

Gebäudemodellierung in reduzierten Parameterräumen von Flugzeug-Laserscannerdaten

ELLEN SCHWALBE, ALEXANDRA D. HOFMANN & HANS-GERD MAAS, Dresden

Keywords: airborne laser scanning, line tracing, building reconstruction

Zusammenfassung: Dieser Beitrag beschreibt eine Methode zur Gebäudemodellierung aus Laserscannerdaten, welche auf der Detektierung von Geraden in gezielten 2D-Projektionen der Punktwolke beruht. Der Ansatz beinhaltet, ausgehend von einer gegebenen Vorsegmentierung, die Bestimmung der Ausrichtung des Gebäudes, die Detektierung von Dachflächen, die Gruppierung der Dachflächen zu Gebäudemodellen sowie die Bestimmung der Gebäudegrundrisse.

Summary: *Building model reconstruction in reduced parameter spaces of airborne laser scanner data.* The article describes a method for the generation of building models from raw airborne laser scanner point clouds, which is based on the detection of straight lines in specific 2D projections of a point cloud. The approach contains the determination of the building orientation, the detection of roof faces, the grouping of the roof planes to a 3D building model and the derivation of the building ground plan.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Thematik der Gebäudemodellierung aus Laserscannerdaten hat in den vergangenen Jahren wachsendes Interesse gefunden. Beispiele für die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten sind die Generierung von 3D-Stadtmodellen zur städtebaulichen Planung oder für virtuelle Stadtrundgänge sowie die Informationsgewinnung für Geografische Informationssysteme und deren Folgeprodukte. Weiterhin kann die Gebäudemodellierung der Aktualisierung von Katasterdaten dienen.

Aus diesem Grund werden Methoden entwickelt, mit denen Gebäude aus Laserscannerdaten möglichst vollautomatisch, der Punktdichte entsprechend detailliert, genau und effektiv modelliert werden können (vgl. Abb. 1). Im Hinblick auf die zunehmende Punktdichte und Genauigkeit der Laserscannerdaten ist es zudem von Interesse,

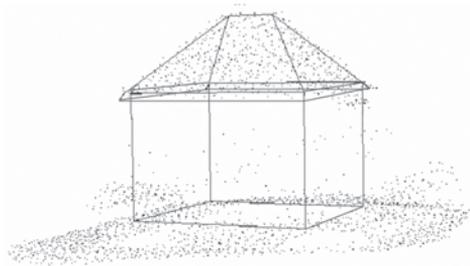


Abb. 1: Gebäudemodell aus Laserscannerdaten mit Punktwolke; zum Vergleich Foto des Gebäudes.

Methoden zu entwickeln, welche Daten unterschiedlicher Dichte und Qualität verarbeiten können, und die für eine höhere Punktdichte und Genauigkeit auch entsprechend detailgetreuere Ergebnisse liefern.

Unter diesen Gesichtspunkten wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Ansätze zur Gebäudemodellierung aus Flugzeuglaserscannerdaten entwickelt. Grundsätzlich kann dabei in Methoden unterschieden werden, welche rein auf der Basis von Laserscannerdaten arbeiten und Ansätze, die in der Lage sind, zusätzliche Datenquellen wie beispielsweise vorhandene GIS-Daten oder Luftbilder einzubeziehen. Eine weitere Unterscheidung klassifiziert in modellbasierte Verfahren, welche von der Annahme eines zu parametrisierenden Gebäudemodells ausgehen (BRENNER & HAALA 1998, MAAS 1999) und datenbasierte Verfahren (VOSSELMAN 1999, ROTTENSTEINER & BRIESE 2002), welche versuchen, geometrische Primitive in segmentierten Punktwolken zu detektieren und diese nach vorgegebenen Regeln zu Gebäuden zu kombinieren. Als dritte Kategorisierung kann in Methoden unterschieden werden, welche die originalen Laserscannerpunkte nutzen, und solche, die – meist mit dem Ziel der Nutzung bestehender Bildverarbeitungswerkzeuge – auf einer Interpolation der Originaldaten auf ein regelmäßiges Raster basieren.

Das im Folgenden vorgestellte Verfahren basiert ausschließlich auf nicht interpolierten Laserscannerdaten um zunächst das Potential dieser Datenquelle nachzuweisen.

1.2 Zielstellung und Grundidee

Das Ziel der hier vorgestellten Methode ist die automatische Gebäuderekonstruktion aus Flugzeug-Laserscannerdaten ohne die Nutzung von Zusatzinformationen.

Die Idee, die der entwickelten Methode zugrunde liegt, ergibt sich aus der Überlegung, wie ein menschlicher Betrachter in einer Punktwolke ein Gebäude erkennt. Die wesentlichsten Informationen werden beim Drehen der Punktwolke durch die Betrachtung der Giebelseite des Gebäudes erhalten. Es ist zu erkennen, dass sich Dachflächen,

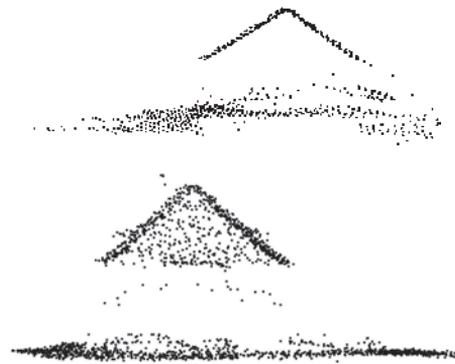


Abb. 2: Punktwolken eines Satteldaches (oben) und eines Walmdaches (unten), von der Giebelseite des jeweiligen Gebäudes aus betrachtet.

wenn sie in eine Vertikalebene parallel zur Giebelseite des Gebäudes projiziert werden, als Geraden abbilden (vgl. Abb. 2).

Aus dieser Blickrichtung lassen sich die Dachart des Gebäudes sowie die Anzahl, die Neigung und die Breite der Dachflächen abschätzen. Diese Informationen sollen in der zu entwickelnden Methode genutzt werden, um Dachflächen zu detektieren. Dazu ist die Ausrichtung des Gebäudes zu bestimmen, und die Datenpunkte sind in die entsprechende Vertikalebene zu projizieren. In diesen Projektionen werden Geraden gesucht, welche Dachflächen repräsentieren. Eine ähnliche Idee wurde bei VOSSELMAN & DIJKMAN (2001) angesprochen. Diese Geraden sollen schließlich zu Dachflächen erweitert und zu einem Gebäudemodell gruppiert werden. Die Detektierung von Dachflächen wird somit auf zweidimensionale Parameterräume reduziert, was eine Verminderung der Rechenzeit und eine effektive Arbeitsweise des Algorithmus erwarten lässt.

2 Daten

Die beschriebene Methode wurde an zwei verschiedenen Datensätzen getestet, die sich durch ihre Punktdichte und Art der enthaltenen Gebäude unterscheiden:

Der erste Datensatz liegt in den Schweizer Voralpen. Die Punktdichte beträgt ca. einen Punkt pro Quadratmeter. Das Gebiet ist gekennzeichnet durch Einzelhausbebauung

und einfache Gebäudestrukturen. Vorwiegend handelt es sich um einfache oder kombinierte Satteldächer. Eine spezielle Eigenheit der Gebäude dieses Datensatzes ist, dass sie teilweise in den Hang hineingebaut sind. Das entwickelte Modellierungsverfahren wurde an 229 Gebäuden dieses Datensatzes getestet, um seine Effektivität zu ermitteln.

Bei diesem Datensatz handelt es sich um unregelmäßig verteilte Laserscannerdaten. Der Ansatz geht von einer vorliegenden Segmentierung des Datensatzes aus (HOFMANN et al. 2003), wobei Gebäudesegmente häufig noch umgebende Bodenpunkte oder Punkte angrenzender Vegetation enthalten. Die Punktdichte der Datensätze resultiert aus mehreren sich stark überlappenden Flugstreifen.

Als zweiter Datensatz wurde ein Gebiet im innerstädtischen Bereich der Stadt Dresden verwendet. Hierbei handelt es sich um Daten mit einem Punktabstand von einem Meter. Dieser Datensatz dient einem Vergleich der modellierten Gebäude mit Daten, die durch klassische Vermessung gewonnen wurden.

3 Verfahren

3.1 Modell

Die Vielfalt der existierenden Dachformen stellt unterschiedliche Ansprüche an einen Algorithmus zur Gebäudemodellierung. Nicht alle Details und Formen, die in der Realität auftreten, können modelliert werden. Deshalb ist es im Vorfeld notwendig, eine gewisse Modellvorstellung eines Gebäudes zu erarbeiten. Zu diesem Zweck werden Vorüberlegungen zu Gebäudeformen und gemeinsamen Eigenschaften von Gebäuden durchgeführt.

Es wird davon ausgegangen, dass Gebäude aus ebenen Flächen bestehen. Die grundlegenden Dachformen, die mit dem vorliegenden Algorithmus modellierbar sein sollen, sind Satteldächer, Pultdächer und Walmdächer sowie Kombinationen aus diesen Grundformen. Eine erste einschränkende Annahme ist, dass Gebäude maximal

zwei Hauptrichtungen besitzen, welche orthogonal zueinander sind. Die Normalenvektoren aller Dachflächen sollten orthogonal zu einer der Hauptrichtungen sein. Die Hauptrichtungen des Gebäudes werden durch die Ausrichtung der Dachfirste definiert bzw. durch die Ausrichtung der Gebäudekanten.

Um komplexere Gebäude zu modellieren, wie Gebäude mit kombinierten Dachformen, ist es notwendig, weitere Annahmen zu machen. Ein Gebäude kann mehrere Dachfirste unterschiedlicher Höhe besitzen. In der derzeitigen Implementation sollten sie parallel oder orthogonal zueinander sein. Zudem wird angenommen, dass die Traufe parallel zum Dachfirst verläuft und der Dachfirst parallel zur Horizontalebene liegt. Die Wände eines Gebäudes sind senkrechte ebene Flächen und schließen an die äußeren Dachkanten an. Gegenüberliegende Dachflächen, die sich in einer Dachfirstlinie schneiden, besitzen nicht notwendigerweise die gleiche Neigung.

3.2 Überblick

Die Datengrundlage für den vorliegenden Algorithmus bilden segmentierte Laserpunktwolken, die jeweils ein potentielles Gebäude repräsentieren. Die einzelnen Punktwolken werden sukzessive nach folgendem Schema verarbeitet:

- a) Einlesen der Punktkoordinaten und Reduktion auf schwerpunktbezogene Koordinaten
- b) Eliminierung von vermeintlichen Bodenpunkten
- c) Bestimmung des Azimuts der Hauptdachfirstrichtung und Rotation der Datenpunkte um diesen Winkel um die z-Achse
- d) Projektion der Datenpunkte in die z-x- und z-y-Ebene
- e) Suche nach Geraden in diesen projizierten Punkten und Ermittlung der Ausdehnungen der Dachebenen, die durch die Geraden repräsentiert werden
- f) Ermittlung von Aussparungen
- g) Nachbearbeitung detektierter Dachflächen

- h) Verschneidung der Ebenen aus unterschiedlichen Projektionen
- i) Ermittlung der Wandebenen unter Einbezug des Dachüberstandes
- j) Bestimmung des Grundrisspolygons und Visualisierung des Gebäudes als VRML-Modell

3.3 Bestimmung der Dachfirstrichtung

Da die Methode auf dem Prinzip der Linien-suche in Projektionen der Punktwolke orthogonal zur Dachfirstrichtung beruht, ist als erster Arbeitsschritt die Bestimmung der Hauptrichtung des Gebäudes nötig.

Zuvor werden potentielle Bodenpunkte mittels einer Höhenhistogramm-Analyse aus dem Datensatz eliminiert. Das Minimum an Laserpunkten in den Höhenschichten im Bereich der Hauswände dient dabei als Kriterium zur Trennung von Dach- und Bodenpunkten.

Mit den verbliebenen Gebäudepunkten erfolgt die Suche nach der Dachfirstrichtung des Gebäudes. Darunter ist das Azimut κ des Hauptdachfirstes zu verstehen (vgl. Abb. 4a).

Das dazu angewandte Prinzip beruht auf der Untersuchung der Verteilung der Punkte in einzelnen Höhenschichten der Punktwolke. Nicht nur das Höhenintervall, in welchem Dachfirstpunkte enthalten sind, lässt die Ausrichtung des Gebäudes erkennen,

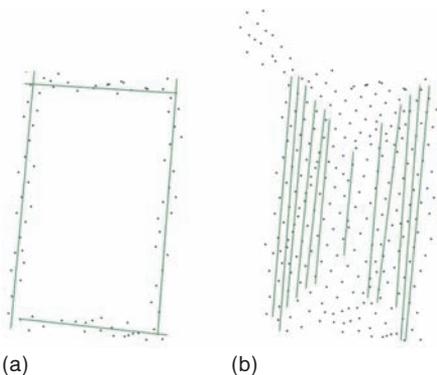


Abb. 3: a) Linien einer Höhenschicht; b) Linien aller Höhenschichten, welche die Hauptrichtung definieren.

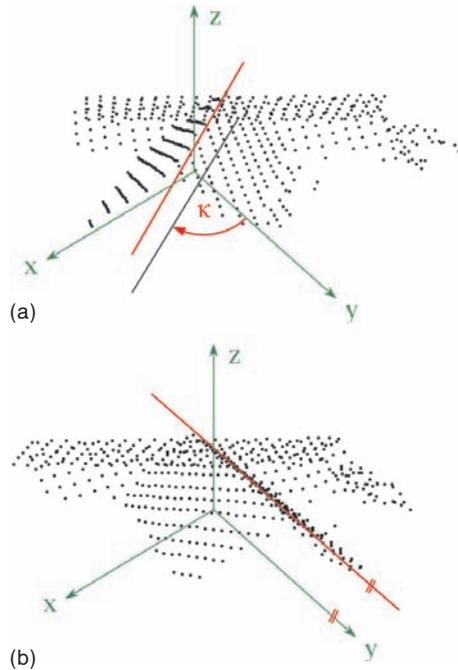


Abb. 4: a) Dachfirstrichtung; b) um den Winkel $-\kappa$ rotierte Punktwolke.

auch tiefere Höhenschichten innerhalb der Dachpunkte enthalten diese Information.

Die Idee besteht darin, in den Punkten der einzelnen Höhenschichten des Datensatzes nach Geraden zu suchen (vgl. Abb. 3a). Im Bereich des Daches entspricht die am häufigsten auftretende Richtung der detektierten Geraden einer der beiden Hauptrichtungen des Gebäudes (vgl. Abb. 3b). Die Verteilung der Punkte in Höhenschichten durch Vegetationsbereiche hat dagegen Zufallscharakter.

Als Richtung des Hauptdachfirstes wird zunächst die ausgeprägteste Richtung der detektierten Geraden angenommen. Anschließend wird die Punktwolke um das ermittelte Azimut κ um die z-Achse rotiert, so dass die Hauptrichtung (der Hauptdachfirst) des Gebäudes parallel zur y-Achse verläuft (vgl. Abb. 4b).

3.4 Detektierung von Dachflächen

Im nächsten Schritt werden die Punkte in die Vertikalebene projiziert. Zuerst erfolgt

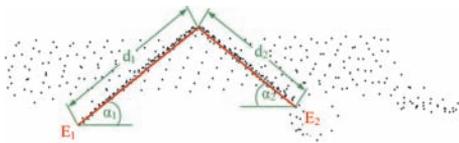


Abb. 5: Neigung und Breitenausdehnung detektierter Dachebenen.

die Projektion in die z-x-Ebene. Punkte, die dabei auf einer Dachfläche liegen, deren Normalenvektor parallel zur Projektionsebene ist, werden als eine Gerade abgebildet.

In der Projektion werden die Geraden, welche Dachflächen repräsentieren, detektiert, miteinander verschnitten, und ihre Endpunkte werden bestimmt (SCHWALBE 2003).

Bei hoher Punktdichte kann sich die Notwendigkeit einer temporären Ausdünnung der projizierten Punkte ergeben, um die Zuverlässigkeit der Linienverfolgung zu steigern. Anhand des Anstieges und der Endpunkte der Geraden werden die Neigung und die Breitenausdehnung der durch sie repräsentierten Dachflächen ermittelt (vgl. Abb. 5).

Die einzelnen Geraden sollen nun zu Flächen erweitert werden. Die z- und x-Koordinaten der Eckpunkte des Ebenenpolygons sind bekannt durch die ermittelten Geradenendpunkte (vgl. Abb. 5).

Die y-Koordinaten der Eckpunkte werden nach folgendem Verfahren bestimmt: Alle Punkte, die einer Geraden zugeordnet werden können, werden um den Anstiegswinkel der entsprechenden Geraden in die Horizontale rotiert. Danach werden die Punkte in die z-y-Ebene projiziert, wo sie sich als horizontale Gerade abbilden. Durch deren Detektierung und die Bestimmung ihrer Endpunkte können die y-Koordinaten des Ebenenpolygons festgelegt werden. Jede einzelne Gerade der z-x-Projektion wird auf diese Weise zu einem rechteckigen dreidimensionalen Dachflächenpolygon erweitert (vgl. Abb. 6).

Nicht alle Dachflächen sind mit dieser rechteckigen Form optimal beschrieben. Abb. 7a zeigt das Beispiel einer Dachfläche mit Vordach, die gewisse Aussparungen aufweist. Um diese Einkerbungen zu bestimm-

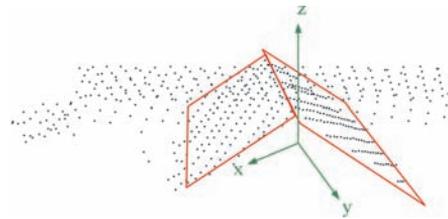
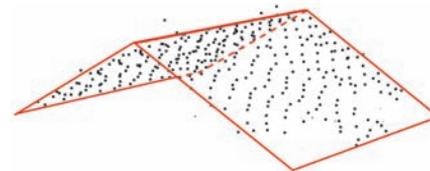


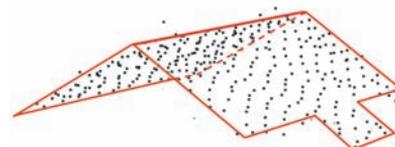
Abb. 6: Erweiterung der Geraden zu Dachflächen.

men, werden zunächst alle Punkte ermittelt, die innerhalb der vorläufigen Grenzen in der Dachebene liegen. Diese Punkte werden um den Neigungswinkel der Ebene in die Horizontale rotiert und in die x-y-Ebene abgebildet. In dieser Projektion werden die Einkerbungen der jeweiligen Dachebene detektiert und das Ebenenpolygon entsprechend erweitert (vgl. Abb. 7b). Die Detektierung der Aussparungen erfolgt durch die streifenweise Untersuchung der Ebene unter Berücksichtigung der Punktdichte in der jeweiligen Fläche.

Da angenommen wird, dass ein Gebäude zwei orthogonale Hauptrichtungen besitzen kann, erfolgt anschließend eine weitere Projektion aller Datenpunkte in die z-y-Ebene. Für diese zweite Projektion werden die analogen Arbeitsschritte wie für die Projektion in die z-x-Ebene durchgeführt. Bei dem Beispieldatensatz aus Abb. 6 handelt es sich um ein kombiniertes Satteldach mit T-förmig-



(a)



(b)

Abb. 7: Modellierung von Einkerbungen: a) Dachfläche mit Einkerbungen; b) Angepass-tes Dachflächenpolygon.

gem Grundriss und vier Dachflächen. Zwei der Flächen werden in der ersten Projektion (z-x-Projektion) gefunden, die beiden anderen in der zweiten Projektion (z-y-Projektion).

3.5 Rekonstruktion des Gebäudes

Als Ergebnis der Auswertung beider Projektionen liegen nun die dreidimensionalen Polygone aller detektierbaren Dachflächen des Gebäudes vor. Alle Flächen, die aus ein und derselben Projektion stammen, sind untereinander verschnitten, da die Geraden in den einzelnen Projektionen bereits verschnitten wurden (vgl. Abb. 5).

Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Bestimmung der Firstrichtung besteht hier durch die jeweilige Ermittlung einer ausgleichenden Ebene für die Punkte, die einer Geraden zugeordnet werden können, und die Bestimmung eines verbesserten Dachfirstes durch die Verschneidung der so ermittelten Dachebenen. Mit der neuen Firstrichtung kann dann rekursiv eine erneute Projektion und Liniensuche durchgeführt werden.

Im Anschluss an die Detektierung der Dachebenen sind verschiedene Nacharbeitungsschritte notwendig. Zum einen können unter den gefundenen Flächen Fehlflächen vorhanden sein. Die Ursache dafür sind z. B. Bodenpunkte, die fälschlicherweise nicht aus dem Datensatz entfernt wurden. Deshalb werden alle detektierten Flächen daraufhin untersucht, ob es sich um relevante Dachflächen handelt. Ebenen, die zu klein sind oder zuwenig Punkte im Verhältnis zum Flächeninhalt besitzen, werden ausgesondert. Zum anderen tritt folgendes Problem auf: Für zwei Dachebenen, die sich in einer Dachfirstlinie schneiden, liegen die beiden oberen horizontalen Randlinien der Ebenen auf einer Geraden. Die Endpunkte dieser Randlinien stimmen jedoch nicht überein, sondern sind leicht versetzt. Ist dieser Versatz geringer als der mittlere Punktabstand der Laserscannerdaten, wird er angeglichen, so dass die beiden Dachebenen in einer Vertikalebene abschließen.

Bei vielen Datensätzen werden Ebenen in den projizierten Punkten der z-x- sowie der

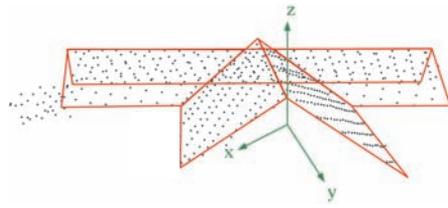


Abb. 8: Verschnittene Dachflächen.

z-y Ebene gefunden. In diesen Fällen müssen noch diejenigen Flächen miteinander verschnitten werden, die aus unterschiedlichen Projektionen stammen (SCHWALBE 2003). Damit ist die Modellierung des Gebäudedaches abgeschlossen (vgl. Abb. 8).

Zur Vervollständigung des Gebäudemodells werden im nächsten Schritt Polygone ermittelt, welche die Wände des Gebäudes beschreiben. Dabei können ein vordefinierter Dachüberstand angenommen und die Hauswände entsprechend eingerückt werden. Als Höhenniveau für die Unterkanten der Wandflächen wird die mittlere Höhe der zuvor eliminierten Bodenpunkte angenommen. Durch Projektion der Wandflächen in die x-y-Ebene wird der Grundriss des Gebäudes erhalten. Die Eckpunkte des Grundrisspolygons werden ermittelt.

Die Ebenenpolygone werden zu einem polyedrischen Gebäudemodell zusammengegruppert und als VRML-Modell visualisiert (vgl. Abb. 9).

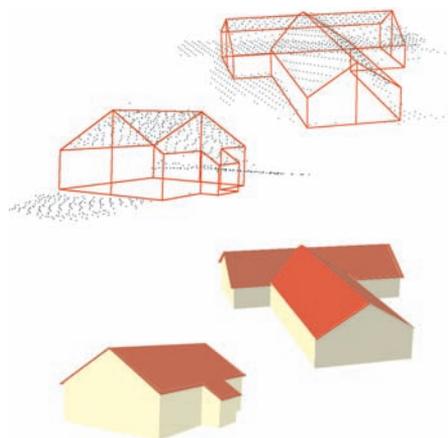


Abb. 9: Als VRML Modelle visualisierte Gebäude.

4 Ergebnisse

4.1 Auswertbarkeit

Die Qualität der Modellierungsergebnisse der beschriebenen Methode hängt von der Datenqualität und Komplexität des Gebäudes ab, welches zu modellieren ist. Im Folgenden werden die Ergebnisse in korrekt, teilweise korrekt und fehlerhaft modellierte Gebäude unterschieden. Die Hauptursachen für fehlerhaft modellierte Gebäude sind:

- a) Lücken in den Punktwolken
- b) Starke Streuung der Punkte aufgrund bestimmter Dacheigenschaften oder durch Diskrepanzen zwischen sich überlappenden Flugstreifen
- c) Gebäude, welche in den Hang hinein gebaut sind
- d) Sehr kleine Gebäude mit wenig Punkten
- e) Geringe Dachneigungen
- f) Das Gebäude entspricht nicht der in Absatz 3.1 beschriebenen Modellvorstellung

Zur Bestimmung der Auswertbarkeit von Gebäuden mit der vorliegenden Methode wurde der Schweizer Datensatz verwendet. Die Gesamtanzahl der ausgewerteten Punktwolken beträgt hier 229. Davon waren 29% der Punktwolken nicht auswertbar, 9% der Gebäude wurden mit kleinen Fehlern modelliert und 62% der Gebäude wurden erfolgreich ausgewertet. Die Verifikation erfolgte durch visuellen Vergleich der VRML-Modelle mit den zugehörigen Punktwolken.

4.2 Detaillierbarkeit

Der Detaillierungsgrad modellierter Gebäude hängt vom Verhältnis der Größe der Details zur Punktdichte der Laserscannerdaten sowie von der Wahl der Ausdünnparameter ab. Die Auswertung zahlreicher Punktwolken hat gezeigt, dass ein Minimum von ca. 10 Punkten pro Fläche notwendig ist, um in der Projektion die Gerade detektieren zu können, welche die entsprechende Fläche repräsentiert. Weiterhin wird die Definition des Grundrisses vage, wenn nur wenige Punkte in einer Fläche enthalten sind.

Bei einer Punktdichte von ca. einem Punkt pro Quadratmeter (Schweizer Datensatz) bedeutet dies, dass Flächen erst ab einer Größe von etwa zehn Quadratmetern modelliert werden können. Somit tendiert das Verfahren eher zur Generalisierung. Kleinere Details wie Dachgauben oder Schornsteine werden in der Regel nicht modelliert. Im Gegenzug dafür ist die Methode jedoch wenig anfällig für starke Streuungen in den Laserdaten oder auftretendem Höhenversatz zwischen einzelnen Flugstreifen.

4.3 Terrestrischer Vergleich

Um die absolute Genauigkeit der modellierten Gebäude zu bestimmen, erfolgte für eine statistische Auswahl unterschiedlicher Gebäudetypen aus dem Datensatz Dresden ein Vergleich aller Eckpunkte des Gebäudemodellldaches mit terrestrisch bestimmten Koordinaten für diese Punkte. Die mittleren Abweichungen betragen in der Lage $\pm 0,46$ m und in der Höhe $\pm 0,25$ m. Die Genauigkeit in der Höhe ist deutlich besser als die Lagegenauigkeit. Dies ist auf die bessere Höhengenaugigkeit der Laserscannerdaten zurückzuführen (MAAS 2003). Die Genauigkeit der Lagekoordinaten dagegen wird im Wesentlichen durch die Punktdichte (mittlerer Punktabstand ca. 1 m) eingeschränkt.

5 Ausblick

Die Methode eignet sich zur Modellierung der wesentlichsten Grundtypen von Gebäuden sowie von einfachen Kombinationen dieser Grundtypen (vgl. Abb. 10). Vorteile des Verfahrens liegen in der effektiven Arbeitsweise und der geringen Empfindlichkeit gegenüber sub-optimalen Laserscannerdaten. Ein breites Spektrum unterschiedlicher Punktdichten kann verarbeitet werden.

Ein Nachteil ist die Beschränkung der auswertbaren Gebäude auf Gebäudetypen mit maximal zwei orthogonalen Firstrichtungen. Dies kann verbessert werden, indem die Punktwolken in kleineren Winkelintervallen als 90° projiziert werden.

Zudem kann eine Anzahl von Erweiterungen in Betracht gezogen werden, um die

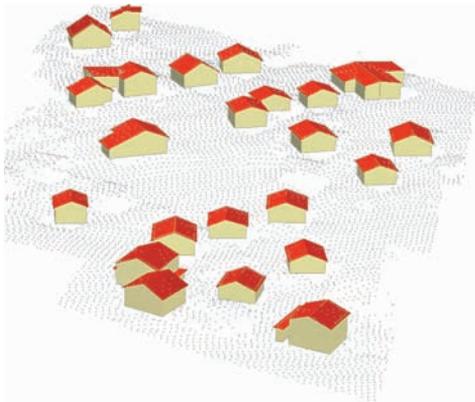


Abb. 10: Modelliertes Gebiet mit einfacher Einzelhausbebauung.

Anwendbarkeit der Methode zu steigern: Zusätzlich zur Suche nach Geraden kann z. B. die Detektierung von Kreissegmenten in den projizierten Punkten erfolgen. Auf diese Weise können eventuell gewölbte Dachelemente auswertbar gemacht werden. Um auch komplexere Gebäude auswerten zu können, sollte in Betracht gezogen werden, die Gebäude in kleinere Primitive zu zerlegen, wie es bei BRENNER & HAALA (1998) vorgestellt wurde. Der Methode kann z. B. auch eine Segmentierung vorgeschaltet werden, durch welche Punkte ausgewählt werden, die zu Flächen gleicher Ausrichtung gehören. Diese Ausrichtungen sind dann zu bestimmen, um für jede von ihnen mit den zugehörigen Punkten eine separate Projektion und Liniensuche durchzuführen. Neben diesen Möglichkeiten, das Verfahren zu erweitern, bietet sich die Methode selbst auch zur Kombination mit anderen Gebäuderekonstruktionsmethoden an.

6 Danksagung

Für die Unterstützung der Arbeiten und die Bereitstellung von Daten danken wir dem Schweizer Bundesamt für Landestopographie (Datensatz Schweiz), der Milan Flug GmbH (Datensatz Freiberg) sowie der Landestalsperrenverwaltung Sachsen (Datensatz Dresden).

7 Literatur

- BRENNER, C. & HAALA, N., 1998: Rapid acquisition of virtual reality city models from multiple data sources. – *IAPRS* **32** (5): 323–330.
- HOFMANN, A. D., MAAS, H.-G. & STREILEIN, A., 2003: Derivation of roof types by cluster analysis in parameter spaces or airborne laserscanner point clouds. – *ISPRS Com. III/3*, Dresden, Germany, 08.–10. October
- MAAS, H.-G., 1999: Closed solution for the determination of parametric building models from invariant moments of airborne laserscanner data. – *IAPRS* **32** (3-2W5): 193–199.
- MAAS, H.-G., 2003: Planimetric and height accuracy of airborne laserscanner data. – User requirements and system performance. Proceedings 49. Photogrammetric Week (Ed. D. Fritsch), Wichmann Verlag.
- ROTTENSTEINER, F. & BRIESE, C., 2002: A new method for building extraction in urban areas from high-resolution LIDAR data. – *IAPRS* **34** (3A): 295–301.
- SCHWALBE, E., 2003: Gebäudemodellierung in reduzierten Parameterräumen von Airborne Laserscannerdaten. – Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung TU-Dresden, <http://www.tu-dresden.de/fghgipf/lehre/diplomarbeiten/schwalbe/DASchwalbe.pdf>
- VOSSELMAN, G., 1999: Building Reconstruction using Planar Faces in Very High Density Data. – *IAPRS* **32** (3-2W5): 87–92.
- VOSSELMAN, G. & DIJKMAN, S., 2001: 3D building model reconstruction from point clouds and ground plans. – *ISPRS* **34** (3W4): 37–44.

Anschrift der Autoren:

Dipl.-Ing. ELLEN SCHWALBE
Ellen.Schwalbe@mailbox.tu-dresden.de

Dipl.-Ing. ALEXANDRA HOFMANN
Alexandra.Hofmann@mailbox.tu-dresden.de

Prof. Dr. habil. HANS-GERD MAAS
hmaas@rcs1.urz.tu-dresden.de

Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung,
Technische Universität Dresden
Helmholtzstr. 10, D-01069 Dresden
Tel.: +49-351-463 32645
Fax: +49-351-463 37266

Manuskript eingereicht: März 2004
Angenommen: April 2004