

Halbautomatische Gebäudeauswertung durch Integration von hybrider Ausgleichung und 3D Objektmodellierung

FRANZ ROTTENSTEINER, Wien (Österreich)

Zusammenfassung: Es wird eine neue Methode zur halbautomatischen Gebäudeextraktion aus digitalen Luftbildern nach dem Prinzip der Constructive Solid Geometry (CSG) vorgestellt. Jedes Gebäude wird aus einfachen Gebäudeprimitiven zusammengesetzt, wobei die einzelnen Primitive durch den Benutzer in den Bildern näherungsweise und mit Hilfe von Bildzuordnungsverfahren exakt positioniert werden. Fertig rekonstruierte Gebäude werden in einem topographischen Informationssystem (TIS) gespeichert.

In allen Phasen dieses Auswerteprozesses übernimmt eine neue Methode der Integration von robuster Parameterschätzung und Objektmodellierung durch Randdarstellung (Boundary Representation) eine Schlüsselrolle.

Diese Arbeit beschreibt die neue Methode und präsentiert die Ergebnisse eines Testprojektes.

Abstract: *Semi-automatic building extraction by integrating hybrid adjustment and 3D object modelling techniques.* A new method for semi-automatic building extraction from digital aerial images is presented. The new method is based on the principles of Constructive Solid Geometry (CSG). Each building consists of a set of simple building primitives which are reconstructed individually. The building primitives are approximately located in the images by the user. Fine measurement is automated by applying image matching techniques. The reconstructed buildings are stored in a Topographic Information System (TIS).

In all phases of the reconstruction process, a key role is taken over by a new method for the integration of parameter estimation and object modelling by boundary representation.

In this paper, the new method is described, and the results of a test project are presented.

1 Einleitung

Der große Bedarf an 3D-Gebäudemodellen für verschiedene Anwendungen kollidiert mit den enormen Kosten für die Erfassung dieser Daten im dafür benötigten Detaillierungsgrad, weshalb die Automatisierung der Auswertung von Gebäuden als notwendig erscheint. Allerdings stellt die Lösung dieses Problems auf Grund der großen Zahl möglicher Gebäudeformen eine große wissenschaftliche Herausforderung dar. Es wurden und werden Versuche unternommen, um Gebäude automatisch aus digitalisierten Luftbildern (z. B. LANG 1999) oder aus digitalen Oberflächenmodellen (DOM), die aus Laserscannerdaten gewonnenen wurden (z. B. WEIDNER 1997), zu extrahieren. Weiter gibt es einen Trend zur Kombination von Datensätzen verschiedener Her-

kunft, z. B. von existierenden 2D GIS-Datensätzen mit einem DOM (z. B. BRENNER 2000) oder von digitalisierten Luftbildern und einem DOM (AMERI 2000). Obwohl beachtliche Fortschritte erzielt wurden, gibt es noch keine operationellen Systeme für die vollautomatische Gebäuderekonstruktion. Die Gründe dafür liegen einerseits in der Komplexität der Aufgabe, weil für die semantische Interpretation der Daten eine Modellierung von vielen Objektklassen nötig ist, und andererseits in den Problemen, die sich aus den Eigenschaften der verwendeten Sensoren ergeben (Sensorrauschen, fehlende Objektteile auf Grund von Verdeckungen).

Um der Komplexität der Aufgabe gerecht zu werden und dennoch kostengünstige Methoden zur Erfassung von Gebäudedaten zur Verfügung stellen zu können, bietet sich

als Kompromiss die Entwicklung von halbautomatischen Verfahren zur Gebäudeextraktion an, bei denen die semantische Interpretation der Daten und die Herausfilterung der relevanten Information durch den Menschen erfolgt, während gewisse Teilaufgaben durch den Computer gelöst werden können.

VAN DEN HEUVEL (2000) unterscheidet zwei Arten von halbautomatischen Systemen zur photogrammetrischen Objektrekonstruktion. Bei der ersten Gruppe von Systemen erfolgt die Messung von Punkten und die Erfassung von Strukturdaten interaktiv, z. B. an einer digitalen photogrammetrischen Station. Aus der so gewonnenen, mehr oder weniger stark strukturierten Punktwolke wird dann automatisch die Topologie der Gebäude abgeleitet, um zu einem vollständigen Modell zu kommen. Ein Beispiel für ein nach diesem Prinzip arbeitendes System ist der *CyberCity Modeler* (GRÜN & WANG 1998). Bei der zweiten Gruppe von Systemen ist die Objektmodellierung direkt in die photogrammetrische Auswertung integriert. Es werden einfache Gebäudemodelle sowie Werkzeuge zu deren Bearbeitung vom System vorgegeben. Der Benutzer wählt auf Basis einer visuellen Interpretation ein passendes Modell aus und positioniert es mit Hilfe von interaktiven Werkzeugen näherungsweise in den Bildern. Die Feinmessung erfolgt dann automatisch mit Hilfe von Bildzuordnungstechniken, z. B. GÜLCH et al. 1998.

Für die Modellierung der Gebäude kommen vorwiegend zwei Modellierungstechniken zur Anwendung, z. B. (GÜLCH et al. 1998): *Randdarstellung*, also die Modellierung eines Objektes durch seine begrenzenden Flächen, Kanten und Ecken sowie deren Nachbarschaftsbeziehungen, und *Constructive Solid Geometry* (CSG), die Modellierung von Gebäuden durch einfach geformte volumetrische Primitive, die mit Hilfe Boolescher Mengenoperatoren kombiniert werden können. Das Prinzip der Modellierung durch Randdarstellung ist sehr allgemein und besonders gut für Visualisierungen geeignet. Allerdings ist die Erzeugung von Randdarstellungen ohne unterstützende

Werkzeuge sehr aufwendig. Unter Verwendung des CSG-Prinzips können mit geeigneten Werkzeugen zum Bearbeiten der Primitive Gebäudemodelle sehr effizient erfasst werden.

Tatsächlich werden zur Gebäudeextraktion oft hybride Modellierungstechniken verwendet (MÄNTYLÄ 1988: S. 123). Dabei wird dem Benutzer eine CSG-Schnittstelle zur Verfügung gestellt, während für die Visualisierung sowie als Schnittstelle zu CAD-Programmen die Randdarstellung aus der CSG-Repräsentation abgeleitet wird. Solche Modellierungstechniken können dahingehend charakterisiert werden, ob die interne Repräsentation der Objekte in Randdarstellung oder durch CSG erfolgt.

In dieser Arbeit soll ein am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien (I.P.F.) entwickeltes neues System zur halbautomatischen Gebäudeextraktion aus digitalen Luftbildern durch Integration von Objektmodellierung und photogrammetrischer Auswertung vorgestellt werden. Ziel dieses Systems ist die Erfassung von Randdarstellungen von Gebäuden für ein *Topographisches Informationssystem* (TIS). Es gibt vor allem zwei wesentliche Errungenschaften dieser neuen Methode. Erstens wurde ein neues Verfahren zur Integration von Objektmodellierung durch Randdarstellung und Parameterschätzung entwickelt, bei dem die Randdarstellung eines Gebäudes in einer hybriden Ausgleichung repräsentiert wird. Dafür werden „GESTALT-Beobachtungen“ im Programmsystem ORIENT benutzt (KAGER 1989). Zweitens wurde eine objekt-relationale Methode zur Verwaltung von 3D-Gebäudemodellen in einem TIS entwickelt, die auf einer Erweiterung des im Programm SCOP.TDM zur landesweiten Verwaltung von Geländedaten verwendeten Prinzips beruht (HOCHSTÖGER 1996).

In der Folge werden das neue System und die Ergebnisse eines Pilotprojektes beschrieben. Der Schwerpunkt der Darstellung liegt auf dem Ansatz zur Integration von Objektmodellierung und Parameterschätzung sowie dessen Anwendung in allen Phasen des Arbeitsablaufs.

2 Halbautomatische Gebäudeauswertung

2.1 Systemübersicht und Arbeitsablauf

Das neue Verfahren zur Gebäudeauswertung wurde als Modul des am I.P.F. entwickelten Programmes ORPHEUS realisiert. ORPHEUS stellt einerseits eine graphische Benutzeroberfläche für das Programmsystem ORIENT zur Ausgleichung hybrider Beobachtungen (KAGER 1989) und andererseits einen digitalen Mehrbild-Monokomparator zur interaktiven Messung von Punkten und Generierung von 3D-Fotomodellen dar (ROTTENSTEINER 2001).

Grundlage des vorzustellenden Verfahrens ist die Integration von Objektmodellierung und photogrammetrischer Auswertung (VAN DEN HEUVEL 2000). Als Ausgangsmaterial liegen digitale Luftbilder in verschiedenen Auflösungen sowie deren Orientierungsparameter vor. Falls vorhanden, kann ein digitales Geländemodell (DGM) verwendet werden, um die Höhen der Bodenpunkte der Gebäude zu interpolieren. Es wird eine Datenbank mit einfachen Gebäudeformen zur Verfügung gestellt, die sowohl parametrische Gebäudeprimitive als auch prismatische Gebäudetypen enthält. Während durch diese Datenbank und die entsprechenden Werkzeuge zur Bearbeitung der Primitive eine CSG-Benutzerschnittstelle vorgegeben wird, erfolgt die interne Modellierung sowohl der Primitive als auch des zusammengesetzten Gebäudes durch Randdarstellung. Wie an späterer Stelle noch näher erläutert, wird es dadurch dem Benutzer ermöglicht, auf einfache Weise neue parametrische Primitive zu definieren.

Abb.1 zeigt das Ablaufdiagramm der halbautomatischen Auswertung eines Gebäudes. Nach der Initialisierung des Gebäudes wird es vom Benutzer sukzessive aus Primitive aus der Datenbank der Gebäudeformen mit Hilfe von Booleschen Operatoren zusammengesetzt. Dabei sind mindestens zwei digitale Bilder am Bildschirm dargestellt, denen alle bereits ausgewerteten Ge-

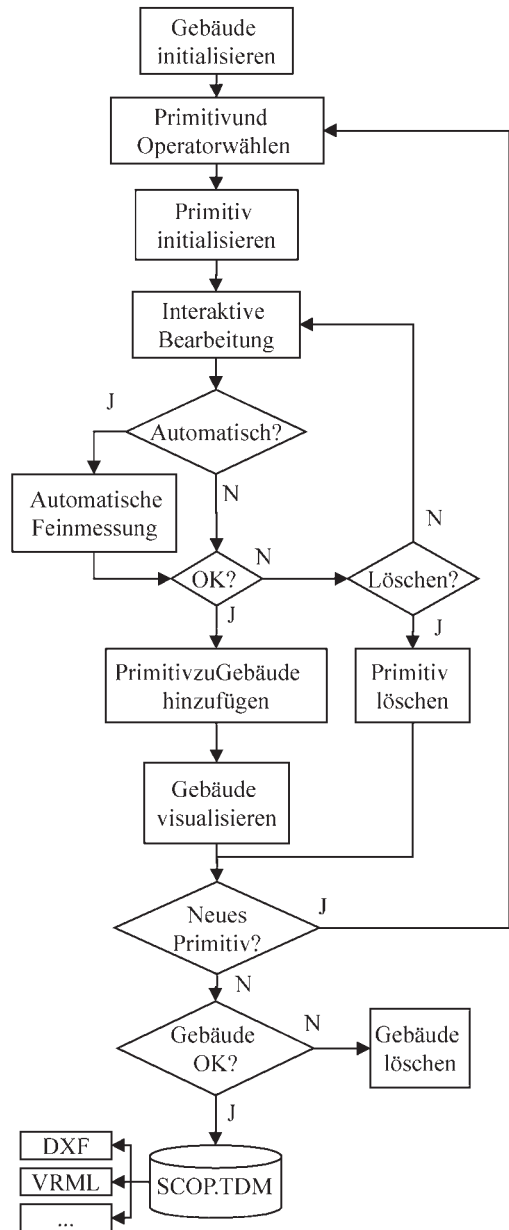


Abb. 1: Ablaufdiagramm der halbautomatischen Gebäudeauswertung.

bäude, das aktuelle Gebäude und das aktuelle Primitiv als Drahtmodelle, durch unterschiedliche Farben gekennzeichnet, überlagert sind (Abb. 2).

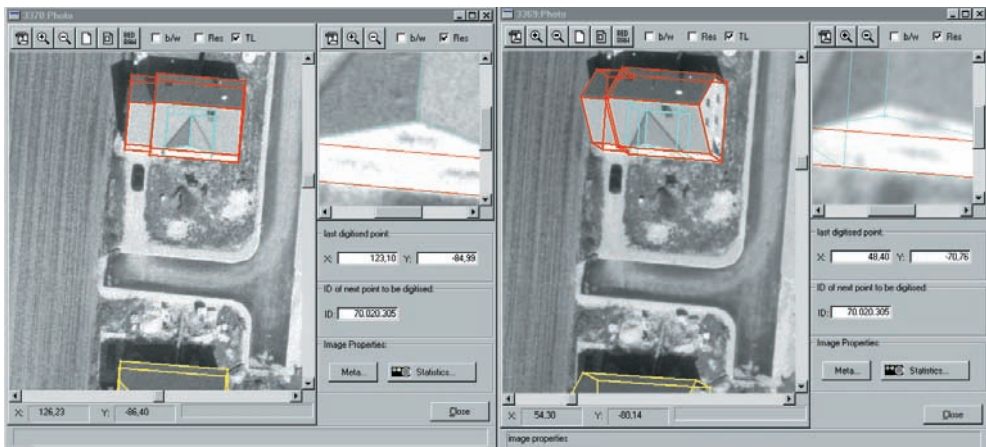


Abb. 2: Visualisierung zweier Luftbilder für die Gebäudeextraktion. Gelb: bisher erfasste Gebäude. Rot: aktuelles Gebäude. Cyan: aktuelles Primitiv.

Um ein Primitiv zu bearbeiten, kann der Benutzer in den Bildern Gebäudeecken messen. Nach jeder Interaktion werden die Parameter des Primitives aus den vorhandenen Beobachtungen geschätzt und die Darstellung der Drahtmodelle erneuert. Auf Wunsch kann die automatische Feinmessung durchgeführt werden. Danach kann das Primitiv weiter interaktiv bearbeitet werden, bis der Benutzer entweder zum Schluss kommt, das Primitiv sei korrekt rekonstruiert und deshalb zu akzeptieren, oder es sei zu löschen. Wenn ein Primitiv akzeptiert wird, wird es dem aktuellen Gebäude hinzugefügt. Bei dieser Gelegenheit werden die Randdarstellungen des aktuellen Gebäudes und jene des aktuellen Primitives nach der von MÄNTYLÄ (1988: 263) angegebenen Methode verschnitten, gegebenenfalls die Höhe des Bodens aus dem DGM bestimmt und die Darstellung des aktuellen Gebäudes in allen visualisierten Bildern nachgeführt. So besteht z. B. in Abb. 2 das aktuelle Gebäude aus zwei bereits verschnittenen Primitiven vom Typ „Satteldach“; ein drittes Primitiv des selben Typs für eine Gaube ist noch in Bearbeitung. Sobald der Benutzer entscheidet, dass kein weiteres Primitiv mehr dem Gebäude hinzuzufügen ist und das Gebäude daher vollständig rekonstruiert ist, kann das Gebäude akzeptiert

und an das TIS zur Verwaltung übergeben werden.

Durch diesen Arbeitsablauf wird auf mehrere Arten Arbeit im Vergleich zur konventionellen photogrammetrischen Auswertung gespart. Zunächst stellen die Gebäudeprimitive bereits konsistente 3D-Modelle mit vollständiger topologischer Information dar, die ansonsten erst in der interaktiven Nachbearbeitung definiert werden kann. Durch die Ausnützung von Symmetrien und Orthogonalitäten bei der Modellierung wird die Anzahl der vom Benutzer interaktiv zu identifizierenden Gebäudeecken erheblich verringert. Im Sinne von KRAUS (2000: 237) handelt es sich daher bei der vorgestellten Methode um ein System der topologiegestützten Erfassung von Gebäuden. Wenn die Feinmessung automatisch erfolgen kann, wird die Anzahl der notwendigen Benutzeraktionen weiter reduziert. Schließlich fallen bei der Kombination der Primitive durch Boolesche Operatoren die Schnittlinien der Primitive automatisch an, die bei der konventionellen Auswertung manuell gemessen werden müssten.

Der Detaillierungsgrad der Gebäudemodelle hängt einerseits von der Wahl der Gebäudeprimitive ab, weil bereits hier einem stärker generalisierenden Primitiv der Vorzug gegeben werden kann. Andererseits

können gewisse Einzelheiten (z. B. Dachgauben) noch durch zusätzliche Primitive modelliert werden. Prinzipiell kann ein sehr hoher Detaillierungsgrad erreicht werden, während andererseits die Verwendung der Primitive zu einer Homogenisierung der Gebäudemodelle (KRAUS 2000: 236) führt. Hinsichtlich der Genauigkeit kann man bessere Ergebnisse als bei der konventionellen Auswertung erwarten, weil zur automatischen Feinmessung Bildkanten und daher sehr viele Beobachtungen zur Bestimmung der Gebäudeparameter herangezogen werden.

2.2 Das mathematische Modell der hybriden Ausgleichung in ORIENT

Das Programm ORIENT wird am I.P.F. seit Mitte der 70er Jahre entwickelt und zeichnet sich durch die große Anzahl der Beobachtungstypen, die in einer hybriden Ausgleichung simultan verarbeitet werden können, aus. Außerdem bietet ORIENT mit der robusten Schätzung und „Data Snooping“ zwei Methoden zur Eliminierung grober Fehler an (KAGER 1989).

In ORIENT werden die Beobachtungen als Koordinaten von Punkten in 3D-Räumen betrachtet, denen je ein kartesisches Koordinatensystem, das *Beobachtungskordinatensystem*, zugeordnet ist. Jeder dieser 3D-Räume ist mit dem Objektkoordinatensystem durch eine Abbildungsfunktion verknüpft. Die Parameter dieser Abbildungsfunktionen werden aus den Beobachtungen durch Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen geschätzt.

2.2.1 Die Abbildungsfunktionen

In ORIENT werden alle Beobachtungstypen einheitlich behandelt, indem zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen beobachtetem Punkt $\mathbf{p} = (u, v, w)^T$ und Objektpunkt $\mathbf{P} = (X, Y, Z)^T$ zunächst dieselbe Transformation verwendet wird:

$$\mathbf{M} \cdot [\mathbf{p} - \mathbf{p}_0(\mathbf{adp})] = \lambda \cdot \mathbf{R}^T(\Theta) \cdot (\mathbf{P} - \mathbf{P}_0) \quad (1)$$

In Gleichung (1) wird $\mathbf{p}_0 = (u_0, v_0, w_0)^T$ als *innerer Referenzpunkt* bezeichnet. Er kann durch Funktionen der zusätzlichen Parame-

ter *adp* modifiziert werden. \mathbf{R} ist eine Rotationsmatrix in Abhängigkeit der Drehwinkel Θ , wobei Θ auf mehrere Arten parametrisiert werden kann, z. B. $\Theta = (\omega, \varphi, \kappa)^T$. λ bezeichnet den Maßstabsfaktor zwischen den beiden Systemen. $\mathbf{P}_0 = (X_0, Y_0, Z_0)^T$ heißt *äußerer Referenzpunkt*, und $\mathbf{M} = \text{diag}(m_u, m_v, m_w)$ bezeichnet eine Spiegelungsmatrix mit den Spiegelungskoeffizienten $m_i = \pm 1, i \in \{u, v, w\}$. Mit Ausnahme von \mathbf{M} können alle Gruppen von Parametern durch Ausgleichung bestimmt werden. Aus Gleichung (1) werden die Abbildungsgleichungen aller Beobachtungstypen abgeleitet, wobei einzelne Parametergruppen verschiedene Interpretationen erhalten können.

Bildkoordinaten

Für in zentralperspektivischen Bildern gemessene Punkte entspricht das Beobachtungskordinatensystem dem Kamerakordinatensystem. Es gilt für alle Punkte: $w = 0$. \mathbf{P}_0 ist das Projektionszentrum. \mathbf{p}_0 liegt um die Kamerakonstante c vor dem Hauptpunkt, d. h. $\mathbf{p}_0 = (u_0, v_0, c)^T$. Die zusätzlichen Parameter *adp* sind die Koeffizienten von Verzeichnungs-polynomen. λ bleibt nicht für alle Punkte konstant, sondern beschreibt die Position des Objektpunktes \mathbf{P} auf dem Projektionsstrahl. Unter diesen Annahmen erhält man durch Division der ersten beiden Zeilen von Gleichung (1) durch die dritte und einige Umformungen die Gleichungen der Zentralprojektion in ihrer üblichen Form (KAGER 1989).

GESTALT-Beobachtungen

GESTALT-Beobachtungen sind fiktive Beobachtungen der Art, daß ein Punkt \mathbf{P} im Objektraum auf einer Fläche liege. Diese Flächen werden ebenfalls in einem lokalen Koordinatensystem modelliert, das mit dem Objektkoordinatensystem über Gleichung (1) zusammenhängt. Der Maßstab wird konstant mit $\lambda = 1$ angenommen. Um \mathbf{P} als auf der Fläche liegend zu modellieren, kann der Abstand zwischen \mathbf{P} und der Fläche fiktiv mit dem Wert 0 „beobachtet“ werden. In ORIENT wird an Stelle des Normalabstandes die größte Komponente des Diffe-

renzvektors verwendet. \mathbf{p}_0 erhält eine besondere Interpretation: seine Komponenten werden als Polynome in Abhängigkeit von zwei Komponenten von $\mathbf{p}_R = (u_R, v_R, w_R)^T = \mathbf{R}^T \cdot (\mathbf{P} - \mathbf{P}_0)$ angenommen, durch die je eine Fläche im Beobachtungskoordinatensystem modelliert wird. Es gibt daher drei Möglichkeiten für die Formulierung der Abbildungsgleichungen:

$$0 = m_u \cdot u_R + \sum_{j,k=0}^{n,n} a_{jk} \cdot (m_v \cdot v_R)^j \cdot (m_w \cdot w_R)^k$$

$$0 = m_v \cdot v_R + \sum_{i,k=0}^{n,n} b_{ik} \cdot (m_u \cdot u_R)^i \cdot (m_w \cdot w_R)^k \quad (2)$$

$$0 = m_w \cdot w_R + \sum_{i,j=0}^{n,n} c_{ij} \cdot (m_u \cdot u_R)^i \cdot (m_v \cdot v_R)^j$$

Dabei werden die zusätzlichen Parameter \mathbf{adp} aus Gleichung (1) durch die GESTALT-Koeffizienten a_{jk} , b_{ik} und c_{ij} ersetzt, die die Form der Fläche im Beobachtungskoordinatensystem beschreiben. Innerhalb einer Applikation kann für eine GESTALT, also die eine bestimmte Menge von Punkten enthaltende Fläche, eine beliebige Auswahl einer Teilmenge aller möglichen Koeffizienten getroffen werden. Da die Zuordnung von Parametern der Abbildungsfunktion zu den GESTALTen per Referenz erfolgt, können mehrere GESTALTen mit unterschiedlichen Koeffizienten sich auf das selbe bzw. mehrere GESTALTen mit identischen Koeffizienten auf verschiedene Beobachtungskoordinatensysteme beziehen. Auf diese Art und durch geeignete Wahl der Elemente von \mathbf{M} können sehr leicht implizit geometrische Bedingungen zwischen Flächen modelliert werden. 3D-Kurven können als Schnitt zweier Flächen bestimmt werden, indem für alle Punkte der Kurve zwei der Beobachtungen entsprechend zwei Gleichungen (2) eingeführt werden (KAGER 1989).

Beobachtete Parameter

Für alle Gruppen von Parametern in Gleichung (1) können Beobachtungen („Parameterbeobachtungen“) eingeführt werden.

So werden z. B. die Koordinaten von Passpunkten als „beobachtete Objektkoordinaten“ behandelt. In diesem Fall degeneriert Gleichung (1) zu $\mathbf{p} = \mathbf{P}$. Solche Beobachtungsgleichungen können für alle Parameter eingeführt werden, es gibt also z. B. beobachtete Drehwinkel, usw.

2.2.2 Hybride Ausgleichung

Alle Beobachtungen werden simultan nach der Methode der kleinsten Quadrate ausgeglichen, wobei das mathematische Modell der Ausgleichung sich aus den Spezialisierungen der Abbildungsfunktion ergibt, indem die stochastischen Eigenschaften der Beobachtungen \mathbf{p} berücksichtigt werden. Es wird also in den Abbildungsgleichungen \mathbf{p} durch die Erwartung $\mathbf{E}(\mathbf{p}) = \mathbf{p} + \mathbf{r}$ substituiert, um die (nichtlinearen) Verbesserungsgleichungen zu erhalten. Dabei ist \mathbf{r} der Vektor der Verbesserungen von \mathbf{p} .

Das stochastische Modell der Ausgleichung ist in ORIENT durch die Annahme gegeben, dass die Beobachtungen unkorreliert und normalverteilt sind. Mit dem mittleren Gewichtseinheitsfehler a priori s_0 und dem mittleren Fehler s_i ergibt sich das Gewicht W_i der Beobachtung i zu $W_i = s_0^2/s_i^2$.

Welche Parameter in der Ausgleichung als Unbekannte bestimmt und welche als konstant angesehen werden, kann in ORIENT vom Benutzer vorgegeben werden. Es ist allerdings darauf zu achten, daß diese Parameter bestimmbar sein müssen. So gibt es etwa für GESTALTen eine funktionale Abhängigkeit zwischen den linearen Polynomkoeffizienten und den Drehwinkeln sowie zwischen den konstanten Koeffizienten und \mathbf{P}_0 in den Gleichungen (2).

Grobe Fehler in den Beobachtungen können in ORIENT durch robuste Schätzung eliminiert werden. Zu diesem Zweck wird nach Beendigung der Ausgleichung die Iteration erneut aufgenommen, wobei die Gewichte der Beobachtungen in Abhängigkeit ihrer normalisierten Residuen aus dem jeweils vorigen Iterationsschritt moduliert werden (KAGER 1989). Voraussetzung für dieses Verfahren sind eine hohe Redundanz und eine Anzahl von groben Fehlern, die

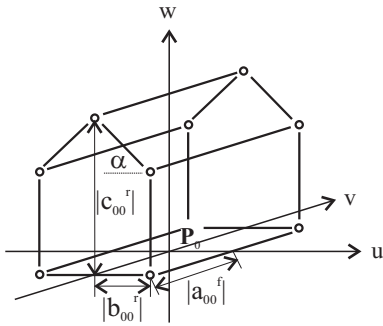


Abb. 3: Parametrisierung eines Gebäudes mit Satteldach.

30% der Beobachtungen nicht überschreitet.

2.3 Modellierung der Gebäudeprimitive im Rekonstruktionsprozess

Die Modellierung der Gebäudeprimitive erfolgt durch Randdarstellung. Da die Parameterschätzung im Rekonstruktionsprozess eine zentrale Rolle spielt, sollen die durch die Modellierung der Primitive vorgegebenen topologischen und geometrischen Bedingungen in die Ausgleichung einfließen. Dies erfolgt durch ein System von GESTALTen, das bei der Initialisierung eines Gebäudeprimitives angelegt wird. Jeder Fläche der Randdarstellung entspricht eine GESTALT, die durch eine der Gleichungen (2) modelliert wird, wobei in der gegenwärtigen Version zur Modellierung nur Ebenen verwendet werden können. Alle diese GESTALTen werden im selben Beobachtungs-koordinatensystem formuliert, d. h. es gibt für alle GESTALTen nur einen äußeren Referenzpunkt P_0 , und einen Satz von Drehwinkeln Θ . Die Parametrisierung der Ebenen bezieht sich ebenfalls auf dieses Koordinatensystem, wobei durch geeignete Wahl der Spiegelungsmatrix M Symmetrien modelliert werden können. Die Form der Gebäudeprimitive wird durch die gewählten Polynomkoeffizienten a_{jk} , b_{ik} und c_{ij} beschrieben. Für alle Punkte, die einer Fläche der Randdarstellung zugeordnet werden, wird eine Beobachtung in die entsprechende

GESTALT eingeführt. Dies gilt auch für alle Gebäudeecken der Randdarstellung, sodass von vornherein für jede dieser Gebäudeecken mindestens drei GESTALT-Beobachtungen vorliegen, die in der Ausgleichung die Ebenen verknüpfen und somit die Topologie der Randdarstellung repräsentieren.

Abb. 3 zeigt als Beispiel die Parametrisierung eines einfachen Primitives. P_0 liegt im Zentrum auf dem Boden. Die w -Achse des Koordinatensystems steht auch im Objektraum vertikal, es gilt $\omega = \varphi = 0$. Das Primitiv besteht aus sieben Ebenen:

1. Boden: $w_0 = 0$.
2. Vorderwand: $v_0 = a_{00}^f$
3. Rückwand: $v_0 = a_{00}^f$; $m_v = -1$: symmetrisch zu 2. bezüglich der uw -Ebene.
4. Rechte Wand: $u_0 = b_{00}^f$
5. Linke Wand: $u_0 = b_{00}^f$; $m_u = -1$: symmetrisch zu 4. bezüglich der vw -Ebene.
6. Rechte Dachebene: $w_0 = c_{00}^f + c_{10}^f \cdot u_R$
7. Linke Dachebene: $w_0 = c_{00}^f + c_{10}^f \cdot u_R$; $m_u = -1$: symmetrisch zu 6. bezüglich der vw -Ebene.

Es sind folgende Parameter zu bestimmen:

- P_0 und κ , die die Position und Orientierung des Primitives im Objektraum beschreiben
- die Koeffizienten a_{00}^f , b_{00}^f , c_{00}^f und c_{10}^f , die die Form des Primitives beschreiben
- die Objektkoordinaten der Gebäudeecken.

Die Objektkoordinaten der Gebäudeecken sind immer aus ihren GESTALT-Beobachtungen bestimmbar. Die verbleibenden Parameter müssen aus anderen Beobachtungen, z. B. aus Bildkoordinaten, bestimmt werden. Solange solche Beobachtungen nicht vorliegen, werden für diese Parameter „Parameterbeobachtungen“ eingeführt.

Obwohl die Modellierung der Gebäudeprimitive durch Randdarstellung erfolgt, ist zur Beschreibung ihrer Form und Position nur eine minimale Anzahl von Parametern nötig. Die Datenbank der Gebäudeprimitive kann auf einfache Weise erweitert werden. Es muss dem System die Beschreibung der Randdarstellung des neuen Primitives

sowie die Abbildung der das Primitiv beschreibenden Parameter in das oben beschriebene System der GESTALT-Parametrisierung bekannt gegeben werden. Dies geschieht in der gegenwärtigen Version durch Modifikation einer ASCII-Datei. Im Augenblick stehen ca. 15 Primitive zur Verfügung.

Dieses Prinzip der Abbildung der Modellierung durch Randdarstellung auf GESTALT-Beobachtungen wird gegenwärtig im vorgestellten System auch zur Modellierung von prismatischen Gebäuden mit horizontalem Dach und Boden sowie n vertikalen Wänden verwendet. Allerdings musste dafür eine Konstruktionsvorschrift ausprogrammiert werden, während die Erweiterung der Datenbank der parametrischen Primitive ohne Programmieraufwand erfolgen kann.

2.4 Interaktive Bearbeitung der Gebäudeprimitive

Nach der Initialisierung eines Primitives, bei der das eben beschriebene System von GESTALTen angelegt und mit Startwerten versehen wird, erfolgt die interaktive Bearbeitung durch Identifizieren der Gebäudeecken

in den digitalen Bildern. Für jede vom Benutzer in den Bildern identifizierte Gebäudeecke werden zwei Bildkoordinaten-Beobachtungen generiert, die zur Bestimmung der noch unbestimmten Gebäudeparameter herangezogen werden. Es erfolgt nach jeder Benutzerinteraktion eine Ausgleichung mit ORIENT, in die neben den durch die Modellierung vorgegebenen GESTALT- und Parameterbeobachtungen die vom Benutzer gemessenen Bildkoordinaten einfließen. Dabei wird das Problem, zu erkennen, welche Parameter durch die neu hinzugekommenen Beobachtungen bestimmbar sind, mit Hilfe der robusten Schätzung gelöst. Die Strategie der Modulation der Gewichte wird nur auf die „Parameterbeobachtungen“ angewandt. Da nur Beobachtungen, die einander widersprechen, große normalisierte Residuen erhalten, werden bei dieser robusten Schätzung genau die Beobachtungen für jene Parameter eliminiert, die durch die neu hinzugekommenen Bildkoordinaten bestimmbar werden. Nach der Ausgleichung werden die „Parameterbeobachtungen“ den aktuellen Werten angeglichen, und die Darstellung der Drahtmodelle in den Bildern wird angepasst. Diese Prozedur wird so lange wiederholt, bis auf Grund einer visuellen

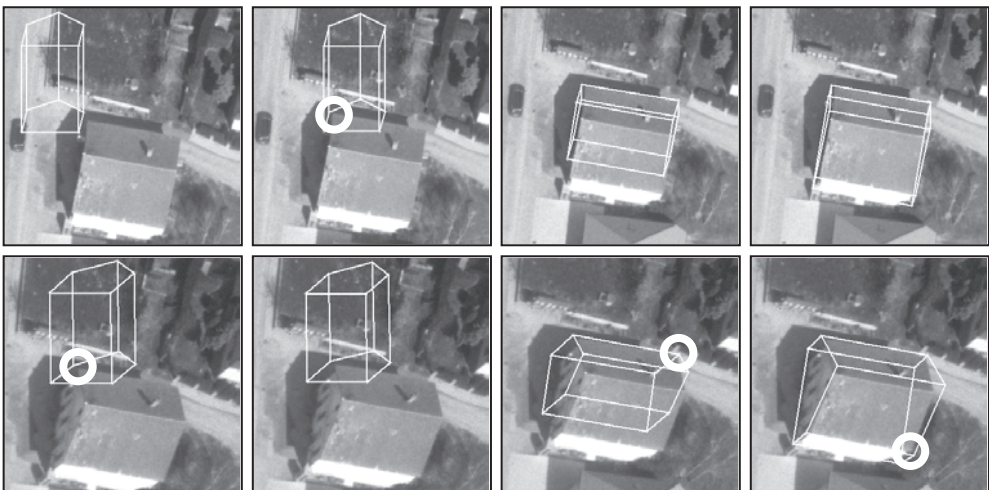


Abb. 4: Näherungsweise Bestimmung der Parameter eines Satteldaches. Oben: rechtes Bild, unten: linkes Bild. Die Kreise zeigen die vom Benutzer identifizierten Ecken an. Die Zeitachse verläuft von links nach rechts.

Beurteilung entschieden wird, dass die Drahtmodelle gut genug zum Bildinhalt passen. Dabei hat man die Wahl, die Gebäudeecken in den Bildern näherungsweise zu positionieren, um Startwerte für die automatische Feinmessung zu erhalten, oder sie exakt zu messen.

Abb. 4 zeigt ein Beispiel für die interaktive Bearbeitung eines Gebäudeprimitives. Oben ist das rechte, unten das linke Bild dargestellt. Die Zeitachse verläuft von links nach rechts. Zunächst wird ein Traufenpunkt im linken Bild gemessen (linke Spalte). Dadurch kann die Lage von P_0 bestimmt werden, nicht jedoch die Höhe. Durch Digitalisieren desselben Traufenpunktes im zweiten Bild (zweite Spalte in Abb. 4) kann P_0 vollständig bestimmt werden. Danach wird ein zweiter Traufenpunkt in einem Bild gemessen, wodurch zwei weitere Parameter bestimmbar werden: κ und a_{00}^f (dritte Spalte in Abb. 4). Nach Identifizierung eines dritten Punktes in einem Bild kann auch b_{00}^r bestimmt werden (rechte Spalte in Abb. 4), und das Primitiv ist gut genug in den Bildern positioniert, damit eine automatische Feinmessung erfolgen kann. Diese Methode arbeitet unabhängig von der Reihenfolge, in der die Gebäudeecken identifiziert werden, und sie ist auch unabhängig von der Anzahl der identifizierten Ecken. Der visuelle Eindruck alleine ist entscheidend für die Beendigung der interaktiven Bearbeitung.

Da Gebäudeecken manchmal verdeckt sind, sollte es möglich sein, auch Punkte entlang von Gebäudekanten in den Bildern digitalisieren zu können. Dies kann mit Hilfe der vorgestellten Methode problemlos bewerkstelligt werden.

2.5 Automatische Feinmessung der Gebäudeprimitive

Das Verfahren zur automatischen Feinmessung stellt eine Anwendung des von ROTTENSTEINER (1998) vorgestellten allgemeinen Konzeptes zur automatischen Oberflächenrekonstruktion dar. Ausgehend von den digitalen Bildern, deren Orientierungsparametern und den vom Benutzer vorgegebenen groben Näherungen für die Gebäudepa-

rameter erfolgt die Rekonstruktion hierarchisch durch Anwendung merkmalsbasierter Bildzuordnungsverfahren. Um dem Problem der in den Bildern auftretenden Verdeckungen zu begegnen, ist es nützlich, zu diesem Zweck mehr als zwei Bilder zu verwenden. Beginnend in einem vom Benutzer vordefinierten Bildpyramidenniveau N werden in jedem Pyramidenniveau zunächst mit Hilfe der polymorphen Merkmalsextraktion (FUCHS 1998) Bildpunkte und -kanten extrahiert. In der Folge werden nur noch die Bildkanten verwendet, die in einem modellgetriebenen Prozess den Dachkanten der Randdarstellung zugeordnet werden. Diese Zuordnung erfolgt in einem zweistufigen Verfahren, in dem zuerst Zuordnungshypothesen erzeugt und anschließend hinsichtlich ihrer Konsistenz mit einem Objektmodell evaluiert werden, um falsche Hypothesen zu eliminieren (GÜLCH 1994). Als Ergebnis erhält man eine der Auflösung des jeweiligen Pyramidenniveaus entsprechende Objektrepräsentation, die als Näherung für den Zuordnungsprozess in der nächsthöheren Auflösung dient. Der Prozess ist abgeschlossen, sobald die Zuordnung in den Bildern mit der höchsten Auflösung erfolgt ist. Durch diese iterative Vorgangsweise wird der Konvergenzradius der Zuordnung erhöht.

Die Erzeugung der Zuordnungshypothesen erfolgt unabhängig für alle Dachkanten der Gebäudeprimitive in allen Bildern. Die genäherte Lage der Dachkante in einem Bild sei e^o (Abb. 5). In den Bildern werden die extrahierten Bildkanten l durch Polygone

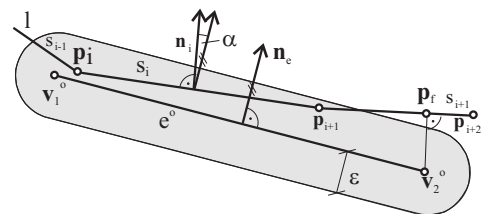


Abb. 5: Erzeugung von Zuordnungshypothesen für eine Objektkante in einem Bild. e^o : genäherte Lage der Kante im Bild. l : eine durch ein Polygon approximierte Bildkante.

approximiert. Ein Segment s_i von l wird dann der Objektkante zugeordnet, wenn mindestens einer seiner Endpunkte innerhalb eines durch eine vom Benutzer vorgegebene Schranke ε im Bild definierten Suchbereiches liegt und der Winkel α zwischen s_i und e° kleiner als ein weiterer Schwellwert α_0 ist. Falls die Projektion eines Endpunktes auf e° außerhalb von e° liegt, wird dieser Endpunkt durch den Fußpunkt p_f des Kantenendpunktes ersetzt. Für jeden Endpunkt eines so als Kandidaten für die Zuordnung zu einer Objektkante gefundenen Segments werden vier Beobachtungen, nämlich je zwei Bildkoordinaten und zwei GESTALT-Beobachtungen (eine für jede der Kante im Objektraum benachbarten Fläche), erzeugt, denen drei unbekannte Objektkoordinaten gegenüberstehen. Das stochastische Modell der Bildkoordinaten ergibt sich aus den mittleren Fehlern der Polygonapproximation durch Fehlerfortpflanzung. Der mittlere Fehler eines Endpunktes normal zum Segment ist dabei umgekehrt proportional der Quadratwurzel seiner Länge, jener in Richtung des Segments kann gleich dem Digitalisierungsintervall angenommen werden (FUCHS 1998). Dadurch erhalten lange Segmente einen größeren Einfluss auf das Ergebnis als kurze.

Die Evaluierung der Zuordnungshypothesen erfolgt durch eine gemeinsame Ausgleichung aller dieser Beobachtungen für alle Kanten, wobei die Rolle des Objektmodelles durch das in Abschnitt 2.3 beschriebene System von GESTALT-Beobachtungen wahrgenommen wird. Die Eliminierung falscher Hypothesen erfolgt durch robuste Schätzung, wobei das Prinzip der Gewichtsmodulation nur auf die Bildkoordinaten angewandt wird. Die Ausgleichung ist stark überbestimmt. Auf Grund der hierarchischen Strategie kann in jedem Bildpyramidenniveau der Suchbereich relativ klein gehalten werden, was die Zahl der falschen Zuordnungen von vornherein verringert, sodass die Voraussetzungen für den Erfolg der robusten Schätzung gegeben sind.

Ein wichtiger Parameter der automatischen Feinmessung ist der mittlere Fehler a priori s_g einer GESTALT-Beobachtung. Er

beschreibt die „Rigidität“ des Objektmodells im Zuordnungsprozess. Wird s_g zu klein gewählt, werden zu viele, andernfalls zu wenige Zuordnungen eliminiert.

2.6 Verwaltung der Gebäudemodelle in einem TIS

Die Rolle des TIS wird im hier beschriebenen System von dem am I.P.F. entwickelten und auf einer relationalen Datenbank mit zusätzlichen geometrischen Elementen beruhenden Programm SCOP.TDM übernommen (HOCHSTÖGER 1996). Zur Verwaltung der Gebäudedaten wurde ein „objekt-rationales“ Prinzip verwendet (KRAUS 2000: S. 54), das es ermöglicht, die vorhandene relationale Datenbank zu nutzen und doch eine objektorientierte Sicht auf diese Datenbank für Applikationsprogramme, z. B. für Visualisierungen, zur Verfügung zu stellen.

In SCOP.TDM werden im „Produktmarkt“ DGMs in einer Tabelle der relationalen Datenbank so verwaltet, dass jede Zeile dieser Tabelle einem auf eine binäre Datei ausgelagerten Geländemodell entspricht. Die Spalten dieser Tabelle enthalten nur die Metadaten, z. B. Objekttyp, Dateiformat, Dateiname und Ausdehnung. Letzteres Attribut beschreibt einen das DGM zur Gänze umschließenden achsparallelen Quader und dient vor allem zu Abfragen nach geometrischen Kriterien. Dieses Prinzip, bei dem die eigentlichen Daten als auf Datei ausgelagerte „binäre große Objekte“ („Binary Large Objects, BLOBs) behandelt werden, während die Metadaten in der relationalen

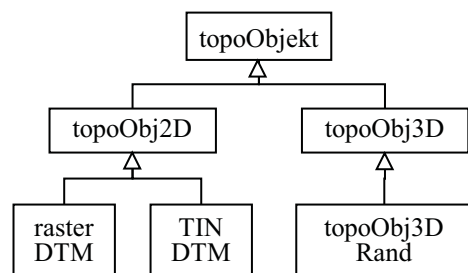


Abb. 6: Vererbungshierarchie für topographische Objekte.

Datenbank verwaltet werden, hat sich für die landesweite Verwaltung von Höhendaten bewährt (HOCHSTRÖGER 1996). Außerdem kann es auf sehr einfache Weise auf Gebäudedaten angewendet werden, indem neue Werte für die Attribute „Objekttyp“ und „Dateiformat“ zugelassen werden. Nur die Randdarstellung der Gebäude ist auf eine externe binäre Datei in einem spezifischen Format ausgelagert.

Es wurde eine objektorientierte Schnittstelle für Applikationen dieses Teils der relationalen Datenbank entwickelt. Dazu wurde eine Vererbungshierarchie für topographische Objekte geschaffen (Abb. 6). Die Basisklasse *topoObjekt* entspricht einem topographischen Objekt und enthält die oben beschriebenen Metadaten. Die eigentliche Art der geometrischen Modellierung ist noch nicht festgelegt und erst für abgeleitete Klassen realisiert. In einer ersten Stufe werden von dieser Klasse zwei Klassen für die 2.5D- bzw. 3D-Modellierung abgeleitet. Erst die davon abgeleiteten Klassen entsprechen realen Daten in einer bestimmten Modellierungstechnik, einerseits für Geländemodelle in 2.5D-Rasterdarstellung bzw. als Triangulierung, und andererseits für 3D-Objekte in Randdarstellung. Um die objektorientierte Sicht auf die topographischen Daten zu erhalten, ist eine Schnittstelle nötig, die an SCOP.TDM Abfragen bezüglich des „Produktmarktes“ richtet, aus dem Ergebnis das Attribut „Objekttyp“ interpretiert und das dem Wert dieses Attributes entsprechende Objekt instantiiert. Diese Objekte verfügen dann über die entsprechenden Methoden, um ihre Daten aus den dem Wert des Attributs „Dateiname“ entsprechenden Dateien zu initialisieren. Die Applikation bekommt also als Resultat einer Abfrage eine Liste von Instanzen der Klasse *topoObjekt* und kann über die Schnittstelle dieser Klasse deren Methoden, z. B. für Visualisierungen, nutzen.

3 Ergebnisse

Zur Evaluierung des neuen Verfahrens wurde ein Testprojekt in Stoitzendorf (Niederösterreich) durchgeführt. Dafür wurde

ein kleiner Luftbildblock ($M = 1 : 4500$, $c_k = 15 \text{ cm}$) mit zwei Streifen mit 70% Längs- und 50% Querüberdeckung verwendet. Im Bereich des Ortskerns waren alle Gebäude in sechs Bildern sichtbar. Die Bilder wurden mit $15 \mu\text{m}$ an einem photogrammetrischen Scanner digitalisiert (schwarzweiß). Zur Bestimmung der Höhen der Gebäudeböden wurde ein DGM durch Stereoauswertung in einem analytischen Auswertegerät bestimmt.

Zunächst wurde die Genauigkeit des Verfahrens zur automatischen Feinmessung untersucht. Zu diesem Zweck wurden fünf Gebäudeprimitive, drei Satteldächer und zwei Krüppelwalmdächer, in verschiedenen Ausrichtungen relativ zur Flugrichtung, ausgewählt und sowohl automatisch als auch manuell durch Messung aller Dachecken in sechs Bildern ausgewertet. Es konnten so mittlere Fehler σ_Δ der Differenzen der Parameter der Primitive berechnet werden. Sie betragen für die einzelnen Kategorien von Parametern:

- Position (X_0, Y_0) des Primitivs:
 $\sigma_\Delta = \pm 3.1 \text{ cm}$
- Orientierung κ : $\sigma_\Delta = \pm 85 \text{ mgon}$, das entspricht $\pm 1.3 \text{ cm}$ auf 10 m .
- Gebäudedimensionen a_{00}^f, b_{00}^f :
 $\sigma_\Delta = \pm 2.9 \text{ cm}$.
- Firsthöhe c_{00}^r : $\sigma_\Delta = \pm 2.8 \text{ cm}$.
- Dachneigung c_{10}^r : $\sigma_\Delta = \pm 1.1 \%$.

Diese Ergebnisse zeigen das hohe Genauigkeitspotential der Methode, das durch die große Anzahl an Beobachtungen für ein einzelnes Primitiv (ca. 2500) begründet ist. Allerdings sind noch weitere Untersuchungen mit einer größeren Anzahl von Gebäuden nötig, um zu einer endgültigen Beurteilung zu kommen.

Es wurde auch die Konvergenzfähigkeit der automatischen Feinmessung in Abhängigkeit von den wichtigsten Steuerparametern und der Qualität der Näherungswerte mit Hilfe derselben fünf Gebäude untersucht (ROTTENSTEINER 2001). Es können folgende Aussagen getroffen werden:

- Das Verfahren konvergiert bei Abweichungen der Näherungen von bis zur halben Gebäudeausdehnung.

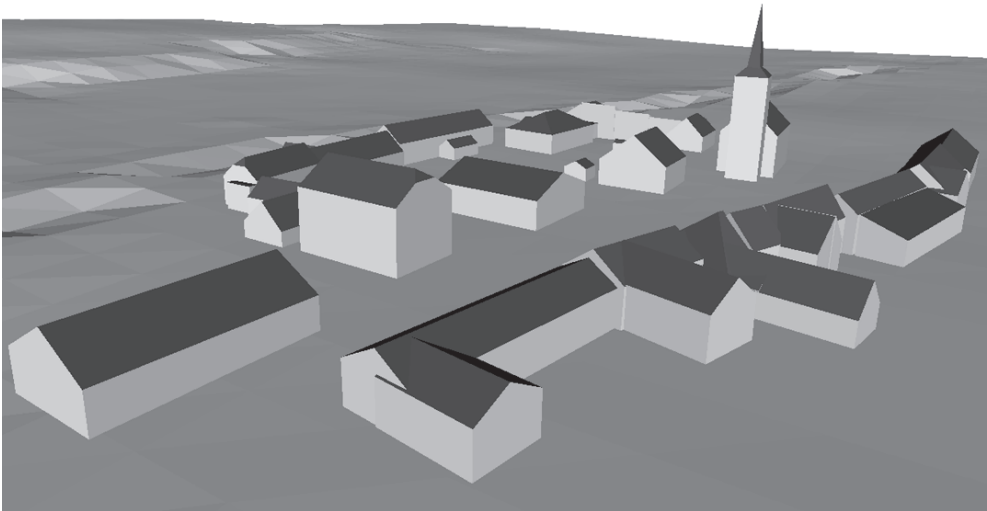


Abb. 7: VRML-Visualisierung der ausgewerteten Gebäude mit DGM.

- Diese Werte werden aber nur unter Verwendung der hierarchischen Strategie erreicht, weil in den Bildern mit grober Auflösung nur die wesentlichen Kanten des Objekts extrahiert werden und somit bei gleicher Größe des Interessensgebietes weniger Fehlzuordnungen auftreten.
- Schon für $s_g = \pm 10$ cm können falsche Ergebnisse auftreten, weil falsche Zuordnungen nicht mehr eliminiert werden. Im Testprojekt hat sich die Wahl von $s_g = \pm 2$ cm bewährt.

Um die allgemeine Anwendbarkeit des Verfahrens zu testen, wurde der Ortskern von Stoitzendorf zur Gänze ausgewertet. Abb. 7 zeigt eine VRML-Visualisierung des erfassten Bereichs. Er besteht aus 18 Gebäudeblöcken mit insgesamt 48 Primitiven. Es traten 8 verschiedene Typen von Primitiven auf. Als kritisch für den Erfolg der automatischen Feinmessung haben sich vor allem Schlagschatten und fehlender Kontrast herausgestellt. Generell war die monoskopische Interpretation der Bilder für die Wahl eines Gebäudeprimitives in manchen Fällen kritisch. Hier hätte wohl die Verwendung von Farbbildern bzw. eine stereoskopische Betrachtung eine deutliche Verbesserung ge-

bracht. Trotzdem kann das Ergebnis der Rekonstruktion einer doch relativ komplexen Szene mit sehr verschachtelten Gebäudeformen als sehr ermutigend betrachtet werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein neues Verfahren zur halbautomatischen Gebäudeextraktion entwickelt und in einem Pilotprojekt getestet. Die Ergebnisse des Tests sind sehr ermutigend und zeigen insbesondere das hohe Genauigkeitspotential der neuen Methode, aber auch einige Möglichkeiten zu deren Verbesserung, etwa durch eine Funktion zum Messen von Punkten an Gebäudekanten anstelle von Gebäudeecken. Auch sind umfangreichere Tests zur Evaluierung der Methode erforderlich, um die Genauigkeitsangaben durch eine größere Anzahl von Vergleichsmessungen zu untermauern und um die Anwendbarkeit in Projekten mit anderer Bildanordnung zu überprüfen. Das dem Verfahren zugrunde liegende Prinzip der Integration von Objektmodellierung und Parameterschätzung ist aber in keiner Weise auf die Anwendung im Kontext der halbautomatischen Gebäudeextraktion beschränkt. Es kann auch auf eine generische Modellierung

durch Polyeder verallgemeinert werden und somit in Zukunft die Grundlage für eine Feineinpassung von Gebäudemodellen in einer datengetriebenen Gebäudeextraktion analog zu AMERI (2000) sein.

Dank

Diese Arbeit wurde vom Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung und der Österreichischen Nationalbank im Rahmen des Forschungsschwerpunktes S7004-MAT unterstützt.

Literatur

- AMERI, B., 2000: Feature Based Model Verification (FBMV): A new Concept for Hypothesis Validation in Building Reconstruction. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, **33** (B3): 24–35.
- BRENNER, C., 2000: Towards fully automatic Generation of City Models. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, **33** (B3): 85–92.
- FUCHS, C., 1998: Extraktion polymorpher Bildstrukturen und ihre topologische und geometrische Gruppierung. – Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, DGK-C **502**, München.
- GRÜN, A. & WANG, X., 1998: CC-Modeler: A Topology Generator for 3-D City Models. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, **53** (5): 286–295.
- GÜLCH, E., 1994: Erzeugung digitaler Geländemodelle durch automatische Bildzuordnung. – Dissertation, Universität Stuttgart, DGK-C **418**, München.
- GÜLCH, E., MÜLLER, H., LÄBE, TH. & RAGIA, L., 1998: On the Performance of Semi-automatic Building Extraction. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, **32** (3/1): 331–338.
- HOCHSTÖGER, F., 1996: Software for Managing Country-Wide Digital Elevation Data. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing **31**, (B2): 160–163.
- KRAUS, K., 2000: Photogrammetrie Band 3. Topographische Informationssysteme. – 417 S., Dümmler Verlag, Köln.
- KAGER, H., 1989: ORIENT: A Universal Photogrammetric Adjustment System. – In: GRÜN, A. & KAHMEN, H. (Hrsg.): Optical 3-D Measurement. – Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe: 447–455.
- LANG, F., 1999: Geometrische und semantische Rekonstruktion von Gebäuden durch Ableitung von Gebäudeecken. – Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, ISBN 3-8265-6619-X
- MÄNTYLÄ, M., 1988: An Introduction to Solid Modeling. – 401 S., Computer Science Press, Rockville, Maryland, USA.
- ROTTENSTEINER, F., 1998: Object Reconstruction in a Bundle Block Environment. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, **32** (3/1): 177–183.
- ROTTENSTEINER, F., 2001: Semi-automatic extraction of buildings based on hybrid adjustment using 3D surface models and management of building data in a TIS. – Dissertation, Geowissenschaftliche Mitteilungen **56**, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien, ISBN 3-9500791-3-0.
- VAN DEN HEUVEL, F.A., 2000: Trends in CAD-based Photogrammetric Measurement. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, **33** (B5): 852–863.
- WEIDNER, U., 1997: Gebäudeerfassung aus digitalen Oberflächenmodellen. – Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, DGK-C **474**, München.

Anschrift des Verfassers:

Dipl.-Ing. Dr. FRANZ ROTTENSTEINER
 Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien
 Gußhausstraße 27–29
 A-1040 Wien
 Tel.: +43 1 58801 12217
 Fax.: +43 1 58801 12299
 e-mail: fr@ipf.tuwien.ac.at

Manuskript eingegangen: Mai 2001

Angenommen: Mai 2001