

Evaluation automatisch rekonstruierter Gebäudemodelle aus Flugzeuglaserscannerdaten

ALEXANDRA D. HOFMANN¹, ELLEN SCHWALBE²

Zusammenfassung: Der folgende Beitrag befasst sich mit der Evaluierung der Ergebnisse zweier Methoden zur Rekonstruktion von virtuellen Gebäudemodellen aus Flugzeuglaserscannerdaten. Beide Methoden werden kurz vor- und gegenübergestellt. Die Ergebnisse, die rekonstruierten virtuellen Gebäudemodelle, werden bezüglich ihrer Korrektheit und Genauigkeit untersucht. Als Maß für die Genauigkeitsbewertung dienen sowohl photogrammetrisch abgeleitete als auch terrestrisch bestimmte Dachinformationen. Es wird gezeigt, dass aus Flugzeuglaserscannerdaten automatisch abgeleitete Dachinformation durchaus als Grundlage für virtuelle Landschaftsmodelle verwendet und photogrammetrisch bestimmte Informationen durch diese ersetzt werden können.

1 Einleitung

Die Erstellung von 3D-Stadt- und Landschaftsmodellen ist momentan ein sehr aktuelles Thema. Die wichtigsten Bestandteile sind hier 3D-Gebäudemodelle neben digitalen Geländemodellen und 3D-Daten von Straßen und Vegetation. In der Literatur wurden einige Ansätze zur automatischen Rekonstruktion von Gebäudemodellen aus Flugzeuglaserscannerdaten vorgestellt. Unter ihnen sind (HAALA & ANDERS, 1997), (MAAS, 1999) und (ROTTENSTEINER & BRIESE, 2002) um nur einige zu nennen. Alle betrachten den Erfolg und Automatisierungsgrad ihrer Methode, doch nur einzelne (MAAS, 1999) beurteilen auch die erreichte Genauigkeit der Gebäudemodelle. Diese ist jedoch für die letztendliche Nutzung in einem 3D Stadt- oder Landschaftsmodell von großem Interesse.

In diesem Beitrag werden zwei weitere Methoden erörtert, die automatisch 3D-Gebäudemodelle aus Punktwolken von Flugzeuglaserscannerdaten generieren. Die erste Methode, Parameterraum-Methode genannt (Abschnitt 2.1), basiert auf der Analyse der Lageeigenschaften von 2,5D Maschen einer in die Punktwolke gerechneten TIN-Struktur. Die andere Methode, kurz Linienmethode (Abschnitt 2.2), ermittelt die Ausrichtung eines Gebäudes und nutzt spezifische Orthogonalprojektionen der Punktwolke zur Bestimmung der Dachflächen. Die beiden Verfahrensansätze sind grundverschieden und arbeiten unabhängig voneinander.

Mit den erhobenen Untersuchungen soll gezeigt werden, inwieweit mit den vorgestellten Methoden Gebäudemodelle aus Flugzeuglaserscannerdaten erstellt werden können und ob diese in Vollständigkeit und Genauigkeit mit photogrammetrisch bestimmten Modellen konkurrieren können. Sollte dies der Fall sein, können sie auch eine Grundlage für ein 3D-Stadt- oder Landschaftsmodell darstellen oder sogar zur automatischen Kartenaktualisierung dienen.

¹ Dipl.-Ing. Alexandra D. Hofmann, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden, Mommsenstr. 13, 01062 Dresden, e-mail: Alexandra.Hofmann@mailbox.tu-dresden.de

² Dipl.-Ing. Ellen Schwalbe, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden, Mommsenstr. 13, 01062 Dresden, e-mail: Ellen.Schwalbe@mailbox.tu-dresden.de
<http://www.tu-dresden.de/fghgipf/index.htm>

2 Methoden zur Gebäudemodellrekonstruktion

2.1 Parameterraum-Methode

Die Parameterraum-Methode nutzt die Lageinformationen von 2,5D Maschen einer Dreiecksvermaschung (Delaunay Triangulation), welche in jede Punktwolke gerechnet wird. Abb. 1a zeigt ein Beispiel. Zu jeder Masche/Dreieck werden Parameter (Neigungsgrad φ , Orientierung ω und Abstand d zum Ursprung) bestimmt, die dessen Ausrichtung und Position im Raum eindeutig definieren. Da alle auf einer Dachseite liegenden Dreiecke ähnliche Lageparameter besitzen, gruppieren sich diese im Parameterraum (siehe Abb. 1b oben).

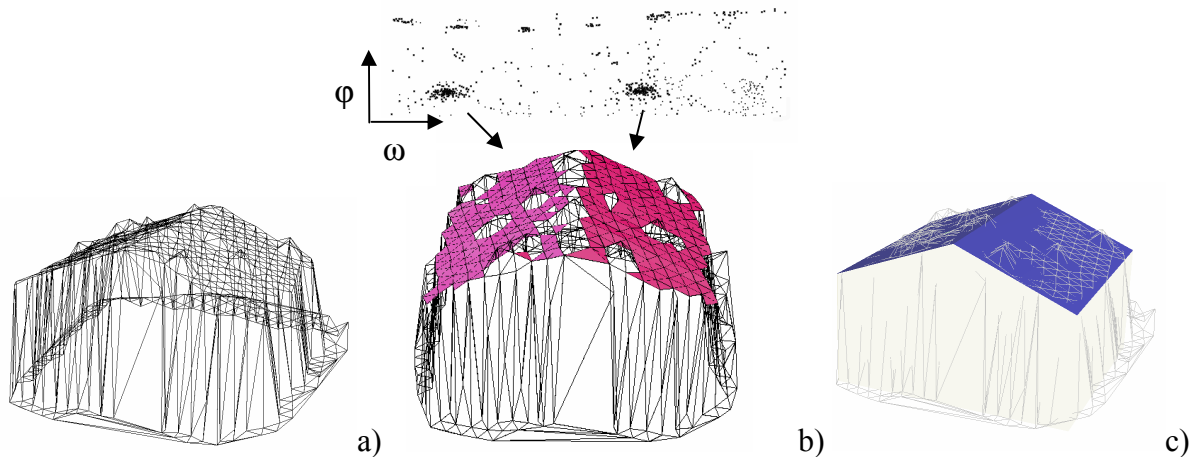


Abb. 1: a) Punktwolke mit Dreiecksvermaschung b) Zuweisung der Parameterpunkte zu den einzelnen Dachflächen c) rekonstruiertes Gebäudemodell

Eine Clusteranalysetechnik detektiert diese Anhäufungen unter Nutzung von Wissen über die Geometrie von Dächern, wie z.B. den maximalen Neigungsgrad. Weitere Kenntnisse über die Dachform sind nicht nötig. Die gesammelten Punkte im Parameterraum werden über eine Region-Growing Technik den einzelnen Flächenelementen zugewiesen. Über Nachbarschaftsbedingungen werden die einzelnen Flächenelemente einander zugewiesen und logisch verschnitten. Das Ergebnis ist ein vereinfachtes 3D Modell des Daches. Eine ausführliche Beschreibung der Methode kann in (HOFMANN, MAAS & STREILEIN, 2003) und (HOFMANN, 2004) nachgelesen werden.

2.2 Linienmethode

Die Idee, die der Linienmethode zugrunde liegt, ergibt sich aus der Überlegung, dass die meisten Informationen zur Dachrekonstruktion durch die Betrachtung der Giebelseite des Gebäudes erhalten werden. Es ist zu erkennen, dass sich Dachflächen, wenn sie in eine Vertikalebene parallel zu Giebelseite des Gebäudes projiziert werden, als Linien abbilden (vgl. Abb. 2). Aus dieser Blickrichtung lassen sich die Dachart des Gebäudes sowie die Anzahl, die Neigung α und die Breite b der Dachebenen E_1 und E_2 abschätzen

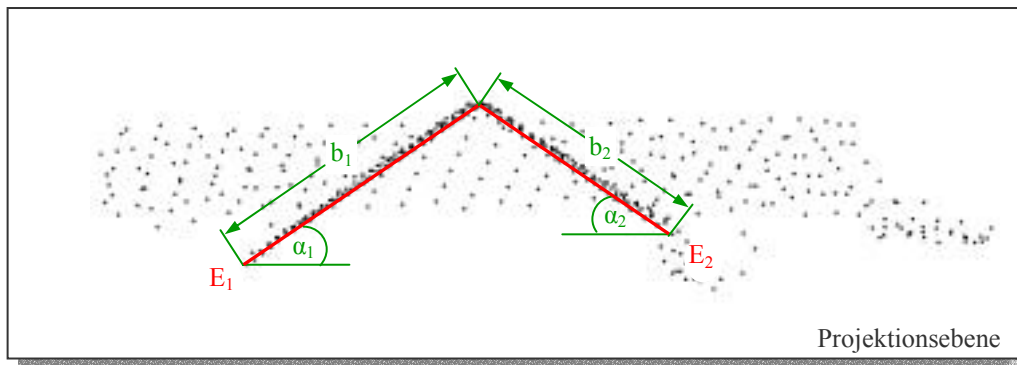


Abb. 2: In eine Giebelseite projizierte Punktwolke

Die Methode setzt sich aus mehreren Arbeitsschritten zusammen: Zur Verringerung der Datenmenge werden zunächst mittels einer Histogrammanalyse potenzielle Bodenpunkte aus dem Datensatz eliminiert. Als zweiter Schritt erfolgt die Bestimmung der Hauptausrichtung des Gebäudes. Dabei wird in den Punkten einzelner Höhengschichten der Punktwolke nach Linien gesucht. Die Ausrichtungen der gefundenen Linien entsprechen den Ausrichtungen des Gebäudes.

Anschließend werden die Datenpunkte um die z-Achse rotiert, so dass die Hauptrichtung des Gebäudes zur y-Achse des zugrundeliegenden Koordinatensystems parallel ist. Nach der Rotation erfolgt die Projektion der Datenpunkte in die z-x- und z-y-Ebene. In den projizierten Datenpunkten werden Einzelpunkte eliminiert und die Daten ausgedünnt, um die anschließende Liniensuche zu begünstigen. Im Anschluss an die Liniensuche in den projizierten Punkten erfolgt die Ermittlung der Neigung sowie der Breiten- und Längsausdehnung der Dachebenen, welche durch die detektierten Linien repräsentiert werden. Mit diesen Informationen können die Dachebenen als rechteckige Polygone dreidimensional rekonstruiert werden. Der vollständige Algorithmus ist in SCHWALBE (2004) beschrieben.

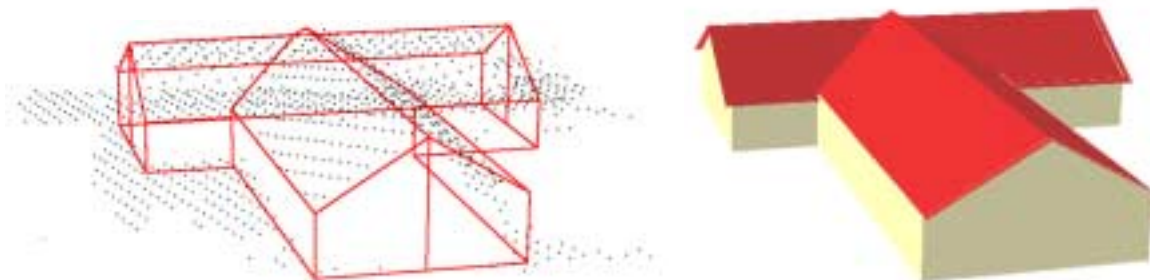


Abb. 3: Drahtrahmen und Flächenmodell der projizierten Punktwolke von Abb. 2

2.3 Vergleich beider Methoden

Beide Methoden sind in ihrer Strategie und Arbeitsweise grundverschieden. So ermöglicht die Parameterraum-Methode die Rekonstruktion von komplexeren Gebäuden, bedingt allerdings auch eine gute Datengenauigkeit bzw. Streifeninformation und reagiert empfindlich auf geometrische Diskrepanzen bzw. sich ungünstig überlagernde Flugstreifen. Bei dieser Methode wird im Gegensatz zur Linienmethode ein einzelner Flugstreifen gewählt, mit dem die Dachinformation rekonstruiert wird. Prinzipiell wird bei höherer Punktdichte und bei genügend genauen Laserscannerdaten auch eine höhere Informationsgewinnung erwartet. Die

Linienmethode bearbeitet erfahrungsgemäß auch Flugzeuglaserscannerdaten schlechterer Qualität, ist aber auf Gebäude mit maximal zwei Firstrichtungen limitiert. Beide Methoden haben allerdings eine Untergrenze für modellierbare Flächen, welche bei ca. 10 Punkten pro Fläche liegt.

Die vorgestellten Methoden arbeiten voll automatisch. Das heißt, dass jede einzelne Punktwolke vom Programm bearbeitet wird und die Ergebnisse als VRML-Dateien abgelegt werden. Die Kontrolle der Ergebnisse obliegt bislang noch dem Nutzer. Kapitel 4.1 informiert über die Erfolgsrate der Methoden.

Für die Parameterraum-Methode benötigt ein Athlon-Duron-Prozessor (700 MHz) mit 512MB RAM ca. 6 min für 100 Satteldächer des Schweizer Datensatzes. Die Linienmethode durchläuft diese Gebäude in ca. der Hälfte der Zeit. Der Zeitaufwand für die Parameterraum-Methode steigt mit zunehmender Punktdichte und dem Grad der Komplexität der Gebäude exponential an, wohingegen der Zeitaufwand, den die Linienmethode benötigt, vorwiegend mit der Komplexität der Gebäude korreliert ist.

3 Ergebnisse und Genauigkeiten

In diesem Kapitel werden die entstandenen Modelle, bezüglich der Topologie, in „korrekt modellierte“, „größtenteils korrekt modellierte“ und „nicht verwendbare“ Modelle unterteilt und statistisch aufgeschlüsselt. Die geometrische Bewertung findet im direkten Vergleich der automatisch abgeleiteten Gebäudemodelle mit herkömmlich photogrammetrisch oder terrestrischen bestimmten Modellen statt.

3.1 Ergebnisse der Gebäudemodellrekonstruktionen

Um den Erfolg der Methoden zu quantifizieren, wurden 200 Gebäude eines Datensatzes mit beiden Ansätzen prozessiert und die Ergebnisse ausgewertet. Dieser Datensatz hat Multi-Pulse Flugzeuglaserscannerdaten mit 2m Punktabstand innerhalb eines Flugstreifens. Die Flugstreifen wurden mit mindestens 40% Überlappung geflogen, womit insgesamt ein mittlerer Punktabstand von ca. 1,2m erreicht wird. Das beflogene Gebiet ist eine ländliche, alpine Region der Schweiz mit vorwiegend Einzelhausbebauung.

Als korrekt wurden diejenigen Modelle bezeichnet bzw. dargestellt, bei denen alle Dachflächen vollständig rekonstruiert wurden und die keiner Nachbearbeitung bedürfen. Größtenteils korrekt gekennzeichnete Modelle enthalten mindestens die Hälfte aller vorhandenen Dachflächen und müssen, aus der Sicht eines Operators, mit wenigen Schritten zum vollständigen Modell zusammengeführt werden können. Alle übrigen Modelle, einschließlich nicht rekonstruierter Punktwolken wurden als unbrauchbar eingestuft. Tabelle 1 fasst die erhaltenen Ergebnisse zusammen.

	Linienmethode	Parameterraum-Methode
Korrekt	60%	61%
Größtenteils korrekt	11%	28%
Nicht verwendbar	29%	11%

Tabelle 1: Erfolgsrate der rekonstruierten Gebäudemodelle

Die Erfolgsrate für korrekt rekonstruierte Gebäude (Beispiele siehe Abb. 4) der beiden Methoden kann als gut eingeschätzt werden. Prinzipiell hat die Parameterraum-Methode leicht bessere Ergebnisse, da mehr Gebäude als größtenteils korrekt bestimmt wurden. Jedoch ist der Erfolg beider Methoden von der Qualität der Laserscannerdaten, der Größe der Punktwolke und der Art des Gebäudes abhängig. Hinsichtlich der Qualität der Laserscannerdaten ist hier die Information zu den einzelnen Flugstreifen von Interesse. Die Größe der Punktwolke hat insofern Einfluss auf den Erfolg der automatischen Rekonstruktion, als das nicht in die Punktwolke gehörige Objekte, wie Vegetation, oder auch starke Hanglagen die Auswertung behindern. Da beide Methoden die Punktwolke nach ebenen Flächen durchsuchen, können zu kleine Objekte auf Dächern, wie z.B. Dachgauben, störend wirken. Das hat zum Ergebnis, dass diese Dachfläche nicht oder nur teilweise rekonstruiert wird.

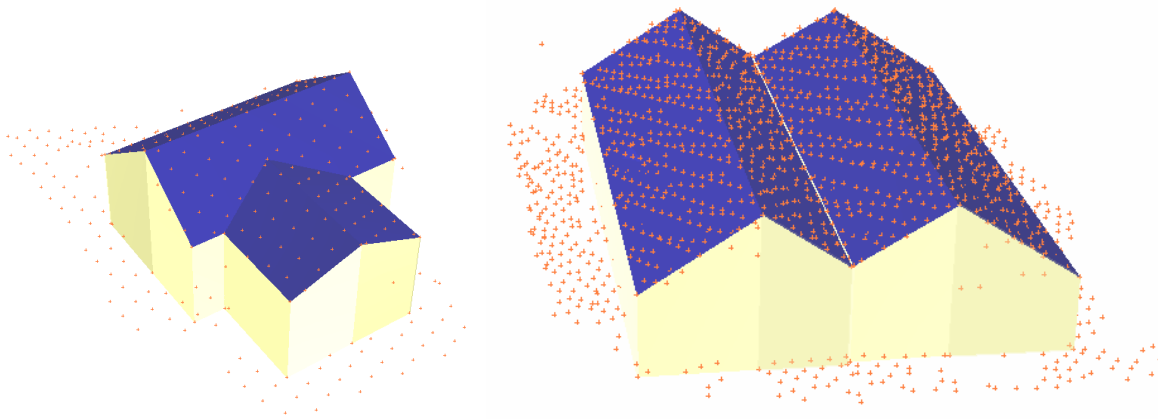


Abb. 4: Beispiele für korrekt rekonstruierte Gebäudemodelle

Unter optimalen Bedingungen können Erfolgsraten von bis zu 70% erreicht werden. Wohingegen in sub-optimalen Datensätzen, das heißt schlecht angepasste Streifen und keine vorhandene Streifeninformation, mit komplexen Dachstrukturen nur ca. 45% der Gebäude erfolgreich rekonstruiert werden.

3.2 Genauigkeitsbetrachtung der entstandenen Gebäudemodelle

Neben der eben betrachteten Korrektheit der Gebäudemodelle ist deren Genauigkeit im Sinne der Lage und Größe auch von großem Interesse. Die beiden folgenden Abschnitte prüfen einerseits die absolute Lagegenauigkeit der Modelle und vergleichen andererseits die Modelle mit herkömmlich photogrammetrisch gemessenen Daten.

3.2.1 Vergleich terrestrisch bestimmter Gebäudemaße zu denen der Flugzeuglaserscannerdaten

Um eine genaue Quantifizierung der mit den rekonstruierten Gebäudemodellen erreichten Genauigkeit zu erlangen, wurden fünf willkürlich gewählte Gebäude eines lokalen Datensatzes (Dresden) terrestrisch mit einem Tachymeter mittels reflektorloser Distanzmessung aufgenommen. Diese fünf Gebäude beinhalten Sattel- und Walmdächer und ein Zeltdach. Von den Gebäuden wurde jeweils die Höhe und Position der Enden des Firstes und alle Dachkanten bestimmt. Diese Werte wurden mit den Koordinaten der entsprechenden Modellpunkte verglichen, wobei bei den Dachkanten nur die Position gewertet wurde, da die Höhenanga-

be mit dem Dachanstieg korreliert ist. Der Laserscannerdatensatz ist in Form eines regelmäßigen Rasters (1m) vorhanden.

	Linienmethode	Parameterraum-Methode
Dachfirst: Position und Höhe	0,7m / 0,1m	0,7m / 0,1m
Dachkanten (mittlerer RMSE in Position)	0,8m	1,2m
Dachneigung	0,7°	0,3°
Ausrichtung	0,1°	0,4°

Tabelle 2: Gemittelten Genauigkeitsmaße der rekonstruierten Gebäudemodelle

Es zeigt sich, dass die Gebäudemodelle neben einer erstaunlich guten Höhengenaugkeit auch über eine äußerst gute Dachneigung und Ausrichtung verfügen. Der mittlere Lagefehler der Dachkanten ist im Vergleich zur Punktdichte recht hoch. Er wurde im Bereich des halben Punktabstandes, also 0,5m, erwartet. In diesem Bereich liegen auch die Genauigkeitsangaben in MAAS (1999).

Im Wesentlichen wird der Dresdner Datensatz (1m Raster) als Laserscannerdatensatz höherer Qualität betrachtet, da keine Streifendiskrepanzen vorhanden sind. Zudem ist eine optimale Segmentierung über die terrestrischen Aufnahmen gewährleistet. Somit können die Ergebnisse aus Tabelle 2 in Bezug auf die Punktdichte als absolute Genauigkeiten gewertet werden. Mit einer sich ändernden Punktdichte sollte sich auch die Genauigkeit der Lagekoordinaten der Dachendpunkte entsprechend ändern.

3.2.2 Vergleich photogrammetrisch abgeleiteter Gebäudemaße mit denen der Flugzeuglaserscannerdaten

Neben dem Vergleich der rekonstruierten Gebäudemodelle zu terrestrischen Messungen ist der Vergleich zu photogrammetrisch gemessenen Dachpunkten von praktischem Interesse. Für ca. 40 Gebäude des Schweizer Datensatzes lagen photogrammetrisch gemessenen Dachpunkte mit einer Lagegenauigkeit von etwa 20 cm und einer Höhengenaugkeit von 50 cm vor. Tabelle 3 gibt die mittleren Differenzen der Eckkoordinaten zwischen den rekonstruierten und den photogrammetrisch bestimmten Modellen wieder. Neben diesen Maßen wurden relative Maße wie Länge, Breite und Dachhöhe berechnet. Diese sind aufgrund der lokalen Korrelation gegenüber systematischen Fehlern weniger anfällig. Sie zeigen, dass die photogrammetrischen Auswertungen recht gut zu den rekonstruierten Modellen passen.

Das Genauigkeitspotenzial von Lage und Höhe bei der photogrammetrischen Messung von Gebäuden durch einen Operateur ist dem der Laserscannerdaten gerade entgegengesetzt: Bei photogrammetrischen Messungen ist – schon aufgrund des Basis-Höhen-Verhältnisses bei der Aufnahme – die Lagegenauigkeit besser als die Höhengenaugkeit. Dies zeigt sich bei der Analyse der Gebäudemodelle deutlich in Form von photogrammetrisch gemessenen Gebäudemodellen, die in Höhe und Dachneigung klar von der Laserscannerpunktwolke (ohne jegliche automatische Rekonstruktion) abweichen (siehe Abb. 5). Vergleicht man in die pho-

togrammetrische Auswertung mit den originalen Laserscannerpunkten, so sieht man in vielen Fällen systematische Abweichungen:

- Die photogrammetrische Auswertung liegt häufig systematisch über oder unter der Punktwolke. Diese Abweichung beträgt bis zu einem Meter.
- Dachfirste weisen systematische horizontale Verschiebungen und Verdrehungen auf.
- Die Dachneigung der photogrammetrischen Auswertung entspricht nicht der aus den Laserscannerrohdaten ablesbaren Neigung.
- Die Größe der automatisch modellierten Gebäude ist in der Regel etwas kleiner als die der photogrammetrischen Auswertung

	Linienmethode	Parameterraum-Methode
gemittelte RMSE-Unterschied aller Eckkoordinaten	1,2m \pm 0,3m	1,1m \pm 0,4m
Gemittelte Firsthöhendifferenzen	-0,5m \pm 0,3m	-0,4m \pm 0,3m
mittlere Differenzen der Umrisse	Länge 0,3m \pm 0,8m Breite 0,6m \pm 0,6m	Länge 0,5m \pm 0,6m Breite 0,1m \pm 0,7m

Tabelle 3: Abweichungsmaße der automatisch abgeleiteten Eckkoordinaten und Gebäudemaße zu den photogrammetrischen Dachpunkten

Diese Effekte sind unabhängig von der automatischen Rekonstruktion vorhanden. Während die Verschiebung der Dächer in Lage und Höhe möglicherweise auf systematische Fehler der Laserscannerbefliegung zurückzuführen sind (GPS/INS-Suboptimalitäten und unzureichender Streifenausgleich), zeigen die Diskrepanzen in der Dachneigung, welche ohne jegliche Rekonstruktion aus der rohen Punktwolke erkennbar sind, eindeutig, dass die Laserscannerdaten in der Höhe eine Genauigkeit aufweisen, die der photogrammetrischen Auswertung überlegen ist.

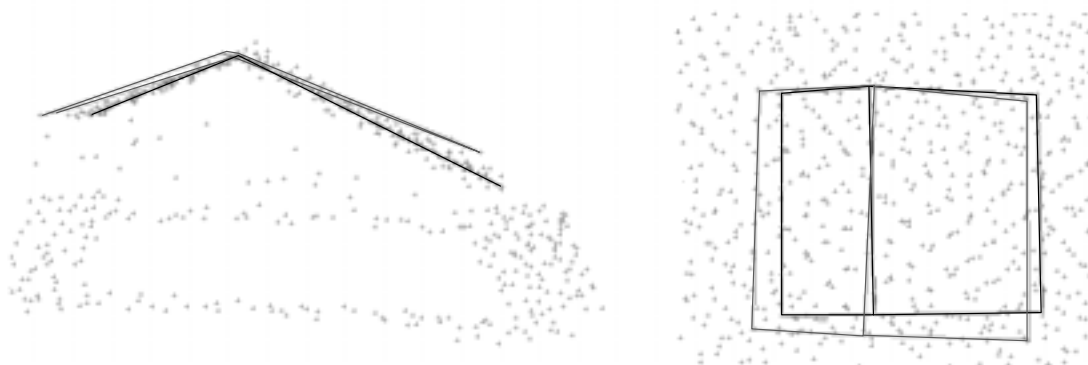


Abb. 5: Vergleich der Dachinformation der photogrammetrischen Auswertung (grau) und der rekonstruierten Modelle (schwarz) mit unterlegter Punktwolke.

4 Zusammenfassung

Es wurden zwei Methoden entwickelt, die automatisch 3D-Gebäudemodelle in Punktwolken rechnen. Mit beiden Methoden ist es möglich, eine große Anzahl an Gebäude in kurzer Zeit recht erfolgreich zu berechnen. Die bislang erhaltenen Ergebnisse sind als positiv zu beurteilen, da in Gebieten mit wenig komplexer Gebäudestruktur eine Erfolgsquote von 70% erreicht wurde. Komplexe Gebäudestrukturen können prozessiert werden, allerdings liegt hier die Erfolgsquote niedriger.

Die geometrische Genauigkeit der Modelle entspricht mindestens der der photogrammetrisch bestimmten Modelle. Der visuelle Vergleich zeigt, dass korrekt modellierte Gebäude sich in Höhe und Ausrichtung sehr gut in die Punktwolke einpassen. In der photogrammetrischen Auswertung sind dagegen auffällige Dachhöhen- und –Neigungsunterschiede zu sehen. Ein Vergleich zu klassisch terrestrisch gemessenen Gebäudekanten weist eine absolute Lagegenauigkeit im Bereich des Laserscannerpunktabstandes und eine Höhengenaugigkeit von ca. 10 cm aus.

5 Danksagung

Diese Studie wurde vom Schweizer Bundesamt für Landestopographie unterstützt. Die Autorinnen danken dem Schweizer Bundesamt für Landestopographie und der Landestalsperrenverwaltung Sachsen für die Bereitstellung der Flugzeuglaserscannerdaten.

6 Literaturverzeichnis

- HAALA, N., ANDERS, K. 1997: Aquisition of 3D urban models by analysis of aerial images, digital surface models and existing 2D building information – SPIE Conference on Integrating Photogrammetric Techniques with Scene analysis and Machine Vision III, Orlando, Florida, pp.212-222
- HOFMANN, A.D., MAAS, H.-G., STREILEIN, A. 2003: Derivation of roof types by cluster analysis in parameter spaces of airborne laserscanner point clouds – IAPRS International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol.34, Part 3/W13, pp.112-117
- HOFMANN, A.D 2004: Analysis of Tin-Structure parameter spaces in airborne laser scanner data for 3-D building model generation – ISPRS XXth Congress, Istanbul, Turkey (eingereicht)
- MAAS, H.-G., VOSSELMAN, G. 1999: Two algorithms for extraction building models from raw laser altimetry data – ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 54 **1999** pp. 153-163
- ROTTENSTEINER, F., BRIESE, C. 2002: A new method for building extraction in urban areas from high-resolution LIDAR data – IAPRS International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol.34, Part 3A, pp.295-301
- SCHWALBE, E., HOFMANN, A.D., MAAS, H.-G., 2004: Gebäudemodellierung in reduzierten Parameterräumen von Flugzeug-Laserscannerdaten. - Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG), **2004** (Heft 4)