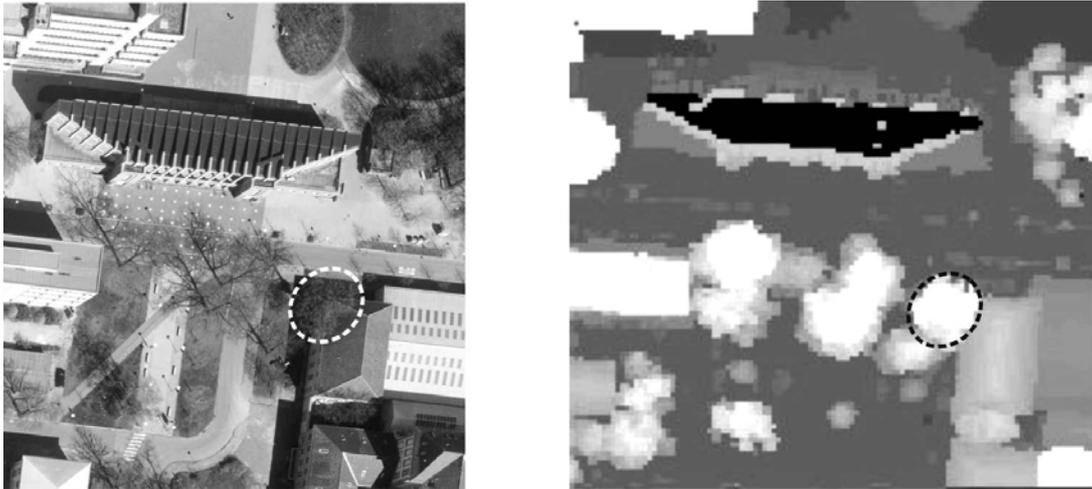


Abb. 40: Beispiele für Überlagerung eines Daches durch einen Baum (gestrichelter Kreis) und Messsysteminsuffizienz infolge dunkler Dacheindeckung (längliches Gebäude im oberen Bereich, Messsignal wird stark absorbiert). Links: Luftbild (© Stadt Karlsruhe), rechts: First-Echo-Laserscanning-DOM (schwarze Pixel sind Lücken im Datensatz)

Unter Glättungseffekten an Bruchkanten soll hier verstanden werden, dass an Gebäuderändern mit Höhensprüngen oftmals Messpunkte auf dem Dach und solche auf dem Boden in ein und dasselbe Rasterelement (Pixel) fallen, was bei der Berechnung des Pixelwertes eine Interpolation dieser Punkte bedeuten kann (vgl. Kapitel 2.1.5). Deshalb bilden sich abrupte Höhenänderungen unter Umständen fälschlicherweise als kontinuierliche Höhenübergänge ab.

Mit Messsysteminsuffizienz sollen hier die Effekte beschrieben werden, die durch die Leistungsbegrenzung des Messsystems auftreten. So können z. B. an wasserbedeckten, spiegelnden oder stark Licht absorbierenden Dachelementen Lücken im Datensatz entstehen, da entweder das Signal als Folge von Totalreflektion nicht mehr zum Sensor zurückgeworfen wird oder nur Teile des Ausgangssignals zurückkommen, d. h. insgesamt nur ein schwaches Messsignal, so dass das Signal/Rausch-Verhältnis sehr ungünstig wird und das Messsignal dann nicht mehr eindeutig identifiziert werden kann. Diese Art der Ausreißerpixel ist getrennt zu behandeln, da sie zu Lücken im Datensatz führt (vgl. Abb. 40 oben). Um sie kenntlich zu machen, bekommen sie aber einen – symbolischen – Höhenwert, z. B. die Höhe Null; sie werden in dieser Arbeit im Folgenden als *Fehlstellen* bezeichnet. Bei neueren Systemen, z. B. TopoSys II (vgl. [LOHR, 1999]), treten die Effekte der Messsysteminsuffizienz aber deutlich seltener auf, als dies früher der Fall war.

Dadurch, dass die Ausreißerpixel keiner Fläche zugeordnet werden können, kann es Probleme mit der Konsistenthaltung der Gebäudemodelle geben, da sie im Prinzip an den Ausreißerstellen offen gehalten werden müssten, also Lücken haben müssten. Um dies zu vermeiden, werden sie aber trotzdem mit Flächen approximiert, was im Folgenden näher beschrieben wird.

Es gibt grundsätzlich zwei Vorgehensweisen mit Ausreißern, also mit den nach der Segmentierung noch nicht klassifizierten Pixeln, umzugehen: Ignorierung der Pixel durch Erweiterung der direkt benachbarten Dachflächen auf diese Bereiche oder Markierung der Pixel und Anwendung einer sehr viel weniger restriktiven Ebenenapproximation. Für diese Arbeit wurden beide Vorgehensweisen implementiert, da das Anwenden der ersten Methode in bestimmten Fällen eine Verfälschung der Gebäudegeometrie bedeuten könnte.

Die Fehlstellen werden anders als die anderen Ausreißer behandelt, nämlich wie Geländestellen, d. h. sie erhalten die Höhe des umgebenden Geländes. An Geländestellen wird das Gebäudemodell abgeschlossen, d. h. es bekommt vertikale Begrenzungsflächen angefügt. Diese Stellen werden bei der

Gebäudemodellierung also nicht explizit durch Flächen approximiert, sondern wirken vielmehr als Signal das anzeigt, dass jenseits der mit ihnen existierenden Kanten keine weiteren Gebäudeflächen existieren.

Die Vorschrift zur Ebenenapproximation an den Ausreißerstellen, bzw. die über diese Ebenen ermittelbare Bildintensität lautet:

$$\hat{I}_A(x,y) = \begin{cases} g(x,y) & \forall P_{x,y} \mid P_{x,y} \in M_A = \{P_{x,y}\} \\ \frac{g(x,y) + g(x_{bn}, y_{bn})}{2} & \forall P_{x,y} \mid P_{x,y} \in M_A = \{P_{x,y}, P_{x_{bn}, y_{bn}}\} \\ \hat{I}(x,y) & \forall P_{x,y} \mid P_{x,y} \in M_A = \{P_{x,y}, P_{x_{bn1}, y_{bn1}}, \dots, P_{x_{bn n}, y_{bn n}}\} \end{cases} \quad (48)$$

wobei P hier für ein Pixel steht, A den Bezug auf Ausreißer andeutet, M die Menge aller direkt benachbarten Pixel bezeichnet, bn der Hinweis auf Nachbarschaft zum Pixel an der Stelle x,y ist und n die Anzahl der benachbarten Ausreißerpixel wiedergibt.

Die in (48) wiedergegebene Ebenenapproximation sagt aus, dass es drei Fälle der Flächenapproximation an Stellen mit Ausreißerpixeln gibt:

Tritt in der unmittelbaren Nachbarschaft des Ausreißers kein weiterer Ausreißer auf, so wird das Pixel durch eine horizontale Fläche angenähert, welche die Höhe des Ausreißerpixels hat.

Tritt in unmittelbarer Nachbarschaft genau ein weiterer Ausreißer auf, so werden die Höhen beider Pixel gemittelt und dieses Mittel als Höhe der Horizontalfläche verwendet, durch die beide Pixel angenähert werden.

Treten mindestens drei Ausreißer in unmittelbarer Nachbarschaft auf, so werden sie durch eine (ausgleichende) Ebene angenähert, analog (36).

Die so gewonnenen Flächen genügen im Allgemeinen nicht den bei der Dachflächensegmentation vorgegebenen Qualitäts- bzw. Genauigkeitsvorgaben. Sie werden deshalb entsprechend markiert, so dass sie bei Bedarf gesondert behandelt werden können.

4.2 Topologie-Ermittlung

Die Analyse der topologischen Beziehungen zwischen den Gebäudeprimitiven erfolgt unterschiedlich für die einzelnen Primitive-Arten. Während sich die Flächennachbarschaften direkt aus der Analyse der extrahierten Flächen ableiten lassen, ist dies für die Kanten und Ecken nicht möglich. Da diese Elemente selbst nicht direkt aus den Ausgangsdaten extrahiert werden, können ihre Nachbarschaftsbeziehungen auch nur indirekt ermittelt werden. Als Grundlage dazu dienen die ermittelten Flächenadjazenzen.

4.2.1 Flächenadjazenz

Die Nachbarschaftsanalyse, die zur Detektion der Flächenadjazenzen notwendig ist, erfolgt nicht direkt im Dreidimensionalen, sondern getrennt in Feststellung der Lage- und Höhennachbarschaften. Die Laserscanner-DOMs werden in der vorliegenden Arbeit vorwiegend in Form von grauwertcodierten Höhenbildern genutzt, so dass sie nicht als echt 3D, sondern vielmehr als 2,5D-Datensatz verwendet werden. Oftmals sind

auch die Zwischenergebnisse Grauwertbilder, wie z. B. – zumindest teilweise – das Ergebnis der Dachflächensegmentation (s. Kapitel 4.1.1). Es besteht einerseits aus einem Datensatz mit den Parametern der extrahierten Flächen und zum Anderen aus einem Grauwertbild, in dem jedes Pixel den Index der Fläche trägt, zu der es zugeordnet wurde. Auf diesem symbolischen Bild setzt die Analyse der „Lagenachbarschaften“ auf, wobei hiermit die Nachbarschaft in 2D bezüglich der Grundriss-Ebene gemeint ist, die von den Koordinatenachsen der zur Lageangabe benutzten Koordinaten aufgespannt wird. Die Grundidee hierbei ist die Durchführung einer Überlappungsanalyse. Dazu wird auf die Flächen im symbolischen Bild mathematische Morphologie, genauer die Dilatation, angewandt.

Für die als potenziell benachbart gefundenen Flächen wird dann eine Höhennachbarschaftsanalyse durchgeführt. Dazu wird zuerst der gemeinsame Randbereich extrahiert und an dessen Eckpunkten dann auf Höhengsprünge untersucht.

4.2.1.1 Mathematische Morphologie

Nach Soille (1998) ist die mathematische Morphologie „nicht nur eine Theorie, sondern auch eine umfangreiche Technik für die Bildverarbeitung“, deren „Ziel die Analyse der Form von Objekten“ ist. Dabei baut sie wesentlich auf der Mengentheorie und Topologie auf. Sie war ursprünglich an Binärbildern, d. h. Bildern mit nur zwei möglichen Pixelwerten (0 und 1), entwickelt worden, wird aber inzwischen z. B. auch für Grauwertbilder benutzt (einen Überblick über die Entwicklung der mathematischen Morphologie findet sich z. B. in [SERRA, 1994]). Ihre Methoden sind im Wesentlichen der Mengentheorie entnommen und werden auf verbundene Objekte angewandt, wodurch im Allgemeinen topologische Abfragen nötig sind.

Die beiden wichtigsten morphologischen Operatoren sind die *Erosion* und *Dilatation*, die nach Soille (1998) folgendermaßen für Binärbilder definiert sind:

$$\varepsilon_B(X) = \{x \mid B_x \subseteq X\} \quad (49)$$

$$\delta_B(X) = \{x \mid B_x \cap X \neq \emptyset\} \quad (50)$$

In Gleichung (49) ist die Erosion, in Gleichung (50) die Dilatation angegeben. Die Formeln geben jeweils die Bedingung an, unter der ein Punkt Element der (Ergebnis-)Menge x ist. Dies wird innerhalb eines strukturierenden Elements B_x gegen die Prüfmenge X (hier das betrachtete Binär-Bild) untersucht.

Als strukturierendes Element B_x bezeichnet man hier eine kleine Menge (von Punkten bzw. Pixeln), die angibt, welche Pixel in der Nachbarschaft des Bezugspixels zur Beurteilung der Zugehörigkeit dieses Pixels zur Ergebnismenge geprüft werden sollen. In der Bildverarbeitung wird ein solches Element i. Allg. als Maske bezeichnet und stellt ein Teilbild aus Pixeln mit Vordergrund- und/oder Hintergrundwerten dar.

An einer Prüfungsoperation nehmen nur die Pixel des betrachteten Bilds an denjenigen Positionen teil, an denen die überlagerte Maske gerade den Vordergrundwert trägt. Dazu werden die Pixelpositionen in der Maske als relative Positionen angesehen und an die aktuellen absoluten Bezugskoordinaten angehängt. Innerhalb der Maske ist ein Pixel als Bezugspunkt definiert, meist das zentral gelegene, an dem die Maske über das Bild bewegt wird und dessen aktuelle Koordinaten die Bezugskoordinaten darstellen (in Abb. 41 ist dieses Pixel mit einer Ellipse markiert).

Das Bezugspixel wird bei der Erosion als Teil der Ergebnismenge angesehen, wenn alle über B_x definierten Pixel in X nicht den Hintergrundwert tragen, bzw. bei der Dilatation mindestens eines den Vordergrundwert trägt. Im Folgenden wird näher auf die Dilatation eingegangen, da sie zur Ermittlung der Flächenadjazenzen eingesetzt wurde.

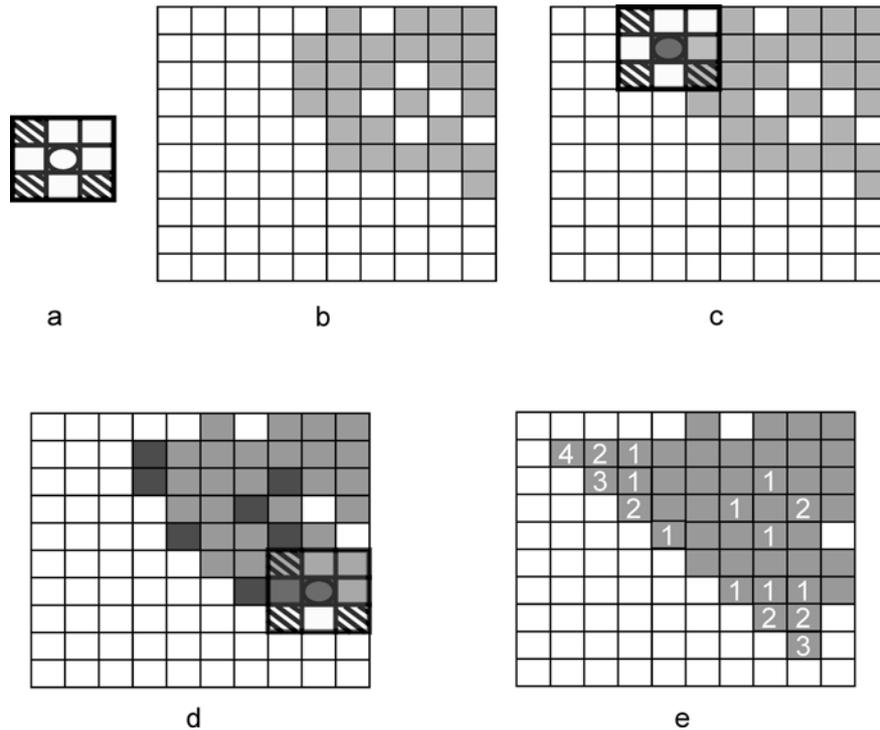


Abb. 41: Beispiel zur Dilatation; a) Strukturierendes Element b) Menge X (bzw. Prüfbild) c) Beispiel für einen Prüfschritt, bei dem ein Pixel hinzugenommen wird d) Zustand am Ende der ersten Dilatation e) Endergebnis nach viermaliger Dilatation (keine weitere Dilatation möglich)

In Abb. 41 ist ein Beispiel zur Dilatation gegeben. Unter a) ist dort das strukturierende Element B_x dargestellt, das in diesem Fall als 3x3 Pixel großes Binärmuster definiert ist. Der Bezugspunkt dieser Maske ist ihr Zentrum (schraffiert dargestellt); es handelt sich hier um eine nicht voll besetzte Maske, lediglich drei der Ecken sind belegt. Dieser Operator wird nun systematisch über das in b) dargestellte binäre (Prüf-)Bild geschoben.

In „d“ ist ein konkreter Analyseschritt für eine Pixelposition wiedergegeben. Die Maske ist, zur besseren Ansicht, mit dicken Linien umrandet und ihre gefüllten Pixel sind schraffiert dargestellt. Innerhalb des durch die Maske überdeckten Bereichs befinden sich im Bild vier Pixel mit dem Vordergrundwert, wobei aber nur eines auch in der Maske belegt ist (in der linken oberen Ecke).

Bei der Dilatation wird an allen belegten Maskenpositionen abgefragt, ob das Bild dort einen Vordergrundwert trägt; die Einzelabfragen werden dann mit dem logischen Operator „oder“ verknüpft. Allgemein lautet die Abfrage für Binärbilder und Binärmasken:

$$[\delta_B(X)](c,r) = \sum_{dr=-m}^m \sum_{dc=-n}^n X(c+dc,r+dr) * B(dc,dr) \quad (51)$$

Hierbei geben c und r die Position des Bezugspunkts im Bild an (row und column = Zeile und Spalte), dc und dr die Relativpositionen der in der Maske belegten Pixel. Die Formel drückt aus, dass für jedes Pixel, dessen c und r -Komponente um nicht mehr als m Pixel in Zeilen- und n Pixel in Spalten-Richtung von den Bezugskordinaten unterschiedlich sind, sein Pixelwert mit dem Wert multipliziert wird, der an der entsprechenden Position in der Maske steht. Alle Teilergebnisse werden aufsummiert und ergeben das Gesamtergebnis für das Bezugspixel; ist es größer als Null wird das Bezugspixel (in der Abbildung mit einem schwarzen Kreis gekennzeichnet) mit dem Vordergrundwert gefüllt.

Oder in der Schreibweise mit logischen Operationen für den in Abb. 41 wiedergegebenen konkreten Fall:

$$[\delta_B(X)](c,r) = \begin{cases} 1: & X(c-1,r-1) \vee X(c-1,r+1) \vee X(c+1,r+1) \\ 0: & \text{sonst} \end{cases} \quad (52)$$

$X(x,y)$ bedeutet hier zwar auch der Grauwert an der Stelle x, y im Bild X , wird aber in obiger Gleichung als Abfrage nach Vorkommen eines Vordergrundwertes an der Stelle x, y im Bild X benutzt. Falls die Gleichung (52) den Wert 1 ergibt, wird an die Position des Bezugspixels der Vordergrundwert geschrieben.

In Abb. 41 e) ist das Ergebnis einer viermaligen Dilatation abgebildet. Die dazugenommenen Pixel sind nummeriert, und zwar mit der Nummer des Dilatationsschrittes, bei dem sie aufgefüllt wurden. Dabei wird die Bedeutung der Form des strukturierenden Elements deutlich, da im Beispiel nach dem vierten Dilatationsschritt mit der gewählten Form der Maske kein Pixel mehr dazugenommen werden kann.

4.2.1.2 Lagenachbarschaft

Zur Bestimmung der Lagenachbarschaften wird eine Überlappungsanalyse auf dem Ergebnisbild der Dachflächensegmentation ausgeführt. Dazu wird im Wesentlichen die Dilatation aus dem vorangegangenen Kapitel eingesetzt, aber in leicht modifizierter Form.

Die Dilatation ist nicht nur für Binär-, sondern z. B. auch für Grauwertbilder definiert. In dieser (allgemeineren) Form lautet sie ([SOILLE, 1998]):

$$[\delta_B(f)](x) = \max_{b \in B} f(x+b) \quad (53)$$

Wobei f hier die Prüfmenge, also das (Grauwert-)Bild bezeichnet. Die Formel zeigt, dass bei der Dilatation dem Bezugspixel der Wert des höchsten Grauwerts innerhalb der Maske zugewiesen wird.

Das Bild mit dem Ergebnis der Dachflächensegmentation ist ein symbolisches Bild, in dem jedes Pixel den Index der Fläche enthält, zu der es gehört. Somit ist es ein Grauwertbild; es wird aber trotzdem nicht die oben beschriebene Grauwertbilddilatation auf dieses Bild angewendet. Vielmehr wird das Bild jeweils bezüglich einer speziellen Fläche als Binärbild interpretiert (in Abb. 42 ist dies im rechten Bildteil für die im linken Teil dunkelgraue Fläche dargestellt). Dies bedeutet, dass nur der jeweilige Flächenindex (im Beispiel dunkelgrau) als Vordergrundwert gilt, alle anderen Indices (in der Abb. 42 schwarz, mittelgrau und hellgrau) und der eigentliche Hintergrund (in der Abbildung weiß) werden als Hintergrundwerte angesehen. Auf diese Weise kann die Binärbilddilatation auch hierfür angewandt werden.

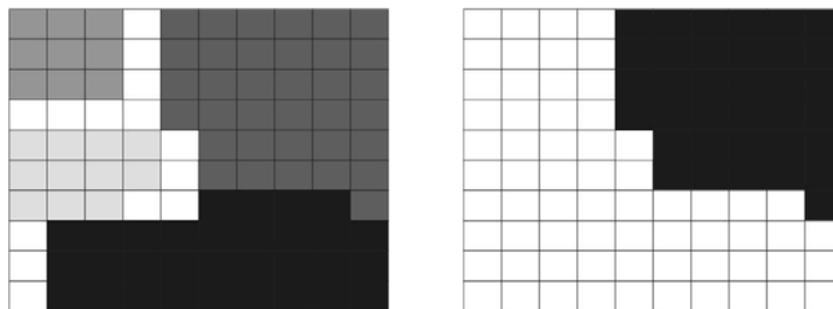


Abb. 42: Symbolisches Grauwertbild (links); rechts ist schematisch dargestellt, wie das Bild im Dilatationsverfahren, beispielhaft für die dunkelgraue Fläche, benutzt wird

Ein weiterer Unterschied besteht darin, dass bei der hier benutzten, speziellen Dilatation die Pixel, die neu zur Ergebnismenge dazukommen und eigentlich auf den Vordergrundwert gesetzt werden müssten, nicht beschrieben, sondern lediglich auf das Vorhandensein eines anderen Flächenindex untersucht werden. Wird eine andere Fläche an der entsprechenden Stelle gefunden, so werden die beiden Flächen als potenziell benachbart markiert, das bedeutet, das Indexpaar wird in einer Liste abgespeichert. Zudem wird das entsprechende Pixel als Randpixel der untersuchten Fläche an einer gemeinsamen Kante zur gefundenen Fläche gespeichert. Diese Information wird später zur Beurteilung der Höhennachbarschaften benötigt.

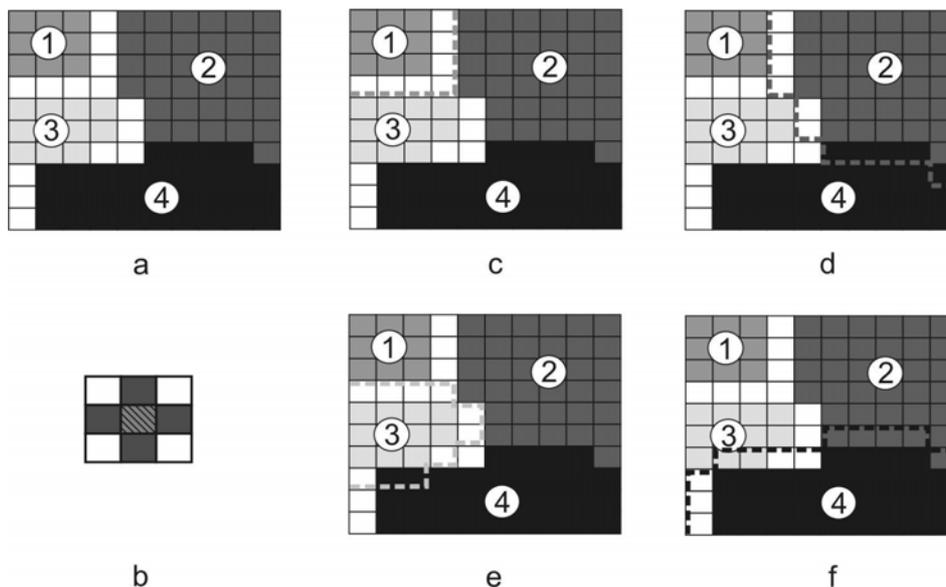


Abb. 43: Überlappungsanalyse a) Ausgangsbild b) Strukturierendes Element c) - f) Überlappungsanalyse für die Regionen 1 bis 4, gestrichelte Linien umschließen die untersuchten Pixel

Als strukturierendes Element B_x wird bei der Überlappungsanalyse eine 3x3-Pixel-Maske eingesetzt, deren Bezugspunkt das Zentralpixel ist. In der Maske sind alle Pixel bis auf die Eckpunkte besetzt, also die Pixel in der 4er-Nachbarschaft des Zentralpixels (vgl. Abb. 43 b). Damit wird für die (Lage-)Nachbarschaft zwischen Flächen implizit vorausgesetzt, dass sie gemeinsame Kanten besitzen, Nachbarschaft über gemeinsame Einzelpunkte, wie sie z. B. in Abb. 43 bei den Flächen 2 und 3 auftritt, sind ausgeschlossen.

In Abb. 43 c) – f) ist ein Beispiel für eine Überlappungsanalyse dargestellt. In c) wird für Fläche 1 kein Nachbar, in d) für Fläche 2 die Fläche 4, in e) für die Fläche 3 ebenfalls Fläche 4 (aber nicht Fläche 2!) und in f) die Flächen 2 und 3 als Nachbarn zur Fläche 4 gefunden.

4.2.1.3 Höhennachbarschaft

Die mit dem im Kapitel 4.2.1.2 vorgestellten Verfahren gefundenen Lagenachbarschaften dienen zusammen mit dem aus Laserscanning entstandenem nDOM als Basis zur Feststellung der Höhennachbarschaften. Dazu werden die als Randpunkte gefundenen Pixel zu Linien zusammengefasst und danach in Geradenstücke unterteilt, an deren Endpunkten das nDOM auf Höhengsprünge untersucht wird. Unter Höhengsprüngen sollen hier diejenigen Stellen verstanden werden, an denen zwischen zwei benachbarten Pixeln ein großer Höhenunterschied besteht.

Liegt ein Höhengsprung zwischen 2 Flächen vor, so gilt die Nachbarschaftshypothese, welche durch die im vorigen gefundene Lagenachbarschaft für ein Flächenpaar aufgestellt wurde, als widerlegt. Im Folgenden wird das Verfahren detaillierter beschrieben.

Begrenzungslinien

Für die Überlappungsanalyse müssen zunächst die Flächenbegrenzungen der extrahierten Segmente ermittelt werden. Damit sind nicht die Flächen-Begrenzungslinien gemeint, die das resultierende Gebäudemodell enthalten wird, also die „realen“ Dachflächenränder, sondern die aus den Laserscanning-DOMs direkt extrahierbaren, „unscharfen“ Dachflächenränder. Sie dienen zur Festlegung der Suchbereiche, innerhalb denen auf Höhengsprünge zwischen zwei Segmenten untersucht wird.

Zuerst werden die Randpixel der Flächen gesucht. Randpixel sind hier jene Pixel, an denen eine Dilatation ausgeführt und Nachbarn gefunden werden. Sie werden getrennt nach den Nachbarflächen der aktuell betrachteten Fläche abgelegt, d. h. für jedes Segment wird pro Nachbarfläche ein Satz von gemeinsamen Randpixeln abgelegt. Im Prinzip sind diese Punkte direkt nach ihrer Extraktion ungeordnet, da aber das Bild in einer bestimmten Reihenfolge abgearbeitet wird, nämlich vom Ursprung links oben zeilenweise nach rechts unten, werden horizontale Kanten immer zusammenhängend und geordnet abgespeichert, andere Kanten nur im Ausnahmefall.

In Abb. 44 ist ein Beispiel für dieses Vorgehen wiedergegeben. Hier sei die zu untersuchende Fläche die mit 1 bezeichnete. Ihre Randpixel mit den Flächen 2 und 3 sind durch Nummern gekennzeichnet, wovon die erste Ziffer die jeweilige Nachbarfläche zu Fläche 1 und die zweite Ziffer die Reihenfolge wiedergibt, in der die Randpixel mit der jeweiligen Nachbarfläche gefunden werden. Die schwarzen Linien zeigen an, wo Pixel direkt in der Reihenfolge ihres Auftretens ein Begrenzungslinienstück bilden.

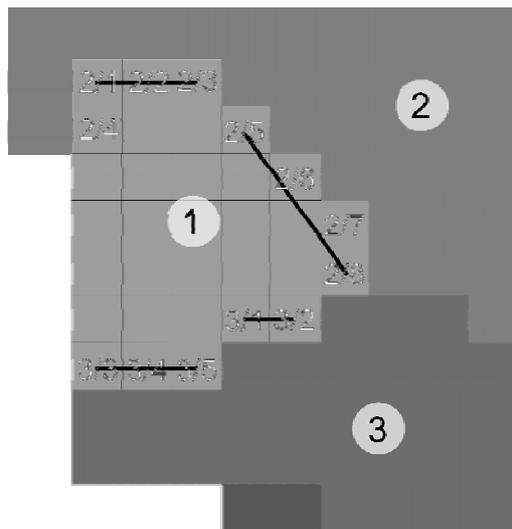


Abb. 44: Extraktion von Flächengrenzen zur Überlappungsanalyse

Für die weitere Bearbeitung werden nun aus der Menge der Randpunkte zusammenhängende Geradenstücke herausgesucht. Dazu wird die Liste der Randpixel sequenziell abgearbeitet und eine Linienverfolgung durchgeführt. Es werden sowohl die Abstände der aufeinander folgenden Punkte als auch der jeweilige Richtungsvektor ihrer Verbindungslinie berechnet. Folgen die Pixel aufeinander, d. h. ist ihr Abstand nicht größer als $\sqrt{2} * \text{Pixelbreite}$, dann wird untersucht, ob die Verbindungslinie des vorangegangenen Punktepaars, d. h. des aktuellen Anfangspunkts und seines Vorgängers in der Punktliste, die gleiche Richtung hatte. Ist dies der Fall, dann wird der aktuelle Endpunkt als Teil einer Linie interpretiert, der auch der Anfangspunkt und sein Vorgänger angehören. In der Abb. 44 wäre dies z. B. für den Punkt 2/7 der Fall, da die Linie 2/6-2/7 den gleichen Richtungsvektor wie die Linie 2/5-2/6, und 2/7 von 2/6 den Abstand $\sqrt{2} * \text{Pixelbreite}$ hat. Der aktuelle Anfangspunkt (2/6) wird deshalb aus der Gesamtlinie gelöscht, da es

ausreicht, nur jeweils die Endpunkte eines Geradenstücks abzuspeichern. Weicht nun aber die Richtung ab, dann wird das bisher verfolgte Geradenstück geschlossen und der aktuelle Endpunkt als Beginn eines neuen Geradenstücks abgespeichert.

Auf diese Weise werden alle aufeinander folgenden Linien (-fragmente) zusammengefasst und die Punktliste ausgedünnt. Dieser Datensatz wird nun abermals sequenziell abgearbeitet mit dem Ziel, alle isolierten Pixel zu finden und gegebenenfalls die Endpunkte der vorhandenen Geradenstücke zur Deckung zu bringen.

Wird in der Liste der Begrenzungslinien ein isoliertes Pixel gefunden, so wird geprüft, ob es mit einer schon vorhandenen Linie benachbart ist, d. h. ob es einem der Endpunkte benachbart ist. In diesem Fall wird eine neue Linie eingeführt, die vom Endpunkt des benachbarten Elements zu dem einzelnen Pixel führt (vgl. Abb. 45, links). Ist das Pixel aber wirklich isoliert, so wird überprüft, an welcher Seite des Pixels die Nachbarfläche anliegt. An dieser Pixelkante wird dann eine kleine Linie gezogen, die genau auf der Pixelkante verläuft (vgl. Abb. 45, rechts). Dies wird eingeführt, da infolge der Flächenzuweisung nichtsegmentierter Pixel Elemente mit einem Punkt entstehen können (vgl. Kapitel 4.1.1.3).

Bei der nochmaligen Abarbeitung der Geradenstücke wird auch geprüft, ob Endpunkte der Elemente direkt benachbart sind. Dabei werden die Elemente aber nicht gerichtet behandelt, d. h. es werden nicht nur die Abstände zwischen Anfangs- und Endpunkt zweier unterschiedlicher Linien analysiert, sondern auch die Abstände zwischen den Anfangs- bzw. Endpunkten der unterschiedlichen Linien. Wird eine Nachbarschaft entdeckt, so wird jenes Geradenstück um den benachbarten Endpunkt ergänzt, bei dem die Erweiterung um diesen Punkt zu keiner Richtungsänderung des Elements führt, d. h. der benachbarte Endpunkt muss genau auf der schon berechneten Linie liegen. Damit haben die beiden Nachbarelemente einen Punkt gemeinsam, dies ist später bei der unter Umständen notwendigen Einführung von Vertikalflächen relevant.

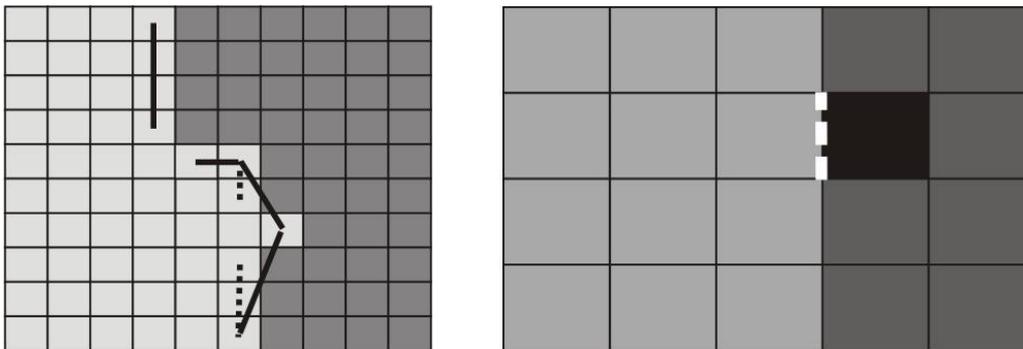


Abb. 45: Einzelpixelbehandlung bei der Begrenzungsliniensuche; links: „isoliertes“ Pixel bewirkt Verschiebung der Endpunkte benachbarter Grenzlinien (Grenzverlauf entlang der durchgezogenen und nicht entlang der gepunkteten Linien); rechts: Einführung einer Grenzlinie (weiß gepunktet) auf dem Rand eines vollständig isolierten Einzelpixels

Am Ende des Prozesses erhält man für jedes benachbarte Flächenpaar zwei Begrenzungslinien, dies bedeutet, es gibt für jede Flächennachbarschaft jeweils eine Begrenzungslinie bezüglich einer der beiden beteiligten Flächen. Sie liegen jeweils außerhalb der Flächen, von denen ausgehend sie ermittelt wurden, da sie bei der Überlappungsanalyse nach der Dilatation der Flächen im Expansionsbereich entstanden; sie liegen aber innerhalb der Nachbarflächen.

In einem letzten Schritt werden diese beiden Grenzlinien zu einer einzigen verschmolzen. Dies geschieht jeweils durch Mittelung ihrer Anfangs- und Endpunktkoordinaten.

Analyse des Höhenverlaufs an Kanten

Entlang den extrahierten Flächengrenzen, nach dem im vorigen Kapitel beschriebenen Verfahren, wird nun der jeweilige Höhenverlauf analysiert. Dabei wird davon ausgegangen, dass entlang einer jeden Grenzlinie ein linearer Höhenverlauf vorliegt, d. h. es gibt parallel zu den Grenzlinien keine Höhengsprünge. Betrachtet man hierzu die Abb. 46, so bedeutet es dort, dass die Flächen E_1 , E_2 und E_4 zur Fläche E_3 keine gemeinsamen Kanten haben, sondern jeweils eigene Grenzlinien gebildet werden ($g_{1,3}$ & $g_{3,1}$, $g_{2,3}$ & $g_{3,2}$ und $g_{3,4}$ & $g_{4,3}$), d. h. auf beiden Seiten einer Grenzlinie nur jeweils *eine* Fläche anliegen darf. Dies ist durch die Segmentationsvorschrift (s. Kapitel 4.1.1) gewährleistet, da es nicht möglich ist, andere als innerhalb eines Toleranzbereiches plane Flächen in ein einziges Segment zu klassifizieren.

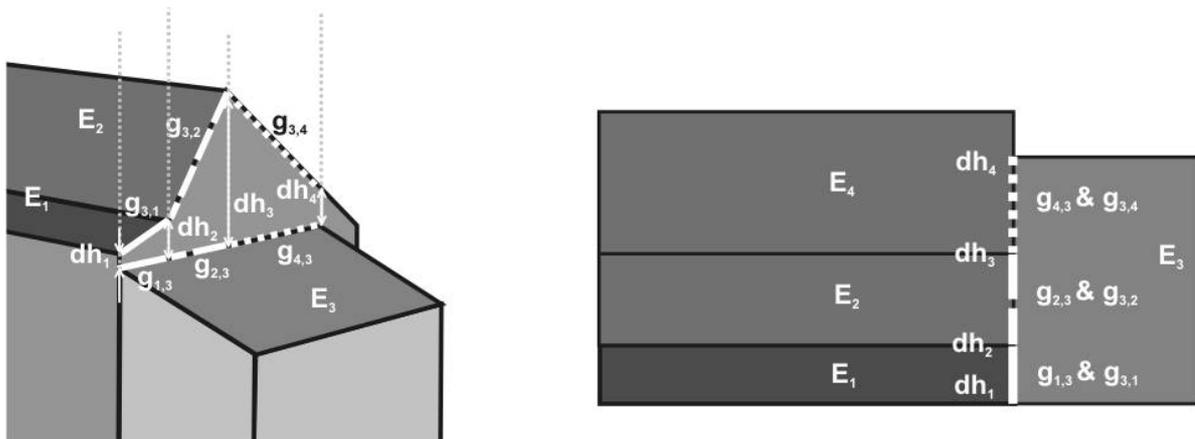


Abb. 46: Höhenverlauf an Grenzlinien; links: schematische Ansicht eines Gebäudeteils mit Höhengsprüngen in 3D; rechts: gleiches Gebäude in zweidimensionaler Draufsicht

Die Ausreißerflächen bilden zwar hiervon eine gewisse Ausnahme, da sie viel weniger strengen Segmentationsvorschriften unterliegen, trotzdem werden auch dort keine groben Unstetigkeiten akzeptiert.

Dadurch dass die Flächen stetig sind ist es möglich, jeweils nur an den Enden der begrenzenden Geradenstücke zu prüfen, ob auf beiden Seiten der Kante ähnliche Höhen auftreten, d. h. ob bis auf einen gewissen Toleranzfaktor im Höhendatensatz keine Höhenabweichung auftritt. Im Beispiel könnte z. B. die Höhendifferenz dh_1 im Toleranzbereich liegen, dh_2 , dh_3 und dh_4 aber nicht. Ist die Bedingung erfüllt, dann werden die beiden Flächen als benachbart ausgewiesen (da im Beispiel zwar dh_1 im Toleranzbereich liegen würde, aber nicht dh_2 , wären die Flächen E_1 und E_3 *nicht benachbart*). Anderenfalls wird an der gemeinsamen Kante, der jeweiligen Mittelung der flächenbezogenen Grenzlinien (also z. B. der Mittelung von $g_{1,3}$ und $g_{3,1}$ oder $g_{2,3}$ und $g_{3,2}$), eine Vertikalfläche eingeführt und die beiden Ausgangsflächen werden als benachbart zu dieser Vertikalfläche gekennzeichnet.

Da ein Flächenpaar mehrere Grenzlinienstücke haben kann, ist es möglich, dass deren Höhennachbarschaft an unterschiedlichen Stellen unterschiedlich beurteilt wird. So können z. B. horizontal verlaufende Flächen innerhalb von Schrägflächen liegen, mit denen sie dann eine oder einen Satz von wirklich gemeinsamen Kanten (ohne Höhengsprünge) haben, als auch Grenzen, an denen sie deutlich auseinander gehen. Dies kann z. B. bei Dachgauben auftreten, wie die in Abb. 47 dargestellte.

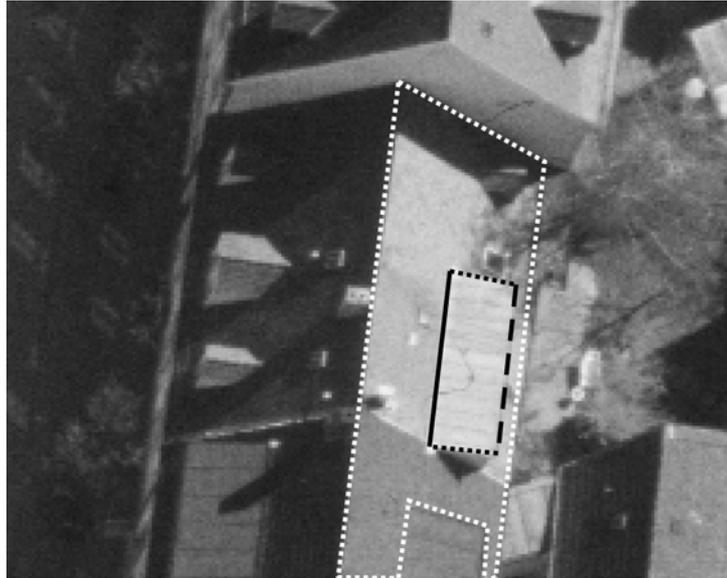


Abb. 47: Luftbild eines Gebäudes mit länglicher Dachgaube; die weißen und schwarzen Linien geben Flächengrenzen an

Dort ist eine Dachfläche weiß punktiert umrandet dargestellt, als auch die Flächengrenzen einer Dachgaube (schwarze Linien). Einzig die schwarz durchgezogene Linie liegt an einer Stelle echter Nachbarschaft zwischen den beiden Flächen, an allen anderen gemeinsamen Kanten treten Höhengsprünge auf, so dass dort Vertikalflächen zur Modellierung benutzt werden müssen.

4.2.1.4 Nachbarschaften von Vertikalflächen

Auf die Ermittlung von Nachbarschaftsbeziehungen zwischen Vertikalflächen soll hier kurz eingegangen werden, da sie grundsätzlich unterschiedlich zu den oben angesprochenen Flächennachbarschaftsanalysen verläuft.

Vertikalflächen werden bei dem hier vorgestellten Verfahren nicht explizit gesucht, sie sind z. B. nicht Teil der Ergebnismenge der Flächensegmentation (vgl. Kapitel 4.1.1). Sie haben vielmehr den Charakter von Hilfskonstrukten zur Konsistenzhaltung der Gebäudemodelle, da sie nur dort eingeführt werden, wo zwei im Zweidimensionalen aneinander grenzende Dachflächen einen Höhengsprung an (einer) ihrer gemeinsamen Kante aufweisen. Die Vertikalflächen schließen also quasi die „Lücken“ im Gebäudemodell. Da aber zu diesem Zeitpunkt die Nachbarschaftsbeziehungen der sie umgebenden Flächen z. T. schon geklärt sind, können auch einige Nachbarschaftsbeziehungen der Vertikalflächen sofort abgelegt werden.

Zum einen sind sie offensichtlich mit den beiden Flächen benachbart, an deren vermeintlich gemeinsamer Kante sie eingeführt wurden. Diese Beziehungen sind also unmittelbar abzulegen (für die Szene in Abb. 48 z. B. u. a. die Nachbarschaften E_4-V_5 und E_8-V_5). Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dass sie zu anderen Vertikalflächen benachbart sind, die einen der „Endpunkte“ mit ihnen gemeinsam haben. Darunter ist zu verstehen, dass die entsprechenden Flächenkanten, an denen Vertikalflächen eingeführt werden, im Zweidimensionalen, also in ihrer Projektion auf die Grundrissebene, einen gemeinsamen Endpunkt haben (z. B. $g_{4,8}$ und $g_{5,8}$). Dies lässt sich über die für jede Fläche abgespeicherten Randpolygone (vgl. Kapitel 4.2.1.3) bestimmen. Ist dies der Fall, dann werden die beiden Vertikalflächen als benachbart markiert (z. B. V_5 und V_8).

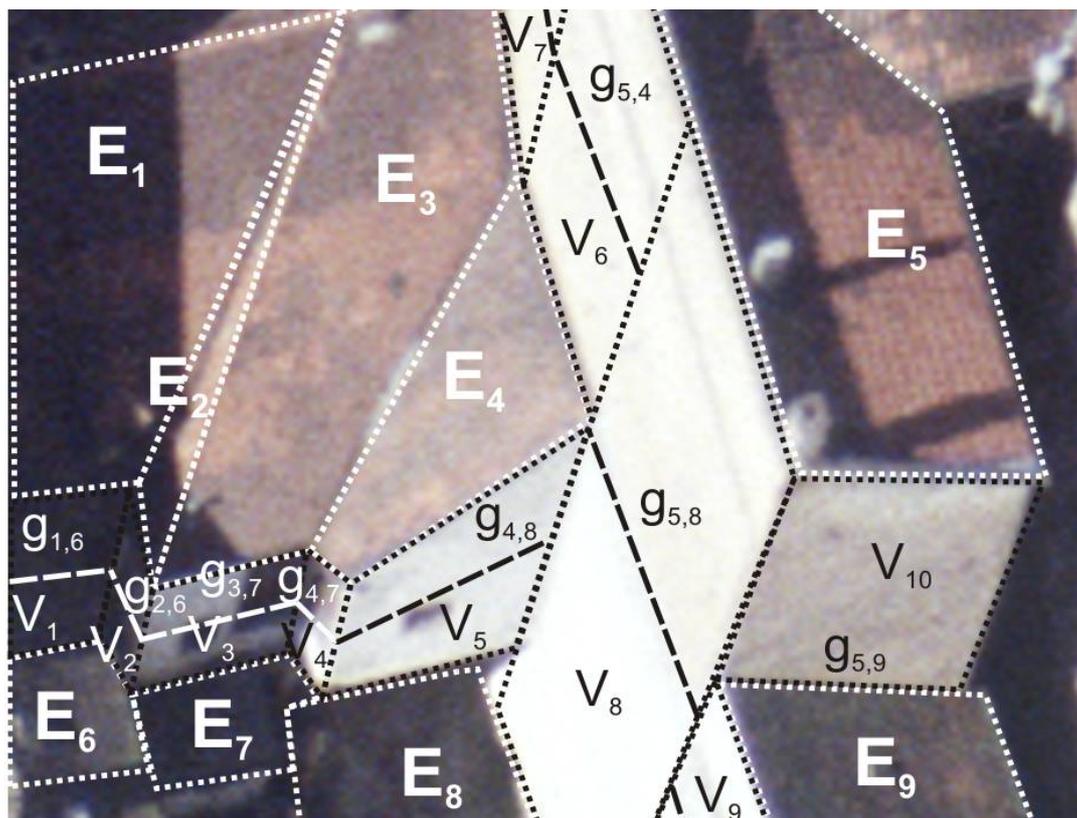


Abb. 48: Komplexe Gebäudeform in Luftbildausschnitt; gekennzeichnet sind Dachflächen (weiß gepunktet), Vertikalflächen (schwarz gepunktet) und gemittelte Kanten zwischen Dach- und Vertikalflächen (gestrichelt)

4.2.2 Linienadjazenz

Wie schon eingangs erwähnt, können die Linienbeziehungen nur indirekt ermittelt werden. Dies liegt daran, dass die Linien bzw. Kanten nicht direkt aus den Ausgangsdaten, sondern durch Schnitt der ermittelten Ebenen generiert werden. Sie sind auch nicht identisch mit den in Kapitel 4.3.3 erwähnten Begrenzungslinien, auch wenn man diese als Approximation der Gebäudekanten ansehen kann. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass die aus Ebenenschnitten ermittelten Kanten eventuell eine andere Lage und Richtung haben als jene, die aus den Rasterdaten ermittelt wurden.

So wie die Linien aus den Flächen abgeleitet werden, so wird ihre Topologie aus den Flächentopologien abgeleitet. Dabei wird im bereits aufgebauten Topologiegraphen, der bisher als Primitive der untersten Hierarchieebene die Linien enthält, nach Kreisen gesucht. Sie sind in der Graphentheorie folgendermaßen definiert (s. [VOLKMANN, 1991]):

„Sind in einer Kantenfolge alle Kanten paarweise verschieden, so spricht man von einem Kantenzug. Sind in einem Kantenzug alle Ecken paarweise verschieden, so liegt ein Weg vor. Ein geschlossener Kantenzug $C=(a_0, \dots, a_p)$, in dem die Ecken a_0, \dots, a_{p-1} paarweise verschieden sind, heißt Kreis.“

Hier wird nun nach Kreisen gesucht (vgl. Abb. 49, bogenförmige Pfeile), aber die Begriffe *Kanten* und *Ecken* dürfen dabei nicht missverstanden werden. Sie beziehen sich rein auf Knoten und deren Verbindungen im Graphen und nicht auf die geometrischen Primitive Kanten und Ecken wie sie hier gebraucht werden.

Dem Begriff Kante in der obigen Definition entspricht hier die Inzidenzbeziehung zwischen einer Fläche und einer Gebäudekante, dem Begriff Ecke die Gebäudekanten (vgl. Abb. 50).

Außerdem wird nun nach bestimmten Kreisen gesucht, nämlich solchen, bei denen alle beteiligten Gebäudekanten einen gemeinsamen Punkt besitzen. Über diesen gemeinsamen Schnittpunkt adjazieren die Kanten, d. h. sind sie benachbart. Da aber zu diesem Zeitpunkt noch keine Punkte ermittelt wurden, kann diese Eigenschaft nicht direkt abgeprüft werden. Man muss sich deshalb weiterer Analysen der Flächennachbarschaften bedienen.

Zunächst wird die Kreissuche auf Kreise mit 3 beteiligten Kanten beschränkt. Dies ist gleichzeitig der kleinstmögliche bei der Gebäudemodellierung existierende Kreis, d. h. derjenige mit der Mindestanzahl an beteiligten Kanten. Sollen alle beteiligten Kanten mit dem gleichen Punkt inzidieren, so muss jede inzidente Fläche mit allen anderen beteiligten Flächen adjazieren. Mit anderen Worten müssen alle Flächen zueinander benachbart sein.

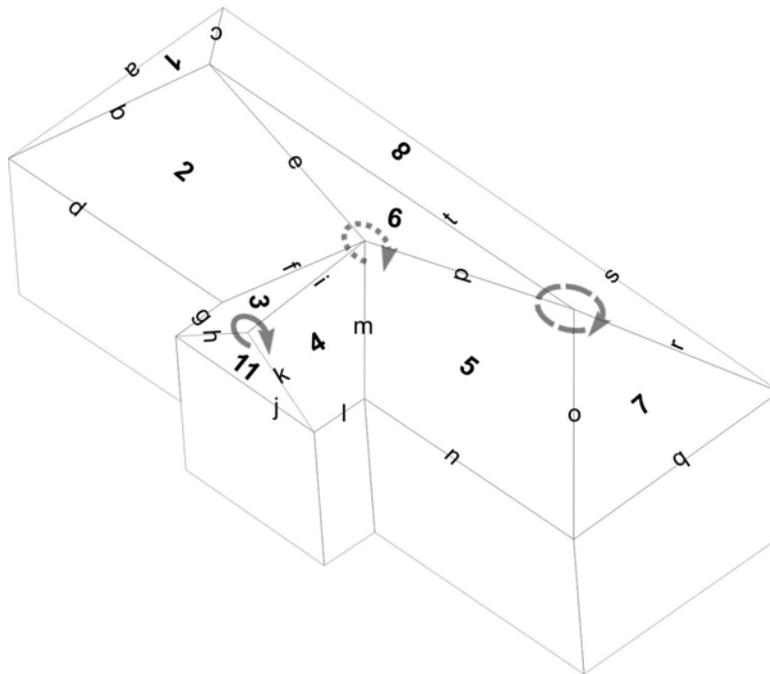


Abb. 49: Beispiele zur Kantentopologiesuche (Kreissuche) an realem Gebäude, bogenförmige Pfeile deuten Kreise an

In Abb. 49 ist ein reales Gebäude als Vektormodell dargestellt, seine Dachflächen und Kanten sind mit Nummern bzw. Kleinbuchstaben beschriftet. Es ist dort auch ein Beispiel für den Fall des Kreises mit drei Kanten dargestellt (durch bogenförmigen, ausgefüllten Pfeil symbolisiert), und zwar an der Giebelseite des Vorbaus, wo die Flächen 3, 4 und 11 über die Kanten h, i und k adjazieren. Derselbe Kreis ist in Abb. 50, einer Darstellung des Flächen-Kantengraphs des Beispiels, grau hinterlegt. Dort sieht man deutlich, dass es im Kreis möglich ist, an einer beliebigen Fläche zu starten und über verschiedene Kanten wieder zur Fläche zurückzukehren, ohne dass eine Kante zweifach durchschritten werden muss.

Der Kreis mit drei Kanten lässt sich leicht aus einer Adjazenzmatrix ermitteln, in dem nach zwei verschiedenen Flächen mit einer gemeinsamen Nachbarfläche gesucht wird.

Kreise mit vier beteiligten Kanten lassen sich ebenfalls relativ einfach bestimmen. Dazu wird der vorhergehend behandelte Fall erweitert, in dem wiederum zwei benachbarte Flächen betrachtet werden. Diesmal wird aber untersucht, ob sie keine gemeinsame Nachbarfläche haben. Ist dies der Fall, dann wird weiter analysiert,

ob zwei ihrer nicht gemeinsamen Nachbarflächen benachbart sind. Zur weiteren Verdeutlichung ein Beispiel, korrespondierend zu Abb. 49 (gestrichelter, kreisförmiger Pfeil). Es wird festgestellt, dass Fläche 5 und Fläche 7 keinen gemeinsamen Nachbarn haben. Deshalb wird nun geprüft, ob eine Nachbarfläche der Fläche 7 mit einer Nachbarfläche der Fläche 5 benachbart ist. Bei der Fläche 8 ist dies der Fall, da sie mit Fläche 6 benachbart ist, einem Nachbarn der Fläche 5.

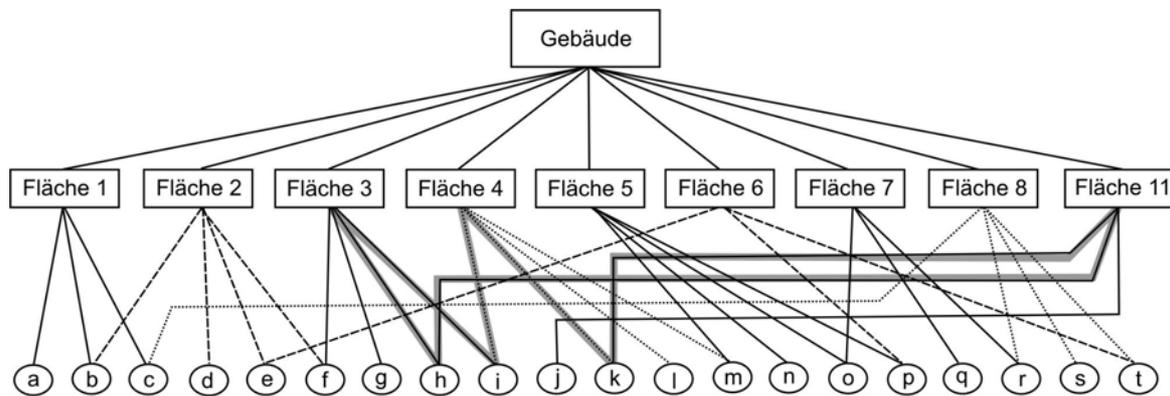


Abb. 50: Flächen-Kanten-Graph zum oben abgebildeten Beispiel; die Kanten eines Kreises (Flächen 3-4-11) sind grau hinterlegt

Die Abfrage für Kreise mit mehr als vier Kanten zur Kantenadjazenzsuche wird in der Praxis selten benötigt. Zusätzlich zu der grundsätzlichen Suche nach einem geschlossenen Durchlauf durch den Topologiegraphen muss dabei analysiert werden, ob der Kreis auch gleichzeitig den kürzesten Weg zwischen den beiden Ausgangsflächen, aber nicht deren direkte Verbindung darstellt. Im Beispiel wäre es z. B. möglich, die Fläche 3 ausgehend von der Fläche 4 über die Flächenfolge 4-5-7-8-1-2-3 zu erreichen. Die dabei überquerten Kanten sind aber nicht alle adjazent. Dies ist aber bei der kürzesten Verbindung, der Flächenfolge 4-5-6-2-3, der Fall. Um dies festzustellen müssen aber alle möglichen Kreise berechnet und derjenige mit der kürzesten Distanz, d. h. der geringsten Anzahl von Flächendurchläufen, ermittelt werden. Gerade bei Gebäuden mit sehr vielen Flächen kann dies unter Umständen zu sehr komplexen und damit zeitaufwendigen Berechnungen führen, weshalb nur die Abfrage für Kreise bis zu vier Kanten implementiert wurde. Das in Abb. 49 dargestellte Gebäude mag nun vermeintlich nicht modelliert werden können, was aber nicht der Fall ist. In der Abbildung ist ein CAD-Modell des Gebäudes gezeigt, das man zu Visualisierungszwecken rendern können muss (weitere Details im Kapitel 4.3.5.2). Aufgrund softwarebedingter Limitationen durften in der bisher realisierten Ausbaustufe einzelne Flächen nicht mehr als höchstens vier Randpunkte besitzen, so dass die zum Betrachter weisende große Dachfläche in die Flächen 2, 5 und 6 aufgeteilt wurde. In der Praxis wird diese Fläche als eine einzige erkannt und im Gebäudemodell eingefügt, so dass dabei nicht das Problem eines Kreises mit fünf Kanten auftritt.

4.3 Objektgenerierung

Die vorangegangenen Kapitel dienen der Erklärung der notwendigen Analyseverfahren, auf deren Ergebnissen die eigentliche Objekt- oder Gebäudegenerierung aufsetzt. Dies soll bedeuten, dass zur Ermittlung der Dach-Flächen, -Kanten und -Eckpunkte plane Flächen und ihre topologische Beziehungen gefunden werden müssen. Ist dies geschehen, so können die Gebäudeprimitive rein mathematisch berechnet werden. Im Folgenden wird nochmals kurz auf die Ermittlung der Gebäudemodellbestandteile eingegangen.

4.3.1 Dachflächen

Die *Dachflächen* werden im eigentlichen Sinne nicht direkt ermittelt. *Flächen* sind durch Linien begrenzte Stücke von *Ebenen*. Hier werden, wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben, die Parameter der *Ebenen*, zu denen die einzelnen Flächen gehören, mit Hilfe eines speziellen Flächenwachstumsverfahrens ermittelt. Die dabei ebenfalls detektierten Flächenränder sind jedoch nur Approximationen der eigentlichen Flächengrenzen, weshalb nach diesem Segmentierungsschritt die *Dachflächen*(grenzen) nur genähert vorliegen. Sie sind erst dann vollständig beschrieben, wenn ihre Eckpunkte und Kanten berechnet wurden, das bedeutet erst nach Ermittlung aller Dach-Kanten und -Eckpunkte.

4.3.2 Wände

Als Wände werden hier alle vertikalen Gebäudeflächen bezeichnet. Sie werden genähert aus den Laserscanning-Höhendaten abgeleitet. Im Zuge der Untersuchung auf Höhennachbarschaft der Dachflächen (vgl. Kapitel 4.2.1.3) werden sie an den bei der Flächensegmentation gefundenen approximierten Flächengrenzen eingefügt, sobald dort ein Höhengsprung detektiert wurde. Dazu werden die beiden Kantenendpunkte in die Gleichung einer Vertikalebene eingesetzt. Sie ergibt sich aus Gleichung (34) durch Einsetzen von Null für den Parameter c :

$$\begin{aligned} ax + by + 0 * z + d &= 0 \\ \Rightarrow ax + by + d &= 0 \\ \Rightarrow a'x + b'y + 1 &= 0 \end{aligned} \tag{ 54 }$$

Damit sind aber die Flächengrenzen bzw. -kanten noch nicht festgelegt. Sie ergeben sich erst später durch die Schnitte der zugehörigen Vertikalebenen mit anderen Gebäudeebenen. Die Vertikalflächen sind ungenauer bestimmt als die Schräg- oder Horizontalflächen, da sie aus den in den gerasterten Höhendaten gefundenen Flächenkanten bestimmt werden. Ihre Position und Orientierung wird aus den für beide Nachbarflächen getrennt gefundenen Flächenkanten an dieser Stelle durch Mittelung bestimmt. Damit ist eine Vertikalfläche aber aus genau vier Punkten ermittelt; bei den Schräg- oder Horizontalflächen werden in der Regel mehr Punkte zur Bestimmung herangezogen (vgl. Kapitel 4.1.1). Es wäre aber auch möglich, den Richtungsvektor der Vertikalflächen in der x,y-Ebene über eine ausgleichende Gerade durch alle Punkte der beteiligten Flächenkanten zu bestimmen. Die Bestimmungsgenauigkeit der Vertikalebenen könnte dadurch, abhängig von der jeweiligen Länge der Flächenkanten, etwas gesteigert werden.

4.3.3 Gebäudekanten

Die Gebäudekanten werden durch den Schnitt der zu den Dachflächen gehörenden Ebenen ermittelt, die durch die Segmentierung gefunden wurden. Welche Ebenen zu schneiden sind, wird aus der Flächentopologie abgeleitet (vgl. Kapitel 4.2).

Sie werden also durch Lösen des folgenden Gleichungssystems berechnet, das aus zwei Ebenengleichungen besteht:

$$\begin{aligned} a_1x + b_1y + c_1z - d_1 &= 0 \\ a_2x + b_2y + c_2z - d_2 &= 0 \end{aligned} \quad (55)$$

In einer allgemeinen Form lautet eine mögliche Lösung, also die Schnittgerade ($z=1$ gesetzt):

$$\vec{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g \\ f \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} h \\ e \\ 1 \end{pmatrix} z \quad (56)$$

mit:

$$e = \frac{a_2c_1 - a_1c_2}{a_1b_2 - a_2b_1}, \quad f = \frac{a_1d_2 - a_2d_1}{a_1b_2 - a_2b_1}, \quad g = \frac{d_2}{a_2} - \frac{b_2}{a_2}f, \quad h = -\frac{c_2}{a_2} - \frac{b_2}{a_2}e \quad (57)$$

Als Ergebnis bekommt man die jeweilige Schnittgerade der Ebenen, welche die Richtung der Gebäudekante, aber noch nicht deren Lage angibt. Ähnlich wie die Gebäudeflächen erst durch ihre Randlinien vollständig definiert sind, sind die Gebäudekanten erst nach Ermittlung der Gebäudeecken vollständig bestimmt, da sie nur einem Teilstück der Schnittgeraden entsprechen.

4.3.4 Gebäudeecken

Die Gebäudeecken sind die Schnittpunkte der Gebäudekanten. Sie werden durch Lösen des folgenden Gleichungssystems berechnet (vgl. Gleichung (56)):

$$\begin{aligned} x_1 + t_1 dx_1 &= x_2 + t_2 dx_2 \\ y_1 + t_1 dy_1 &= y_2 + t_2 dy_2 \\ z_1 + t_1 dz_1 &= z_2 + t_2 dz_2 \end{aligned} \quad (58)$$

Eine mögliche Lösung lautet:

$$\vec{x} = (x_1 + t_1 dx_1, y_1 + t_1 dy_1, z_1 + t_1 dz_1) \quad (59)$$

mit

$$t_1 = \frac{(x_1 - x_2) dy_2 - (y_1 - y_2) dx_2}{dx_2 dy_1 - dx_1 dy_2} \quad (60)$$

Da die Geradenschnitte im Dreidimensionalen stattfinden, muss der Fall der „windschiefen Geraden“ mitbehandelt werden. Er kann dann auftreten, wenn Geraden geschnitten werden sollen, die nicht gemeinsam in einer Ebene liegen, d. h. beim Schnitt zweier Geraden die nicht beide Grenzlinien ein und derselben Dachfläche sind.

Aufgrund von Ungenauigkeiten bei der Ebenenbestimmung kann es vorkommen, dass sich zwei Geraden rein rechnerisch nicht schneiden, obwohl die entsprechenden realen Gebäudekanten sich in einem Punkt treffen. In diesen Fällen wird der Punkt ermittelt, der zu beiden Geraden den geringsten Abstand hat (siehe Punkt N in Abb. 51) und als „Schnittpunkt“ genommen.

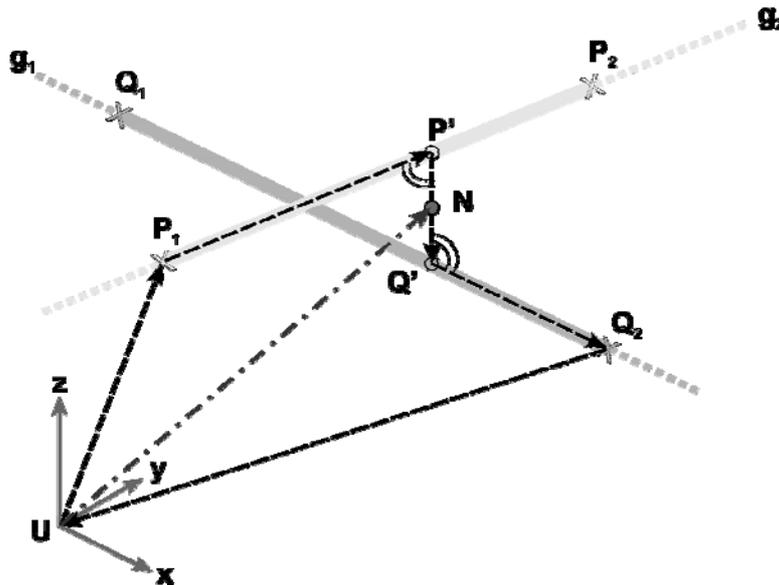


Abb. 51: Prinzipskizze zur Berechnung des Punktes N mit kürzestem gemeinsamen Abstand zu zwei windschiefen Geraden

Er liegt auf der kürzesten, zu beiden Geraden g_1 und g_2 (die Endpunkte sind mit einem X bezeichnet) senkrecht stehenden Linie. Man kann ihn mithilfe des Kreuzproduktes der beiden Richtungsvektoren ermitteln (z. B. [MERZIGER & WIRTH, 1991]):

$$\Rightarrow \vec{N} = \vec{x}_1 + t_1 \vec{dx}_1 + 0,5 * t_3 \left(\vec{dx}_1 \times \vec{dx}_2 \right) = \vec{x}_2 + t_2 \vec{dx}_2 - 0,5 * t_3 \left(\vec{dx}_1 \times \vec{dx}_2 \right) \quad (61)$$

4.3.5 Gebäudemodelle

Die finale Verbindung der ermittelten Primitiven zu Gebäudemodellen ist stark von ihrer beabsichtigten Anwendung abhängig. Es besteht eine gewisse Diskrepanz zwischen dem eigentlichen Ziel der Approximation eines Gebäudes durch plane Flächen und den Erfordernissen, die von Visualisierungsprogrammen oder CAD-Software an die Gebäudemodelle gestellt werden. Sie fordern üblicherweise eine Einschränkung der Randflächen auf höchstens vier (besser drei) Punkte, um sie z. B. noch *rendern*, d. h. unter Berücksichtigung von Sichtbarkeitsbedingungen und Beleuchtungsverhältnissen fotorealistisch darstellen zu können.

Im Folgenden wird deshalb zuerst auf die Verbindung zu solchen Gebäudemodellen eingegangen, die zur Änderungsdetektion genutzt werden können (im Folgenden *Deskriptionsmodelle* genannt), und danach kurz beschrieben, wie sie sich auf die Form einschränken lassen, die z. B. zur Visualisierung geeignet ist; diese Modelle werden hier als *Visualisierungsmodelle* bezeichnet. In Abb. 52 sind beispielhaft beide Darstellungsarten in ihrem prinzipiellen Aufbau für dasselbe Gebäude wiedergegeben. Das Ergebnis der realen Visualisierung dieses Gebäudes zeigt Abb. 53.

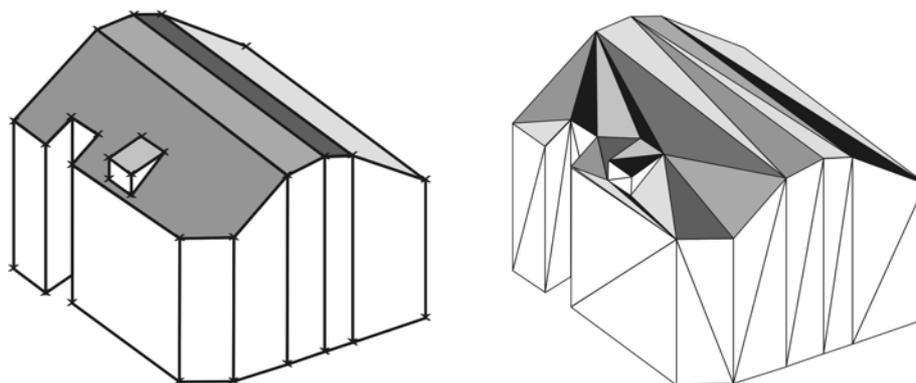


Abb. 52: Verschiedene Modelle desselben Gebäudes; links: Deskriptionsmodell, rechts: Visualisierungsmodell (Dachflächen sind in verschiedenen Grautönen dargestellt)

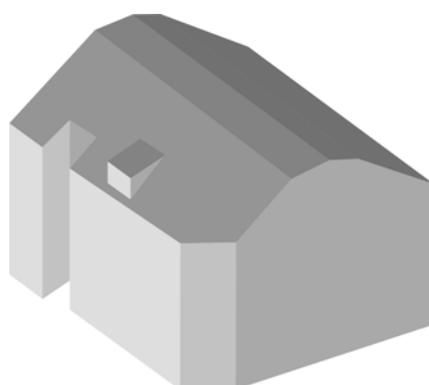


Abb. 53: Reale Visualisierung des Gebäudes aus Abb. 52

4.3.5.1 Deskriptionsmodell

Der Begriff Deskriptionsmodell (von lateinisch *describere* = beschreiben, aufzeichnen) wurde gewählt, da das aus den Laserscanningdaten abgeleitete Gebäudemodell diese Daten so gut wie möglich wiedergeben, also beschreiben soll. Seine Bestandteile sind die Gebäudeprimitiven (Flächen, Kanten und Ecken) sowie ihren topologischen Beziehungen, also die Inzidenz- und Adjazenzrelationen.

Unter einer möglichst guten Wiedergabe wird hier aber nicht verstanden, dass das Gebäudemodell möglichst detailliert die gemessene Höhe eines jeden einzelnen Pixels wiedergeben soll, sondern dass es im Sinne des Modellierungsansatzes das Gebäude möglichst gut beschreibt; das bedeutet hier aber auch bis zu einem gewissen Grad generalisiert (vgl. Kapitel 3.2.1 und Anfang von Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Der Generalisierungsgrad wird z. B. durch die Wahl der zugelassenen Abweichung eines einzelnen Pixels von einer ermittelten Dachfläche und dem Umgang mit Ausreißerpixeln bestimmt.

Im Vordergrund bei dieser Art der Gebäudemodelle steht ihre leichte Interpretierbarkeit und der schnelle Zugriff auf die einzelnen Modellbestandteile. Aus diesen Gründen wurde in dieser Arbeit zur Speicherung eine eher pragmatische Lösung gewählt. Für jedes Gebäude werden die Ebenengleichungen seiner Einzelflächen, Geradengleichungen der Kanten und die Punktkoordinaten der Eckpunkte in einer Textdatei abgespeichert. Die Inzidenz- und Adjazenzbeziehungen werden in Matrizenform angehängt, und zwar jeweils eine

jeweils eine Adjazenzmatrix pro Art der Gebäudeprimitive, sowie die Inzidenzmatrizen in der Primitivenhierarchie aufeinander folgender Objektarten, also die Flächen-Kanten, sowie Kanten-Punkte-Inzidenzmatrix.

Dieses Datenformat ist so angelegt, dass es sich mit relativ geringem Aufwand in einer Datenbank abspeichern ließe. Dadurch würde sich auch der Zugriff auf die einzelnen Elemente optimieren lassen, da die datenbankeigenen Abfragemechanismen direkt genutzt werden könnten. Zum Beispiel könnte die Abfrage nach den Randpunkten einer Ebene leicht über „if“-Beziehungen (Bedingungsbeziehungen) formuliert werden, in der Art: „Suche alle Punkte, die auf solchen Kanten liegen (1. Bedingung), welche inzident zur Ebene X sind (2. Bedingung)“.

4.3.5.2 Visualisierungsmodell

Das Visualisierungsmodell orientiert sich an dem DXF-Format (s. z. B. [AUTODESK, 2003], [RUDOLPH ET AL., 1993]). Dies ist ein von der Firma Autodesk entwickeltes Format zur Beschreibung geometrischer Daten, das mittlerweile zum Standard avancierte und deshalb von fast allen Grafik-Programmen interpretiert werden kann.

Das Datenformat kann als objektorientiert bezeichnet werden, da es verschiedene geometrische (Grund-)Formen kennt, mit denen eine Szene beschrieben wird. Es sind dies z. B. Punkte, Linien und Drei- bzw. Vierecksflächen, aber auch Kreise, Quader, Kugeln, Kegel oder Toruse, etc. Eine Szene wird mit Hilfe dieser geometrischen Objekte beschrieben, in dem die auftretenden Einzelobjekte hintereinander in einer Textdatei abgelegt werden. Dabei wird jedes neue Objekt durch eine Reihe von Kennzahlen eingeleitet und danach seine – für diese Objektart spezifischen – Parameter wiedergegeben. Im Falle eines Punktes sind das z. B. seine Koordinaten, im Falle des Kreises sein Mittelpunkt und der Radius.

Der Nachteil dieses Datenformates ist, dass im Allgemeinen die Topologie zwischen verschiedenen Objekten nicht abbildbar ist. Zwar existieren einige Objektarten, die sich aus mehreren Punkten zusammensetzen und implizit die Topologie der Punkte über eine definierte Speicherreihenfolge enthalten, z. B. die Kugel, aber auch sie können nicht zur vollständigen Abbildung eines Gebäudes im Sinne eines Deskriptionsmodells benutzt werden. Dagegen spricht, dass für diese Objekte nur Punkte und ihre Verbindungslinien abgespeichert werden, zwischen den sich dann Flächen befinden, es ist aber z. B. nicht möglich, gezielt einzelne Flächen oder Linien zu extrahieren; damit können sie z. B. bei einer Änderungsdetektion auch nicht automatisch analysiert werden.

Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass Flächen nur aus höchstens vier Punkten bestehen dürfen. Zwar können Flächenränder mit dreidimensionalen Polygonzügen abgebildet werden, damit wird aber keine Fläche eingeschlossen, d. h. der durch ein geschlossenes Polygon umgebene Bereich ist nicht als massive Fläche darstellbar, man kann ihn z. B. nicht rendern.

Um dieses Problem zu umgehen, müssen die extrahierten Deskriptionsmodelle weiterverarbeitet werden. Das Ziel ist es dabei, sie in drei- oder viereckige Flächenstücke aufzuteilen. Dafür eignen sich prinzipiell Triangulationsmethoden, wie z. B. die Delaunay-Triangulation.

Für das Visualisierungsmodell werden nur die aus einer sog. *Constrained Delaunay-Triangulierung* unter Berücksichtigung von Flächengrenzen und Lücken gewonnenen Dreiecksflächen im DXF-Format abgespeichert (Details im Folgenden). Aufgrund der Definition des DXF-Formats werden aber lediglich ihre Eckpunkte abgespeichert, wodurch die Flächen aber gleichzeitig begrenzt sind. Die Topologie der Einzelflächen ergibt sich hier nur implizit durch die grafische Darstellung. Sie setzen sich visuell zu Flächenrand-Darstellungen der modellierten Gebäude zusammen, die dreidimensional unter Berücksichtigung von Beleuchtungsverhältnissen dargestellt werden können.

Delaunay-Triangulation

Nach BILL & ZEHNER (2001) ist die Delaunay-Triangulation „... eine Methode zur Anpassung von Dreiecken an einen Satz von Punkten. Die Dreiecke sind mit der Bedingung definiert, dass innerhalb eines Umkreises um drei Punkte, die ein Dreieck bilden, kein weiterer Punkt liegt. ... Die resultierenden Dreiecke überlappen sich nicht und vermaschen eine beliebig große Punktmenge flächendeckend und einheitlich ...“.

Es handelt sich also um eine Methode der optimalen Verbindung einer Punktmenge zu Dreiecken. Dabei wird als optimal angesehen, wenn die Dreiecksseiten insgesamt möglichst den kürzesten Verbindungen zwischen den Punkten des Punkthaufens entsprechen (dies ist meist die Folge, wenn innerhalb eines Dreiecks kein weiterer Punkt zu liegen kommt). In Abb. 54 ist ein Beispiel dargestellt. Die linke Bildhälfte zeigt die Ausgangspunktmenge, in diesem Fall 13 Punkte. Im rechten Bildteil ist eine mögliche Delaunay-Triangulation wiedergegeben, wobei ebenfalls die umgebenden Kreise der Dreiecke angedeutet sind; es wurden 18 Dreiecke gebildet.

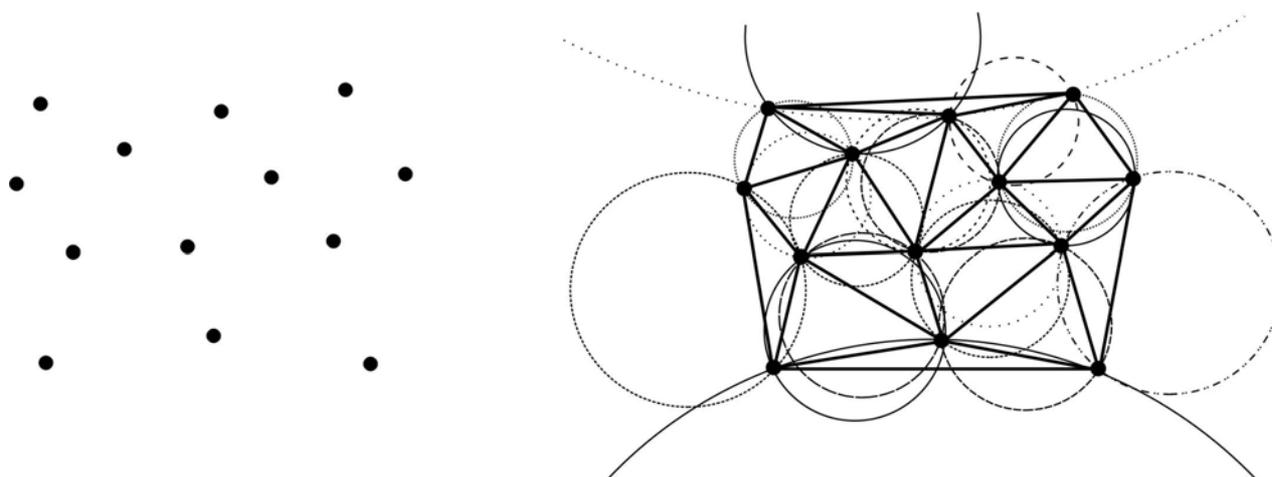


Abb. 54: Beispiel zur Delaunay-Triangulierung; links: Ausgangspunktmenge, rechts: Delaunay-Vermaschung mit Umkreisen der Dreiecke

Das Beispiel zeigt, dass zum Teil sehr lange Verbindungen existieren, und zwar an den äußersten Kanten der Figur. Dies kommt daher, dass im Außenraum keine weiteren Punkte liegen und deshalb der zweitnaheste Punkt, der zur Komplettierung eines Dreiecks nötig ist, entsprechend weit entfernt sein darf. Es zeigt sich gleichzeitig die Eigenschaft der Delaunay-Triangulierung konvexe Umrandungen zu bilden. Dabei bedeutet Konvexität, dass für eine Figur jedes beliebige Tripel von drei aufeinander folgenden Randpunkten herausgegriffen werden kann, so dass bei der Verbindung der beiden äußersten Punkte mit einer Linie der mittlere Punkt oberhalb der Linie liegt, d. h. in Beobachtungsrichtung weiter weg ist als die beiden anderen Punkte. Das heißt, der mittlere Punkt würde außerhalb der Figur liegen, falls die gezogene Verbindung Teil des Figurenrandes wäre.

Constrained-Delaunay-Triangulierung

Hier soll die Triangulierung nicht zur Verbindung eines beliebigen Punkthaufens, sondern zur Unterteilung einer bekannten Fläche benutzt werden. Von dieser Fläche ist aber der Rand bekannt, der bei der Triangulation erhalten bleiben soll. Aus diesem Grund müssen die Flächenkanten zwingend als Verbindungslinien eingehalten werden; dies wird mit dem englischen Wort *constrained* (constraint = Zwang, Bedingung) angedeutet.

Praktisch kann dies wie z. B. in [SHEWCHUK, 1996] beschrieben realisiert werden. Dort wird zuerst eine Delaunay-Triangulation durchgeführt und danach werden die Zwangs-Kanten hinzugefügt. Schneiden sie vorhandene Dreiecksseiten, dann werden diese Dreiecke aufgelöst und der Bereich um die Zwangskante wird neu trianguliert.

Abb. 55 zeigt ein Beispiel hierfür. Im linken Bildteil ist das aus dem vorangegangenen Kapitel bereits bekannte Triangulationsergebnis zu sehen, in das eine Zwangskante eingefügt wird (fett dargestellt). Die gestrichelt gezeigten Dreiecksseiten werden von der Zwangskante geschnitten und deshalb gelöscht. Der Bereich um die Zwangskante wird nun geteilt, es ergibt sich ein links- und ein rechtsgelegener Teil (im rechten Bildteil angedeutet durch die punktierte Verlängerung der Zwangskante als Trennlinie und den grau dargestellten linksseitigen Teil).

Die nun fehlenden, also nicht mehr triangulierten, Teile der Figur werden neu nach Delaunay trianguliert, aber unter Berücksichtigung nur der Punkte, die zum selben Bereich gehören, d. h. dass bei der Triangulierung des linksseitigen Bereichs der rechtsseitige ignoriert wird und umgekehrt. Es können nun also in den Umkreisen um die Dreiecke Punkte liegen, sofern sie zum jeweils anderen Bereich gehören. Die im rechten Bildteil gestrichelt dargestellten Linien sind die neu hinzugekommenen Verbindungslinien.

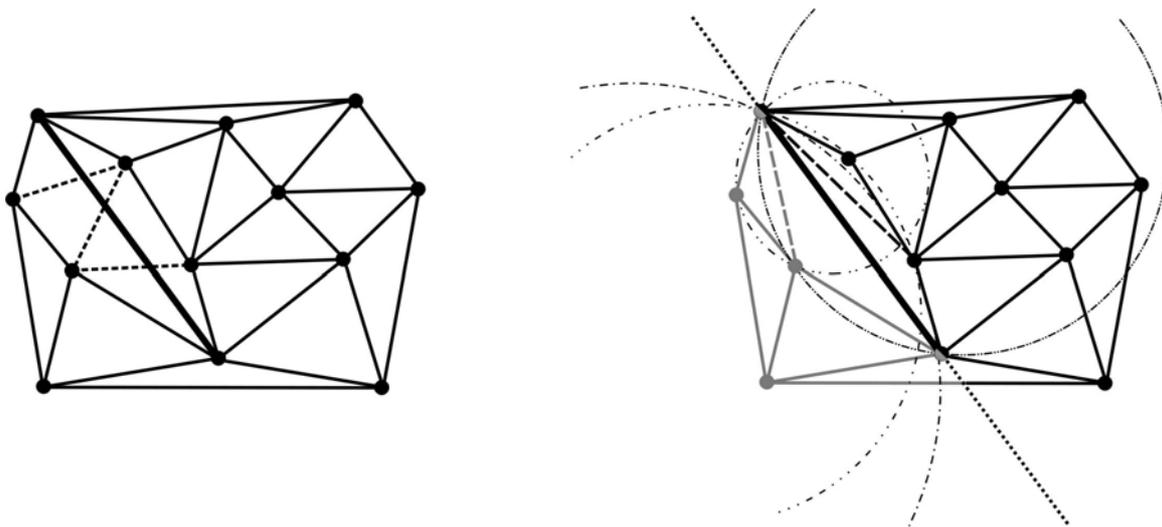


Abb. 55: Constrained-Delaunay-Triangulierung; links: Einführung einer Zwangskante (fett) in eine bereits vermaschte Punktvolke, rechts: neue Triangulation des betroffenen Bereiches

Berücksichtigung von Lücken und Flächengrenzen

Durch die Einführung der Flächenränder als Zwangslinien ist noch nicht gewährleistet, dass sie auch die Grenzen des triangulierten Bereichs werden, insbesondere dann nicht, wenn konkave Teilstücke am

Flächenrand auftreten (vgl. Abb. 56a, untere Flächenbegrenzung). Es kann zudem auch Flächengrenzen innerhalb einer Fläche geben, falls ein segmentierter Bereich vollständig innerhalb eines anderen Segments liegt, wie dies z. B. bei Dachgauben vorkommen kann, die vollständig innerhalb einer Dachebene liegen (vgl. Abb. 47).

SHEWCHUK (1996) schlägt hierfür ebenfalls eine Methode vor, die er mit einem Virus vergleicht, der alle triangulierten Bereiche vernichtet bis er an bestimmte Grenzen stößt.

Wird dieses Verfahren benutzt, um vollständig innerhalb des betrachteten Segments liegende andere Segmente, so genannte Löcher, aus der Triangulierung herauszunehmen, dann wird das Verfahren an einem beliebigen Dreieck innerhalb des Loches gestartet. Es wird überprüft, ob das Dreieck Nachbarn hat, die nicht über eine Zwangskante benachbart sind. Ist dies der Fall, dann werden alle Dreiecksseiten gelöscht, die keine Zwangskanten sind, und danach mit den benachbarten Dreiecken fortgefahren. Dies wird so lange wiederholt, bis keine Dreiecke mehr existieren, die nicht über Zwangskanten erreichbar sind. Das Loch wird also quasi von innen ausgehöhlt, es enthält keine aus der Triangulierung entstandenen Dreieckskanten mehr.

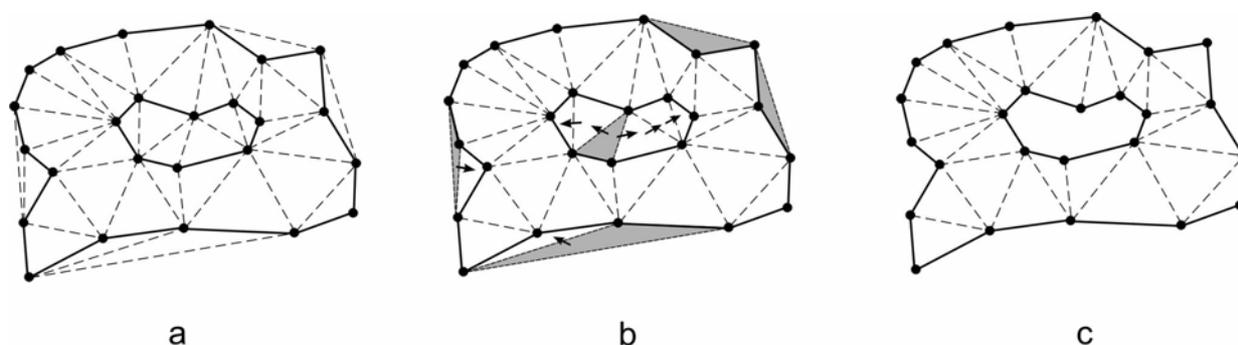


Abb. 56: Eliminierung von Dreiecken in Löchern und konkaven Randbereichen

Man kann das Verfahren aber auch benutzen, um Kanten außerhalb der definierten Fläche – in konkaven Randbereichen – zu eliminieren. Dazu geht man quasi „von außen nach innen“ vor. Dies bedeutet, man untersucht von den ganz außen gelegenen Dreiecken ausgehend alle angrenzenden Dreiecke. Dabei wird jedes Dreieck gelöscht, das nicht über eine Zwangskante erreicht wird; an den Zwangskanten endet das Verfahren jeweils.

In Abb. 56 ist das Verfahren exemplarisch dargestellt. Das Teilbild a) zeigt das Ergebnis einer Constrained-Delaunay-Triangulierung; die gestrichelten Linien sind die bei der Triangulierung entstandenen Dreiecksseiten, die dickeren durchgezogenen Linien zeigen die Zwangskanten. In b) ist das Verfahren zur Elimination der überflüssigen Dreiecke symbolisch dargestellt. Die grau unterlegten Dreiecke sind Startpunkte, an denen der Dreieck-eliminierende „Virus“ gestartet wird. Die Pfeile geben die Richtung seines Fortschreitens an. Das letzte Teilbild zeigt schließlich das Ergebnis des Verfahrens.

4.4 Beispiele und Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des entwickelten Verfahrens zur Gebäudemodellierung diskutiert. Dazu werden extrahierte Gebäudemodelle auf ihre semantische und geometrische Korrektheit überprüft. Das Ziel in dieser Arbeit ist es, die Gebäudemodelle möglichst gut an die Laserscanning-Messungen anzupassen, weshalb die geometrische Genauigkeit der Ergebnisse ausführlicher diskutiert wird.

4.4.1 Semantische Korrektheit

Zur Überprüfung der Korrektheit extrahierter Gebäudemodelle wird in einigen Arbeiten die *semantische Korrektheit* benutzt. Darunter ist zu verstehen, dass die extrahierten Gebäudemodelle in Klassen wie „*korrekt modelliert*“ und „*inkorrekt modelliert*“ eingeteilt werden. Als Grundlage zur Einteilung in diese Klassen dient meist ein Vergleich der durch einen Operateur aus Luftbildern ermittelten Gebäudedachtypen, wie z. B. Satteldach oder Flachdach, mit dem rekonstruierten Dachtyp. Es werden also die Anzahl der Dachflächen und ihre topologischen Beziehungen zueinander zur Überprüfung der Modellierungsgenauigkeit benutzt.

Die semantische Korrektheit der in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse wurde mit denen zweier aktueller Arbeiten zur Gebäudemodellierung aus der Literatur verglichen, für welche nicht nur qualitative sondern auch quantitative Angaben über die semantische Korrektheit vorliegen. Im Einzelnen sind dies die Arbeiten von HOFMANN (2004) und SUVEG & VOSSELMAN (2004). In diesen Arbeiten sind mehrheitlich Modellierungsergebnisse für Sattel-, Walm- und Flachdächer angegeben, weshalb aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit ebenfalls eine Untersuchung für Gebäude dieser Dachtypen durchgeführt wurde.

In der folgenden Tab. 3 sind die Ergebnisse der Untersuchung auf semantische Korrektheit für 183 Gebäude bzw. Gebäudeteile wiedergegeben, die mit Hilfe von Luftbildern eindeutig einem der erwähnten Dachtypen zugeordnet werden konnten (vgl. Abb. 57 und Abb. 58). Die Ergebnisse der Gebäuderekonstruktion wurden jeweils nach Dachtypen klassifiziert; falls dies aber nicht eindeutig möglich war, z. B. weil die Gebäude durch zu viele oder zu wenige Dachflächen approximiert wurden, ist das Ergebnis als „nicht zuordenbar“ klassifiziert worden.

„realer“ Dachtyp (Gesamtzahl) modellierter Dachtyp	Satteldach (65)	Walmdach (37)	Flachdach (81)
Satteldach	58 (89%)	1	0
Walmdach	0	28 (76%)	0
Flachdach	6	4	76 (94%)
nicht zuordenbar	1	4	5

Tab. 3: Modellierungsergebnis hinsichtlich semantischer Korrektheit

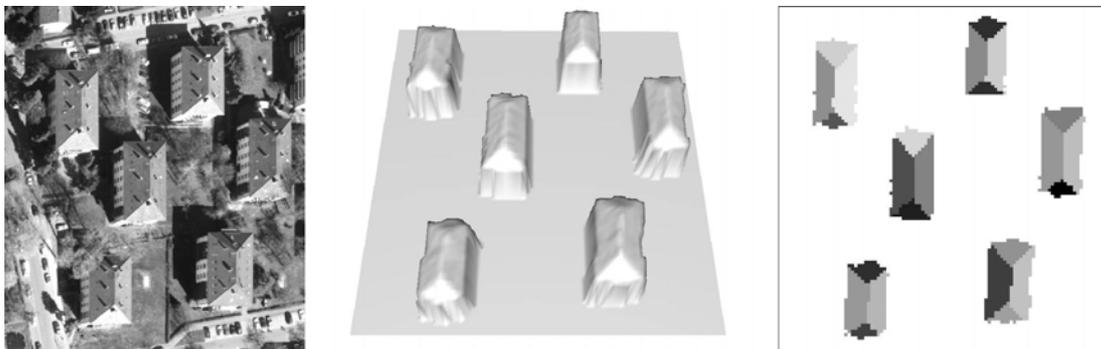


Abb. 57: Luftbild (links), 3D-Darstellung der LE-Daten von 2002 (Mitte) und daraus extrahierte Dachflächen (rechts) einer Szene mit Walmdachgebäuden

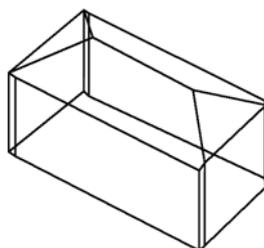


Abb. 58: Automatisch abgeleitetes Vektormodell eines der Gebäude aus Abb. 57

Numerisch liegt die semantische Korrektheit, zusammengenommen für alle Dachtypen, bei ca. 89 % (162 von 183 Gebäuden wurden korrekt rekonstruiert). Damit ist sie im Bereich bzw. höher als bei den in der Literatur dokumentierten Methoden (ca. 81 % in [SUVEG & VOSSELMAN, 2004] und ca. 70 % in [HOFMANN, 2004]). Ein direkter Vergleich ist aber problematisch, da die Kriterien zur Einteilung in *erfolgreiche* und *nicht erfolgreiche* Modellierung in der Literatur meist nicht vollständig transparent sind bzw. die Beurteilung des Modellierungserfolgs auch vom jeweiligen Operateur abhängt.

Zudem werden nur eindeutig einem bestimmten Prototypen zuordenbare Gebäude in die Statistik aufgenommen. Im Untersuchungsgebiet gibt es aber mehrheitlich komplexere Dachtypen. Durch die Anpassung der Gebäudegeometrien an vorhandene räumliche Verhältnisse existieren meist Sonder- und Mischformen, sowie Gebäude mit zahlreichen Dachaufbauten (vgl. Abb. 59 und Abb. 60). Für diese Gebäude ist es aber z. T. schwierig, die korrekte Anzahl der tatsächlichen Dachflächen aus den Luftbildern abzuschätzen. Es besteht z. B. keine Eindeutigkeit bei gekrümmten Flächen, wenn von der Annahme einer Modellierung der Gebäudedächer durch plane Flächenstücke ausgegangen wird.



Abb. 59: Sonderformen von Gebäudedächern in Blockbebauung

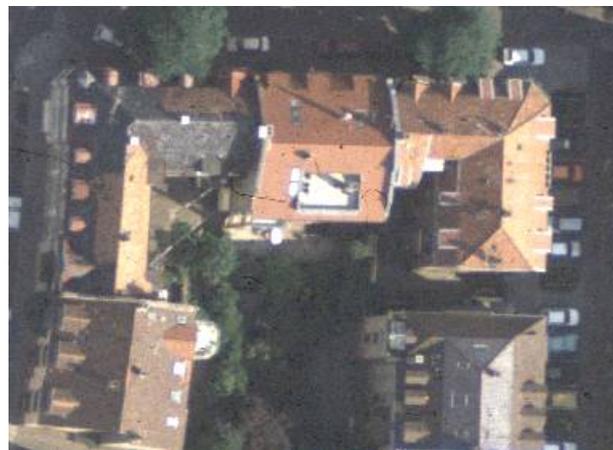


Abb. 60: Gebäudedächer mit zahlreichen Dachaufbauten

Zu dieser Problematik ist in Abb. 61 und Abb. 62 ein Beispiel dargestellt. Es handelt sich dabei um eine Kirche, deren zentraler Raum von einer Kuppel überspannt wird. In der Mitte der Kuppel befindet sich eine verglaste Öffnung, weshalb in den LE-Daten an dieser Stelle Messungen des Bodens wiedergegeben werden; in der 3D-Darstellung erscheint dies als Öffnung der Kuppel.

Die Abb. 62 zeigt ein mögliches Ergebnis der Approximation dieser Dachgeometrie durch Ebenen. Für dieses Ergebnis wurden Schwellwerte verwendet, die bei der Gebäudemodellierung im Allgemeinen zum Einsatz kamen, nämlich $dh_t = 70$ cm (vgl. Kapitel 4.1.1.1) und $P_{min} = 66$ % (vgl. Kapitel 4.1.1.2). Unter

diesen Qualitätsvorgaben resultieren viele kleine Flächen zur Approximation der Kuppel (vgl. Abb. 62). Es ist nun aber nicht objektiv zu beurteilen, ob dies im Sinne einer semantisch korrekten Wiedergabe ein richtiges oder falsches Ergebnis darstellt.

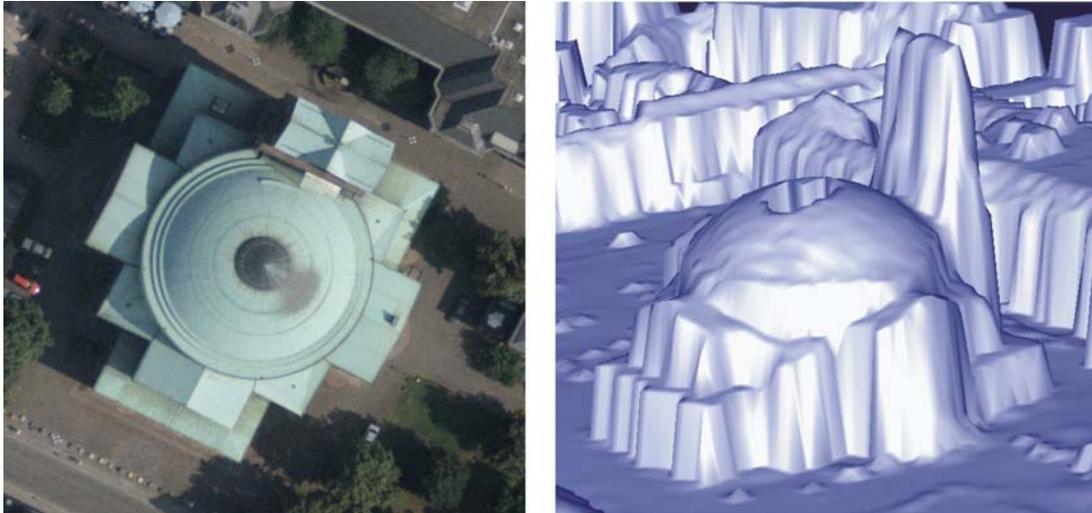


Abb. 61: Komplexe Dachform mit zentraler Kuppel (St. Stephanskirche in Karlsruhe) im Luftbild (links, © Stadt Karlsruhe) und in dreidimensionaler Darstellung der LE-Daten von 2002 (rechts)

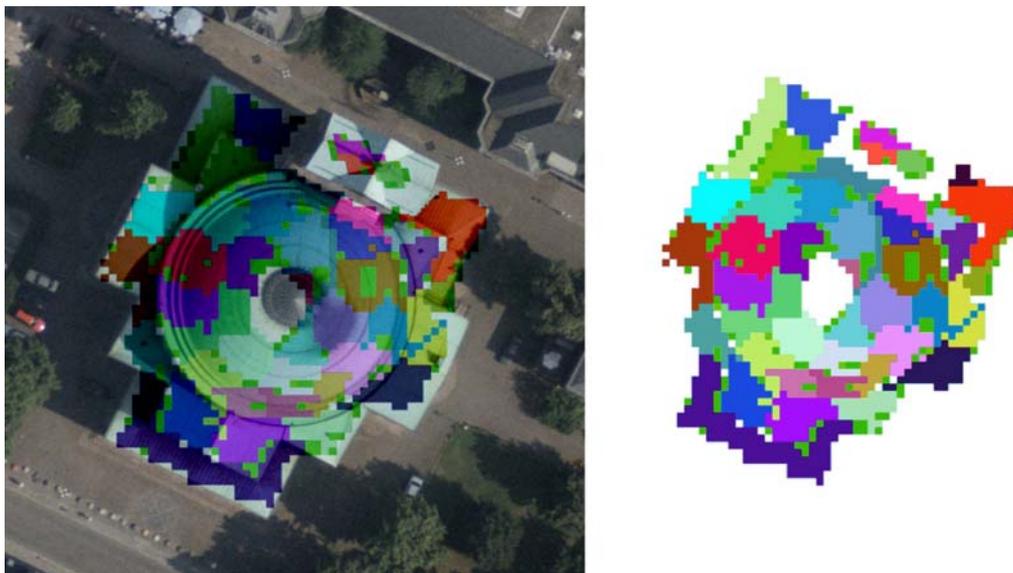


Abb. 62: Farbkodiertes Ergebnis der Flächensegmentation (rechts); links: Überlagerung des Ergebnisses mit dem Luftbild aus Abb. 61

Problematisch hinsichtlich einer semantisch-korrekten Modellierung sind neben gekrümmten vor allem kleine Flächen, wie auch HOFMANN (2004) berichtet. In der Abb. 63 sind die beiden Vektormodelle eines Gebäudes zu sehen, das sowohl aus FE- als auch aus LE-Daten modelliert wurde.

Das Dach ist an beiden Schmalseiten walmdachförmig begrenzt, d. h. es existiert jeweils eine kleine geneigte Dachfläche an der Giebelseite (vgl. Abb. 64). Diese Schrägebenen bilden sich in den FE-Daten nur schwach ab, da im Randbereich dieser Flächen oft noch Messungen auf der Firstlinie abgespeichert werden. In den

LE-Daten sind sie deutlicher ausgeprägt, da hier diese Flächen eher etwas zu groß abgebildet wurden, d. h. Messungen auf diesen Flächen wurden auch noch außerhalb ihrer wahren Begrenzungslinien im Datensatz repräsentiert (vgl. Kapitel zur Footprint-Problematik). In dem Beispiel kommt hinzu, dass sich auf den Schmalseiten Dachgauben befinden. In den LE-Daten werden sie aufgrund ihrer geringen Größe nicht abgebildet, sie sind aber z. T. in den FE-Daten zu finden.

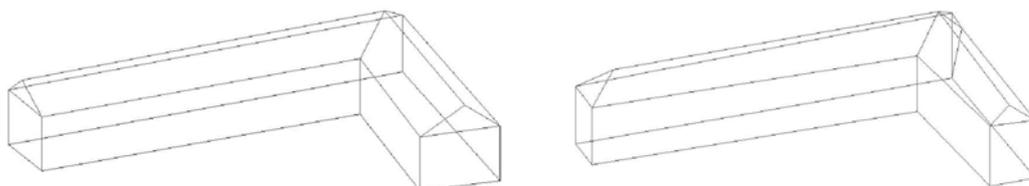


Abb. 63: Vektormodelle eines L-förmigen Gebäudes entstanden aus FE- (links) bzw. LE-Daten (rechts)



Abb. 64: Luftbild des Gebäudes aus Abb. 63

Im Allgemeinen sind FE-Daten deshalb zur Modellierung der Dachgeometrie weniger geeignet, da sie oft Details wie z. B. Messungen an Schornsteinen und Antennen enthalten können. Es ist auf der anderen Seite aber nicht zuverlässig möglich diese Details zu modellieren, falls gewünscht, da es nicht sicher ist, dass sie stets und vollständig enthalten sind.

In der Abb. 65 ist ein Gebäude dargestellt, bei dem um den Dachrand auf den Seiten der Innenhöfe ein Sims verläuft. Bei der Rekonstruktion des Gebäudes aus den Laserscannerdaten konnten aber nur Teile dieses Simses segmentiert und damit rekonstruiert werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Überprüfung des Modellierungserfolgs anhand der semantischen Korrektheit nicht notwendigerweise eine eindeutige, objektive Aussage liefert, in dem Sinne, dass die semantische Korrektheit verschiedener Ansätze verglichen werden kann. In HOFMANN (2004) kann dies im Unterschied des Modellierungserfolgs mit dem gleichen Verfahren für eine Szene mit einfachen

Dachgeometrien in der Schweiz und einer Szene mit einem Teil der Innenstadt von Dresden nachvollzogen werden, wo die Gebäudedächer in der Regel sehr viel komplexer als in dem zuerstgenannten Datensatz sind.

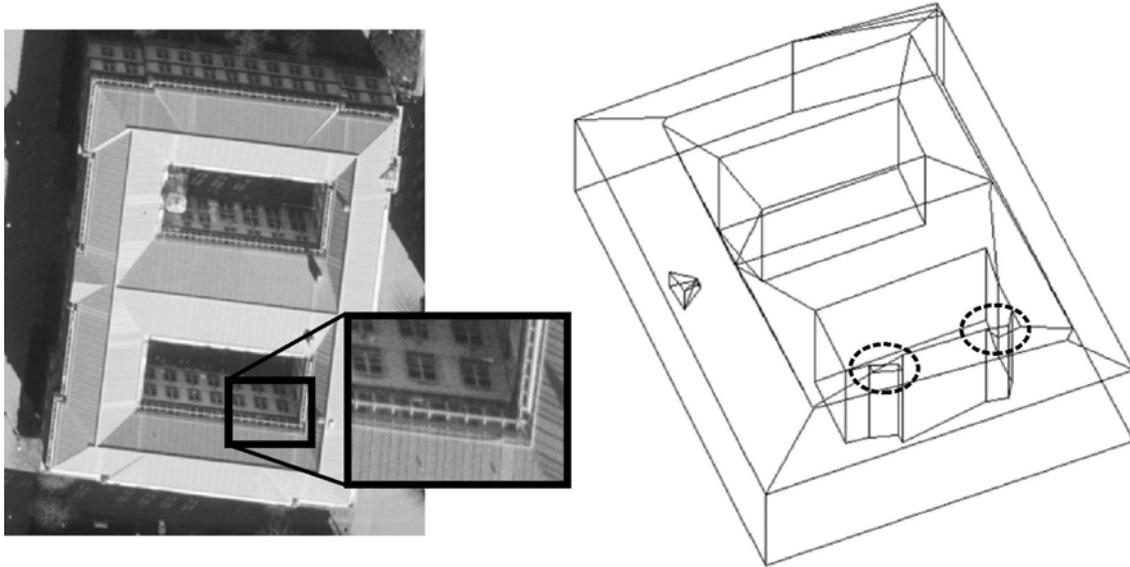


Abb. 65: Gebäude im Luftbild mit vergrößertem Detail (links) und aus der Modellierung gewonnenes Vektormodell (rechts); die gestrichelten Kreise markieren bei der Modellierung verbleibende Fragmente des im Detail sichtbaren Gebäudesims

Für den Datensatz aus Dresden ist der Anteil der korrekt wiedergegebenen Gebäudedächer mit 46 % deutlich geringer als für die Szene aus der Schweiz, wo er 70 % beträgt. Es ist also deutlich beobachtbar, dass der Grad der semantischen Korrektheit des Modellierungsergebnisses auch von der Komplexität der untersuchten Gebäudedächer abhängt.

Es wurde in dieser Arbeit deshalb auch ein Verfahren zur Überprüfung des Modellierungserfolgs benutzt, das durch einen Vergleich der rekonstruierten Gebäudeform mit einem geometrischen Soll-Modell objektivere Qualitätskriterien liefern soll (s. folgendes Kapitel).

4.4.2 Geometrische Korrektheit

Obwohl es eine ganze Reihe von Arbeiten zur Gebäudemodellierung gibt, existiert bisher noch kein allgemein akzeptiertes Verfahren zur Überprüfung ihrer geometrischen Genauigkeit, auch wenn erste Arbeiten darüber vorhanden sind. Beispielsweise wird in RAGIA (2000) eine Analyse – allerdings auf Rasterbasis – durchgeführt. Das Fehlen eines Überprüfungsverfahrens liegt u. a. auch daran, dass, wie bereits in Kapitel 3.2 erwähnt, bei „realen“ Objekten keine Modellierungseindeutigkeit besteht. Insofern bleiben Untersuchungen der Modellierungsgenauigkeit in gewissem Sinne Abschätzungen („relativ“).

Zur Beurteilung der Modellierungsverfahren hinsichtlich der geometrischen Genauigkeit der rekonstruierten Gebäude wurden die extrahierten Vektormodelle gegen Soll-Vektormodelle geprüft. Diese Soll-Modelle entstanden durch Aufnahme von Gebäuden mit einem reflektorlosen Tachymeter (TCR 305, Firma Leica) mit einer Genauigkeit von ca. 5 cm in allen drei Koordinatenrichtungen. Es wurde dabei darauf geachtet möglichst solche Punkte auszuwählen, die auch aus einem Laserscanningdatensatz heraus rekonstruiert werden könnten. Das heißt, es wurden nur Dachpunkte erfasst, die von einem Flugzeug aus sichtbar wären.

Außerdem wurden nicht nur Punkte an Dachecken, sondern bei Dachflächen mit offensichtlichen Neigungswechseln auch an deren Knickkanten aufgenommen.

In der klassischen Geodäsie werden meist Punktverschiebungen zur Aufdeckung von Abweichungen oder Genauigkeiten ganz unterschiedlicher Art verwandt. Dieser Ansatz ist hier aber insofern nicht sinnvoll, da keine Punktidentitäten zwischen den auf verschiedene Weise zustande gekommenen Vektormodellen angenommen werden können. Eine adäquate Untersuchungsmethode müsste sich im Prinzip auf direkte Untersuchung der Abweichungen von dreidimensionalen Flächen stützen, da diese die Grundlage der Gebäudemodellierung bilden. Da aber nicht nur Flächeneigenschaften wie z. B. Richtung der Flächennormalen zur Untersuchung ausreichen, sondern auch der Flächenrand in die Untersuchungen mit einbezogen werden müssen, ist ein geschlossener Ansatz hochgradig nicht-trivial. Für diese Arbeit wurde deshalb ein zweiteiliges Verfahren benutzt, bei dem die Lageabweichungen und Höhenabweichungen separat untersucht werden (vgl. [VÖGTLE & STEINLE, 2003]).

4.4.2.1 Untersuchung der Lagegenauigkeit

Die Untersuchung der Lagegenauigkeit erfolgt im Zweidimensionalen, und zwar in diesem Fall in der Lageebene der benutzten Gauß-Krüger-Koordinaten. Untersucht werden die Abstände der beiden Gebäudegrundrisse, also zwischen dem Grundriss des Soll-Modells und des rekonstruierten Gebäudes. Es werden die Abstände zwischen einzelnen Grundrissgeraden ermittelt und alle berechneten Abstände zur Bestimmung eines Gesamtmaßes benutzt.

Die Einzelabstände werden über die Fläche zwischen zwei Konturpolygonen oder Grundrisse bestimmt. Dazu wird die Fläche in Teilflächen zerlegt. Für jeden Punkt jeder Kontur wird geprüft, ob in einem bestimmten Maximalabstand ein Punkt der anderen Kontur liegt. Ist dies der Fall, so werden beide Punkte verbunden. Anderenfalls wird das Lot des Punktes auf die gegenüberliegende Seite der anderen Kontur gefällt (vgl. gepunktete Linien in Abb. 66). Auf diese Weise entstehen drei- bzw. viereckige Teilflächen. Für diese Figuren werden dann Mittellinien bestimmt, welche die Mitten der Lote bzw. direkten Punktverbindungen als Endpunkte besitzen (in der Abbildung beispielhaft für eine Fläche als \bar{c}_i strichpunktiert dargestellt).

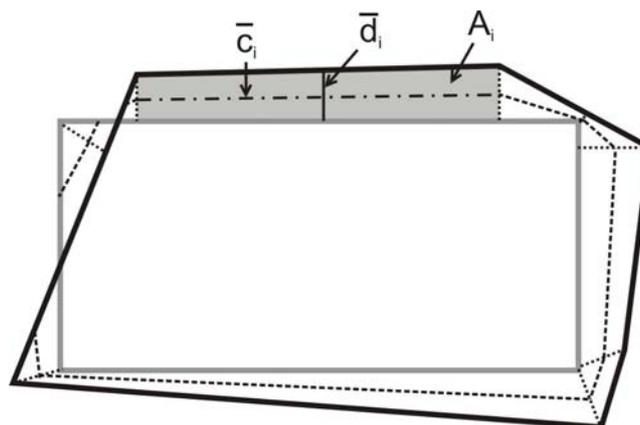


Abb. 66: Prinzipskizze zur Ermittlung des Konturabstands

Die Fläche eines Dreiecks lässt sich genau, die eines Vierecks – in diesem Fall – in guter Näherung bestimmen zu:

$$A_i \approx \bar{d}_i * \bar{c}_i \Rightarrow \bar{d}_i = \frac{A_i}{\bar{c}_i} \quad (62)$$

Da sich die Fläche auch mithilfe der *Gauß'schen Trapezformel* (s. z. B. [KAHMEN, 1993]) aus den Konturpunktskoordinaten direkt berechnen lässt, kann mit obiger Formel die mittlere Höhe \bar{d}_i der Teilfläche bestimmt werden. Sie soll an dieser Stelle als Maß für den Konturabstand gelten. Zur Berechnung eines Gesamtmaßes werden die Einzelkonturabstände über die Länge der jeweiligen Mittellinie gewichtet und durch Mittelung das Gesamtmaß bestimmt:

$$\bar{d} = \frac{\sum_i \bar{d}_i * \bar{c}_i}{\sum_i \bar{c}_i} = \frac{\sum_i A_i}{\sum_i \bar{c}_i} \quad (63)$$

Mit dieser Methode wurden die Konturabstände ermittelt, wobei dies getrennt für Modelle die aus First-Echo (FE) -Daten extrahiert wurden, und solchen aus Last-Echo (LE) -Daten durchgeführt wurde. In der folgenden Tabelle finden sich die ermittelten Ergebnisse für einen benutzten Datensatz mit acht repräsentativen Gebäudemodellen, d. h. unterschiedlichen Dachformen, der im Folgenden als *Testdatensatz* bezeichnet werden wird. Die Rekonstruktion der Gebäude erfolgte auf Basis der Datensätze von 2002.

Die Anzahl der benutzten Gebäude ist noch relativ gering, da insbesondere die Schaffung der Referenzmodelle sehr aufwendig ist. Sie müssen tachymetrisch erfasst werden, da z. B. eine photogrammetrische Auswertung von Luftbildern nicht die gewünschten Genauigkeiten liefern könnte. Es wäre insbesondere für die Höhenkomponente bei photogrammetrischer Auswertung zu erwarten, dass sie ähnlich genau wie die aus den Laserscanningdaten modellierten Gebäudehöhen ist. Um aber als Referenzmodell genutzt werden zu können, müsste sie *deutlich genauer* sein.

Ein weiteres Problem ist es, dass bei der tachymetrischen, terrestrischen Aufnahme die Gebäudedächer vermessen werden müssen, womit das Problem des Auffindens geeigneter Aufnahme Standpunkte besteht. Die folgenden Ergebnisse sind also als erste Abschätzung aufzufassen und müssen durch weitere Experimente weiter untermauert werden.

Modelle bestimmt aus:	FE-Daten	LE-Daten
Konturabstand \bar{d} [m]	+ 1,16 ± 0,27	-1,18 ± 0,21

Tab. 4: Ermittelte Lagegenauigkeiten für den Testdatensatz

Es zeigte sich insbesondere, dass die erzielten Lagegenauigkeiten einen großen systematischen Anteil enthalten, der vom benutzten Messmodus abhängt. Aus FE-Daten gewonnene Gebäudemodelle sind um etwa 1,2 m zu groß, aus LE-Daten gewonnene in der gleichen Größenordnung zu klein. Der zufällige Fehleranteil beträgt nur ca. ein Viertel bzw. ein Fünftel des systematischen Anteils und liegt zwischen 20 und 30 cm.

4.4.2.2 Untersuchung der Höhengenaugkeit

Zur Bestimmung der Höhengenaugkeit wurde ein diskreter Ansatz gewählt. Zunächst wurden die Gebäudemodelle anhand eines *Best-Fit-Verfahrens* bezüglich ihrer Grundrisse so zueinander verschoben, dass ihre Konturabstände möglichst gering wurden. Der Grund hierfür war, dass sich Lagefehler als

Höhenfehler bemerkbar machen können. Nach einer teilweisen Korrektur durch die Lageanpassung ist zu erwarten, dass die Einflüsse der Lagefehler abnehmen.

Das benutzte Best-Fit-Verfahren ist ebenfalls ein diskretes Verfahren. Dabei wird die Kontur des zu prüfenden Gebäudes (Prüfmodell-Kontur) in vorgegebenen geringen Schrittweiten (0,3 m) in den beiden Lagekomponenten sukzessive verschoben und für jede Position das Konturmaß bestimmt. Die Position, an der das geringste Konturmaß gefunden wurde, wird zur Bestimmung der Best-Fit-Position benutzt, indem getrennt für jede Koordinatenrichtung eine Parabelinterpolation durchgeführt wird (s. Abb. 67).

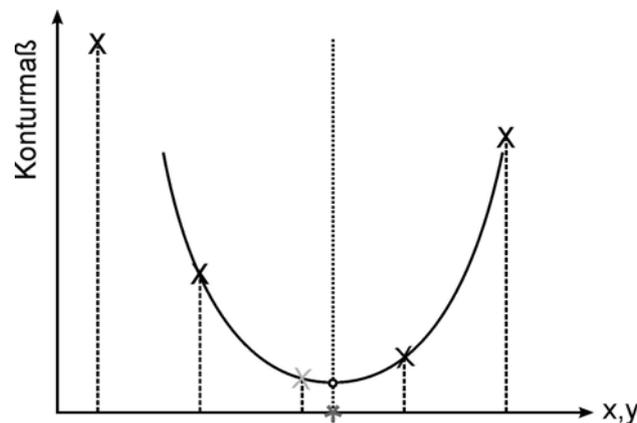


Abb. 67: Prinzipskizze zur Parabelinterpolation

Darunter ist zu verstehen, dass durch die berechneten Konturmaßwerte der Minimalposition (hellgraues Kreuz) und diejenigen ihrer benachbarten Positionen eine Parabel geschätzt wird. Die Position (*) des Scheitelpunkts der Parabel (Kreis) wird als Position des „wahren“ Minimums bestimmt und die Prüfmodellkontur an diese Stelle verschoben.

Nach der Verschiebung der Prüfmodellkontur an die Stelle des Best-Fit wurde um die beiden Gebäudegrundrisse eine Bounding Box gelegt, die beide vollständig enthält (s. Abb. 68, gestricheltes Rechteck). Ausgehend von den Grenzen der Bounding Box wurde ihre Fläche mit einem regelmäßigen Gitter überzogen (Gitterweite 0,5 m, in der Abbildung sind die Gitterpunkte durch Kreise angedeutet). An jedem Gitterpunkt, an dem sowohl eine Dachfläche in dem Referenz- und Prüfmodell vorliegt (gefüllte Kreise), wurden die Höhenwerte bestimmt und deren Differenz berechnet.

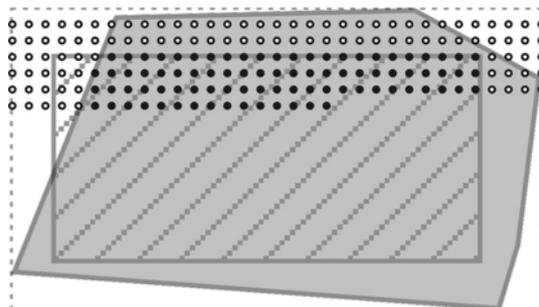


Abb. 68: Prinzipskizze zur Höhengenaugkeitsermittlung

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse für den Testdatensatz wiedergegeben. Dabei fiel auf, dass sich die Höhendifferenzen auch mit der Dachform ändern, d. h., dass je nach der vorherrschenden Neigungsrich-

tung der Dachflächen andere signifikante Abweichungen auftraten. Deshalb sind drei Gruppen von Dächern mit ihren vorherrschenden Neigungsrichtungen ausgewiesen. Mitverantwortlich für diesen Effekt dürfte die geringere Messgenauigkeit des Laserscanningverfahrens an zur Aufnahmerichtung geneigten Flächen sein. Dafür verantwortlich ist die Zuordnung der ermittelten Entfernungsmessung zu einem Punkt auf der Achse des Messstrahlkegels (vgl. Kapitel 2.1.4.1). Bei stark geneigten Flächen, z. B. steilen Dächern, tritt dadurch ein signifikanter Höhenfehler gegenüber der wahren Höhe an der berechneten Position auf.

Modelle generiert aus:	FE-Daten	LE-Daten
Flachdächer (< 5°)	+ 0,02 ± 0,02	- 0,01 ± 0,02
Leichte Dachneigungen (< 30°)	+ 0,16 ± 0,05	- 0,11 ± 0,04
Steile Dächer (> 30°)	+ 0,42 ± 0,18	- 0,31 ± 0,15

Tab. 5: Ermittelte Höhengenaugigkeiten in [m]

Auch bei den ermittelten Höhenabweichungen konnten starke systematische Effekte festgestellt werden. Es sind wiederum die FE-Daten „zu groß“, d. h. hier, dass die aus dieser Datenart ermittelten Gebäudemodelle zu hoch sind. Die aus LE-Daten gewonnenen Modelle sind dagegen etwas zu niedrig. Der systematische Fehleranteil ist allerdings für verschiedene Dachneigungen verschieden stark an der Gesamtabweichung beteiligt. Besonders für Dächer zwischen 5° und 30° ist er im Vergleich zum zufälligen Fehleranteil besonders stark ausgeprägt, er beträgt in etwa das Dreifache des zufälligen Fehleranteils. Für steilere Dächer beträgt er in etwa das Doppelte, für flachere Dächer ist der systematische Fehleranteil in etwa gleich groß wie der zufällige Fehleranteil.

4.4.2.3 Diskussion der Ergebnisse

Bei der Überprüfung der Modellierungsgenauigkeiten gegenüber tachymetrisch erfassten Gebäudemodellen zeigten sich deutliche Charakteristiken und Abhängigkeiten. Wie zu erwarten, ist die Höhengenaugigkeit der rekonstruierten Modelle deutlich besser als ihre Lagegenauigkeiten. Dies ist zum einen durch das Messverfahren begründet, bei dem sich die Höhe deutlich genauer als die Lage der Messpunkte bestimmen lässt. Zum anderen wirken sich auf die Höhengenaugigkeit weniger stark die systematischen Effekte der einzelnen Messmodi aus. Bei Verwendung der FE-Daten treten deutliche Vergrößerungen der Gebäude bezüglich der Lagekoordinaten auf, bei LE-Daten signifikante Verkleinerungseffekte in etwa der gleichen Größenordnung.

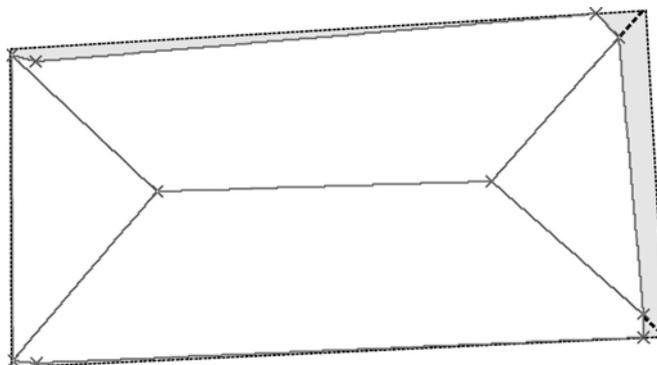


Abb. 69: Walmdach modelliert aus LE-Daten; auf der rechten Seite ist der Effekt der „Eckpunktverschiebung“ sichtbar

Allerdings wirkt sich die Wahl des Messmodus unter Umständen auf die Rekonstruktion der Geometrie aus. Tendenziell können aus LE-Daten „semantisch korrektere“ Dachflächen bestimmt werden, die FE-Daten sind in dieser Hinsicht durch evtl. Messung zusätzlicher Details „verrauscht“, vor allem bei der Messung kleinerer Dachflächen. Sie enthalten aber hinsichtlich der ermittelbaren *Dachpunkte* semantisch korrektere Formen, da z. B. Traufpunkte in den aus LE-Daten extrahierten Modellen oftmals nicht in den Ecken der ermittelten Grundrisse zu liegen kommen. Hier zeigt sich ein Effekt der Verkleinerungstendenz dieser Datenart, bei der das Gebäudemodell bereits quasi innerhalb des korrekten Grundrisses abgeschnitten wird.

Als Beispiel ist in der Abb. 69 die Draufsicht des Gebäudes aus Abb. 58 dargestellt, bei dem dieser Effekt der „Eckpunktverschiebung“ auftrat. Auf der rechten Seite des Modells reichen die durch den Schnitt der Dachflächen gefundenen Dachkanten nicht bis zu den Endpunkten des Begrenzungspolygons der Schmalseite (die „korrekte“ Form ist durch eine graue Flächenfüllung und gestrichelte Linien angedeutet).

Wie gezeigt wurde, sind ein großer Anteil der die Genauigkeiten verringernden Effekte systematischer Natur und vom Messmodus abhängig. Auf der anderen Seite wirken diese Effekte bei den beiden Messmodi in entgegengesetzten Richtungen. Daher entstand die Idee der Fusion der beiden aus den verschiedenen Datensätzen extrahierten Modelle zur Genauigkeitssteigerung (vgl. [VÖGTLE & STEINLE, 2004]). Zur Abschätzung des erreichbaren Genauigkeitspotenzials wurden die aus beiden Modi jeweils separat extrahierten Konturlinien gemittelt (auf die gleiche Art wie die Mittellinie zur Konturabstandsbestimmung gebildet wird) und der resultierende Konturabstand zum Soll-Modell bestimmt.

Für die Höhengenaugkeitsprüfung wurden an den diskreten Prüfpositionen die Höhenwerte beider Vektormodelle bestimmt, gemittelt und dieser Wert mit den Referenzhöhen verglichen. Dies wurde aber nur dort durchgeführt, wo sich zwei Dachflächen überlagerten, die zuvor als einander zugehörig bestimmt wurden (vgl. Abb. 70).

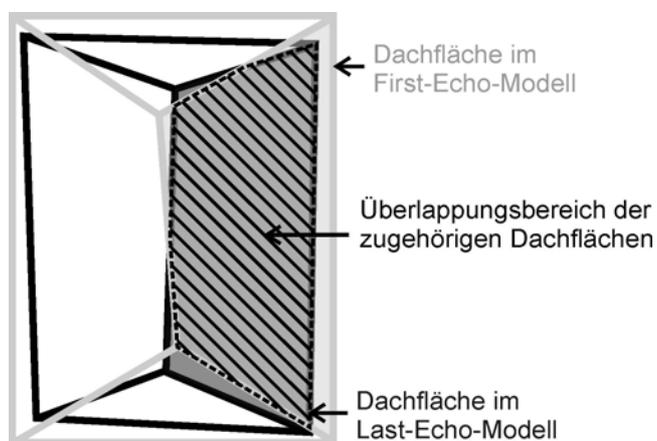


Abb. 70: Bestimmung der Höhen einer aus FE- (hellgrau) und LE-Daten (schwarz) gemittelten Dachfläche im Überlappungsbereich (schraffiert) korrespondierender Dachflächen

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Genauigkeitsbestimmung für die aus FE- und LE-Daten gemittelten Gebäudemodelle wiedergegeben. Die ermittelbaren Genauigkeiten liegen zum großen Teil unterhalb der Messgenauigkeiten des Laserscanningverfahrens (die mit 0,5 m in der Lage und 0,15 m in der Höhe angegeben werden, vgl. Kapitel 2.3). Eine Fusion der aus den verschiedenen Messmodi entstandenen Vektormodelle ist also sinnvoll, zumal neuere Laserscanningsysteme im Allgemeinen in beiden Modi gleichzeitig erfassen können.

		Genauigkeit [m]
Lageabweichung		+ 0,23 ± 0,08
Höhenabweichung	Flachdächer (< 5°)	+ 0,02 ± 0,02
	Leichte Dachneigungen (< 30°)	+ 0,07 ± 0,03
	Steile Dächer (> 30°)	+ 0,12 ± 0,06

Tab. 6: Ermittelte Genauigkeiten für Gebäudemodelle entstanden aus Fusion der FE- und LE- Modelle

Das resultierende Gebäudemodell wäre in vielerlei Anwendungen einsetzbar, da es generell den geforderten Genauigkeitsansprüchen genügen dürfte. Allerdings fand hier nur ein Vergleich der als in der „Realität“ identisch erkannten Dachflächen statt, d. h. der Dachflächen, die in beiden Modi und in den Referenzmodellen vorhanden waren. In weiteren Untersuchungen müssen deshalb Lösungen zum Umgang mit nicht-identischen Modellteilen erarbeitet, und die dann bei der Modellierung erreichbaren Genauigkeiten analysiert werden.

5 Änderungen an urbanen Objekten

Im Bereich der Fernerkundung, digitalen Bildverarbeitung und Computer Vision gibt es eine Reihe von Projekten, die sich mit der Erkennung von Veränderungen an Objekten befassen, und dies als *change detection* bezeichnen. Es können dabei aber ganz unterschiedliche Zielsetzungen bestehen, wie z. B. Umweltmonitoring, Stadtplanung und Videoüberwachung. Ein Beispiel hierfür ist z. B. die Arbeit von BHATTACHARYYA ET AL. (2002), die sich mit der Veränderung der Mangrovenwälder in West-Bengalen (Indien) beschäftigt. Aber auch die Arbeit von ALTAN ET AL. (2002), in der die bauliche Entwicklung der Stadt Istanbul (Türkei) anhand von Fernerkundungsdaten untersucht wird, und die Arbeit von GERBER (2000), in der ein System zur automatischen sprachlichen Beschreibung von mit Videoüberwachungssystemen ermittelten Ereignissen im Straßenverkehr entwickelt wird. Ganz allgemein lässt sich die Zielsetzung der meisten Arbeiten als Untersuchung und Dokumentation der Nutzungsänderung von Flächen anhand multitemporaler Daten beschreiben, wobei hier auch die Änderung des Bewuchses oder der Bedeckung eines Gebietes als Nutzungsänderung verstanden werden soll. Dabei wird meist eine geometrische und eine semantische Komponente der Veränderung erfasst, d. h. es wird ein (2D-) Flächenzugewinn oder -verlust und / oder die Klassenzugehörigkeit einzelner (Teil-)Flächen ermittelt und wiedergegeben. Selten wird eine Untersuchung der Änderung von *dreidimensionaler* Geometrie vorgenommen. Dies ist aber, vor allem in innerstädtischen Bereichen, eine interessante Fragestellung, da Veränderungen in urbanen Bereichen hauptsächlich in der Veränderung von Gebäudegeometrien bestehen und seltener in einer (aus Fernerkundungsdaten beobachtbaren) Flächennutzungsänderung. Im Folgenden soll dieses Thema detaillierter behandelt werden.

5.1 Definition des Änderungsbegriffs

Als Änderung bezeichnet man im Allgemeinen den Zustandswechsel eines Objektes zwischen zwei Beobachtungszeitpunkten. Sie kann sich in einer unterschiedlichen Form des Objektes ausdrücken, aber auch in einer anderen Bedeutung oder in anderen objektspezifischen Merkmalen, wie z. B. einer anderen Farbe oder einem anderen Aggregatzustand. Es kann also eine ganze Reihe sehr unterschiedlicher Dinge gemeint sein, wenn es um die Beschreibung von Änderungen gehen soll. Dabei schränkt aber die Wahl der Beobachtungsmethode automatisch die erkennbaren Merkmale einer Änderung ein, so kann z. B. mit der chemischen Wasseranalyse eines Flusses die Änderung seines Flussbettes nicht erkannt werden.

In der Geodäsie und Geoinformatik werden vor allem Änderungen in der geometrischen Form oder in der Nutzung von Objekten untersucht. Zumeist werden (Teil-)Flächen der Erdoberfläche oder Bauwerke betrachtet, wie z. B. in der Deformationsanalyse von Staudämmen oder der Beobachtung von Flächennutzungsänderungen aus Satellitenbilddaten. Im Bereich der großmaßstäbigen Anwendungen werden häufig *einzelne* Bauwerke untersucht und hierfür jeweils für die spezifische Situation und Aufgabenstellung geeignete Aufnahmeverfahren konzipiert. Bei kleinmaßstäbigen Anwendungen werden dahingegen die Aufnahmeverfahren nicht objektspezifisch, sondern meist merkmalspezifisch gewählt, d. h. es werden ein oder mehrere Merkmale gewählt, für die eine Änderungsanalyse durchgeführt wird. Es kommt dann das Aufnahmeverfahren zur Anwendung, mit dem diese Merkmale am Besten zu beobachten sind. Während bei den objektspezifischen Änderungsanalysen meist Änderungen der dreidimensionalen Objektgeometrie im Vordergrund stehen, ist dies bei den kleinmaßstäbigen sehr selten der Fall, hier stehen Nutzungs- und zweidimensionale Ausbreitungsänderungen im Vordergrund.

In dieser Arbeit ist die Änderungsanalyse im Überlagerungsbereich der beiden erwähnten Ansätze angesiedelt. Zum einen werden Methoden der Fernerkundung verwendet um die Basisdaten zu ermitteln (Laserscanning), zum anderen wird aber eine objektspezifische Untersuchung der dreidimensionalen Form von Gebäuden durchgeführt.

Wie aus dem Vorangegangenen ersichtlich wird, ist der Bereich der Veränderungsanalyse sehr weit, und es können ganz unterschiedliche Arbeiten unter diesem Thema durchgeführt werden. Es ist deshalb notwendig, jeweils konkret anzugeben, in welchem Bereich und für welche Merkmale von Objekten eine solche Analyse durchgeführt werden soll. In dieser Arbeit geht es um Veränderungen in städtischen Gebieten, und zwar überwiegend um Änderungen an der geometrischen Form der äußeren Hülle von Gebäuden. Dies wird durch die Wahl des flugzeuggetragenen Laserscannings als Erfassungsmethode mit vorgegeben, da aus diesen Daten nur jeweils die äußere Hülle eines Objektes ableitbar ist (vgl. Kapitel 2).

Die Aussagen zu spezifischen Abbildungseigenschaften oder ganz generell dem Auftreten der im Folgenden beschriebenen Änderungen zwischen Datensätzen verschiedener Zeitpunkte müssen auch vor dem Hintergrund des Vergleichs verschiedener Laserscanning-Datensätze gesehen werden, und sind z. T. nur für diesen Fall gültig, können also nicht ohne weiteres auf den Vergleich von mit anderen Sensoren erfassten Datensätze ausgeweitet werden.

5.2 Mögliche Arten von Veränderungen in urbanen Gebieten

Städte stellen Konzentrationsbereiche von Menschen und Funktionalität dar. So haben sie z. B. sehr viel größere Besiedlungsdichten als ländliche Gebiete und ein größeres Waren- und Dienstleistungsangebot aufzuweisen. Daraus ergibt sich meist ein mit der Zeit steigender Platzbedarf, der aber durch die schon vorhandene Verdichtung dann nicht immer durch Nutzung bisher ungenutzter Flächen befriedigt werden kann. Deshalb unterliegt die Bausubstanz in Städten einer häufigen Umgestaltung („Umnutzung“), auch wenn die Geschwindigkeit der Veränderungen je nach Gebiet sehr unterschiedlich sein kann.

Die Erfassung von Änderungen in der Baustruktur einer Stadt kann sehr schnell zu einem immensen Zeitaufwand führen, da viele Städte aus mehreren Tausend bis hin zu Millionen von Gebäuden bestehen. Deshalb macht es Sinn, einen Kompromiss hinsichtlich der Erfassungsgeschwindigkeit und dem Detaillierungsgrad der Veränderungsanalyse einzugehen. In dieser Arbeit wird die Veränderungsanalyse auf die aus flugzeuggetragenem Laserscanning erfassbaren Daten basiert. Das bedeutet, dass vorwiegend nur die Dachgeometrie eines Gebäudes in den Daten direkt abzulesen ist, also z. B. keine Fassadenänderungen beobachtbar sind. Die Daten bieten aber den Vorteil einer schnellen Erfassung, so dass auch größere Stadtbereiche in einer akzeptablen Zeit untersucht werden können. Damit wird implizit festgelegt, welche Änderungen überhaupt zu beobachten sind.

Durch die interaktive Untersuchung von multitemporalen Laserscanningdaten und die Überprüfung der Ergebnisse durch Ortsbegehungen konnten drei signifikant unterschiedliche Klassen von Veränderungen gefunden werden: *sensorbedingte*, *temporäre* und *permanente* Änderungen. Im Folgenden werden diese Klassen kurz definiert und Beispiele für jede Art von Änderungen aufgezeigt.

5.2.1 Sensorbedingte Änderungen

Unter sensorbedingten Änderungen sind Änderungen in den Datensätzen zu verstehen, die keiner in der Realität beobachtbaren Änderung entsprechen, sondern vielmehr durch das Sensorsystem selbst verursacht wurden. Darunter fallen zunächst die Änderungen, die durch die Messgenauigkeit des Systems vorgegeben sind, und systematischer oder zufälliger Natur sein können. Da aber bei der Änderungsanalyse immer

multitemporale Datensätze verwendet werden (müssen), kommt ein weiterer Aspekt hinzu. Messsysteme können im Laufe der Zeit technisch verändert werden. Normalerweise wird versucht, ihre Robustheit, Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit zu erhöhen. Außerdem besteht – zumal bei nicht an Objekten fest installierten Sensoren – immer die Möglichkeit, dass ein artgleiches, aber nicht identisches Sensorsystem bei der Wiederholungsmessung eingesetzt wird.

Bei den Untersuchungen zu dieser Arbeit traten diese Effekte deutlich auf, da die benutzten Datensätze mit dem Sensorsystem TopoSys I, bei der Messung im Jahre 2002 aber mit TopoSys II erfasst wurden (vgl. Kapitel 2.2). Dies war insofern zulässig, da TopoSys II eine Weiterentwicklung von TopoSys I darstellt.

Hier war der Effekt der Leistungsverbesserung des Sensorsystems deutlich zu beobachten. Da es sich bei dem Laserscanning-Verfahren um eine Erfassung mit einem aktiven Sensor handelt, hängen die Ergebnisse wesentlich von der Leistungsfähigkeit des Systems ab, und zwar sowohl hinsichtlich der Stärke des ausgesandten Signals als auch hinsichtlich des tolerierbaren Signal-/Rausch-Verhältnis, also der Fähigkeit zur Detektion des zurückgestrahlten und empfangenen Signals. Die ausgehende Signalstärke kann und darf nicht beliebig gesteigert werden, es gelten z. B. Vorschriften hinsichtlich der Augensicherheit der Sensorsysteme. Eine Verbesserung solcher Systeme wird meist durch eine Verbesserung des Signal detektierenden Sensorteils versucht, insbesondere in der Verstärkung des eingehenden Signals. Dies führte bei dem Sensor TopoSys II dazu, dass im Vergleich zu dem System TopoSys I schon sehr viel kleinere beleuchtete als auch stark Signal absorbierende Flächen zu signifikanten Messsignalen führten und damit erfasst wurden. Deutlich sichtbar war dies zum Beispiel bei mit sehr dunklen Materialien eingedeckten Gebäuden, die bei früheren Aufnahmen mit dem System TopoSys I nicht erfasst werden konnten und an den entsprechenden Stellen Lücken im Datensatz bestanden, die bei neueren Messungen mit TopoSys II aber vollständig in den Datensätzen enthalten sind (s. Abb. 71). Dieser Effekt wurde bereits in Kapitel 4.1.1.3 unter dem Stichwort Messsysteminsuffizienz erwähnt, und ist hier nur der Vollständigkeit wegen nochmals erwähnt. Flächen, an denen dieser Effekt auftritt, können natürlich nicht in einer Änderungsanalyse untersucht werden, da ihr Zustand im Endeffekt nur zu einem Zeitpunkt erfasst wurde.

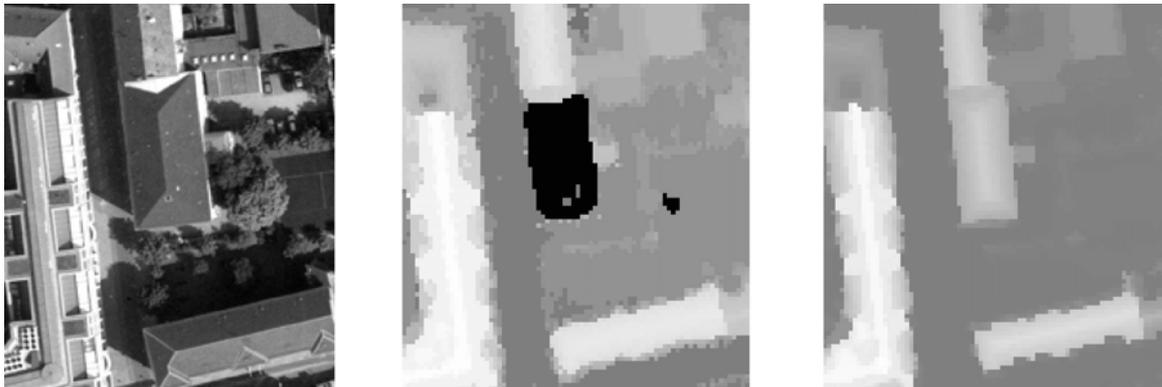


Abb. 71: Beispiel für gesteigerte Messsystemsensitivität an einem stark absorbierendem Dach; Links: Ausschnitt aus einem Luftbild; Mitte: Szene in grauwertkodierter Darstellung von Laserscanningdaten 1998 erfasst; Rechts: Ausschnitt aus Datensatz von 2002

Die gesteigerte Signaldetektionsfähigkeit macht sich aber auch durch die Erfassung schon sehr viel kleinerer Flächen bemerkbar. Offensichtlich ist dies z. B. an Gebäuderändern: Der Effekt der systematischen Vergrößerung bzw. Verkleinerung von Gebäudegrundflächen tritt in den mit TopoSys II erfassten Datensätzen noch sehr viel stärker hervor, als dies in den früheren Datensätzen der Fall war. Das kommt im Wesentlichen daher, dass beim Auftreffen eines Footprints auf eine Gebäudekante ein sehr viel kleinerer Prozentsatz

Prozentsatz auf dem Dach liegen muss, um bei First-Echo-Messweise zu einer Messung des Daches, bzw. bei Last-Echo-Messweise zu einer Messung des Geländes zu führen. In Abb. 72 bis Abb. 74 ist dies für eine Szene mit mehreren Gebäuden und Bäumen beispielhaft dargestellt.

Die Abweichungen an den Gebäudekanten wurden anhand von Vergleichen von aus den Laserscanningdaten extrahierten und modellierten Gebäuden mit tachymetrisch aufgenommenen Gebäudemodellen numerisch untersucht (vgl. Kapitel 4.4.2). Es ergab sich für die mit TopoSys I aufgenommenen Datensätze eine Abweichung von ca. 0,55 m (positiv für First-Echo, negativ für Last-Echo-Daten, vgl. [STEINLE & VÖGTLE, 2000]), für die mit dem System TopoSys II erfassten Datensätze aber eine Abweichung von im Mittel ca. 1,2 m (s. [VÖGTLE & STEINLE, 2004] und Kapitel 4.4.2).

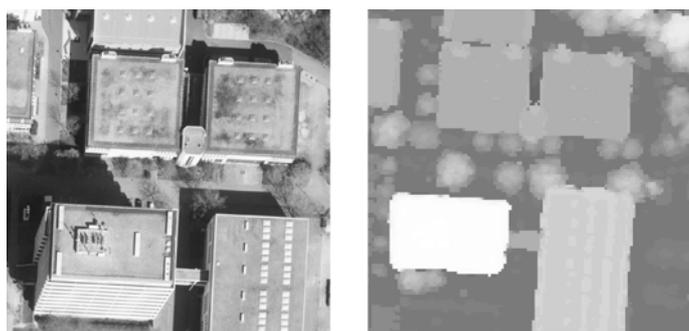


Abb. 72: Ausschnitt aus Luftbild (links) und dem First-Echo-DOM von 2002 (rechts)

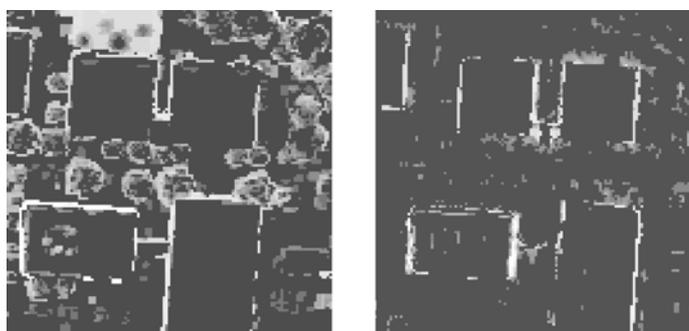


Abb. 73: Differenzbilder, entstanden aus der Subtraktion von First-Echo- (FE) bzw. Last-Echo-Daten (LE) der Szene aus Abb. 72; links: FE 02 - FE 97, rechts: LE 98 - LE 02

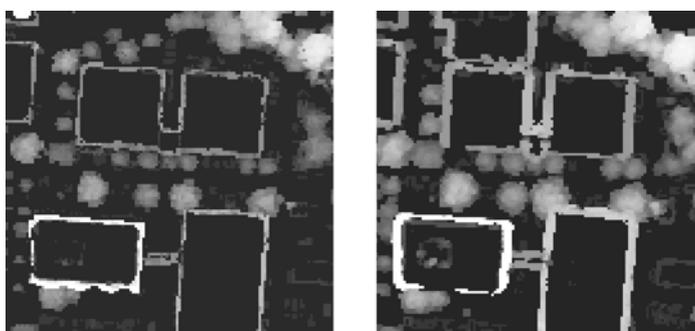


Abb. 74: Weitere Differenzbilder, FE 97 - LE 98 (links), FE 02 - LE 02 (rechts)

Weitere sensorbedingte Änderungen ergeben sich dadurch, dass bestimmte kleinflächige Objekte mit TopoSys II erfasst werden, die mit dem älteren System nicht, nur zufällig oder unter bestimmten, angepassten Aufnahmebedingungen erfasst werden konnten. Dies sind z. B. Hochspannungsleitungen, die mit dem System TopoSys I nur unter Nutzung eines Hubschraubers in geringer Flughöhe (ca. 200m) zuverlässig aufgenommen werden konnten (vgl. Abb. 75 und Abb. 76), heute aber mit TopoSys II zuverlässig erfasst werden.



Abb. 75: Fotografie eines Gebäudes mit über das Dach führenden Leitungen

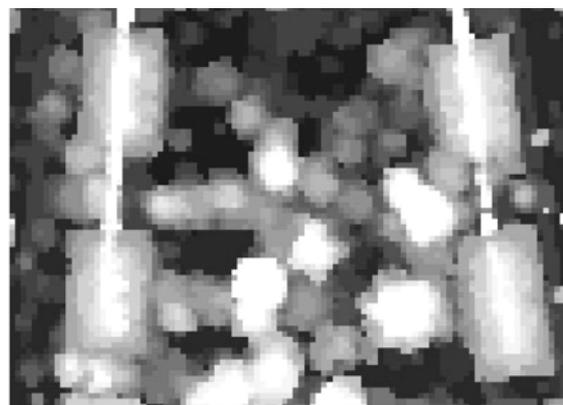
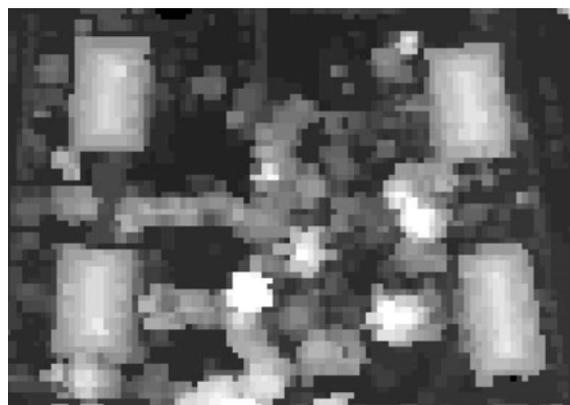


Abb. 76: Gleiche Szene in Laserscanning-Datensätzen; Links: Aufnahme von 1997; Rechts: Aufnahme aus dem Jahre 2002, Leitungen als helle Linien über den Dächern sichtbar

Solch kleinflächigen Objekte sind aber in aller Regel nur in den First-Echo-Daten enthalten, so dass sie durch einen Vergleich der First- und Last-Echo-Daten erkannt und gegebenenfalls modelliert oder eliminiert werden können.

5.2.2 Temporäre Änderungen

In Städten gibt es viele Arten von dynamischen Prozessen, wie z. B. Fahrzeugbewegungen bei den meist hohen Verkehrsaufkommen. Damit einher gehen aber auch häufige Positions- oder Zustandswechsel von Objekten, die sich deshalb zu verschiedenen Erfassungszeitpunkten ganz unterschiedlich abbilden. Handelt

es sich dabei um größere Objekte wie z. B. große Sonnenschirme oder Marktstände, dann können sie unter Umständen als Bauwerksveränderungen missinterpretiert werden. Dies kann z. B. bei großen Markisen auf Dachgärten der Fall sein. Zudem gibt es Objekte, die temporär Dächer überlagern können, wie z. B. Baukräne. In der Abb. 77 ist ein Beispiel für eine solche Überlagerung dargestellt.



Abb. 77: Baukräne im Überlappungsbereich zweier Scan-Streifen in einem First-Echo-Datensatz (2002), erkennbar als helle, uhrzeigerförmige Objekte

Bei diesem Beispiel tritt noch eine andere Eigenschaft von temporären Änderungen hervor. Da sie meist bei mobilen Objekten auftreten, kann es während der flächenhaften Befliegung eines Gebietes bereits zwischen der Aufnahme verschiedener Scan-Streifen zu Unterschieden an den Objekten kommen. In dem Beispiel hier standen zwei Kräne im Überlappungsbereich zweier Scan-Streifen, und hatten sich bis zur Aufnahme des zweiten Streifens bereits weiterbewegt, so dass sie in diesem Fall jeweils doppelt abgebildet werden und daher die Form zweier Uhrzeiger aufweisen.



Abb. 78: Luftbild mit oberstem Deck eines Parkhauses

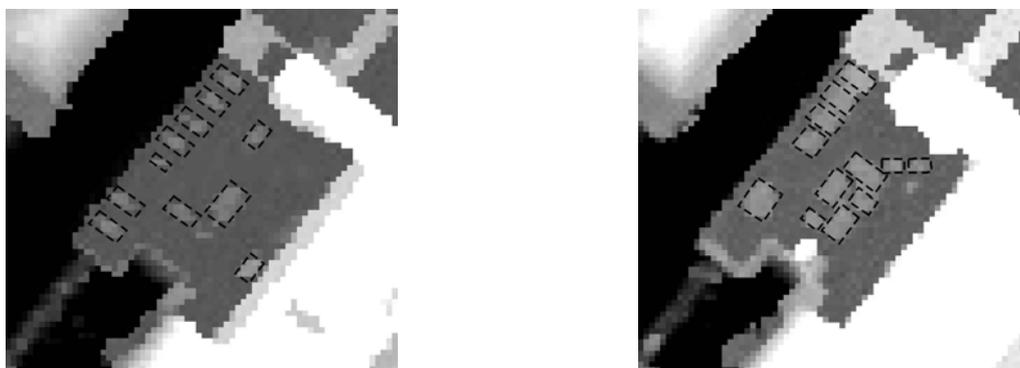


Abb. 79: Gleiche Szene in First-Echo-Datensätzen, parkende Fahrzeuge sind gestrichelt umrandet angedeutet; Links: Aufnahmezeitpunkt 1997; Rechts: Datensatz von 2002

Normalerweise sollen temporäre Veränderungen aber nicht bei einer Änderungsanalyse behandelt werden. Es kommt aber auf die Art der temporären Änderung an, ob dies möglich ist. Bestimmte Nutzungsarten eines Gebäudes oder Platzes lassen von vornherein temporär vorhandene Objekte vermuten, wie z. B. ein Parkdeck auf einem Gebäudedach (vgl. Abb. 78 und Abb. 79), ein Markt- oder Festplatz.

Ist das Zusatzwissen über diese Nutzung vorhanden, dann können die temporären Änderungen als solche erkannt werden. Andere Objekte, mit denen temporäre Änderungen einhergehen, wie Baukräne, können aufgrund ihrer Form identifiziert werden. So sind Baukräne durch eine schmale Geradenform und signifikant höheren Erhebung als die umgebenden Häuser gekennzeichnet, wobei sie, wie im Beispiel oben, aber auch die Form zweier Uhrzeiger annehmen können.

Bei beiden Beispielsarten wird aber deutlich, dass zur Erkennung der temporären Änderungen auf jeden Fall Zusatzwissen notwendig ist, wie z. B. die Flächennutzung oder Modelle von temporären Objekten. Alleine aufgrund von erfassten Laserscanningdaten sind sie nicht zu interpretieren.

5.2.3 Permanente Änderungen

Unter permanenten Änderungen werden alle Differenzen zusammengefasst, deren Ursache eine tatsächliche Änderung in der Struktur von Gebäuden ist. Dies kann z. B. durch einen Umbau, Abriss, Neu- und Anbau, aber auch eine Bauwerksschädigung bedingt sein.

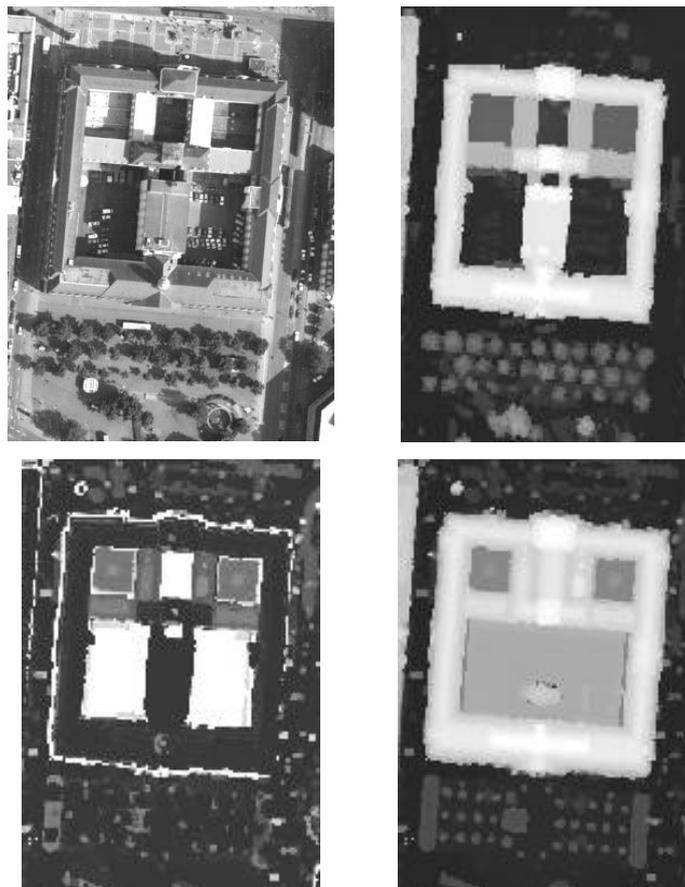


Abb. 80: Permanente Differenzen an einem Gebäude, das umgebaut wurde; sichtbar sind die nun überbauten Innenhöfe; von links oben im Uhrzeigersinn: Luftbild, First-Echo-Daten von 1997, 2002 aufgenommene First-Echo-Daten, Differenzenbild aus den beiden Höhendatensätzen (schwarz = unverändert)

Diese Änderungen sind von meist langfristiger Art und ändern die Gebäudenutzung, und damit auch die Nutzung eines städtischen Bereichs, nachhaltig, wenngleich auch mit unterschiedlicher Signifikanz. Die Erkennung und Interpretation dieser Änderungen ist Gegenstand des folgenden Kapitels.

5.3 Beschreibung und Erfassung

Zur Aufdeckung von Änderungen in städtischen Gebieten kann die Differenz zwischen zwei Laserscanning-Datensätzen direkt gebildet werden. Da es sich um geometrische Daten handelt, sind alle Änderungen, die nicht innerhalb der Messgenauigkeit liegen, sofort als geometrische Änderungen an Objekten interpretierbar. Allerdings ist es so gut wie nicht möglich, aufgrund eines einfachen rasterbasierten Vergleichs die Änderungen weiter zu interpretieren, z. B. den Umbau eines Gebäudes von einer beschnittenen Baumgruppe zu unterscheiden.

Da das Hauptaugenmerk in dieser Arbeit auf Änderungen an Gebäuden liegt, ist es zum einen notwendig sich auf die Bereiche in den Laserscanning-Daten zu beschränken, die Gebäude enthalten, zum anderen ist eine weitergehende Interpretation der Änderungen wünschenswert, d. h. es sollen z. B. Umbauten von Neubau oder Abriss unterschieden werden. Deshalb kann ein rein rasterbasierter Vergleich nicht ausreichen, es muss vielmehr ein objektbasierter Vergleich durchgeführt werden. Ein erster Schritt ist die Segmentation der in den Daten enthaltenen Gebäude, also eine Objektbildung. Dies muss für alle benutzten Datensätze verschiedener Aufnahmezeitpunkte durchgeführt werden. Danach können die Höhenwerte innerhalb der Objektbereiche untersucht und in einem mehrstufigen Verfahren die verschieden geänderten Objekte klassenweise herausgefiltert werden. Es gibt dabei die vier verschiedenen Klassen *Neubau*, *Abriss*, *Aufstockung* und *Rückbau*.

Zur Segmentation der Gebäude wird das in Kapitel 3.1.1 beschriebene Verfahren benutzt. Dabei entstehen durchnummerierte Gebäudesegmente, die in einem zweiten Schritt sequenziell abgearbeitet werden. Die Abb. 81 und Abb. 82 zeigen Beispiele für Segmentdatensätze, die aus Laserscanningdaten zweier unterschiedlicher Zeitpunkte extrahiert wurden.



Abb. 81: Gebäudesegmente, segmentiert aus einem Last-Echo-Datensatz von 1998

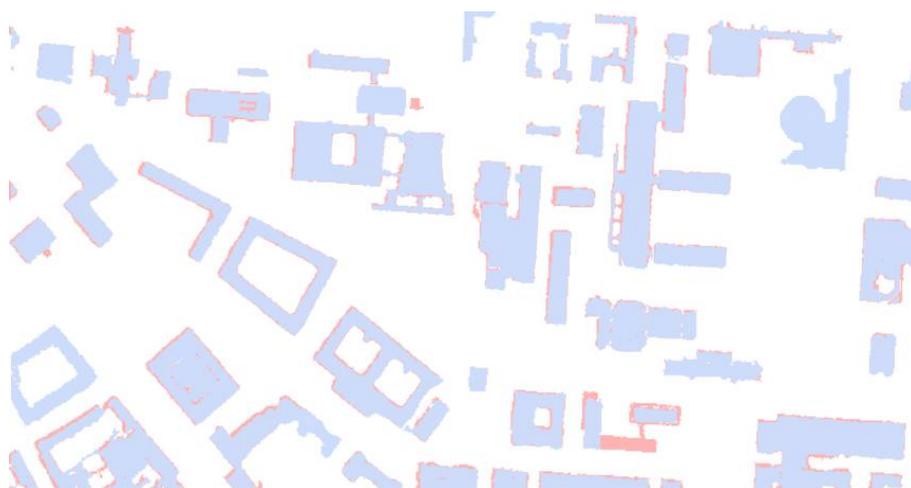


Abb. 82: Überlagerung der aus Last-Echo-Daten extrahierten Gebäudesegmente von 1998 (rosa) und 2002 (hellblau)

Zunächst werden die Gebäude herausgefiltert, die einer kompletten Änderung unterworfen waren, womit *Abriss* und *Neubau* gemeint sind. Ausgehend von zwei Datensätzen unterschiedlicher Zeitpunkte, wird für jeden Segmentdatensatz getrennt untersucht, ob die Segmente im jeweils anderen Segmentdatensatz eine Entsprechung haben. Dies bedeutet, dass sie sich mindestens mit einem gewissen Prozentsatz mit anderen Gebäudesegmenten überlagern, hier wurden 25 % vorausgesetzt. Werden Segmente gefunden, die dieser Anforderung nicht genügen, dann können sie direkt als Abriss oder Neubau interpretiert werden. Um aber Fehlinterpretationen aufgrund fehlerhafter Segmentation auszuschließen, wird zusätzlich ein Vergleich der Höhenwerte an dieser Stelle vorgenommen. Gibt es deutliche Höhenunterschiede, dann wird das Segment als Neubau klassifiziert, falls der gerade untersuchte Datensatz derjenige des jüngeren Aufnahmezeitpunkts ist (s. Abb. 83). Ist es aber der ältere Datensatz, dann wird das Gebäude als Abriss klassifiziert (s. Abb. 84).

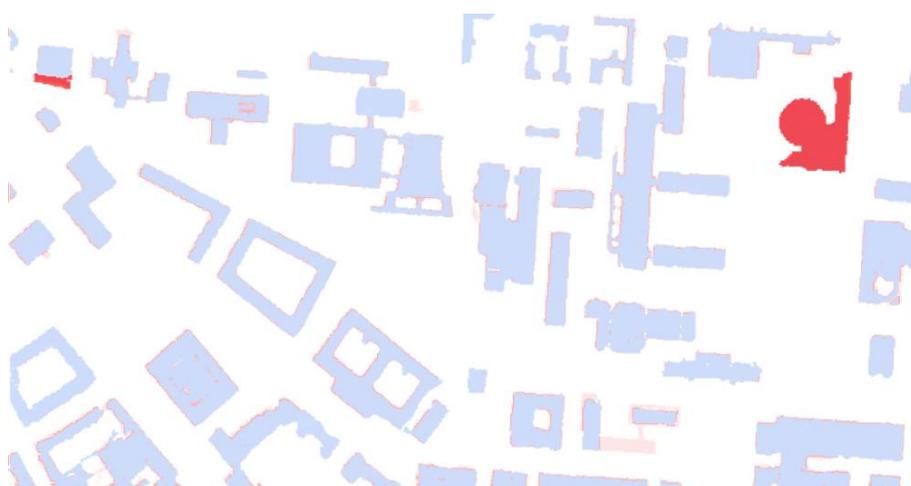


Abb. 83: Segmente des älteren und jüngeren Datensatzes (vgl. Abb. 82), Neubauten in rot

Für die verbleibenden Segmente wird die Differenz der beiden Höhendatensätze gebildet, der jüngere Datensatz wird dazu vom älteren subtrahiert. Innerhalb der Segmente werden nun alle Pixel dahingehend untersucht, ob größere Differenzen als ein vorgegebener Schwellwert auftreten. Dieser Wert setzt sich

zusammen aus der doppelten Laserscanning-Messgenauigkeit, da die beiden Datensätze an einem konkreten Pixel in entgegengesetzter Richtung systematisch verfälscht sein können, und aus einem Toleranzfaktor.

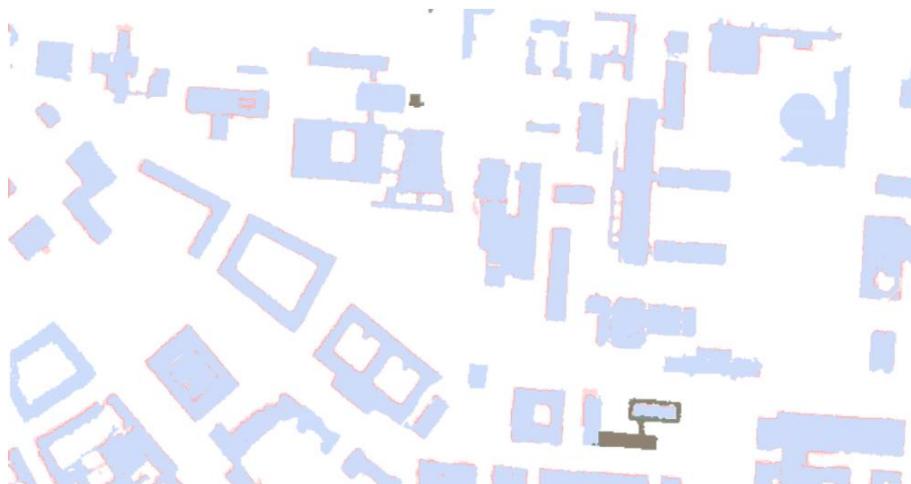


Abb. 84: Als Abriss erkannte Gebäude (dunkelgrün)

Der Toleranzfaktor wird eingeführt, da abhängig von dem jeweiligen Scanmuster bei der Aufnahme eines Datensatzes unterschiedliche Teilflächen innerhalb eines Pixels zu dem signifikanten Messsignal geführt haben können, und somit zufällige Abweichungen entstehen können, vor allem bei sehr steilen Dächern oder Bruchkanten mit großer Höhendifferenz. Der Schwellwert für die insgesamt tolerierte Höhenabweichung wurde bei dem hier gezeigten Beispiel auf einen Meter festgesetzt.

Alle Segmente, die nur Höhendifferenzen innerhalb der vorgegebenen Toleranz aufweisen, werden als unverändert interpretiert und im Weiteren nicht mehr untersucht (s. Abb. 85).

Da permanente Änderungen immer signifikante Änderungen an der Gebäudestruktur sind, sollen Segmente mit einzelnen Ausreißern oder sensorbedingte Vergrößerungs- bzw. Verkleinerungseffekte nicht berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wird auf die noch verbliebenen, segmentweisen Differenzbilddarstellungen ein *Opening*-Verfahren der mathematischen Morphologie (vgl. Kapitel 4.2.1.1) angewendet.

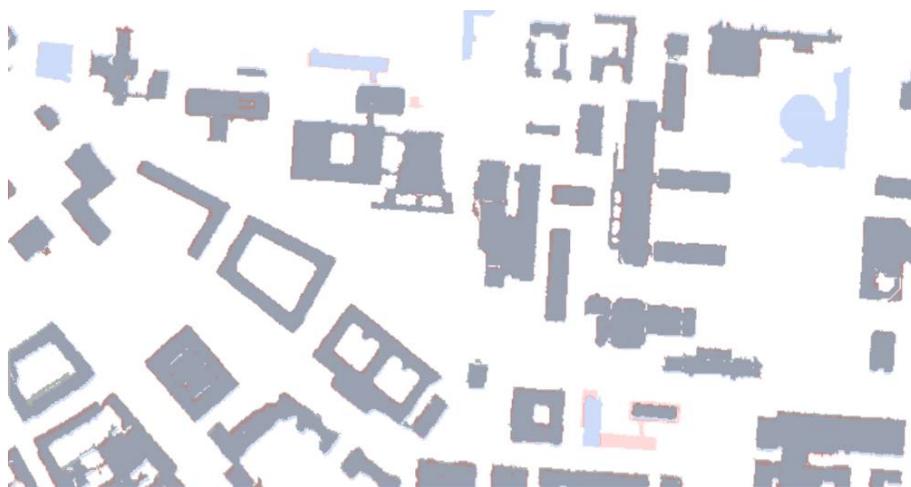


Abb. 85: Als unverändert erkannte Gebäude (dunkelgrau)

Dabei handelt es sich um die Kombination von Erosionsoperationen mit anschließenden Dilatationen:

$$D(X) = \partial_n(X) \circ \partial_{n-1}(X) \circ \dots \circ \partial_1(X) \circ \varepsilon_n(X) \circ \varepsilon_{n-1}(X) \circ \dots \circ \varepsilon_1(X) \quad (64)$$

Das Ziel dieses Verfahren ist ganz allgemein die Elimination von isolierten Pixeln bzw. kleinen Pixelgruppen, eine Elimination von kleinen Ausbuchtungen am Rand von Objekten, also eine Umrissglättung, sowie eine Betonung von Löchern in Objekten. Hier wird vor allem die Elimination von isolierten Pixeln benötigt. Es wird auch nur jeweils eine Erosion und damit auch eine Dilatation ausgeführt, so dass die für diese Anwendung unerwünschten Effekte der Randglättung bzw. der Hervorhebung von Löchern in Objekten praktisch nicht auftreten.

Es werden nach dem Opening-Verfahren wiederum alle noch nicht klassifizierten Segmente auf Höhendifferenzen untersucht, wobei solche mit keinen verbliebenen Differenzpixeln als unverändert klassifiziert werden. Für die anderen Segmente wird analysiert, ob sie mehrheitlich positive oder negative Differenzen aufweisen. Sie werden dann entweder als *aufgestockt* oder *zurückgebaut* klassifiziert, bzw., falls kein eindeutiger Trend besteht, nur als *verändert* markiert.

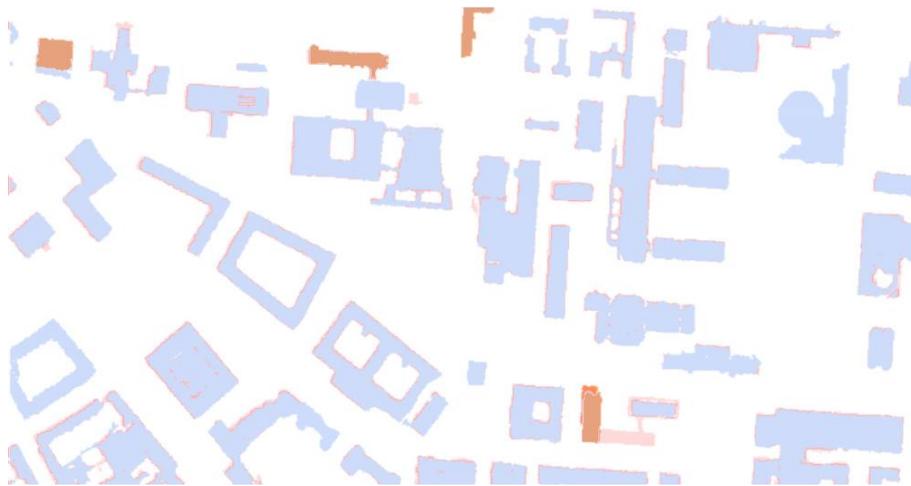


Abb. 86: Aufgestockte Gebäude (orange)

Die Abb. 86 zeigt für die Beispielsszene die Klassifikation der noch verbliebenen Segmente. Hier traten nur Gebäude mit Aufstockungen auf.

Die objektweise und nach Aufnahmezeitpunkten getrennte Vorgehensweise kann in Einzelfällen zu Doppelinterpretationen von Segmenten führen. In Abb. 87 und Abb. 88 ist ein Beispiel hierfür wiedergegeben. Es handelt sich dabei um das Gebäudeensemble eines Autosalons, das erheblichen Umbaumaßnahmen unterlag. Am linken Bildrand standen zum früheren Aufnahmezeitpunkt zwei zusammengebaute Gebäude, von denen eines teilweise abgerissen wurde. Das lange Gebäude am unteren Bildrand wurde aufgestockt und Teile angebaut (in Abb. 87 ist dies noch nicht sichtbar, da die Aufnahme ca. ein Jahr vor der Laserscanning-Erfassung gemacht wurde). Bei der Untersuchung der Gebäudesegmente wurde nun für das Gebäude am linken Bildrand bei der Analyse des Segments, das aus den älteren Laserscanningdaten extrahiert wurde, ein Rückbau erkannt. Für das lang gestreckte Gebäude wurde, ausgehend von dem aus dem jüngeren Datensatz extrahierten Segment, eine Aufstockung festgestellt. Die beiden Segmente überlagern sich aber in der linken unteren Bildecke, so dass der Bereich dort doppelt interpretiert wurde. Dies gibt viel genauer die Vorgänge wieder, als sie aufgrund eines reinen rasterbasierten Höhenvergleichs an dieser Stelle hätten erkannt werden können, da in diesem Fall nur ein Rückgang der Gebäudehöhe erkannt worden wäre.

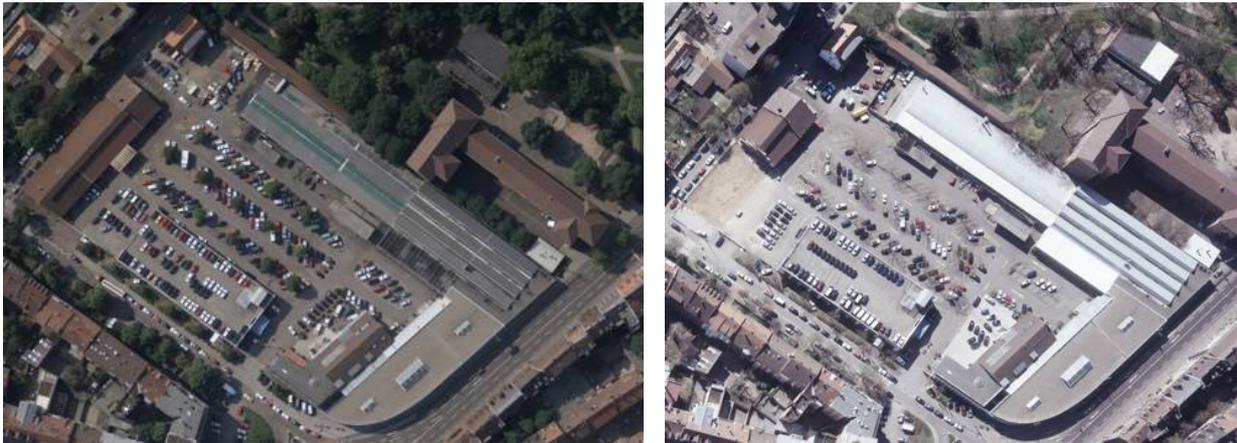


Abb. 87: Luftbilder eines geänderten Gebäudeensembles; links: Zustand 1997; rechts: kurz vor Ende der Bauarbeiten im Jahr 2001

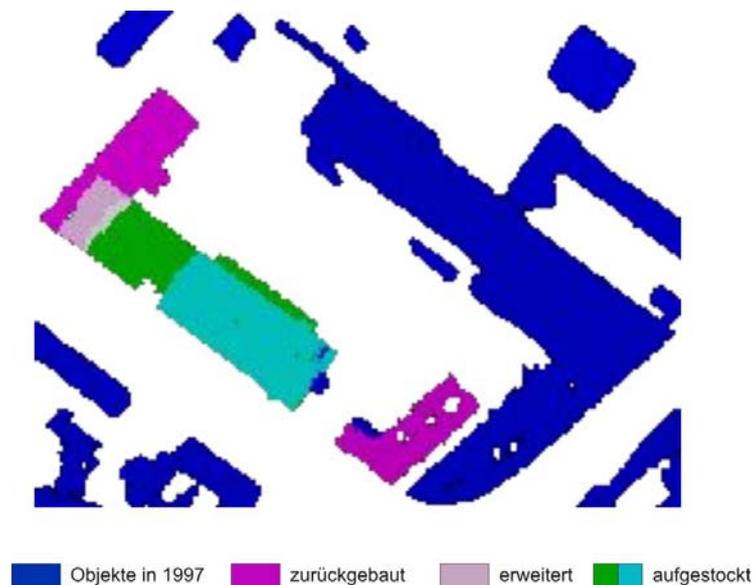


Abb. 88: Ergebnis der Änderungsanalyse des Gebäudeensembles

Es gibt allerdings Ausnahmefälle, in denen eine Klassifikation zwar bezüglich des Vergleichs der Höhendaten korrekt vorgenommen wurde, aber dennoch nicht mit der Realität übereinstimmt. In Abb. 89 und Abb. 90 ist ein Beispiel hierfür wiedergegeben. Es handelt sich dabei um ein Ensemble von drei Gebäuden, von denen zwei abgerissen und eines umfangreich saniert wurden. Eines wurde wieder aufgebaut, und zwar das am linken Bildrand. Das Gebäude ist heute sowohl höher als auch länger als das vorherige Gebäude, steht aber zu einem Großteil auf der Grundfläche des alten Gebäudes, weshalb hier eine Gebäudeaufstockung erkannt wurde.

In der Bildmitte ist ein Fall sichtbar, bei dem ein Gebäude umfangreich saniert wurde. Ein umlaufendes Vordach wurde abgerissen, so dass ein Rand um das Gebäude als abgerissen interpretiert wurde. Das Gebäude selbst wurde aber als unverändert ausgewiesen, da die Sanierung vor allem im Inneren des Gebäudes stattfand.

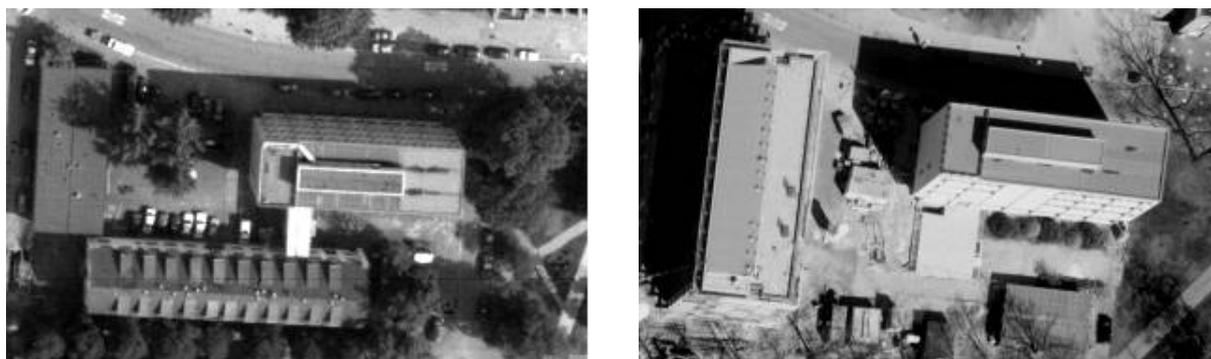


Abb. 89: Luftbilder eines Gebäudeensembles; Links: Aufnahmezeitpunkt 1997; Rechts: Aufnahme von 2001



Abb. 90: Ergebnis der Änderungserkennung für die vorangegangene Szene

5.4 Diskussion der Ergebnisse der Änderungserkennung

Zur Beurteilung der Ergebnisse der Änderungserkennung wurden die kompletten Datensätze von 1997 bzw. 1998 von den entsprechenden Daten des Aufnahmezeitpunkts 2002 subtrahiert. Für die in den Differenzbildern als stark geändert erkennbaren Bereiche, wurde durch Ortskenntnis, Ortsbegehungen und visuelle Analyse vorhandener Luftbilder verschiedener Aufnahmezeitpunkte der Bereiche die Ursache der Höhenänderungen ergründet. Die Ergebnisse wurden hinsichtlich ihrer Art interpretiert bzw. klassifiziert, und damit zum einen die zu Beginn des Kapitels erwähnten Untersuchungen zu auftretenden Änderungsarten durchgeführt. Zum anderen wurden die gefundenen permanenten Änderungen dokumentiert und zur Überprüfung der Änderungserkennung benutzt. Die Änderungserkennung wurde anhand der LE-Daten durchgeführt, da die FE-Daten wegen der stark gestiegenen Sensorsensitivität und Überlagerungseffekten, z. B. bei der Überlagerung von Bäumen oder Spannungsleitungen und Gebäuden, stellenweise sehr problematisch waren.

Von den drei in 5.2 erwähnten Änderungsarten traten nur permanente und sensorbedingte Änderungen auf. Dies hat vor allem damit zu tun, dass als Grundlage der Untersuchung aus den LE-Daten extrahierte Gebäudemodelle dienen. In den LE-Daten treten nahezu keine temporären Änderungen auf, was vor allem mit der Art der Objekte zu tun hat, an denen temporäre Änderungen festgestellt werden. In der Mehrheit sind dies Fahrzeuge, Marktstände und Baukräne. Aufgrund ihrer Größe, oder im Falle der Baukräne auch ihrer

Beschaffenheit (bezüglich des Laserscanningverfahrens sind sie optisch nicht „dicht“, d. h. es können Messstrahlen durch sie hindurchgelangen) bilden sie sich höchstens bruchstückhaft ab. Dadurch besteht nicht die Gefahr, dass sie im Objektextraktionsschritt als Gebäude oder Gebäudeteile erkannt werden.

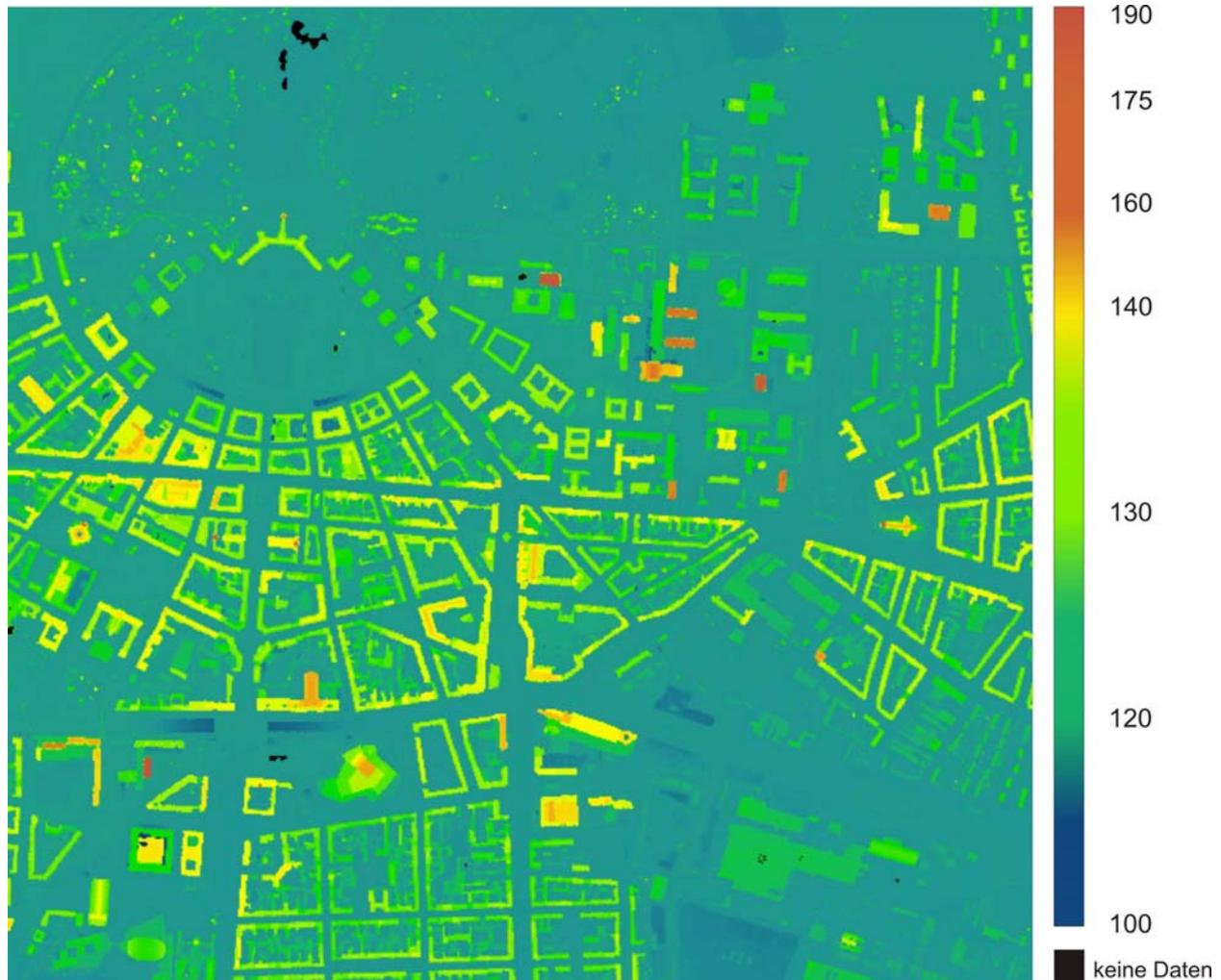


Abb. 91: Farbkodierte Darstellung eines Ausschnitts des LE-DOMs von 2002 (ca. 1,8 km x 1,6 km) des Innenstadtbereichs Karlsruhes (Skala in m)

Die Mehrheit der sensorbedingten Änderungen konnten ebenfalls erkannt, und damit von der Klassifikation ausgeschlossen werden, bei der nur permanente Änderungen als Klassen vorgesehen sind. Für sensorbedingte Änderungen aufgrund früherer Messsysteminsuffizienz, also z. B. fehlender Messwerte an stark absorbierenden Flächen, konnte dies durch das Ausschließen von Objekten geschehen, innerhalb deren Grundfläche größere zusammenhängende Fehlstellenbereiche im Datensatz von 1998 existieren. Wie bereits erwähnt, konnten sensorbedingte Abweichungen an den Objektträgern ebenfalls ausgeschlossen werden, durch Anwenden des morphologischen Opening-Verfahrens (s. Kapitel 5.2.3).

Damit verblieben fast nur permanente Änderungen im zu prüfenden Datensatz. Es wurden alle durch Operateure manuell klassifizierte Änderungen entdeckt und zum großen Teil korrekt interpretiert. Kritisch waren nur die im Kapitel zu den permanenten Änderungen erwähnten Sonderfälle, also z. B. abgebrochene Gebäude, an deren früheren Positionen neue Gebäude anderer Form errichtet wurden, für die dann nur Veränderungen der Gebäudestruktur interpretiert wurden.

Im Folgenden sollen weitere Auffälligkeiten aufgezeigt werden, die nicht direkt als Fehler der Änderungserkennung gelten können. Dazu ist in Abb. 91 bis zur Abb. 93 ein Teil des Untersuchungsgebiets im LE-DOM von 2002, einem Differenzenbild der LE-DOMs und dem Ergebnisbild der Änderungserkennung dargestellt. Vor allem im linken unteren Viertel des Gebiets treten verschiedene signifikante Änderungen an Gebäuden auf (schwarze Stellen in Abb. 92).



Abb. 92: Farbkodierte Darstellung der Differenzen zwischen den LE-DOMs von 1998 und 2002 (ca. 2 km x 1,6 km, Skala in cm)

Die Gebäude befinden sich in Bereichen dichter Bebauung, in denen ein sehr ähnlicher Baustil für jedes Gebäude benutzt wurde. Aus diesem Grund sind die Gebäudedächer in großen Bereichen sehr homogen. Dadurch wurden bei der Objektextraktion manchmal ganze Gebäudeblöcke in ein Segment aufgenommen, d. h. als ein einziges Gebäude interpretiert. Bei der Änderungserkennung wird deshalb eine einzige Zustandsaussage für ganze Blöcke getroffen. Im Sinne des entwickelten Verfahrens ist diese Aussage korrekt, jedoch wird in vielen Anwendungen eine gebäudescharfe Aussage gefordert. Dazu müssen aber Zusatzinformationen bereitgestellt werden, denn aus der abgebildeten Geometrie der Gebäudeblöcke lassen sie sich nicht eindeutig in Einzelgebäude zerlegen.

Im linken oberen Bildviertel ist ein weiteres Problem zu sehen, das auf eine Schwäche des Objektextraktionsverfahrens zurückzuführen ist. Es gibt eine ganze Reihe relativer kleiner Segmente, die Baumgruppen repräsentieren. In LE-Daten sind zwar so gut wie keine Messungen an Laubbäumen enthalten, jedoch finden sich häufig Messungen an Nadelbäumen. In besagtem Bildbereich befindet sich ein Park, der mischwaldähnliche Bereiche enthält. Dort gibt es auch Gruppen von zusammengepflanzten Nadelbäumen, die zudem gepflegt, d. h. regelmäßig durch Baumschnitt in ihrer Kronenform beeinflusst werden. Dadurch haben sie Eigenschaften, die sie bei der Objektextraktion gebäudeähnlich erscheinen lassen. Die Beurteilung ihres Zustands bei der Änderungserkennung ist aber korrekt, z. B. existierten die als „abgebrochen“

klassifizierten Bäume tatsächlich zum späteren Zeitpunkt nicht mehr, da sie zum größten Teil infolge eines Sturmtiefs umknickten und beseitigt werden mussten. An Weihnachten 1999 wurde das Gebiet durch den Orkan „Lothar“ stark beschädigt, es fielen ihm im Stadtgebiet Karlsruhe etwa 70 Hektar Wald zum Opfer. Bis zur dritten Laserscanning-Befliegung im Jahre 2002 waren große Teile zwar schon wieder aufgeforstet, es bestanden aber trotzdem noch Lücken. Zudem waren die neu gepflanzten Bäume noch zu klein, um wiederum fälschlicherweise als Gebäude klassifiziert zu werden.



Abb. 93: Farbkodiertes Ergebnis der Änderungserkennung

Ganz vereinzelt sind Auswirkungen sensorbedingter Änderungen im Ergebnis zu beobachten. So zum Beispiel im rechten oberen Bildviertel an dem großen Gebäude, das als zurückgebaut eingestuft wurde. Es handelt sich dabei um einen Gebäudekomplex, der ein großes Oberlicht in Form einer verglasten Pyramide besitzt (vgl. Gebäude im linken Teil der Abb. 20 auf Seite 32). Bei der Befliegung 2002 führten offensichtlich auch leicht schräg einfallende Messstrahlen zu Messungen im Gebäudeinneren, da der abweichende Randbereich zu den LE-Daten von 1998 im Extremfall bis zu vier Metern beträgt. Derartige Dachkonstruktionen sind aber als seltene Sonderfälle zu betrachten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das entwickelte Verfahren zur Änderungserkennung also in der Lage ist, Änderungen an Gebäuden in der Regel zuverlässig zu erfassen. Allerdings gilt dies nur für Änderungen, deren Fläche bezogen auf die Grundrissebene mindestens 3 m x 3 m beträgt, da sie sonst durch das Opening-Verfahren eliminiert werden. Da aber signifikante Gebäudeänderungen im Allgemeinen mindestens diese Größe besitzen, stellt dies keinen wesentlichen Nachteil dar.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung der Arbeit

Diese Arbeit ist angesiedelt im Umfeld des Einsatzes von Laserscanningdaten zur Detektion und Klassifizierung von Gebäudeschäden für Katastrophenmanagementsysteme. Dadurch ergaben sich für die Aufgabenstellung der Arbeit bestimmte Randbedingungen. Eine wesentliche Vorgabe war die Einschränkung der Ausgangsdaten auf Laserscanninghöhenmessungen, d. h. der Ausschluss jedweder weiterer Zusatzinformationen, wie z. B. Daten von Spektralscannern, die heute bei einigen Laserscanningssystemen fester Bestandteil sind (z. B. bei TopoSys II).

Es gab zwei thematische Bereiche: zum einen die Entwicklung eines Verfahrens zur Gebäudemodellierung aus Laserscanningdaten, zum anderen die Untersuchung von in multitemporalen Laserscanningdaten beobachtbaren Veränderungen in städtischen Bereichen. Die Gebäudemodellierung wurde als flächenbasiertes Verfahren realisiert. Dabei werden zunächst plane Flächen aus den Laserscanningdaten durch ein spezielles Flächenwachstumsverfahren extrahiert. Für die aufgefundenen Flächen wird eine automatische Topologieermittlung durchgeführt, die zuerst im zweidimensionalen Raum Lagenachbarschaften feststellt. Diese werden durch eine Höhenanalyse an den Berührungskanten der Flächen überprüft, und bei signifikanten Abweichungen an diesen Stellen Vertikalflächen eingeführt. Aus den Flächenparametern und den topologischen Eigenschaften werden Vektormodelle durch Schnitte der Dachflächen bestimmt. Es werden zuerst Dachkanten bestimmt und durch deren Schnitt Dachpunkte berechnet.

Für Pixel, die keiner Fläche zugeordnet werden konnten, wurden zwei mögliche Vorgehensweisen implementiert. Sie können entweder zu benachbarten Flächen hinzugenommen, oder aber durch Bildung eigener, kleinflächiger und in der Tendenz ungenauerer Flächen approximiert werden.

Zur Überprüfung der Modellierungsverfahren wurden Vergleiche mit geometrischen Soll-Modellen durchgeführt. Dabei zeigte sich die Problematik der Generierung geeigneter Referenzdatensätze, die eine höhere Genauigkeit als die benutzten Laserscanningdaten haben müssen. Die Referenzdatensätze wurden durch Tachymeteraufnahmen generiert, was aber einen hohen zeitlichen Aufwand bedeutet und z. T. schwierig ist, da Dachgeometrien gemessen werden müssen, die nicht immer durch terrestrische Aufnahmen exakt erfassbar sind.

Für die rekonstruierten Gebäudemodelle konnten erste Genauigkeitsabschätzungen vorgenommen werden. Es konnte eine Abhängigkeit der Höhengenaugkeit von den Dachneigungen festgestellt werden, sowie systematische Abweichungen in Lage- und Höhengenaugkeit in Abhängigkeit vom verwendeten Messmodus. Durch Mittelung der aus LE- und FE-Daten rekonstruierten Gebäude wurde das Potenzial zur Genauigkeitssteigerung durch die Fusion beider Modelle untersucht. Es konnte eine signifikante Erhöhung der Modellierungsgenauigkeiten prognostiziert werden.

In einem zweiten Teil wurden die in multitemporalen Laserscanningdaten urbaner Bereiche auftretenden Veränderungen untersucht und ein Verfahren zur Aufdeckung signifikanter Gebäudeänderungen implementiert. Bei der kategorisierenden Analyse der Daten konnten die Änderungsarten *sensorbedingte*, *temporäre* und *permanente Änderungen* identifiziert werden. Temporäre Änderungen und bestimmte sensorbedingte Änderungen wurden nur in FE-Daten festgestellt, so dass durch Verwendung von LE-Daten diese ausgeschlossen werden können. Die auch in den LE-Daten vorhandenen sensorbedingten Änderungen lassen sich,

bis auf wenige Ausnahmen, durch spezielle Filterung beseitigen, so dass einzig permanente Änderungen in den Daten verbleiben.

Die permanenten Änderungen können durch ein objektorientiertes Verfahren für Gebäude weiter klassifiziert werden in *abgerissene*, *zurückgebaute*, *aufgestockte* oder *neue Gebäude*. Dazu werden für die Datensätze verschiedener Aufnahmezeitpunkte getrennt Gebäude extrahiert und für die Gebäudesegmente ein Höhenvergleich mit den Daten anderer Aufnahmezeitpunkte durchgeführt. Die mit dem Verfahren erzielten Ergebnisse wurden anhand von Expertenwissen überprüft, und es konnten nur dort „Fehlklassifikationen“ festgestellt werden, wo sich die wahren Verhältnisse nicht in entsprechenden Höhenänderungen ausdrücken.

Es konnte gezeigt werden, dass die Änderungserkennung an Gebäuden und ihre Modellierung unter ausschließlicher Verwendung von Laserscannerdaten möglich ist und ausreichende Genauigkeiten erreicht werden können. Die Modellierungsverfahren konnten ohne Einführung gravierender geometrischer Restriktionen realisiert werden, die Modellierung wurde einzig auf die Verwendung planer Flächen(stücke) eingeschränkt.

Im Laufe der Untersuchungen wurde deutlich, dass bei der Informationsgewinnung über Gebäude aus Laserscanningdaten der verwendete Messmodus eine erhebliche Rolle spielt. Die resultierenden Datensätze haben ihre eigenen Charakteristiken, z. B. hinsichtlich der abgebildeten Objekte oder Objektgeometrien. Dies ist ein Punkt, der in vielen Ansätzen zur Modellierung von Gebäuden aus Laserscanningdaten heute leider noch nicht berücksichtigt wird, was an den oft fehlenden Angaben über den verwendeten Messmodus in der Literatur deutlich sichtbar wird.

6.2 *Ausblick*

In der Arbeit konnten erste Ergebnisse zur Beurteilung der erreichten Genauigkeiten im Gebäudemodellierungsprozess präsentiert werden. Für eine fundiertere Aussage über die Absolutgenauigkeiten ist die Ausweitung des Referenzdatensatzes notwendig. Da sich zeigte, dass eine erhebliche Genauigkeitssteigerung durch Fusion der aus LE- und FE-Daten extrahierten Vektormodelle erwartet werden kann, sollten Verfahren zur Fusion der Modelle entwickelt werden. Da im Allgemeinen die LE-Daten etwas besser die tatsächlich vorhandenen Dachflächen repräsentieren als die FE-Daten, sollten sie hinsichtlich der semantischen Rekonstruktion stärker betont werden, d. h. an Stellen von nicht-identischen Modellteilen die modellierte Dachstruktur bestimmen.

Sowohl für die Gebäudemodellierung als auch die Änderungserkennung ist eine Gebäudeextraktion aus den Laserscanningdaten notwendig. Hier bestehen noch Probleme mit Fehlklassifikationen an Baumgruppen, vor allem falls es sich dabei um Nadelbäume handelt. Auf diesem Gebiet besteht noch weiterer Forschungsbedarf (s. [TÓVÁRI & VÖGTLE, 2004]).

Die vorliegende Arbeit entstand im Kontext des Sonderforschungsbereichs 461. Sie stellt Grundlagen zur Erkennung und Modellierung beschädigter Gebäude bereit. Für den Einsatz der Verfahren in dem im Rahmen des SFB 461 entwickelten Disaster-Management-Tools müssen aber noch einige Erweiterungen der Verfahren vorgenommen werden. Die Verfahren zur Gebäudemodellierung müssen um Methoden ergänzt werden, mit denen eine Modellierung von derartig zerstörten Gebäudeteilen ermöglicht wird, die nicht mehr durch den vorgestellten Modellierungsansatz approximiert werden können.

Beim Verfahren der Änderungserkennung würden sich mögliche Gebäudeschäden in den Klassen *abgerissene* und *zurückgebaute Gebäude* finden, könnten aber noch nicht hinsichtlich ihres Schadensbilds interpretiert werden. Hierfür sind Verfahren zum Vergleich von rekonstruierten Vektormodellen und eine Methode zur Interpretation von an ihnen aufgefundenen Veränderungen zu ergänzen.

7 Literatur

- Abmayr, T., Härtl, F., Mettenleiter, M., Heinz, I., Hildebrand, A., Neumann, B. und C. Fröhlich, 2004: Realistic 3D reconstruction – combining laserscan data with RGB color information. In: M. O. Altan (ed.), Proceedings of the XXth ISPRS Congress Geo-Imagery Bridging Continents, IAPRS, Vol. XXXV, Part B, auf DVD veröffentlicht, ISSN 1682-1777.
- Altan, O., Kemper, G., Lavallo, C. and Demicheli, L., 2002. MOLAND – Monitoring land-use changes for the city of Istanbul. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS), Hyderabad, India, Vol. XXXIV, Part 7, auf CD veröffentlicht.
- Ameri, B. S., 2000: Automatic Recognition and 3D Reconstruction of Buildings through Computer Vision and Digital Photogrammetry. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 526, München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, ISBN 3-7696-9565-8.
- Autodesk, 2003: AutoCAD 2000 DXF Reference (R14 DXF Reference, version u14.1.04). Autodesk Inc., 2003. Online im Internet: <http://www.autodesk.com/techpubs/autocad/acad2000/dxf/index.htm> [Stand: 10. 10. 2003].
- Bähr, H.-P., 2001: The power of the links. In: Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, 1/2001, S. 23 – 31.
- Bähr, H.-P. und H. Lenk, 2002: Steps to cognition in image analysis and in philosophy – a comparison. In: Tagungsband zum International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Commission III symposium, IAPRS, Vol. XXXIV, part 3A/B, Graz, Österreich, S. 16 - 17. ISSN 1682-1750.
- Baltsavias, E. P., 1999 a: Airborne laser scanning: basic relations and formulas. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54, S. 199-214.
- Baltsavias, E. P., 1999 b: Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54, S. 164-198.
- Baltsavias E. P., Gruen A. und L. van Gool (Hrsg.), 2001: Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (III). Tagungsband zum gleichnamigen internationalen Workshop, 10-15 Juni, Ascona, Schweiz, Balkema Publishers, Lisse, Niederlande, ISBN 90 5809 252 6.
- Bhattacharyya, K., Sarma, K.S., Dey, S., Bahuguna, A., Shah, D. und Nayak, S.R., 2002: Application of remote sensing for the study of mangrove assemblages in Sunderbans, West Bengal. In: IAPRS, Hyderabad, India, Vol. XXXIV, Part 7, auf CD veröffentlicht.
- Biewer, B., 1997: Fuzzy-Methoden: praxisrelevante Rechenmodelle und Fuzzy-Programmiersprachen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1997, ISBN 3-540-61943-7.
- Bill, R. und D. Fritsch, 1994: Grundlagen der Geo-Informationssysteme I. Heidelberg: Wichmann Verlag, ISBN 3-87907-265-5.
- Bill, R. und M.L. Zehner, 2001: Lexikon der Geoinformatik. Heidelberg: Wichmann Verlag, ISBN 3-87907-364-3.
- Brenner, C. und C. Dold, 2004: Gebäudeextraktion aus luftgestützten und terrestrischen Scandaten. In: Th. Luhmann (Hrsg.), „Photogrammetrie - Laserscanning - Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2004“, Heidelberg: Wichmann Verlag, S. 312 - 319. ISBN 3-87907-407-0.
- Brenner, C. und N. Haala, 1998: Fast Production of Virtual Reality City Models. In: D. Fritsch, M. Englich & M. Sester (Hrsg.), 'IAPRS', Vol. 32/4, ISPRS Commission IV Symposium on GIS - Between Visions and Applications, Stuttgart, S. 77-84.
- Bronstein, I. N. und K. A. Semendjajew, 1991: Taschenbuch der Mathematik. 25., durchgesehene Auflage, herausgegeben von G. Grosche, V. Ziegler und D. Ziegler. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Stuttgart / Leipzig und Verlag Nauka, Moskau, ISBN 3-8154-2000-8.
- Castleman, K. R., 1979: Digital image processing. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J. 07632, USA, ISBN 0-13-212365-7.
- Cramer, M., 2001: Genauigkeitsuntersuchungen zur GPS/INS-Integration in der Aerophotogrammetrie. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 537, München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, ISBN 3-7696-9576-3.
- Comfort, L. K., 2000: Information Technology and Efficiency in Disaster Response: The Marmara, Turkey Earthquake, 17 August 1999. In: Quick Response Report # 130, Natural Hazards Center at the University of Colorado, Boulder, USA. Online im Internet: <http://www.colorado.edu/IBS/hazards/qr/qr130/qr130.html> [Stand: 11. 01. 2005].

- DIN, Deutsches Institut für Normung e.V. (Ed.), 1998: Vermessungswesen: Normen (DIN-Taschenbuch ; 111). 6. Auflage, Stand der abgedr. Normen: Oktober 1998. Berlin; Wien; Zürich: Beuth, ISBN 3-410-13498-0.
- Douglas, D. H. und Peucker, T. K. 1973: Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its character. *Canadian Cartographer* 10(2), S. 112-123.
- Drosdowski, G., Müller, W., Scholze-Stubenrecht, W. und M. Wermke, 1996: Duden Band 1, Rechtschreibung der deutschen Sprache. 21., völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage, herausgegeben von der Dudenredaktion. Dudenverlag, Mannheim, Leipzig, Wien, Zürich. ISBN 3-411-04011-4.
- Englert, R. und E. Gülch, 1996: One-Eye Stereo System for the Acquisition of Complex 3D Building Descriptions. *GIS journal* 4/96, S. 16 - 21.
- EUROCONTROL und IEN, 1998: WGS 84 Implementation Manual. Version 2.4 vom 12. Februar 1998. Online im Internet: <http://www.wgs84.com/files/wgsman24.pdf> [Stand: 29. 12. 2004].
- Förstner, W., 1999: 3D-City Models: Automatic and Semiautomatic Acquisition Methods. *Photogrammetrische Woche*, Stuttgart, S. 291-303.
- Gerber, R., 2000: Natürlichsprachliche Beschreibung von Strassenverkehrsszenen durch Bildfolgenauswertung. Universität Karlsruhe; Institut für Algorithmen und Kognitive Systeme. Dissertation. 2000. Online im Internet: <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/indexervv/2000/informatik/8> [Stand: 08. 09. 2004].
- Grün A., Baltsavias E. P. und O. Henricsson (Hrsg.), 1997: Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II). Birkhäuser Verlag, Basel, Schweiz. ISBN 3-7643-5788-6.
- Grün, A., Kübler, O. und P. Agouris (Hrsg.), 1995: Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images. Birkhäuser Verlag, Basel, Schweiz. ISBN 3-7643-5264-7.
- Grün, A., F. Steidler und X. Wang, 2000: CyberCity Modeler - ein System zur halbautomatischen Generierung von 3D-Stadtmodellen. *Der Vermessungsingenieur*, Jahrgang 51, Heft 4, 2000, S. 201-205.
- Haala, N., 2001: Anwendungspotential virtueller Stadtmodelle. In: *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung*, Band 9, S. 98-105.
- von Hansen, W. und T. Vögtle, 1999: Extraktion der Geländeoberfläche aus flugzeuggetragenen Laserscanner-Aufnahmen. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation (PFG)* 4/1999, S. 229 – 236.
- Hanson, A., Marengoni, M., Schultz, H., Stolle, F., Riseman, E. und C. Jaynes, 2001: Ascender II: a framework for reconstruction of scenes from aerial images. In: Baltsavias E. P., Gruen A. und L. van Gool (Hrsg.), *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (III)*. Tagungsband zum gleichnamigen internationalen Workshop, 10-15 Juni, Ascona, Schweiz, Balkema Publishers, Lisse, Niederlande, S. 25-34. ISBN 90 5809 252 6.
- Haralick, R.M. und L.G. Shapiro, 1992: *Computer and robot vision*. Vol. 1, Addison-Wesley, Reading, MA.
- Hofmann, A. D., 2004: Analysis of TIN-structure parameter spaces in airborne laser scanner data for 3-D building model generation. In: *IAPRSIS*, Vol. XXXV, Part B (Comm. III), CD-ROM. ISSN 1682-1777.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. und J. Collins, 2001: *Global Positioning System: theory and Practice*. 5. Auflage, Wien: Springer Verlag. ISBN: 3-211-83534-2.
- Hug, Ch., 1996: Entwicklung und Erprobung eines abbildenden Laseraltimeters für den Flugeinsatz unter Verwendung des Mehrfrequenz-Phasenvergleichsverfahrens. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 457, München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. ISBN 3-7696-9500-3.
- Hug, C., Ullrich, A. und A. Grimm, 2004: Litemapper-5600 – a waveform-digitizing lidar terrain and vegetation mapping system. In: M. Thies, B. Koch, H. Spiecker, H. Weinacker (eds.): *Proceedings of the ISPRS working group VIII/2 'Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment'*, Freiburg, Deutschland, 03-06 Oktober 2004, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRSIS)*, Volume XXXVI, Part 8/W2. Online im Internet: http://www.isprs.org/commission8/wg2/workshop_laser_forest/HUG.pdf [Stand: 15. 12. 2004].
- Hyypä, J. und H. Hyypä, 2001: High-Scan – Assessing forest stand attributes by integrated use of high-resolution satellite imagery and laserscanner. Final Report prepared for European Commission Directorate General XII. Online im Internet: http://www.felis.uni-freiburg.de/service/dokumente/HIGH_final.pdf [Stand: 16. 08. 2004].

- Hyypä, J., Hyypä, H., Litkey, P., Yu, X., Haggrén, H., Rönholm, P., Pyysalo, U., Pitkänen, J., und M. Maltamo, 2004: Algorithms and methods of airborne laser scanning for forest measurements. In: M. Thies, B. Koch, H. Spiecker, H. Weinacker (Ed.): Proceedings of the ISPRS working group VIII/2 'Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment', Freiburg, Deutschland, 03-06 Oktober 2004, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRSIS), Volume XXXVI, Part 8/W2. Online im Internet: http://www.isprs.org/commission8/wg2/workshop_laser_forest/HYYPAAE.pdf [Stand: 15. 12. 2004]
- Kahmen, H., 1993: Vermessungskunde. 18., völlig neu bearb. und erw. Auflage. – Berlin ; New York: de Gruyter. ISBN 3-11-013733-X.
- Katzenbeisser, R., 2003: Technical Note on: Echo Detection. Online im Internet: <http://www.toposys.de/pdf-ext/Engl/echo-detec3.pdf> [Stand: 13.12.2004].
- Koch, K. R., 1987: Parameterschätzung und Hypothesentests. Zweite, bearbeitete und erweiterte Ausgabe, F. Dümmlers Verlag, Bonn. ISBN 3-427-78922-5.
- Kraus, K. und N. Pfeifer, 1997: A New Method for Surface Reconstruction from Laser Scanner Data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 32, Part 3-2W3, Haifa, 1997, S. 80 – 86.
- Kusche, J., 1994: Ein Modell für die hochgenaue Navigation autonomer flächenbeweglicher Fahrzeuge. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 410, München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. ISSN 0065-5325, ISBN 3-7696-9455-4.
- Läbe, T. und Gülch, E., 1998: Robust Techniques for Estimating Parameters of 3D Building Primitives. Proceedings of ISPRS Commission II Symposium, Cambridge, UK, July 13-17, S. 169-176.
- Lindenberger, J., 1993: Laser-Profilmessungen zur topographischen Geländeaufnahme. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 400, München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. ISSN 0065-5325, ISBN 3-7696-9445-7.
- Löffler, G., 2003: Aspects of Raster DEM Data derived from Laser Measurements. In: H.-G. Maas, G. Vosselman und A. Streilein (Ed.), Proceedings of the ISPRS working group III/3 workshop '3-D reconstruction from airborne laser scanner and InSAR data', International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIV, Part 3/W13. ISSN 1682-1750.
- Lohr, U., 1999: High resolution laserscanning, not only for 3D-City models. In: D. Fritsch, R. Spiller (Hrsg.), Photogrammetric Week 99, Wichmann, Karlsruhe, 1999, S. 133-138.
- Lohr, U. und M. Eibert, 1995: The TopoSys Laser Scanner-System. In: Fritsch, D. und D. Hobbie (Eds.) Photogrammetric Week '95, Heidelberg: Wichmann Verlag, S. 263 – 267. ISBN 3-87907-277-9.
- Maas, H.-G., 2001: On the Use of Pulse Reflectance Data for Laserscanner Strip Adjustment. In: Proc. Of the ISPRS Workshop on Land Surface Mapping and Reconstruction using Laser Altimetry, Annapolis/Maryland, 22-24. oct. 2001, IAPRS Vol. XXXIV, Part 3/W4.
- Maas, H.-G., 2003: Planimetric and height accuracy of airborne laserscanner data - User requirements and system performance. In: D. Fritsch (ed.) Proceedings of the 49. Photogrammetric Week, Heidelberg: Wichmann Verlag, S. 117-125.
- Mayer, H., 1998: Automatische Objektextraktion aus digitalen Luftbildern. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 494, München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. ISSN 0065-5325, ISBN 3-7696-9534-8.
- Makus, M., Fiedrich, F., Gehbauer, F., und S. Hirschberger, 2000: Strong Earthquakes, Rapid Damage Assessment and Rescue Planning. In: Kowalski, K. M. und M. A. Trevis (Ed.), Proceedings of the 7th annual conference of the international emergency management society: "Contingency, Emergency, Crisis and Disaster Management: Emergency Management in the Third Millennium", Orlando, Florida, Mai 1999.
- Markus, M., Fiedrich, F., Leebmann, J., Schweier, C. und E. Steinle, 2004: Concept for an Integrated Disaster Management Tool. In: Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver BC Canada, 1 – 6 August 2004.
- Merziger, G. und Wirth, T., 1991: Repetitorium der Höheren Mathematik. 1. Auflage, Feldmann Verlag, Springe. ISBN 3-923923-33-3.
- MunichRe, 2004: Megacities – Megarisks. Trends and challenges for insurance and risk management. Online im Internet, URL: http://www.munichre.com/publications/302-04271_en.pdf [Stand: 11. 01. 2005].
- Pflug, M., Rindle, P. und R. Katzenbeisser, 2004: True-Ortho-Bilder mit Laser-Scanning und multispektralem Zeilenscanner. In: PFG 3/2004, S. 173 – 178.

- Quint, F., 1997: Kartengestützte Interpretation monokularer Luftbilder. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 477, München: Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, ISSN 0065-5325, ISBN 3-7696-9517-8.
- Ragia, L., 2000: A quality model for spatial objects. In: IAPRS, Vol. XXXIII, Part B3, Proc. ISPRS Congress, Amsterdam, Niederlande, Juli 2000, S. 855 – 862.
- Rudolph, D., Stürznickel, T. und Weissenberger, L., 1993: Der DXF-Standard, weltweit einzige und vollständige Dokumentation des "Drawing-Interchange-Format", vom DXF-Erfinder Autodesk autorisiert ... Rudolph, D. in Zusammenarbeit mit Autodesk (Hrsg.), Rossipaul, München, Edition Autodesk. ISBN 3-87686-246-9.
- Sachs, L., 1972: Statistische Auswertungsmethoden. Dritte, neubearbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. ISBN 3-540-05520-7.
- Salychev, O., 2004: Applied Inertial Navigation: Problems and Solutions. BMSTU Press, Moskau, Russland. ISBN 5-7038-2395-1.
- Schiewe, J., 2001: Ein regionen-basiertes Verfahren zur Extraktion der Geländeoberfläche aus Digitalen Oberflächen-Modellen. PFG 2/2001, Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, S. 81 – 90.
- Schrader, B., (Hrsg.) 1995: Gebäudeinformationssysteme. Deutscher Verein für Vermessungswesen (DVW), Schriftenreihe 19, Stuttgart: Konrad Wittwer. ISBN 3-87919-189-1.
- Serra, J., 1994: The „Centre de Morphologie Mathématique“: an overview. In: J. Serra & P. Soille (Hrsg.), Mathematical morphology and its applications to image processing, Kluwer Academic Publishers, S. 369 – 374.
- Shewchuk, J. R., 1993: Triangle: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator. In: M. C. Lin & D. Manocha (Hrsg.), Applied Computational Geometry: Towards Geometric Engineering, Proceedings of the First ACM Workshop on Applied Computational Geometry, Lecture Notes in Computer Science, Volume 1148, Springer-Verlag, S. 203-222.
- Soille, P., 1998: Morphologische Bildverarbeitung: Grundlagen, Methoden, Anwendungen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. ISBN 3-540-64323-0.
- Steinle, E. und T. Vögtle, 2000: Effects of different laserscanning modes on the results of building recognition and reconstruction. In: IAPRS, Vol. XXXIII, Part B3, Proc. ISPRS Congress, Amsterdam, Niederlande, Juli 2000, S. 858-865.
- Steinle, E. und T. Vögtle, 2001: Automated extraction and reconstruction of buildings in laserscanning data for disaster management. In: Baltasavias E. P., Gruen A. und L. van Gool (Hrsg.), Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (III). Tagungsband zum gleichnamigen internationalen Workshop, 10-15 Juni, Ascona, Schweiz, Balkema Publishers, Lisse, Niederlande, S. 309 – 318. ISBN 90-5809-252-6.
- Stilla, U., Sörgel, U. und K. Jäger, 2000: Generation of 3D-city models and their utilisation in image sequences. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing., Vol. 33, Part B2, 518-524.
- Straub, B.-M. und C. Heipke, 2001: Automatic Extraction of Trees for 3D City Models from Images and Height Data. In: Baltasavias E. P., Grün A. und L. van Gool (Hrsg.), Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (III). Tagungsband zum gleichnamigen internationalen Workshop, 10-15 Juni, Ascona, Schweiz, Balkema Publishers, Lisse, Niederlande, S. 267 – 277. ISBN 90 5809 252 6.
- Suveg, I. und G. Vosselman, 2004: Reconstruction of 3D building models from aerial images and maps. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 58, S. 202 – 224.
- Talaya, J., Alamus, R., Bosch, E., Serra, A., Kornus, W. und A. Baron, 2004: Integration of a terrestrial laser scanner with GPS/IMU orientation sensors. In: M. O. Altan (ed.), Proceedings of the XXth ISPRS Congress Geo-Imagery Bridging Continents, IAPRS, Vol. XXXV, Part B, auf DVD veröffentlicht. ISSN 1682-1777.
- Torlegård, K. und J. Nelson (eds.), 2001: Proceedings of the OEEPE workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models. OEEPE Official Publication No. 40, 2001. ISSN 0257-0505, ISBN 3-89888-782-0.
- Tóvári, D. und T. Vögtle, 2004: Classification methods for 3D objects in laserscanning data. In: IAPRSIS, Vol. XXXV, Part B (Comm. III), CD-ROM. ISSN 1682-1777.
- Tsay, J.-R., 2002: A concept and algorithm for 3D city surface modelling. In: IAPRS, Volume XXXIV, Com. III, Part B, ISPRS Commission III Symposium, Graz, September 2002, S. 283 – 286.

- Vögtle, T. und E. Steinle, 2003: On the Quality of Object Classification and Automated Building Modelling Based on Laserscanning Data. In: H.-G. Maas, G. Vosselman und A. Streilein (Ed.), Proceedings of the ISPRS working group III/3 workshop '3-D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data', International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIV, Part 3/W13, S. 149 – 155. ISSN 1682-1750.
- Vögtle, T. und Steinle, E., 2004: „Fusion of 3D Building Models derived from First and Last Pulse Laserscanning Data”. In: Information Fusion (in Druck). Auch online im Internet: <http://dx.doi.org/10.1016/j.inffus.2004.06.010> [Stand: 11. 01. 2005]
- Volkman, L., 1991: Graphen und Digraphen: eine Einführung in die Graphentheorie. Springer-Verlag, Wien, New York. ISBN 3-211-82267-4.
- Vosselmann, G., 2000: Slope based filtering of laser altimetry data. In: IAPRS, 33(B3), Amsterdam, The Netherlands, S. 935-942.
- Vosselman, G., 2003: 3D Reconstruction of Roads and Trees for City Modelling. In: Maas, H.-G., Vosselman, G. und A. Streilein (Hrsg.), Proceedings of the ISPRS working group III/3 workshop '3D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data', International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 34, part 3/W13, Dresden, Germany, S. 231-236.
- Wang, X., 1999: CyberCity Modeler - Generation and administration of 3-D city data, Online im Internet: <http://www.geod.ethz.ch/p02/research/3DGIS/3DGIS.html> [Stand: 12. 06. 2003].
- Wehr, A. und U. Lohr, 1999: Airborne laser scanning – an introduction and overview. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 54, S. 68 – 82.
- Weidner, U. und W. Förstner, 1995: Towards automatic building extraction from high resolution digital elevation models. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 50(4), S. 38 – 49.
- Weinacker, H., Koch, B., Heyder, U. und R. Weinacker, 2004: Development of filtering, segmentation and modelling modules for lidar and multispectral data as a fundament of an automatic forest inventory system. In: M. Thies, B. Koch, H. Spiecker, H. Weinacker (eds.): Proceedings of the ISPRS working group VIII/2 'Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment', Freiburg, Deutschland, 03-06 Oktober 2004, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRSIS), Volume XXXVI, Part 8/W2. Online im Internet: http://www.isprs.org/commission8/wg2/workshop_laser_forest/WEINACKER.pdf [Stand: 15. 12. 2004]
- Zadeh, L. A., 1965: Fuzzy Sets. In: Yager et al. (Eds.) 1987, S. 29-44. Nachdruck von: Information and Control 8, S. 338-353.
- Zanetti, A., Enz, R. und L. Hitz, 2000: Natur- und Man-Made-Katastrophen 1999: Stürme und Erdbeben führen zu zweithöchster Schadenlast in der Versicherungsgeschichte. SwissRe (Ed.), sigma Nr. 2 / 2000. Online im Internet: [http://www.swissre.com/INTERNET/pwsfilpr.nsf/vwFilebyIDKEYLu/MBA-4VHMBB/\\$FILE/sigma2_2000_d.pdf](http://www.swissre.com/INTERNET/pwsfilpr.nsf/vwFilebyIDKEYLu/MBA-4VHMBB/$FILE/sigma2_2000_d.pdf) [Stand: 11.01.2005].
- Zlatanova, S., 2000: 3D GIS for urban development. PhD thesis, ITC (International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation) publication 69, Enschede, Niederlande. ISBN 90-6164-178-0. Auch online im Internet: <http://www.gdmc.nl/zlatanova/PhDthesis/pdf/content.html> [Stand: 09. 11. 2003].

Danksagung

Diese Dissertation entstand aus der Arbeit in dem Teilprojekt C5 des Sonderforschungsbereichs 461 „*Starkbeben: Von geowissenschaftlichen Grundlagen zu Ingenieurmaßnahmen*“. Der SFB 461 wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziert und von der Universität Karlsruhe (TH) und dem Land Baden-Württemberg unterstützt, wofür an dieser Stelle gedankt sei.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil Dr. h. c. Hans-Peter Bähr möchte ich ganz herzlich für die Möglichkeit zur Erstellung dieser Arbeit danken, als auch für die Betreuung der Arbeit. In seinen Funktionen als Instituts- und Teilprojektleiter hat er stets meine Arbeit unterstützt, mir viele Freiräume eingeräumt und Chancen geboten, wofür ich mich an dieser Stelle auch bedanken möchte.

Bei Herrn Prof. Dr. habil Hans-Gerd Maas bedanke ich mich herzlich für die Übernahme des Korreferats, die fachlichen Diskussionen und Anregungen. Außerdem danke ich ihm sehr für die Mühen, die er in diesem Zusammenhang auf sich genommen hat.

Meinen Kollegen im SFB, am IPF und am GIK möchte ich für die gute Zusammenarbeit und die sehr angenehme Arbeitsatmosphäre danken. Es ist nicht möglich an dieser Stelle alle einzeln zu nennen, drei Personen möchte ich aber herausgreifen. Herr Dr.-Ing. Thomas Vögtle stand mir während meiner Zeit am IPF stets zur Seite und unterstützte mich auf vielfache Weise, wofür ich mich ganz herzlich bedanken möchte. Auch den freundschaftlichen Umgang mit ihm habe ich sehr geschätzt. Bei Herrn Dr.-Ing. Johannes Leebmann möchte ich mich für die zahlreichen fachlichen Diskussionen, die gute Zusammenarbeit im SFB, seine vielfältige Unterstützung und Freundschaft danken, wodurch er wesentlich zu einer angenehmen Arbeitsatmosphäre für mich beigetragen hat. Ebenso bedanke ich mich bei Dipl.-Ing. Dániel Tóvári, der in seiner Eigenschaft als Hiwi im Projekt große Einsatzbereitschaft und Flexibilität bewiesen, mich aber auch als Kollege unterstützt hat.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei meiner Familie und meinen Freunden. Sie haben viel Geduld und Verständnis für mich aufgebracht, auch in schwierigen Zeiten. Ohne ihre Unterstützung wäre mein beruflicher Werdegang so nicht möglich gewesen und Vieles ungleich schwerer geworden. Herzlichen Dank!