

CAD-basierte Modellierungstechniken zur Generierung von 3D-Stadtmodellen aus Luftbildern

Volker Steinhage¹

Abstract

Ausgehend von der Notwendigkeit aktueller 3D-Stadtmodelle für die nachhaltige Stadtplanung und -entwicklung ergibt sich ein Bedarf nach effizienten Methoden zur Erfassung und Fortführung von 3D-Stadtmodellen. Erfassung und Fortführung sind heute in den für die Stadtplanung notwendigen Beschreibungsmaßstäben nur durch Auswertung von Luftbild- oder flugzeuggetragenen Laserscannerdaten möglich. Um die Aktualität von Erfassung und Fortführung zu gewährleisten, ist die Automatisierung der Auswertungsverfahren nötig. Die für die Automatisierung eingesetzten Methoden und Modelle werden diskutiert. Es zeigt sich, dass der Einsatz von wissensbasierten Techniken für die Umsetzung anspruchsvoller Methoden und Modelle unerlässlich ist. Die Umsetzung der eindrucksvollen Fortschritte in der Forschung in praxiserichte Lösungen wird durch die Kombination von automatischen Verfahren mit interaktiven Steuerungs- und Eingriffsmöglichkeiten aufgezeigt. Der vorliegende Schriftbeitrag gibt eine strukturelle Übersicht und inhaltliche Zusammenfassung des Tutorials.

1. Motivation

Räumliche Planungen in urbanen Räumen bedürfen einer immer umfassenderen Kenntnis der aktuellen räumlichen Gegebenheiten im Planungsgebiet und der näheren Umgebung. Auch für die Beschreibung und Bewertung der Auswirkungen von Planungen, wie z.B. im Rahmen eines Bauleitplanverfahrens oder bei Umweltanalysen im Rahmen von Umweltverträglichkeitsplanungen (UVP), sind entsprechende aktuelle raumbezogene Daten notwendig. Für die Beurteilung der nachhaltigen Stadtentwicklung über sog. Nachhaltigkeitsindikatoren ist ferner der Einsatz eines über festgelegte Zeitschritte hinweg operierenden Monitoringsystems erforderlich (Weber/Sandtner 1999).

3D-Stadtmodelle sind als raumbezogene Informationssysteme zu verstehen, in denen räumliche sowie inhaltliche Zusammenhänge der modellierten urbanen Räume erfasst, verwaltet und verarbeitet werden (Förstner/Pallaske 1993). Innerhalb eines 3D-Stadtmodells stellen Gebäude neben dem Verkehrsnetz und der Vegetation

¹ Institut für Informatik III, Universität Bonn

die zentrale Objektgruppe dar, sowohl zur Visualisierung als auch für Analyse- und Simulationsmethoden.

Die Erfassung und Fortführung von 3D-Stadtmodellen sollte kostengünstig, flächendeckend sowie wiederholbar und vergleichbar durchführbar sein. Die für die Stadtplanung erforderlichen Maßstäbe können derzeit nur durch Stereoauswertung von Luftbildern und flugzeuggetragene Lasererfassungen erreicht werden. Aufgrund der hohen Kosten einer 3D-Erfassung und des dabei zu verarbeitenden Datenvolumens einerseits und der Forderung nach Aktualität der Raumdaten und ihrer kontinuierlichen Fortführung für Monitoringmaßnahmen andererseits, ist eine Automatisierung der Auswertungsverfahren von Luftbilddaten und Laserdaten erforderlich.

Ziel dieses Tutorials ist es, den Stand der Technik für die Erfassung von 3D-Stadtmodellen über die 3D-Gebäudeerfassung aufzuzeigen. Anhand von Beispielen werden die Methoden der automatisierten 3D-Gebäudeerfassung dargestellt. Die Grenzen der vollautomatisierten Verfahren werden beschrieben und semiautomatische Ansätze der 3-Gebäuderekonstruktion diskutiert.

2. Modelle

Jede Datenauswertung ordnet den gegebenen Daten eine Interpretation zu. So werden in Luftbildern bestimmte Bildbereiche als Abbildungen von Gebäuden, Verkehrsnetz oder Vegetation interpretiert. Bei der 3D-Rekonstruktion der städtischen Bebauung wiederum, werden abgeleitete 3D-Daten als Gebäudestrukturen interpretiert (z.B. Wand- oder Dachflächen, First- oder Traufkanten, etc.). Es existiert also immer ein *Modell* für die Interpretation der Daten.

Für Gebäude bieten sich CAD-basierte Modelle zur Beschreibung ihrer räumlichen Geometrie und ihrer Funktionalität an. Die CAD-Modelle beschreiben die sog. *Objektmodelle* der Gebäude. Für die 3D-Rekonstruktion aus Luftbildern oder Laserdaten sind zudem sog. *Bildmodelle* notwendig, welche die Erscheinungsform der städtischen Bebauung in den zugrundeliegenden Erfassungsdaten (Luftbilddaten oder Laserscannerdaten) beschreiben.

2.1 Objektmodelle

Die Auswahl der Objektmodelle hat zunächst zwei Ansprüchen der Beschreibungsmächtigkeit zu genügen: einerseits müssen die Objektmodelle flexibel genug sein, um ein möglichst umfangreiches Repertoire von Gebäudeformen beschreiben zu können. Andererseits müssen die Objektmodelle einschränkend genug sein, um nur gültige Gebäudeformen zuzulassen. Ferner sollten die Objektmodelle effiziente Rekonstruktionstechniken unterstützen.

Die automatisierten Verfahren zur 3D-Gebäuderekonstruktion lassen vier Ansätze der CAD-basierten Gebäudemodellierung erkennen (Steinhage 1998):

Prismatische Polyedermodelle beschreiben Gebäude durch polygonale Grundrissformen, vertikale Wandflächen und horizontale Dachflächen.

Parametrisierte Modelle beschreiben Gebäude durch eine Menge von Formprototypen. Jede Gebäudeform wird dann durch eine Prototypform und einen für diesen spezifischen Satz von Parametern beschrieben. Die Parameter beschreiben dann die konkrete geometrische Ausprägung der Prototypform (Länge, Breite und Höhe des Gebäudes, Dachneigung, etc.)

Allgemeine Polyedermodelle beschreiben Gebäudeformen durch zusammenhängende, planare Polygonflächen. Alle Wandflächen sind vertikal orientiert.

Konstruktive Komponentenmodelle beschreiben Gebäude durch wohldefinierte Kombinationen von parametrisierten Modellen von Gebäudeteilen. Konstruktive Komponentenmodelle lassen komplexe Grundrisse und verschiedene Dachtypen und deren Kombinationen zu.

Offensichtlich weisen die ersten beiden Arten von Objektmodellen einschneidende Einschränkungen auf. Prismatische Modelle können nur Gebäude mit horizontalen Flachdächern und polygonalen Grundrissen erfassen. Sie wurden vorwiegend in den USA erprobt, wo sie sich in Hochhauszenarien oder industriellen Flachbautenarealen bewährt haben. Parametrisierte Modelle (im CAD-Bereich auch als Prinzip der Primitiveninstanziierung bezeichnet) lassen verschiedene Gebäudeformen wie z.B. verschiedenen Dachtypen (Satteldach, Walmdach, Flachdach, etc.) zu. Parametrisierte Modelle haben sich z.B. für die Erfassung von Vorortsiedlungen mit einheitlichen oder zumindest beschränkten Gebäudetypen bewährt. Letztlich ist die Formenvielfalt bei der alleinigen Verwendung von parametrisierten Modellen jedoch durch die Aufzählung der Formprototypen begrenzt. Beide erstgenannten Ansätze zeichnen den Stand der Technik bis zu Beginn der neunziger Jahre aus. Die Beschränkungen der Modelle waren nicht zuletzt auch aufgrund des damaligen Stands der Rechnertechnologie und der Mächtigkeit der Bildverarbeitungsverfahren gewählt worden.

Mit zunehmenden Rechnerkapazitäten und verbesserten Bildinterpretationsalgorithmen konnten auch komplexere Gebäudemodelle eingesetzt werden. Seit Mitte der neunziger Jahre ist ein weltweiter Schub von Forschungsaktivitäten im Bereich der 3D-Gebäuderekonstruktion zu verzeichnen, in dessen Verlauf die europäischen Forschungsgruppen inzwischen mit den weltweit führenden Labors mindestens gleichziehen konnten.

Als Weiterentwicklung der prismatischen Polyedermodelle konnten verallgemeinerte Polyedermodelle eingeführt werden. Wesentliche Fortschritte dieser Entwicklung gingen von der ETH Zürich und den Universitäten von Leuven und Oxford im sog. IMPACT-Projekt aus (Abs. 4).

Als Weiterentwicklung der parametrisierten Modelle konnten die konstruktiven Komponentenmodelle eingesetzt werden. Wesentliche Fortschritte in dieser Entwicklung wurden an der Universität Bonn erzielt (Abs. 4).

2.2 Bildmodelle von Gebäuden für Luftbilder

Luftbilder stehen für die 3D-Gebäuderekonstruktion als digitalisierte Grauwert- oder Farbbilder zu Verfügung. Aus ihren Bildpunkten (Pixeln) sind zunächst elementare geometrische Bildmerkmale wie Linien, zusammenhängende Regionen oder Eck- und Verbindungspunkte zu extrahieren. Durch die Bildmodellierung dieser Bildmerkmale als Projektionen von Gebäudekomponenten (Gebäudeflächen, Gebäudekanten und Gebäudeecken) kann bereits in der Bildanalyse geeignet Mehrdeutigkeiten, Verdeckungen und Verschattungen sowie schwachen Kontrasten oder Rauschen begegnet werden. Die derart interpretierten Bildmerkmale bilden die Grundlage für Gruppierungen zu komplexeren Zusammenhängen und die 3D-Rekonstruktion durch Stereoauswertung.

2.3 Bildmodelle von Gebäuden für Digitale Oberflächenmodelle

Flugzeuggetragene Lasererfassungen führen zu sog. Digitalen Oberflächenmodellen. Ihr Vorteil liegt darin, dass sofort 3D-Daten erfasst werden. Aus diesen sind wieder Komponenten von Gebäuden zu extrahieren. Dieser Vorgang ist vergleichbar mit der Extraktion und Interpretation der Bildmerkmale in Luftbildern. Wieder sind Kanten, Flächen und Eck- oder Verbindungspunkte zu detektieren und als elementare Gebäudekomponenten zu interpretieren, wobei das hier dreidimensionale Bildmodell wieder zur Auflösung von Mehrdeutigkeiten, Rauschen, etc. eingesetzt wird.

3. Der Interpretationsprozess

Der gesamte Interpretationsprozess umfasst die folgenden Schritte: die Extraktion von elementaren Merkmalen in den Eingangsdaten, die Gruppierung der elementaren Merkmale zu zusammenhängenden und anwendungsspezifischen (also hier: gebäudespezifischen) Strukturen, die 3D-Rekonstruktion sowie die semantische Interpretation der rekonstruierten Gebäudeobjekte hinsichtlich ihrer Zusammensetzung aus Komponenten, ihrer Funktion, ihres Kontextes, etc.

Die Extraktion der elementaren Merkmale basiert i.a. auf Homogenitäts- bzw. Diskontinuitätsbedingungen in den Eingangsdaten. So deutet z.B. eine lineare Anreihung von Bildpunkten mit signifikanten Intensitätswechseln (Diskontinuität) mit ähnlicher Orientierung des Intensitätswechsels (Homogenität) auf die Projektion einer Objektkante hin. Ihre Extraktion kann zudem durch anwendungsspezifische Heuristiken ergänzt werden. So müssen z.B. die Projektionen von vertikalen Wandkanten einen gemeinsamen Fluchtpunkt im Luftbild aufweisen. Bei der Analyse von digitalen Oberflächenmodellen können sofort Höhenkriterien berücksichtigt werden.

Die Gruppierung der extrahierten elementaren Merkmale zu zusammenhängenden Strukturen ist der aufwendigste Prozess. Die Gruppierung basiert auf der Unter-

suchung von topologischen und geometrischen Zusammenhängen in den Nachbarschaften der Merkmale. In diesem kombinatorischen Prozess ist die Qualität des zugrundeliegenden Gebäudemodells ausschlaggebend.

Die geometrische 3D-Rekonstruktion ist hingegen vergleichsweise einfach. Die Rekonstruktion basiert auf den simultan in den Stereoluftbildern extrahierten punkt- und linienförmigen Merkmalen und der Stereorekonstruktion durch Bündelausgleichung.

Die semantische Interpretation der rekonstruierten Gebäude umfasst die Klassifikation der elementaren Gebäudeteile (z.B. Benennung von Wand- und Dachflächen, Trauf- und Firstkanten, etc.), die Klassifikation in Gebäudetrakte sowie die Zuordnung von Funktionalitäten (Erschließung, Wohnen, Fabrikation, etc.) sowie des Kontextes (Nachbarschaft, Anbindung, etc.). Der heutige Stand der automatischen semantischen Interpretation umfasst i.a. nur die beiden erstgenannten Kriterien.

3.1 Interpretationsstrategien

Die Unterschiede der verschiedenen Ansätze zur automatisierten Gebäudeextraktion liegen u.a. (1) in der Wahl der Eingangsdaten: Luftbilder, Digitale Oberflächenmodelle, Kombinationen von Luftbildern und Digitalen Oberflächenmodellen, Kombinationen von Erfassungsdaten mit Karten, etc., (2) in den verwendeten Algorithmen zur Extraktion und Gruppierung der elementaren Bildmerkmale und damit in der Wahl des Bildmodells, (3) in der Wahl des zugrundeliegenden Objektmodells (Prismatische Polyedermodelle, Verallgemeinerte Polyedermodelle, Parametrisierte Modelle, Konstruktive Komponentenmodelle), (4) bei der Interpretation von Luftbildern in der Wahl des Übergangs zwischen 2D-Bilddaten und 3D-Rekonstruktionsdaten.

Exemplarisch zeigt Abschnitt 4 zwei Ansätze der Gebäuderekonstruktion aus Luftbildern. Für eine Übersicht über das gesamte Spektrum an Arbeiten liegen hervorragende Übersichten in den Sammelwerken von Grün et al. 1995 und 1997, Förstner/Plümer 1997 sowie Förstner 1999 vor, aus denen leicht weitere Referenzen ersichtlich sind.

3.2 Wissen und Interaktion

Die in den Abschnitten 2 und 3 genannten Gebäudemodelle und Interpretationsstrategien basieren auf Wissen über Gebäude (Konstruktion, Funktion, Kontext, etc.) und Wissen über die Herleitung von Objektrekonstruktionen aus Bildvorlagen bzw. Laserscannerdaten. In der Wissensrepräsentation, einem Teilgebiet der Künstlichen Intelligenz, spricht man in diesem Zusammenhang von deklarativem Wissen bzw. prozeduralem Wissen. Das Wissen, das durch den gesamten Interpretationsprozess über meist mehrere Verarbeitungsstufen abgeleitet wird, ist i.a. mit Unschärfen (z.B.

geometrische Ungenauigkeiten aufgrund der Rasterung), Unsicherheiten (z.B. durch Mehrdeutigkeiten der Interpretation) und Unvollständigkeiten (z.B. aufgrund von Verdeckungen oder Verschattungen) behaftet. Letztlich sind automatische Prozesse für die Adaption und das Lernen von Wissen zu berücksichtigen, um umfangreiche Dateneingaben sowie Neu- und Umprogrammierungen zu vermeiden.

Diese Differenzierungen und Aspekte des zu verarbeitenden und zu modellierenden Wissens deuten an, dass der angemessenen Repräsentation und Verarbeitung von Wissen im Kontext einer solch anspruchsvollen Aufgabe wie der 3D-Gebäuderekonstruktion eine Schlüsselrolle zukommen muss, um von prototypischen Ansätzen zu funktionstüchtigen und praxisrelevanten Lösungen zu gelangen. Hierzu sind Techniken aus dem Gebiet der Wissensrepräsentation und -verarbeitung einzusetzen. Aus diesem Grunde werden zahlreiche Projekte interdisziplinär in Gruppen von Geodäten und Informatikern bearbeitet.

Vollautomatische Ansätze haben sich bisher auf ausgewählten Szenarien wie etwa Benchmark-Szenarien bewähren und eindrucksvolle Ergebnisse erzielen können. Aufgrund der nahezu unbegrenzten Komplexität und Variabilität von Gebäudeformen ist es fraglich, ob rein vollautomatische Systeme mit vergleichbarer Erkennungsmächtigkeit und -effizienz zu entwickeln sind, wie sie durch menschliche Bearbeitung von Luftbild- oder Laserscannerdaten erzielbar ist.

Vielmehr scheint die Integration von menschlicher und automatischer Bearbeitung zu praxisgerechten Lösungen zu führen, in denen der Mensch die grundlegenden Entscheidungen trifft und die schwierigen Ausnahmesituationen bearbeitet, während das System die immer wieder auftretenden Berechnungsschritte durchführt und aufgrund neuester Forschungen, auch im Bereich der vollautomatischen Ansätze, immer effektivere und mächtigere Werkzeuge anbietet.

4. Systeme

Es werden zunächst zwei vollautomatische Verfahren beschrieben, die sich bei der 3D-Gebäuderekonstruktion in suburbanen Gebieten mit z.T. sehr komplexen Gebäudeformen bewährt haben. Für die 3D-Rekonstruktion in hoch verdichteten urbanen Bereichen haben sich ihre semiautomatischen Erweiterungen ausgezeichnet.

4.1 Der automatische Ansatz der ETH Zürich

Das an der ETH Zürich entwickelte System AMOBE (Automation of Digital Terrain Model Generation and Man-Made Object Extraction from Aerial Images) basiert auf einem verallgemeinerten Polyedermodell und einer äußerst leistungsfähigen Bildauswertung (Henricsson 1998).

In den zugrundeliegenden Luftbildern werden photometrische und chromatische Attribute der Projektionen von Gebäudekanten in der Merkmalsextraktion durch die

Analyse von lokalen Nachbarschaftsbereichen (Flanking Regions) abgeleitet. Aus den extrahierten Bildlinien werden räumliche Kantenbeschreibungen durch eine Stereoanalyse generiert, in deren Korrespondenzanalyse neben der epipolaren Geometrie auch die photometrischen und chromatischen Attribute der Bildlinien eingesetzt werden.

Die Gruppierung zu polygonalen Beschreibungen von Dachflächensegmenten erfolgt sowohl in den Luftbildvorlagen als auch im rekonstruierten Modellraum, indem solche Linienzyklen generiert werden, deren Bildlinien neben geometrischer Nähe und Verträglichkeit eine hinreichende Homogenität in ihren photometrischen und chromatischen Attributen aufweisen und deren korrespondierende räumliche Kantenrekonstruktionen eine koplanare Kantengruppe bilden.

Alle derart einer objektzentrierten Ebene zugeordneten Linienzyklen werden nach Kriterien der Einfachheit und Kompaktheit der Flächenform sowie der 3D-Unterstützung durch die generierten Kanten bewertet. Die bestbewerteten, in die objektzentrierten Ebenen projizierten Linienzyklen definieren die polygonalen Dachflächensegmente, aus denen zusammenhängende Dachhypothesen generiert werden.

Abbildung 1 veranschaulicht einige der genannten Schritte der 3D-Gebäuderekonstruktion der ETH Zürich.

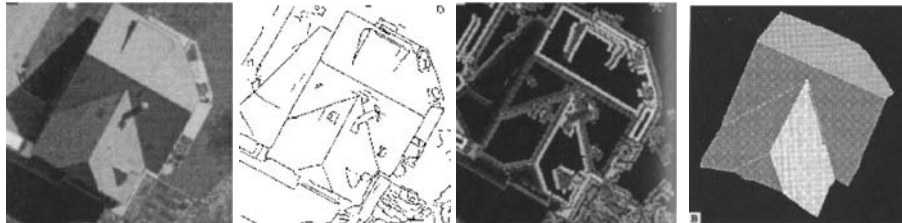


Abbildung 1:

Der AMOBE-Ansatz der ETH Zürich. Von links nach rechts: Bildausschnitt, extrahierte, die lokalen Nachbarschaftsbereiche (durch ihre mittlere Intensität dargestellt), das Rekonstruktionsergebnis.

4.2 Der automatische Ansatz der Universität Bonn

Der vollautomatische Ansatz SMB (Semantic Modeling of Buildings) der Universität Bonn wurde in Zusammenarbeit der Institute für Informatik und Photogrammetrie entwickelt und basiert auf einem konstruktiven Komponentenmodell (Fischer et al. 1998).

In diesem Komponentenmodell wird jede einfache oder komplexe Gebäudeform durch die konstruktive Kombination von gebäudespezifischen Formprimitiven nach dem CAD-Prinzip des Constructive Solid Modeling definiert. Die verwendeten

Formprimitive stellen Verbindungs- oder Abschlusskomponenten von Gebäude-trakten dar und werden durch parametrisierte Modelle repräsentiert.

Ausgehend von den aus Luftbildern extrahierten Bildlinien, Bildregionen und Bildpunkten, werden durch Stereoauswertung modellbasierte und typisierte 3D-Gebäudeecken generiert. Diese typisierten 3D-Gebäudeecken dienen zur Indizierung in die Datenbasis der gebäudespezifischen Formprimitive. Die Parameter der indizierten Formprimitive werden auf der Grundlage der in den rekonstruierten Ecken erfassten Größen (Höhen, Dachneigungen, etc.) partiell oder vollständig belegt. Die indizierten Formprimitive werden im Rahmen eines heuristischen Suchprozesses zu vollständigen 3D-Gebäuderekonstruktionen kombiniert, wobei weitere Formparameter der Gesamtrekonstruktion automatisch generiert und belegt werden.

Abbildung 2 zeigt die genannten Schritte der komponentenbasierten Gebäuderekonstruktion.

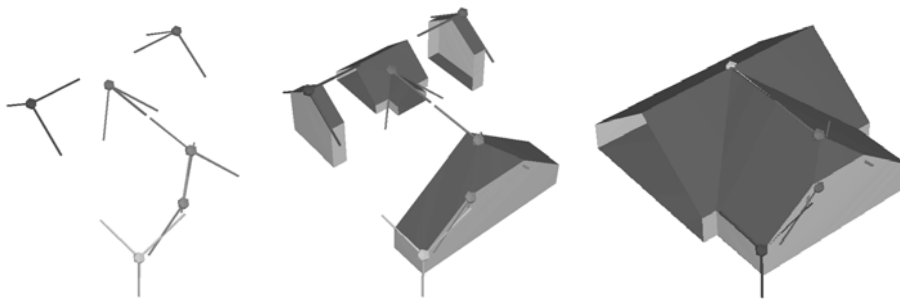


Abbildung 2:

Der SMB-Ansatz der Universität Bonn. Von links nach rechts: die rekonstruierten 3D-Gebäudeecken, die indizierten Gebäudekomponenten in Form von parametrisierten Formprimitive, eine der letzten Kombinationsstufen zur vollständigen Gebäuderekonstruktion.

4.3 Der semiautomatische Ansatz der KU Leuven

Der Ansatz von AMOBE wird auch in Arbeiten der Katholieke Universiteit Leuven fortgeführt. Das von Moons et al. 1998 beschriebene System basiert in der perceptiven Gruppierung auf einer Triangulation der Bildvorlagen derart, dass jede extrahierte Bildlinie einer Kante der Triangulation entspricht. Man spricht von einem sog. Constraint Triangulation Network.

Innerhalb dieser Triangulation wird ein Prozess des Regionenwachstums eingesetzt, um benachbarte Zellen mit ähnlichen photometrischen und chromatischen Attributen zusammenzufassen. Die so abgeleiteten homogenen Bildregionen werden

als betrachterzentrierte Dachflächenhypothesen interpretiert und bilden die Grundlage der Rekonstruktion von objektzentrierten Kantenbeschreibungen.

Die Gruppierung der rekonstruierten Kanten zu objektzentrierten Beschreibungen von polygonalen Dachflächensegmenten basiert einerseits auf ihrer Zugehörigkeit zu den aus der Bildtriangulation abgeleiteten betrachterzentrierten Dachflächenhypothesen und andererseits auf der geometrischen Zugehörigkeit zu einer koplanaren Ebene.

Die Triangulation ist interaktiv steuerbar, so dass selbst in dicht bebauten Szenarien mit hohem Verdeckungs- und Verschattungsgrad und großem Detailreichtum zuverlässige Erfassungen ermöglicht werden. Abbildung 3 zeigt hierzu Zwischenschritte und Ergebnisse.

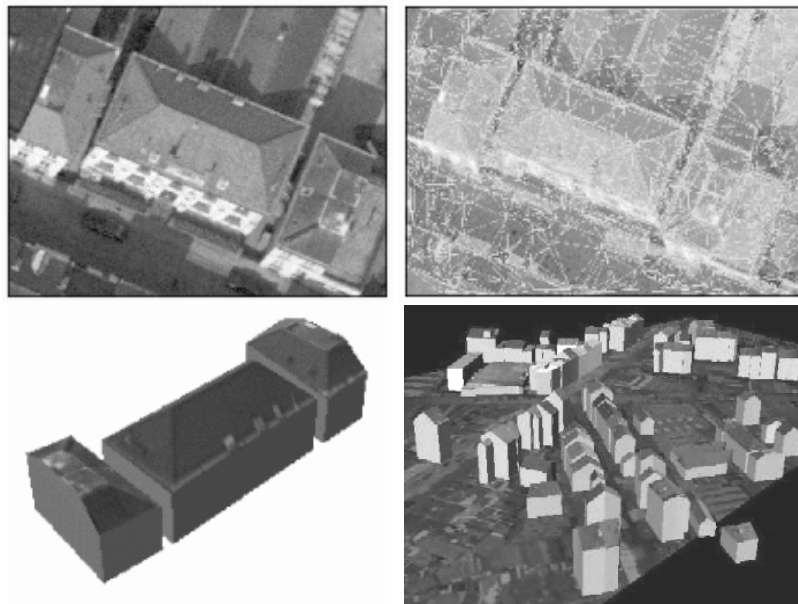


Abbildung 3:

Der semiautomatische Ansatz der KU Leuven. Von links oben nach rechts unten:
Bildausschnitt, Triangulation, Rekonstruktion, Gesamtrekonstruktion.

4.4 Der semiautomatische Ansatz der Universität Bonn

Das am Institut für Photogrammetrie der Universität Bonn weiterentwickelte semiautomatische System ObEx stellt für zahlreiche Teilaufgaben der 3D-Gebäude-rekonstruktion vielfältige Interaktionswerkzeuge zur Verfügung wie etwa das interaktive und simultane 3D-Einpassen von Formprimitiven in verschiedene Bildvor-

lagen, Fangfunktionen, Drahtgitter-Cursor, Dockingfunktionen, etc. und erlaubt sowohl Einzelbild- als auch Stereobildauswertungen.

Abb. 4 zeigt ein Luftbild der Stadt Frankfurt, das rekonstruierte 3D-Stadtmodell sowie eine Darstellung mit Texturüberlagerung. Gülch et al. 1999 geben eine Performanz von durchschnittlich ca. 20 Sekunden für die 3D-Erfassung eines Formprimitivs an.

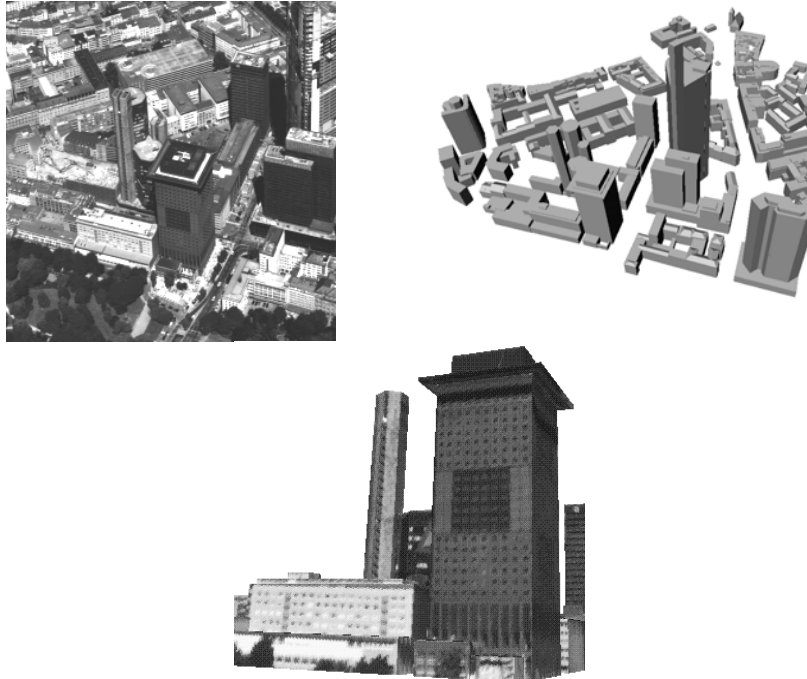


Abbildung 4:
Der semiautomatische Ansatz der Universität Bonn: Luftbild der Stadt Frankfurt,
3D-Rekonstruktion, Texturüberlagerung.

5. Zusammenfassung

In den vergangenen Jahren wurden beeindruckende Forschungsergebnisse in der automatischen 3D-Gebäuderekonstruktion erzielt, die nicht zuletzt der interdisziplinären Zusammenarbeit zwischen Informatikern und Geodäten zu verdanken sind.

Diese Fortschritte sind für den praxisgerechten, d.h. flächendeckenden und kostengünstigen Einsatz auszuwerten und zu integrieren. Neben der Integration verschiedener Methoden und Modelle ist insbesondere eine Kombination von vollautomatischen Verfahrensschritten mit interaktiven Steuerungs- und Eingriffsmöglichkeiten durch den menschlichen Bearbeiter notwendig. Mit den daraus resultierenden semi-automatischen Systemen sind bereits heute effiziente Erfassungen von 3D-Stadtmodellen möglich. Für weitere Verbesserungen dieser Systeme hinsichtlich Effizienz und Flexibilität ist der enge Austausch zwischen Forschung und Praxis weiter aufrechtzuerhalten.

Literatur

- Fischer, A., Kolbe, T. H., Lang, F., Cremers, A. B., Förstner, W., Plümer, L., Steinhage, V. (1998): Extracting Buildings from Aerial Images using Hierarchical Aggregation in 2D and 3D, *Computer Vision and Image Understanding*, (72) 2, 195-203.
- Förstner, W., Liedke, C.-E., Bückner, J. (Eds.) (1999): *Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps (II)*, Techn. University of Munich.
- Förstner, W., Pallaske, R. (1993): Mustererkennung und 3D-Geoinformationssysteme, *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, Heft 5/1993, 167-177.
- Förstner, W., Plümer, L. (Eds.) (1997): *Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps*, Birkhäuser.
- Grün, A., Baltsavias, E., Henricsson, O. (Eds.) (1997): *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II)*, Birkhäuser.
- Grün, A., Kübler, O., Agouris, P. (Eds.) (1995): *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images*, Birkhäuser.
- Gülch, E., Müller, H., Läbe, T. (1999): Integration of Automatic Processes into Semiautomatic Building Extraction, *Intern. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 32, Part 3/1, 331-338.
- Henricsson, O. (1998): The Role of Color Attributes and Similarity Grouping in 3D Building Reconstruction, *Computer Vision and Image Understanding*, (72) 2, 163-184.
- Moon, T., Frère, D., Vandekerckhove, J., Van Gool, L. (1998): Automatic Modeling and 3D Reconstruction of Urban House Roofs from High Resolution Aerial Imagery, *Proc. Europ. Conf. on Computer Vision, Lect. Notes on Comp. Science*, No 1406, 410-425.
- Steinhage, V. (1998): *Zur automatischen Gebäuderekonstruktion aus Luftbildern*, Habilitationsschrift an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bonn.
- Weber, J., Sandtner, M. (1999): Beschreibung städtischer Teilräume mittels Oberflächenstrukturen - Ein Beitrag zur Erfassung, Analyse und Bewertung der nachhaltigen Stadtentwicklung, *Raumforschung und Raumordnung*, Heft 5/6 1999, 410-417.