

Erfassung von 3D Stadtmodellen

**Claus Brenner, Norbert Haala
Institut für Photogrammetrie
Universität Stuttgart**

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird ein Verfahren vorgestellt, das durch Kombination von vorhandenen Grundrißdaten eines 2D-Geoinformationssystems mit durch Laserscanning gemessenen Höhendaten eine weitgehend automatisierte Ableitung von 3D-Stadtmodellen ermöglicht. Der vorgestellte Ansatz eignet sich zur vollautomatischen Rekonstruktion der Gebäude, zur interaktiven Korrektur und Verbesserung der dabei generierten Ergebnisse sowie zur semi-automatischen Gebäudeerfassung. Die Umsetzung des Lösungskonzeptes sowie die Darstellung der unterschiedlichen Verfahrensschritte wird anhand eines größeren Projektes demonstriert, bei dem das Verfahren zum Einsatz kam.

Einleitung

Eine wesentliche Aufgabe der Photogrammetrie ist die Erfassung und Repräsentation der realen Welt. Neue Chancen, auch qualitativ hochwertige Daten dem Nutzer einfach zugänglich zu machen sind insbesondere durch das World Wide Web (WWW) gegeben, das eine sehr einfache Verbreitung von Daten ermöglicht. Der große Erfolg des WWW führte auch zur weiten Verbreitung von internationalen Standards zur Beschreibung von 3D Welten wie der Virtual Reality Modeling Language (VRML). Durch die zum Teil kostenfreie Verfügbarkeit von VRML-Browsern stehen mittlerweile auch dem Standardnutzer Werkzeuge zur 3D Visualisierung zur Verfügung. Nicht zuletzt deshalb kann eine stetig steigende Zahl von Anwendungen erwartet werden, in denen die Visualisierung und der Zugriff auf virtuelle 3D Welten integriert ist. Mögliche Szenarien sind intelligente Touristen-Informationssysteme, die es dem potentiellen Besucher schon vorab ermöglichen virtuell einen Stadtrundgang zu planen. Dabei kann beispielsweise auch die Kopplung mit einem System zur Hotelreservierung erfolgen, welches dem Nutzer die Möglichkeit gibt, die Lage von Hotels (zusammen mit dem Anfahrtsweg) in einer virtuellen 3D Landschaft zu betrachten. Die rasante Entwicklung im Bereich von persönlichen digitalen Assistenten (PDA) bringt immer kleinere und leistungsfähigere Geräte hervor. Die Realisierung von Systemen zur Personennavigation, bei denen der gesuchte Weg nicht mehr in einer 2D Kartendarstellung, sondern erheblich wirklichkeitsnaher in einem virtuellen 3D Modell repräsentiert wird, erscheint daher in greifbare Nähe gerückt.

Die Produktion von virtuellen Stadtmodellen und Landschaften durch die Photogrammetrie bietet somit ein großes Zukunftspotential. Voraussetzung ist jedoch die Verfügbarkeit entsprechender Werkzeuge zur kostengünstigen und schnellen Erfassung der benötigten Daten. Die Entwicklung solcher Werkzeuge stellte in letzter Zeit ein Schwerpunkt der photogrammetrischen Forschung dar und hat eine Vielzahl voll- und halbautomatischer Verfahren hervorgebracht (Grün et. al. 1995; Grün et. al. 1997). Obwohl automatische Verfahren auf einzelnen Datensätzen bereits vielversprechende Ergebnisse erzielt haben, ist eine vollautomatische Rekonstruktion auf absehbare Zeit nicht praktikabel. Hauptgründe hierfür sind die nach wie vor nicht ausreichende Stabilität und Zuverlässigkeit des Rekonstruktionsprozesses. Konsequenterweise konzentrierte sich in der letzten Zeit die Entwicklung auf semi-automatische Verfahren. Diese ermöglichen im Prinzip Erfolgsraten von 100% und können damit auch in der Praxis für die Bearbeitung größerer Projekte eingesetzt werden.

Eine Sonderstellung bezüglich der begrifflichen Unterteilung in halbautomatische und vollautomatische Verfahren nimmt der hier vorgestellte Ansatz ein, bei dem existierende 2D Grundrisse von Gebäuden verwendet werden. Diese Grundrisse beinhalten Information, wie sie in der Regel durch einen menschlichen Operateur erfasst wurde. In diesem Sinn ist das Verfahren als halbautomatisch zu bezeichnen. Werden die Grundrisse jedoch zusammen mit den Höhendaten dem Programm zur Verfügung gestellt, erfolgt die Ableitung des 3D Stadtmodells ohne weiteren Eingriff von außen. In diesem Sinn ist der Ansatz als vollautomatisch zu definieren. Aus diesem Grund wird im weiteren Verlauf die

interaktive Kontrolle und Korrektur der Gebäuderekonstruktion als halbautomatischer Verfahrensschritt, die Ableitung der Gebäude aus den vorgegebenen Eingabedaten dagegen als (voll)automatischer Schritt bezeichnet.

Im Gegensatz zu anderen Verfahren zur Gebäuderekonstruktion auf der Basis von 2D-GIS ([Anders 1997](#), [Schilcher et. al. 1999](#)), die vorhandene Attribute wie z.B. die Stockwerkszahl zur Bildung von 3D Hypothesen nutzen, kommen in dem hier vorgestellten Verfahren zusätzlich gemessene Höhendaten zum Einsatz, da nur durch die Verwendung von 3D Information die tatsächliche Gebäudeform erfasst werden kann. Als Datengrundlage dient dabei ein dichtes Digitales Höhenmodell (DHM), das durch flugzeuggetragenes Laserscanning erfasst wurde. Im folgenden werden die dabei durchgeführten Verfahrensschritte vorgestellt und anhand ausgewählter Beispiele diskutiert.

Verfahrensschritte der 3D Gebäuderekonstruktion

Das gebräuchlichste Modell zur allgemeinen Beschreibung von Gebäuden sind Polyeder, d.h. es wird davon ausgegangen, dass sich alle Gebäude in ebene Flächen und gerade Kanten zerlegen lassen, die sich aus der topologischen Verknüpfung von 3D Punkten ergeben. Die Erfassung der polyedrischen Modelle und damit der Prozess der Gebäuderekonstruktion kann folglich in zwei Schritte unterteilt werden:

- Die **3D Datenerfassung**, die beispielsweise auf der manuellen oder halbautomatischen Punktmessung in Stereoluftbildern basiert. Alternativ kann für die 3D Datenerfassung ein DHM verwendet werden, das durch automatische Stereobildzuordnung abgeleitet oder durch Laserscanning direkt erfasst wird.
- Die **Strukturierung** der gemessenen 3D Daten, bei der Topologien zwischen den gemessenen Punkten aufgebaut werden, um so zu einer CAD-konformen Objektbeschreibung zu gelangen. Die Strukturierung umfaßt auch die Unterteilung der gemessenen Punkte in verschiedene Objektkategorien (z.B. Trennung in Gebäude und Geländeoberfläche) sowie bei Bedarf die Auswahl von Punkten, die eine Objektfläche beschreiben.

Interaktive bzw. semi-automatische Verfahren kombinieren häufig beide Schritte, in dem beispielsweise Punkte in strukturierter Form (Erfassungsreihenfolge, Layerzuordnung) erfasst werden ([Grün & Wang 1998](#)). Eine weitere Möglichkeit besteht in der Verwendung von einfachen Grundelementen zur Darstellung von Gebäuden, die von dem Operateur ausgewählt und semi-automatisch in Luftbilder eingepaßt werden ([Gülch et.al. 1999](#)). Durch solche Grundelemente, wie sie auch in dem hier vorgestellten Verfahren verwendet werden, ist die topologische Struktur der 3D Punkte und Linien bereits implizit vorgegeben.

In dem hier beschriebenen Ansatz werden beide Schritte der Gebäuderekonstruktion getrennt und mit unterschiedlichen Daten durchgeführt. Die Strukturierung basiert auf der automatischen Interpretation vorhandener Gebäudegrundrisse, während der 3D Datenerfassung Höhendaten in Form eines DHM zugrunde liegen. Der Vorteil bei der Verwendung eines DHM gegenüber der Verwendung von Luftbildern liegt darin, dass der Informationsgehalt des DHM bereits auf die in unserem Fall relevante geometrische Information reduziert ist. Im Vergleich zu Luftbildern wird deshalb die automatische Auswertung solcher Daten erheblich vereinfacht.

Grundlage der verwendeten DHM sind Messungen mit einem flugzeuggetragenen Laserscanner, die für die vorliegende Anwendung mit einem mittleren Punktabstand von einem Meter gewonnen wurden. Zum Teil werden bereits solche DHM irrtümlich als 3D Stadtmodell bezeichnet, da durch Überlagerung mit Luftbildern schon zu diesem Zeitpunkt realistische Visualisierungen möglich sind (Abbildung 1). Dabei handelt es sich jedoch um eine rein ikonische Repräsentation, die nicht objektbezogen vorliegt. Des weiteren ist die Darstellung derartiger Modelle aufgrund der großen Datenmenge sehr rechenintensiv. Das Ziel der weiterführenden Verarbeitung und der dabei durchzuführenden Interpretation ist es deshalb, aus der großen Menge von Laserpunkten ein dreidimensionales CAD-

Modell für jedes Gebäude abzuleiten. Nur so ist die Anbindung an ein Informationssystem möglich, welches beispielsweise die Suche nach bestimmten Gebäuden oder Gebäudeeigenschaften erlaubt.



Abbildung 1: DHM aus Laserscanning mit überlagertem Luftbild

Zur Ableitung eines CAD-Modells ist die Strukturierung und damit die Interpretation der 3D Punktdaten notwendig. Dies fällt einem menschlichen Beobachter meist leicht, ist jedoch schwierig zu automatisieren. Um möglichst viel an menschlichem (Vor)wissen in den Auswerteprozess zu integrieren, werden dazu existierende Grundrisse der Gebäude verwendet. Diese Daten werden in der Regel durch einen Operateur erfasst und sind somit das Produkt menschlicher Interpretation. Nur durch die Verwendung des in den Grundrissen implizit enthaltenen Vorwissens ist eine weitgehende Automation des weiteren Verfahrens möglich. Neben den rein algorithmischen Aspekten hat es sich zudem als Vorteil des vorgestellten Ansatzes erwiesen, dass durch die Verwendung eines existierenden 2D GIS Probleme der Integrität zwischen 2D und 3D Daten verhindert werden und damit auch die gemeinsame Fortführung der Datenbestände erleichtert wird. Falls die benötigten Grundrisse nicht schon vorhanden sind, können sie zudem mit Standardrechnern und Standardsoftware relativ schnell und kostengünstig vor Beginn der eigentlichen Gebäuderekonstruktion durch Digitalisierung aus Orthophotos oder Karten abgeleitet werden.

Das Ablaufdiagramm des Algorithmus ist in Abbildung 2 dargestellt. Die verwendeten Eingabedaten sind dabei auf der linken Seite, die resultierenden Ausgabedaten auf der rechten Seite aufgeführt. Die beiden Pfeile markieren Stellen, an denen eine Modifikation der Ergebnisse durch interaktiven Eingriff in die Datenprozessierung möglich ist. Die zu rekonstruierenden Gebäude werden in dem vorgestellten Verfahren durch die Kombination einfacher 3D Grundelemente oder Primitive beschrieben. Dadurch kann die Rekonstruktion auch komplexer Gebäude auf die Bestimmung der Parameter dieser Grundelemente reduziert und damit vereinfacht werden. Zur Initialisierung der 3D Primitive beginnt die Prozessierung deshalb zunächst mit der Zerlegung des Grundrißpolygons in 2D Grundelemente, d.h. in einzelne Rechtecke. Jedes dieser Rechtecke definiert anschließend die Grundfläche des zugehörigen 3D Primitivs, d.h. die Position, Orientierung und Größe des 2D Elements bestimmen die entsprechenden Werte des 3D Gebäudeelements. Als zu bestimmende Parameter verbleiben somit noch die Dachform, die Höhe des Gebäudes und die Dachneigung. Als mögliche Dachformen der Gebäudeelemente sind derzeit Flach-, Giebel- und Walmdach vorgesehen. Die unbekannt Parameter werden in einem anschließenden Schritt durch eine Kleinste-Quadrate-Schätzung bestimmt, bei der die Differenzen zwischen der zu rekonstruierenden Dachfläche dem DHM minimiert werden. Dachbereiche, die Kamine oder andere Aufbauten enthalten, werden zunächst im Rahmen einer Segmentierung detektiert und gehen nicht in die Rekonstruktion der Dachform ein. Im Rahmen dieser Segmentierung wird e-

benfalls Grundrißinformation verwendet, die Vorwissen über mögliche Orientierungen der Dachflächen liefert (Haala & Brenner 1999).

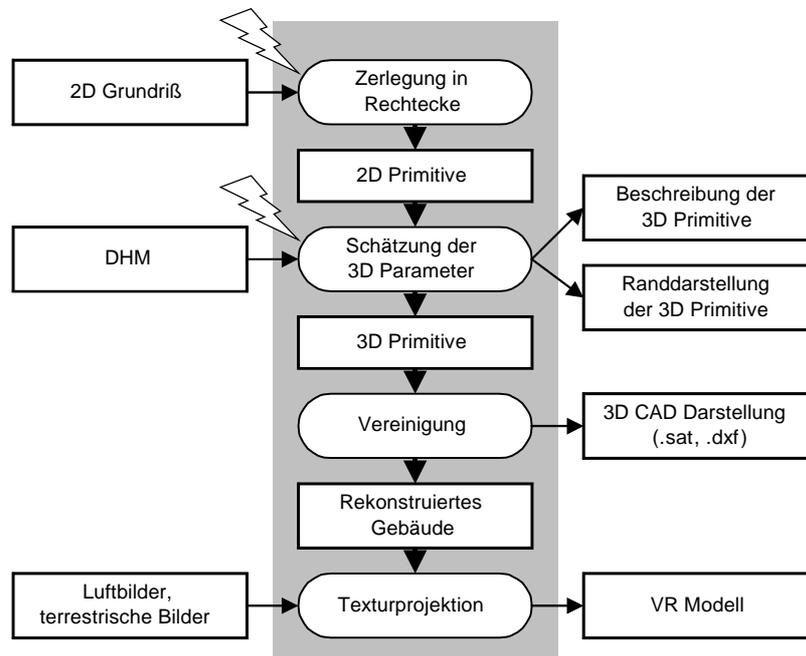


Abbildung 2: Ablauf der 3D Gebäuderekonstruktion

Da unterschiedliche Dachformen zur Verfügung stehen, wird das 3D Primitiv mit dem geringsten verbleibenden Residuum ausgewählt. Nach diesem Schritt stehen für jedes Gebäude die rekonstruierten Grundelemente zur Verfügung, d.h. das gesamte Gebäude wird durch ineinander verschachtelte 3D Primitive repräsentiert, wie dies auch bei einer Beschreibung durch CSG (Constructive Solid Geometry) üblich ist. Für die meisten Anwendungen wird jedoch eine 3D Randdarstellung benötigt, was eine Vereinigung der Grundelemente der CSG-Beschreibung erfordert. Da eine solche Operation zu den Grundaufgaben von CAD-Programmen gehört, wird hierzu auf eine kommerzielle Programm-Bibliothek zurückgegriffen, die neben der Vereinigung der Grundelemente auch die Ausgabe der resultierenden Randdarstellung erlaubt.

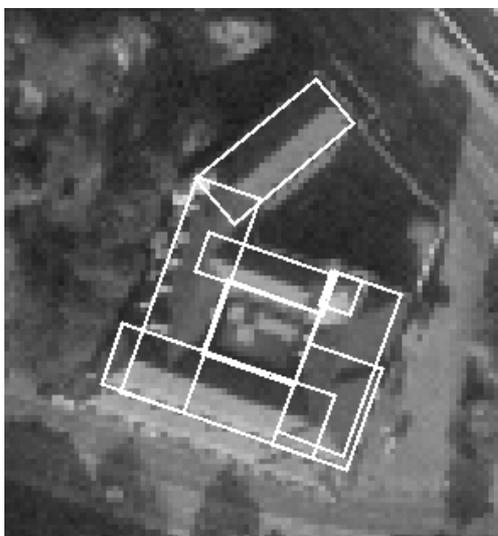


Abbildung 3: Rechteckzerlegung des Grundrisses

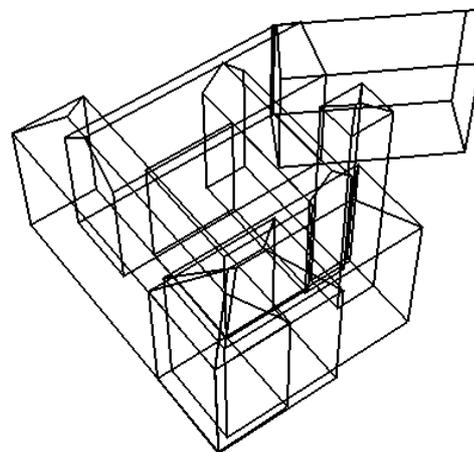


Abbildung 4: Rekonstruierte 3D Primitive

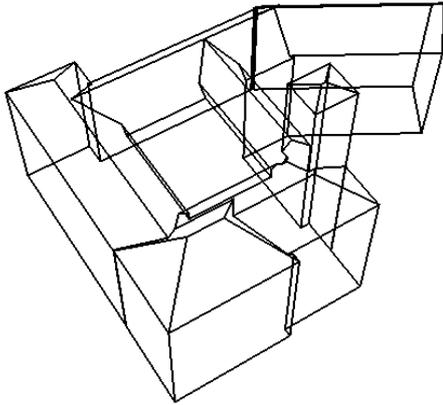


Abbildung 5: 3D Randdarstellung des Gebäudes

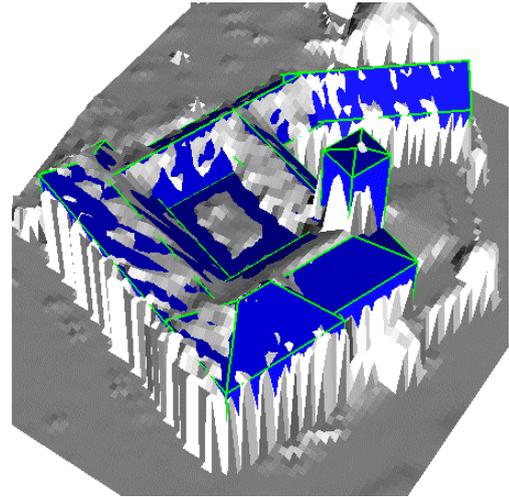


Abbildung 6: Rekonstruiertes Gebäude und DHM

Die einzelnen Schritte des Verfahrens sind beispielhaft in Abbildung 3 bis Abbildung 6 dargestellt. Abbildung 3 zeigt den Grundriss des Gebäudes nach der Zerlegung in einzelne Rechtecke. Für jedes dieser Rechtecke wird durch den Vergleich mit der DHM-Oberfläche ein 3D Primitiv rekonstruiert. Dazu wird die passende Dachform ausgewählt und die Traufhöhe des Gebäudes und die Dachneigungen werden bestimmt (Abbildung 4). Zur Erzeugung einer Randdarstellung werden zum Abschluß der Rekonstruktion die 3D Grundelemente miteinander vereinigt. Die Vereinigung besteht aus einer Verschneidung der 3D Primitive mit einer anschließenden Elimination von Flächen innerhalb des resultierenden Gebäudekörpers. Abbildung 6 zeigt nochmals das Ergebnis des Verfahrens, wobei in dieser Darstellung zusätzlich das zur Rekonstruktion verwendete DHM überlagert wurde.

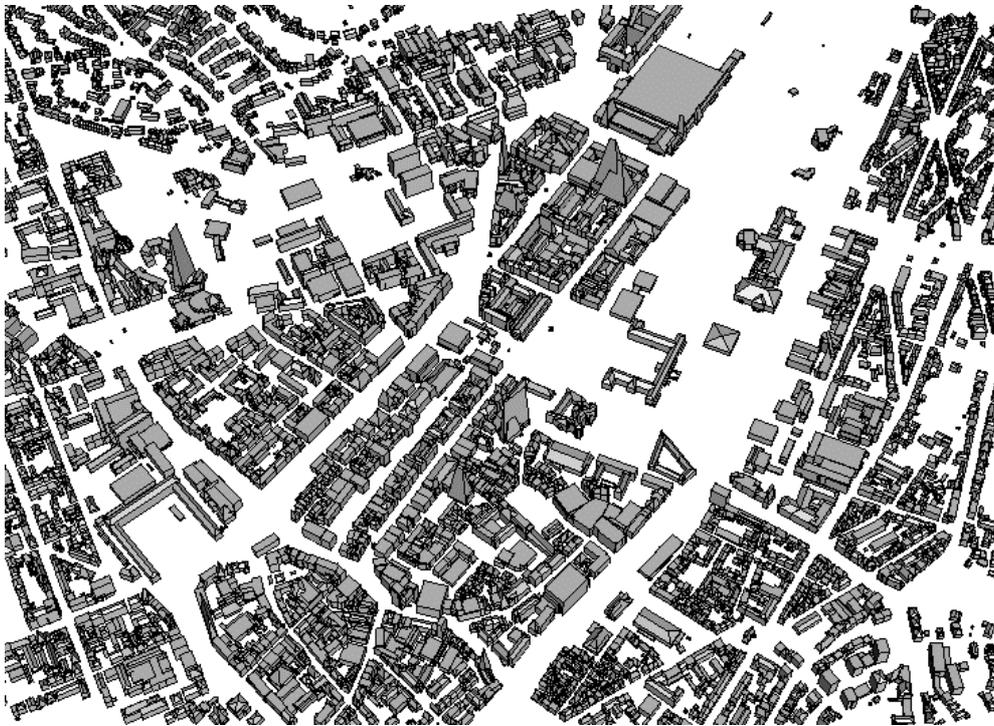


Abbildung 7: Ergebnis der automatischen Gebäuderekonstruktion Testgebiet Stuttgart

Das Ergebnis des Verfahrens für ein größeres Testgebiet ist in Abbildung 7 dargestellt. In diesem Bereich der Stadt Stuttgart mit einer Ausdehnung von 1.8km x 2.3km wurden insgesamt 5208 Gebäude automatisch rekonstruiert. Die Grundrisse der Gebäude wurden in diesem Fall aus der Stadtgrundkarte

1:500 bzw. aus der direkten Einmessung abgeleitet; der Datenbestand lag bereits in digitaler Form vor. Nahezu alle Gebäude wurden durch das Verfahren mit ausreichender Genauigkeit rekonstruiert, lediglich für vereinzelte Gebäude sind grobe Fehler in der Dachform deutlich erkennbar. Eine Hauptursache für diese fehlerhaften Rekonstruktionen lag bei den vorliegenden GIS Daten, in denen die Innenhöfe der Gebäude teilweise nicht enthalten waren.

In solchen Fällen ist eine manuelle Nachbearbeitung des Ergebnisses der automatischen Rekonstruktion erforderlich. Zu diesem Zweck steht ein entsprechendes Programmpaket zur Verfügung, das eine interaktive Modifizierung der Grundrißelemente erlaubt. Die vorhandenen Grundrisse können dabei dem Orthobild, einer Grauwertdarstellung des DHM oder einer gescannten Karte überlagert werden (siehe Abbildung 8). Nach der Selektion eines Gebäudepolygons durch den Operateur, wird das rekonstruierte Gebäude zusammen mit dem entsprechenden Ausschnitt des DHM in einer 3D Visualisierung dargestellt. Innerhalb der graphischen Oberfläche können nun die zunächst automatisch aus dem Grundriß abgeleiteten 2D Primitive (Rechtecke) manipuliert werden. Dadurch wird wiederum die Rekonstruktion des zugehörigen 3D Grundelementes beeinflusst. Werden beispielsweise zusätzliche 2D Grundelemente interaktiv erzeugt, kann dadurch die automatische Rekonstruktion von Gebäudeelementen wie Dachaufbauten, die nicht im Grundriß enthalten sind, ausgelöst werden.

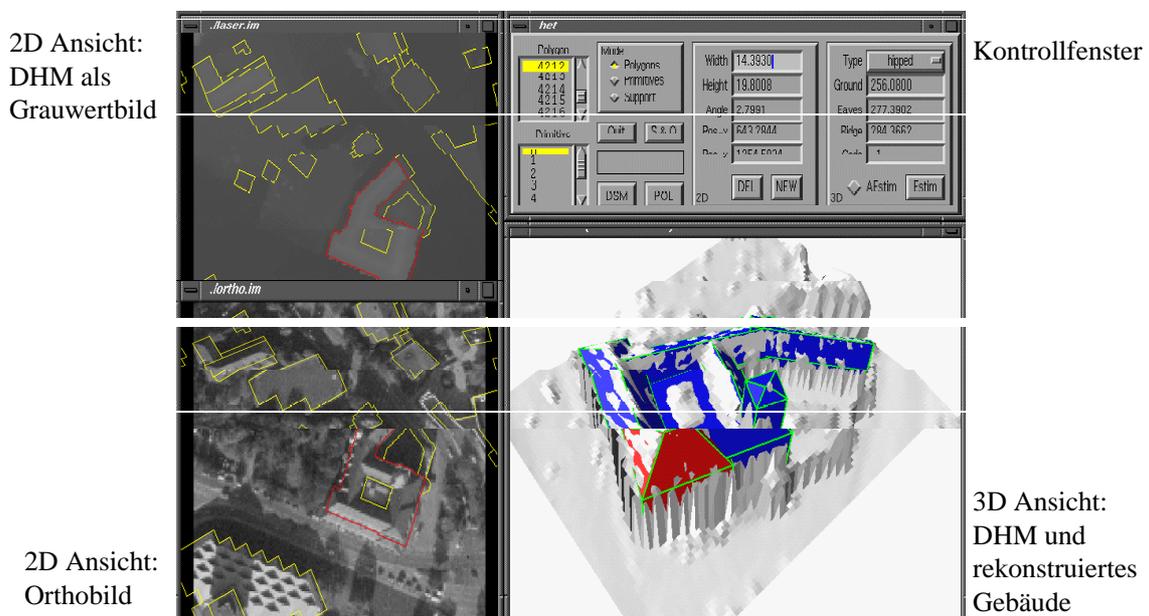


Abbildung 8: Graphische Oberfläche zur interaktiven Gebäuderekonstruktion

Visualisierung der Ergebnisse

Die Erzeugung realistischer Darstellungen erfordert die Verwendung von Bildtextur, die auf die entsprechenden Gebäudeoberflächen aufgebracht werden muß. Dabei kann natürliche Textur die geometrische Modellierung von Details zum Teil ersetzen: wird das Bild einer Fassade auf die entsprechende ebene Fläche des rekonstruierten Gebäudes projiziert, so ist dies für eine realistische Darstellung häufig ausreichend. Auf die geometrische Rekonstruktion z.B. einzelner Fenster kann in diesem Fall verzichtet werden.



Abbildung 9: Visualisierung der Gebäude und des DGM mit überlagertem Luftbild



Abbildung 10: Visualisierung der Gebäude mit terrestrischen Bildern der Fassaden

Sind zusätzlich zu den verwendeten DHM und Grundrißdaten noch Luftbilder mit bekannten Orientierungsparametern vorhanden, können im Anschluß an die eigentliche Rekonstruktion die erfassten Gebäude in das Luftbild projiziert und die entsprechende Bildinformation auf die 3D Gebäudekörper aufgebracht werden. Ein solches Vorgehen, wie es auch zur Generierung von Abbildung 9 verwendet wurde, ist in der Regel jedoch nur dann ausreichend, wenn lediglich für die Dächer oder auch für die Geländeoberfläche Bildtextur benötigt wird. Für die Texturierung der Gebäudefassaden wird aufgrund des ungünstigen Blickwinkels der Luftbilder üblicherweise auf terrestrische Aufnahmen zurückgegriffen. Prinzipiell kann dabei ebenfalls zunächst die Orientierung der Kamera bei der Bildaufnahme bestimmt werden, um anschließend die sichtbaren Flächen des rekonstruierten Gebäudes automatisch mit Textur zu belegen. In der Regel werden jedoch die Eckpunkte der Fassade manuell selektiert, der entsprechende Bildausschnitt wird perspektivisch entzerrt und anschließend mit dem korrespondierenden 3D Polygon des rekonstruierten Gebäudes verknüpft. Zu diesem Zweck können auch bereits verfügbare, kommerzielle Softwarepakete eingesetzt werden, die dann auch die Ausgabe einzelner Bilder (siehe Abbildung 10) erlauben oder die Erzeugung von animierten Darstellungen und virtuelle Flüge ermöglichen.

Diskussion

In dem vorliegenden Artikel wird ein Verfahren zur Generierung eines 3D Stadtmodells aus den Grundrissen der Gebäude und Höhendaten vorgestellt. Die Grundrisse wurden aus einem existierenden 2D GIS bereitgestellt, das DHM wurde aus Messungen mit einem flugzeuggetragenen Laserscanner, die einen mittleren Punktabstand von einem Meter aufwiesen, abgeleitet. Das Verfahren ermöglicht dabei eine vollautomatische Rekonstruktion der Gebäude sowie eine anschließende interaktive Kontrolle und Modifikation der Ergebnisse. Ein großer Vorteil des Verfahrens ist es deshalb, dass zunächst großflächig eine automatische Rekonstruktion durchgeführt werden kann, die sich dann bei Bedarf projektbezogen mit Hilfe des interaktiven Tools verfeinern lässt.

Derzeit findet die dabei notwendige Bewertung des Rekonstruktionsergebnisses hauptsächlich durch den Operateur bezüglich ihres visuellen Eindrucks statt. Die großen Schwierigkeiten bei einer objektiven und dadurch automatisierbaren Validierung der Ergebnisse, wie sie auch zum Vergleich mit anderen Verfahren notwendig wäre, entstehen vor allem dadurch, dass kein allgemein akzeptiertes Modell für das Objekt ‚Gebäude‘ existiert. Aufgrund der großen Unterschiede von 3D Gebäudeformen gilt dies bereits für 2D Darstellung des Grundrisses. Noch viel mehr gilt das aber für 3D Darstellungen mit ihren mannigfaltigen Möglichkeiten zur Generalisierung. Zudem verhindern die unterschiedlichen Anwendungen von 3D Gebäudedaten (neben den hier vorgestellten Visualisierungen sind dies vor allem Anwendungen im Bereich der Telekommunikation) eine Spezifikation, auf die sich Entwickler von Systemen zur Datenerfassung verlassen könnten. Insgesamt ist jedoch – auch im Hinblick auf die mittlerweile mögliche flächendeckende Erfassung von Gebäuden - mit einer weiter wachsenden Zahl von Anwendungen zu rechnen.

Literatur

- Anders, K.-H. (1997): Automated interpretation of digital landscape models. Photogrammetric Week '97, pp. 13-24, Wichmann Verlag
- Grün, Kübler, Agouris (Hrsg.) 1995) Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images, Birkhäuser Verlag
- Grün, Baltsavias, Henricson (Hrsg.) (1997) Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images Grün, Baltsavias and Henricson (eds.), Birkhäuser Verlag
- Haala, N. & Brenner, C. (1999): Virtual City Models from Laser Altimeter and 2D Map Data. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing Vol. 65, 7, pp. 787-795.
- Schilcher, M., Guo, Z., Klaus, M. and Roschlaub, R. (1999): Aufbau von 3D-Stadtmodellen auf der Basis von 2D-GIS. PFG Heft 3, pp. 157-170 .
- Grün, A. & Wang, X. (1998): CC-Modeler: A Topology Generator for 3-D City Models. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing Vol. 53, pp. 286-295 .
- Gülch, E., Müller, H., Läbe, T. (1999): Integration of Automatic Processes into Semi-Automatic Building Extraction. IAPRS, Vol. 32, Part3-2W5, pp.177-186