



Automatische Ableitung detaillierter Gebäudemodelle für 3D Stadtmodelle

Franz Rottensteiner ¹

¹ *Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, Gußhausstraße 27-29, 1040 Wien*

VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation **93** (4), S. 179–185

2005

BibT_EX:

```
@ARTICLE{Rottensteiner_VGI_200520,  
Title = {Automatische Ableitung detaillierter Geb{"a}udemodelle f{"u}r 3D  
Stadtmodelle},  
Author = {Rottensteiner, Franz},  
Journal = {VGI -- {"0}sterreichische Zeitschrift f{"u}r Vermessung und  
Geoinformation},  
Pages = {179--185},  
Number = {4},  
Year = {2005},  
Volume = {93}  
}
```





Automatische Ableitung detaillierter Gebäudemodelle für 3D Stadtmodelle

Franz Rottensteiner, Wien

Kurzfassung

Diese Arbeit behandelt die automatische Ableitung von 3D Gebäudemodellen aus Laserscannerdaten und Luftbildern. Der Arbeitsablauf umfasst zwei Schritte: die Detektion von Gebäuden und deren geometrische Rekonstruktion durch Polyedermodelle. Zur Gebäudedetektion wurde ein Verfahren entwickelt und getestet, das auf der Fusion von Laserscannerdaten und multispektralen Bildern nach der Methode von Dempster-Shafer beruht. Mit diesem Verfahren können Gebäude mit einer Fläche $>120 \text{ m}^2$ sehr verlässlich detektiert werden, wobei die Qualität der Ergebnisse mit kleiner werdender Gebäudefläche stark abnimmt. Die Gebäuderekonstruktion beginnt mit der Extraktion von Dachebenen. Diese Ebenen werden zu Polyedermodellen gruppiert, deren Parameter durch eine konsistente Ausgleichung aller verfügbaren Sensordaten geschätzt werden. Dies kann unter bloßer Verwendung von Laserscannerdaten erfolgen. Durch Kombination von Laserscannerdaten und Luftbildern sind allerdings verbesserte Ergebnisse zu erwarten.

Abstract

This paper deals with the automatic generation of 3D building models from laser scanner data and aerial images. The work flow consists of two stages: building detection and the geometrical reconstruction of the buildings by polyhedral models. A method for building detection was implemented and tested. It is based on the Dempster-Shafer fusion of laser scanner data and multi-spectral images. Using this method, buildings covering an area $>120 \text{ m}^2$ could be detected very reliably. The quality of the results deteriorates quickly with a decreasing building size. Building reconstruction starts with the extraction of roof planes. These planes are grouped to obtain polyhedral models. Finally, a consistent adjustment considering all available sensor data is carried out in order to estimate the building parameters. Building reconstruction can be carried out using laser scanner data alone. Improved results can be expected if laser scanner data and aerial images are combined.

1. Einleitung

3D Stadtmodelle sind zu einem wichtigen Produkt der photogrammetrischen Auswertung geworden, mit Anwendungen z.B. in der Stadtplanung, im Umweltschutz oder bei der Planung von Sendeanlagen für Mobilfunknetzwerke. Dabei bestehen je nach Anwendung unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich Detaillierungsgrad und Genauigkeit der in einem Stadtmodell enthaltenen Gebäudemodelle. Während für manche Fragestellungen die Modellierung von Gebäuden mittels Prismen mit horizontalen Dächern („Blockmodelle“) ausreicht, ist für andere Anwendungen die Kenntnis der Neigungen der Dachflächen und damit eine detaillierte Modellierung der Dachlandschaft notwendig [2], [3]. Blockmodelle können relativ einfach aus bestehenden GIS-Daten erzeugt werden. Die Erfassung und Fortführung von detaillierten Gebäudemodellen ist hingegen mit hohem Aufwand verbunden, weshalb eine Automatisierung dieser Aufgabe angestrebt wird.

Dazu eignen sich besonders flugzeuggestützte Laserscannerdaten und digitale Luftbilder. Laserscannerdaten weisen das höhere Potenzial

hinsichtlich Automatisierung und Höhengenaugigkeit auf, während digitale Luftbilder einen höheren Detaillierungsgrad und eine bessere Lagegenauigkeit ermöglichen [5]. Durch Fusion von digitalen Luftbildern und flugzeuggestützten Laserscannerdaten hofft man, die Vorteile beider Datenquellen ausnützen zu können [8].

Die automatische Gebäudeextraktion umfasst zwei Arbeitsschritte, nämlich die Gebäudedetektion und die geometrische Rekonstruktion der detektierten Gebäude.

2. Gebäudedetektion

Das hier beschriebene Verfahren zur Gebäudedetektion, das zuerst in [9] und [10] vorgestellt wurde, basiert auf der Dempster-Shafer-Fusion von Laserscannerdaten und multispektralen Bildern. Die Eingangsdaten werden dabei zum Zweck der Klassifizierung miteinander verknüpft. Diese Klassifizierung erfolgt in zwei Schritten: zunächst wird jedes Pixel des aus den Laserscannerdaten abgeleiteten digitalen Oberflächenmodells (DOM) klassifiziert. Aus dem Klassifizierungsergebnis werden ursprüngliche Gebäude-

regionen abgeleitet, die einem zweiten Klassifizierungsprozess unterworfen werden, um fälschlich als „Gebäude“ klassifizierte Bäume zu eliminieren. Für die Klassifizierung muss vorab ein digitales Geländemodell (DGM) erstellt werden [9].

2.1. Dempster-Shafer-Fusion

Diese Einführung in die Theorie von Dempster-Shafer basiert auf [6]. Betrachten wir ein Klassifizierungsproblem, bei dem n Klassen $C_j \in \theta$ unterschieden werden sollen. Die Potenzmenge von θ sei 2^θ . Es wird von jedem „Sensor“ (Eingangskanal) jeder Klasse $A \in 2^\theta$ ein Wahrscheinlichkeitsmaß $m(A)$ zugeordnet, sodass gilt: $m(\emptyset) = 0$, $0 \leq m(A) \leq 1$ und $\sum m(A) = 1$, wobei die Summe über alle $A \in 2^\theta$ zu nehmen ist; \emptyset bezeichnet die leere Menge. Unwissen über die Verteilungen der Eingangsdaten bezüglich der Klassen kann modelliert werden, indem man ein von 0 verschiedenes Wahrscheinlichkeitsmaß der Vereinigungsmenge von zwei oder mehr Klassen C_j zuweist. Der *Support* $Sup(A)$ einer Klasse $A \in 2^\theta$ ist die Summe aller dieser Klasse zugewiesenen Wahrscheinlichkeitsmaße; die *Plausibility* $Pls(A)$ ist die Summe aller A nicht widersprechenden Wahrscheinlichkeitsmaße:

$$\begin{aligned} Sup(A) &= \sum_{B \subseteq A} m(B) \\ Pls(A) &= \sum_{B \cap A \neq \emptyset} m(B) \end{aligned} \quad (1)$$

Stehen p „Sensoren“ zur Verfügung, so müssen Wahrscheinlichkeitsmaße $m_i(B_j)$ für alle diese Sensoren i mit $1 \leq i \leq p$ und $B_j \in 2^\theta$ definiert werden. Die Theorie von Dempster-Shafer erlaubt die Kombination dieser Wahrscheinlichkeitsmaße aller Sensoren, sodass man für jede Klasse $A \in 2^\theta$ ein Gesamtwahrscheinlichkeitsmaß erhält:

$$m(A) = \frac{\sum_{B_1 \cap B_2 \cap \dots \cap B_p = A} \left[\prod_{1 \leq i \leq p} m_i(B_j) \right]}{1 - \sum_{B_1 \cap B_2 \cap \dots \cap B_p = \emptyset} \left[\prod_{1 \leq i \leq p} m_i(B_j) \right]} \quad (2)$$

Aus den Gesamtwahrscheinlichkeitsmaßen $m(A)$ können $Sup(A)$ und $Pls(A)$ berechnet werden. Als Ergebnis der Klassifizierung wird jene Klasse $C_a \in \theta$ ausgewählt, die entweder den maximalen Support oder die maximale Plausibility aufweist.

2.2. Pixelweise Klassifizierung

Ziel dieses Schrittes ist die Klassifizierung der Eingangsdaten für jedes Pixel des DOM in eine von vier Klassen: *Gebäude* (G), *Baum* (B), *Grasland* (L) und *Offen* (O), d.h. $\theta = \{G, B, L, O\}$. Um die Dempster-Shafer-Theorie anwenden zu können, muss ein Modell für die Wahrscheinlichkeitsmaße definiert werden. Hier werden fünf Eingangskanäle miteinander verknüpft, von denen jeder zwei komplementäre Teilmengen θ_1 und θ_2 von θ trennen kann (für eine Definition der beiden Parameter der Oberflächenrauigkeit s. [9]):

1. Die *Höhendifferenz* ΔH zwischen dem DOM und dem Gelände unterscheidet Objekte über dem Gelände von Objekten auf dem Gelände. Es wird daher der Klasse $G \cup B$ ein mit ΔH wachsendes Wahrscheinlichkeitsmaß $m_{\Delta H, G \cup B}(\Delta H)$ zugewiesen; für die Klasse $L \cup O$ gilt $m_{\Delta H, L \cup O} = (1 - m_{\Delta H, G \cup B})$.
2. Die *Stärke R der Oberflächenrauigkeit* unterscheidet Bäume von anderen Objekten. Es wird der Klasse B ein mit R wachsendes Wahrscheinlichkeitsmaß $m_{R, B}(R)$ zugewiesen; für die Klasse $G \cup L \cup O$ gilt $m_{R, G \cup L \cup O} = (1 - m_{R, B})$.
3. Die *Gerichtetheit D der Oberflächenrauigkeit* unterscheidet Bäume von anderen Objekten, aber nur dort, wo R sich signifikant von 0 unterscheidet; überall sonst wird D vom Rauschen dominiert. Wenn D berücksichtigt werden kann, wird der Klasse B ein mit D wachsendes Wahrscheinlichkeitsmaß $m_{D, B}(D)$ zugewiesen; für die Klasse $G \cup L \cup O$ gilt $m_{D, G \cup L \cup O} = (1 - m_{D, B})$.
4. Die *Höhendifferenz ΔH_{FL}* zwischen erstem und letztem Echo unterscheidet Bäume von anderen Objekten. Es wird der Klasse B ein mit ΔH_{FL} wachsendes Wahrscheinlichkeitsmaß $m_{\Delta H_{FL}, B}(\Delta H_{FL})$ zugewiesen; für die Klasse $G \cup L \cup O$ gilt $m_{\Delta H_{FL}, G \cup L \cup O} = (1 - m_{\Delta H_{FL}, B})$.
5. Der aus den Multispektralbildern abgeleitete *Normalised Difference Vegetation Index NDVI* ist ein Indikator für Vegetation. Es wird daher der Klasse $B \cup L$ ein mit dem $NDVI$ wachsendes Wahrscheinlichkeitsmaß $m_{NDVI, B \cup L}(NDVI)$ zugewiesen; für die Klasse $G \cup O$ gilt $m_{NDVI, G \cup O} = (1 - m_{NDVI, B \cup L})$.

Die Wahrscheinlichkeitsmaße $m_{\Delta H, G \cup B}$, $m_{R, B}$, $m_{D, B}$, $m_{\Delta H_{FL}, B}$ und $m_{NDVI, B \cup L}$ werden wie folgt modelliert: für Eingangsparameter $x < x_1$ sind sie gleich einer Konstanten P_1 und für $x > x_2$ sind sie

gleich einer weiteren Konstanten P_2 mit $0 \leq P_1 < P_2 \leq 1$ und $x_1 < x_2$. Zwischen x_1 und x_2 werden die Wahrscheinlichkeitsmaße durch eine kubische Parabel modelliert:

$$m_{x,\theta_1}(x) = P_1 + (P_2 - P_1) \cdot \left[3 \cdot \bar{x}(x)^2 - 2 \cdot \bar{x}(x)^3 \right] \quad (3)$$

mit $\bar{x}(x) = (x - x_1)/(x_2 - x_1)$, $x \in \{\Delta H, \Delta H_{FL}, R, D, NDVI\}$; θ_1 bezeichnet jene Teilmenge von θ , der m_{x,θ_1} zugeordnet wird (s. obige Aufzählung). Bezüglich der Wahl der Parameter dieses Modells (P_1, P_2, x_1, x_2) für die einzelnen Eingangskanäle sei auf [10] verwiesen. Für ΔH und ΔH_{FL} hängen sie mit der minimalen Gebäudehöhe im zu klassifizierenden Gebiet zusammen. Für die Oberflächenrauigkeit können sie aus einer Schätzung des Flächenanteils der Klasse *Baum* bestimmt werden. Für den NDVI ist wohl wegen dessen Abhängigkeit von Beleuchtung und Aufnahmerichtung eine Trainingsphase nötig. In [10] wird auch gezeigt, wie das hier vorgestellte Modell für die Wahrscheinlichkeitsmaße des NDVI abgewandelt werden kann, um die Unsicherheit des NDVI in Schattengebieten zu modellieren.

2.3. Endgültige Klassifizierung von Gebäuderegionen

Aus den Ergebnissen der pixelweisen Klassifizierung kann ein binäres „Gebäudebild“ abgeleitet werden. Zusammenhängende Gebiete von „Gebäude-Pixeln“ ergeben Hypothesen für Gebäuderegionen. In einem zweiten Schritt der Dempster-Shafer-Fusion werden diese ursprünglichen Gebäuderegionen noch einmal klassifiziert, wobei vier Eingangsparameter verwendet werden, die denen der pixelweisen Klassifizierung ähnlich sind, aber durchschnittliche Werte für die jeweilige Gebäuderegion darstellen. Regionen, die nicht als „Gebäude“ klassifiziert werden, werden nach diesem Schritt eliminiert. Details findet man in [9] und [10].

2.4. Ergebnisse der Gebäudedetektion

Zur Evaluierung der Methode wurden zwei Testdatensätze verwendet. Beide umfassen ein Gebiet von $2 \times 2 \text{ km}^2$. Der Testdatensatz aus Fairfield (Australien) wurde mit einem Optech Laserscanner mit einem mittleren Punktabstand von 1.2 m aufgenommen, während der Datensatz aus Memmingen (BRD) mit einem TopoSys Scanner erfasst wurde (Punktabstand 0.2 m in Flugrichtung, 1.2 m quer zur Flugrichtung). Von beiden Gebieten waren auch Bilddaten vorhanden.



Abb. 1: Klassifizierungsergebnis für Fairfield: Gebäude (rot), Bäume (dunkelgrün), Grasland (hellgrün), Offen (braun).



Abb. 2: Gebäuderänder für einen Teil des Testgebiets in Memmingen.

Abb. 1 zeigt das Ergebnis der pixelweisen Klassifizierung für Fairfield. Aus den endgültigen Klassifizierungsergebnissen können Randpolygone der Gebäude abgeleitet werden; Abb.2 zeigt diese für das Stadtzentrum von Memmingen. Dabei werden natürlich gekuppelt gebaute Gebäude zusammengefasst. Weiters fällt auf, dass durch Klassifizierungsfehler an den Gebäuderändern der Verlauf der Randpolygone relativ unsicher ist; er wird erst im Zuge der Gebäuderekonstruktion verbessert.

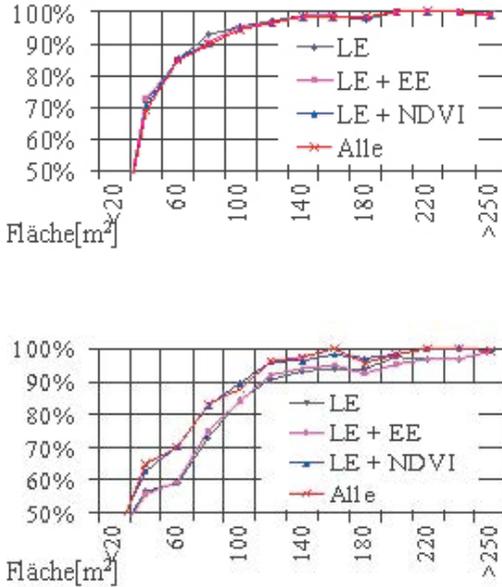


Abb. 3: Vollständigkeit (oben) und Korrektheit (unten) für den Testdatensatz in Fairfield. LE: nur letztes Echo; LE+EE: letztes und erstes Echo; LE+NDVI: letztes Echo und NDVI; Alle: Verwendung von letztem und erstem Echo sowie dem NDVI [10].

Durch Vergleich der Ergebnisse in den beiden Testgebieten mit manuell bestimmten Referenzdaten konnte gezeigt werden, dass mit dem hier beschriebenen Verfahren bei einer Auflösung des DOM von ca. 1 m Gebäude mit einer Fläche größer als 120 m² mit hoher Zuverlässigkeit gefunden werden. Die Genauigkeit des Klassifizierungsergebnisses nimmt mit abnehmender Gebäudefläche stark ab, wobei die Zunahme des NDVI die Ergebnisse vor allem für kleinere Gebäude um 5-10% verbessert (Abb. 3).

3. Gebäuderekonstruktion

In der Gebäuderekonstruktion werden die wie in Abschnitt 2 beschriebenen detektierten Gebäude durch Polyeder modelliert. Die Rekonstruktion umfasst drei Schritte [1], [7], [11]: Die Detektion von Dachebenen, die Bestimmung der Randpolygone dieser Dachebenen und die konsistente Schätzung der Parameter des Gebäudemodells. Zunächst soll hier gezeigt werden, wie diese Schritte allein mit Laserscannerdaten durchgeführt werden können; danach wird diskutiert, wie Luftbilder zur Verbesserung der dabei erzielten Ergebnisse herangezogen werden können.

3.1. Detektion von Dachebenen

Zur Detektion von Dachebenen eignen sich Laserscannerdaten besonders gut, weil Information über die Oberflächenrauigkeit aus ihnen ableitbar ist. Dachebenen zeichnen sich durch eine sehr geringe Oberflächenrauigkeit aus. Somit können Saatregionen für Dachflächen als besonders glatte Gebiete des DOM gefunden werden; diese Saatregionen werden dann durch ein Bereichswachstumsverfahren vergrößert. Um Fehler bei der Selektion eines Schwellwertes bei der Definition der Saatregionen zu vermeiden, wird eine iterative Vorgangsweise gewählt, die zunehmend „rauere“ Saatregionen berücksichtigt [7], [11] (Abb. 4).

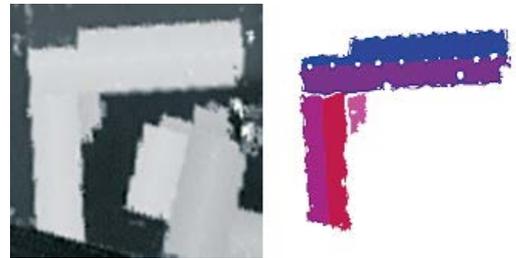


Abb. 4: Digitales Oberflächenmodell aus Laserscannerdaten (links) und extrahierte Dachflächen (rechts) [11].

3.2. Bestimmung der Randpolygone der Dachebenen

Aus den Ergebnissen der Dachflächendetektion können die Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den Dachflächen abgeleitet werden. Diese Nachbarschaftsbeziehungen müssen nun dahingehend klassifiziert werden, ob zwei benachbarte Dachebenen einander schneiden oder nicht. Für einander schneidende Dachebenen enthalten die beiden Randpolygone die Schnittlinie. Andernfalls liegt ein Höhengsprung vor, und die genaue Form des Verlaufs der beiden Randpolygone muss durch Kantenextraktion gefunden werden. Dabei werden zunächst Kantenpixel als Pixel mit großen Höhengradienten quer zur genäherten Richtung des Höhengsprunges detektiert. Zusätzlich wird domänenspezifische Information einbezogen, um den Einfluss von Bäumen unmittelbar neben Gebäuden zu eliminieren. Anschließend werden die so entstandenen Kantenpixelketten generalisiert. Schließlich müssen die Dachrandpolygone auf konsistente Weise durch Vereinigung der Schnittlinien und Höhengsprünge bestimmt werden. Da sich bei der Bestimmung der Dachrandpolygone auch die Begrenzungen der Dachflächen verschieben,

können sich auch die Nachbarschaftsbeziehungen ändern. Es wird daher zunächst die Segmentierung der Dachflächen mit Hilfe der extrahierten Dachrandpolygone verbessert. Danach wird die Bestimmung der Dachrandpolygone auf Basis der verbesserten Segmentierung wiederholt [11].

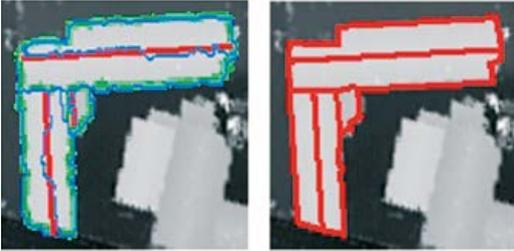


Abb. 5: Links: genäherte Randpolygone (blau), Schnittlinien (rot), Höhengsprünge als Pixelketten (grün). Rechts: generalisierte und zusammengefasste Randpolygone [11].

Um bei der Bestimmung der Dachrandpolygone benutzerdefinierte Schwellwerte weitgehend zu vermeiden, werden Entscheidungen in diesem Prozess auf Basis statistische Tests getroffen. Zur Modellierung der geometrischen Größen und ihrer stochastischer Eigenschaften wird das Konzept der „unsicheren projektiven Geometrie“ [4] herangezogen [11].

3.3. Konsistente Parameterschätzung



Abb. 6: Einige rekonstruierte Gebäude nach der Gesamtausgleichung (Fairfield).

Aus den Dachrandpolygone kann bereits ein Polyedermodell erstellt werden. Im letzten Arbeitsschritt der Gebäuderekonstruktion werden die Parameter dieses Modells in einer Gesamt-

ausgleichung unter Verwendung aller vorhandenen Sensordaten sowie unter Einbeziehung von Information über die Objektstruktur und über geometrische Bedingungen geschätzt. Das Ausgleichungsmodell wurde in [7] vorgestellt. Es beruht auf der Abbildung des Polyedermodells in eine Menge von GESTALT-Beobachtungen, wie sie im Programmsystem ORIENT des Instituts für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien realisiert sind. Dabei entstehen regularisierte Modelle mit geringerem Rauschen an den Höhengsprüngen. Abb. 6 zeigt Ergebnisse für die Gebäuderekonstruktion aus den Laserscannerdaten des Fairfield-Datensatzes nach der Ausgleichung und Regularisierung. Da dieser Modul erst teilweise implementiert ist, wurden die Hypothesen über geometrische Bedingungen hier manuell erzeugt [11]. Es konnte noch keine Evaluierung dieser Resultate durch Vergleich mit Referenzdaten durchgeführt werden. Eine visuelle Kontrolle zeigt, dass die Struktur der Gebäude im Wesentlichen erfasst wurde, wenn auch im Vergleich zur Laserscannerauflösung kleine Dachflächen nicht detektiert werden konnten (s. Beispiel rechts unten in Abb. 6). Die Lagegenauigkeit wirkt umso besser, je größer die erfassten Strukturen sind (bzw. je länger die Höhengsprünge sind); kleinere Strukturen sind ungenauer, wobei die Abweichungen in den Beispielen in Abb. 6 im Allgemeinen kleiner als die Abtastweite sind. Vereinzelt treten etwas größere Fehler an den Gebäuderändern auf, die durch Fehler des DOM in diesen Bereichen (z.B. durch Bodenpunkte unter Dachüberhängen) hervorgerufen wurden.

3.4. Einbeziehung von Luftbildern

Die geringere Lagegenauigkeit von aus Laserscannerdaten abgeleiteten Gebäudemodellen im Vergleich zu solchen, die aus Luftbildern erzeugt wurden, hängt mit der in den Laserscannerdaten relativ schlechten Definition der Höhengsprünge zusammen. Der geringere Detaillierungsgrad ergibt sich aus der geringeren Auflösung der Laserscannerdaten. Um zu besseren Ergebnissen als jenen in Abb. 6 zu kommen, kann entweder die Auflösung der Laserscannerdaten erhöht werden, was aber oft nicht möglich ist (z.B. auf Grund von gesetzlichen Einschränkungen hinsichtlich der minimalen Flughöhe über Grund in besiedelten Gebieten), oder es können digitale Luftbilder als zusätzliche Informationsquelle mit höherer Auflösung verwendet werden. Hier sollen Ansätze zu zweiterer Vorgangsweise diskutiert werden [8]. Die Hinzunahme von Luftbildern kann

in allen drei Phasen des Rekonstruktionsprozesses Verbesserungen bringen:

1. Detektion von Dachebenen: Die Ergebnisse der Ebenenextraktion aus Laserscannerdaten können unter Einbeziehung von Segmentierungsergebnissen aus den Luftbildern verfeinert werden. Dies geschieht durch Matching von aus den Laserscannerdaten extrahierten Dachebenen mit Segmenten homogener Grauwerte aus mehreren Luftbildern und anschließendem Bereichswachstum unter Berücksichtigung der Luftbilder. Als Ergebnis erhält man eine verbesserte Ebenensegmentierung, was insbesondere bessere Näherungswerte für die Bestimmung der Randpolygone liefert (Abb. 7, Mitte). In Zukunft wäre auch denkbar, neue Ebenenhypothesen auf Basis der Segmentierung im Bildraum zu generieren.
2. Bestimmung der Randpolygone: Die Qualität der Randpolygone an Höhengsprüngen kann durch Zuordnung von Bildkanten zu den Objektkanten des Polyedermodells verbessert werden. Zunächst werden in den Luftbildern Bildkanten extrahiert. Unter Berücksichtigung der Information, dass die Dachränder in den Dachebenen liegen müssen, können homologe Bildkanten und daraus 3D Geradensegmente bestimmt werden. Durch Zuordnung der so erhaltenen (in den Dachebenen liegenden) 3D Geradenstücke zu Segmenten der genäherten Randpolygone kann die Lage dieser Randpolygone an Höhengsprüngen verbessert werden [8].
3. Parameterschätzung: Auch hier können die Bildkanten durch zusätzliche Beobachtungen berücksichtigt werden [7].



Abb. 7: Links: Aus Laserscannerdaten extrahierte Ebenen; Mitte: Verbesserung der Ebenensegmentierung durch Luftbilder; rechts: mit Luftbilddaten verbesserte Randpolygone [8].

Abb.7 zeigt Ergebnisse für die ersten beiden dieser Schritte. Ein visueller Vergleich zu den Ergebnissen aus Laserscannerdaten (s. Abb. 6, unten Mitte) zeigt, dass die Dachränder an der Außengrenze des Gebäudes besser bestimmt wurden. Eine Gesamtausgleichung (die für das

Beispiel in Abb. 7 nicht durchgeführt wurde) würde das Ergebnis aus Abb. 7 noch weiter verbessern.

4. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde ein Überblick über Methoden, die zur automatischen Extraktion von Gebäuden dienen, gegeben. Die Methode zur Gebäudedetektion auf Grundlage der Dempster-Shafer-Fusion hat sich in den Experimenten als sehr zuverlässig erwiesen, wobei eine starke Abhängigkeit der Detektionsrate von der Gebäudegröße festgestellt wurde. Gebäude größer als 120 m² können mit einer Korrektheit und Vollständigkeit von jeweils über 95% detektiert werden. Die hier vorgestellten Verfahren zur Gebäuderekonstruktion sind zum Teil noch in Entwicklung begriffen. Das Potenzial dieser Methoden konnte aber dennoch an Hand von ersten Beispielen demonstriert werden. Großes Augenmerk wird in Zukunft auf die Fusion von Bild- und Laserscannerdaten in der Gebäuderekonstruktion gelegt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Baillard, C., Schmid, C., Zisserman, A., Fitzgibbon, A., 2000: Automatic Line Matching and 3D Reconstruction of Buildings from Multiple Views. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXXII (3-2W5): 69-80.
- [2] Bartel, S., Bill, R., Boytscheff, C., Königer, A., 1997: Datenfusion zur Erstellung realitätsnaher 3D-Geoinformationssysteme für städtebauliche Planungen. ZPF 1997(4): 139-137.
- [3] Dorffner, L., Zöchling, A., 2003: Das 3d Stadtmodell von Wien – Grundlage für Planungsaufgaben und Visualisierungen. 16. AGIT-Symposium, S. 90-99.
- [4] Heuel, S., 2004: Uncertain projective geometry. Statistical reasoning for polyhedral object reconstruction. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, BRD.
- [5] Kaartinen, H., Hyypä, J., Gülch, E., Vosselman, G., Hyypä, H., Matikainen, L., Hofmann, A.D., Mäder, U., Persson, Å., Söderman, U., Elmquist, M., Ruiz, A., Dragoja, M., Flamanc, D., Maillet, G., Kersten, T., Carl, J., Hau, R., Wild, E., Frederiksen, L., Holmgaard, J., Vester, K., 2005: Accuracy of 3D city models: EuroSDR comparison. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI (3/W19):227-232.
- [6] Klein, L., 1999: Sensor and data fusion, concepts and applications. 2. Auflage, SPIE Optical Engineering Press.
- [7] Rottensteiner, F., 2003: Automatic generation of high-quality building models from LiDAR data. IEEE CG&A 23(6): 42-51.

- [8] Rottensteiner, F., Trinder, J., Clode, S., Kubik, K., 2004: Fusing Airborne Laser Scanner Data and Aerial Imagery for the Automatic Extraction of Buildings in Densely Built-up Areas. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXV (B3)*: 512-517.
- [9] Rottensteiner, F., Trinder, J., Clode, S., Kubik, K., 2005: Using the Dempster Shafer method for the fusion of LIDAR data and multi-spectral images for building detection. *Information Fusion 6(4)*: 283-300.
- [10] Rottensteiner, F., Summer, G., Trinder, J., Clode, S., Kubik, K., 2005: Evaluation of a Method for Fusing LIDAR Data and Multispectral Images for Building Detection. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI (3/W24)*:15-20.
- [11] Rottensteiner, F., Trinder, J., Clode, S., Kubik, K., 2005: Automated Delineation of Roof Planes from LIDAR Data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI (3/W19)*: 221-226.

Anschrift des Autors

Dipl.-Ing. Dr. Franz Rottensteiner: Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, Gußhausstraße 27-29, 1040 Wien.
E-mail: fr@ipf.tuwien.ac.at

