

Rekonstruktion von Fenstern aus Schrägsicht-ALS Punktwolken zur Anreicherung von Gebäudemodellen

SEBASTIAN TUTTAS¹ & UWE STILLA¹

Zusammenfassung: In der vorgestellten Arbeit werden Schrägsicht-ALS (Airborne Laserscanning) Punktwolken dazu verwendet, ein Gebäudemodell der TU München, in dem nur die Dachstrukturen modelliert sind, mit rechteckigen Fenster anzureichern. Die Registrierung des Modells mit der Punktwolke erfolgt über korrespondierende Dachebenen. Initiale Fensterpositionen werden durch die Detektion von Punkten, die hinter der Hauptfassade liegen, bestimmt. Die innenliegenden Punkte werden anschließend gelöscht und ein Rechteck in den leeren Bereich um die initialen Fensterpositionen eingepasst. Die Unsicherheit der Rechteckkanten wird modelliert um daraus spalten- und zeilenweise die Fensterumrisse zu schätzen. Für 11 unterschiedliche Fassaden, mit einer Gesamtzahl von 321 Fenstern, wurde eine Detektionsrate von 65% und eine Falschalarmrate von 14% erreicht. Die Unsicherheit der Fenstergrößen bei der Rekonstruktion liegt im Dezimeterbereich.

1 Einleitung

Für viele Städte existieren großflächig Stadtmodelle als Geometriemodell mit Dachstrukturen und ebenen Fassadenflächen. Um eine realistischere Darstellung zu erreichen, ist auch eine Modellierung der Fassadenelemente notwendig. Als wesentliches Element spielen dabei Fenster die wichtigste Rolle. Schrägsicht-ALS (Airborne Laserscanning) Punktwolken erlauben im Gegensatz zu Punktwolken, die in klassischer Nadirsicht aufgenommen wurden, die Interpretation von Fassaden. Gleichzeitig kann bei mehrfachen Überflügen die Szene nahezu komplett in 3D erfasst werden. Deshalb werden in der hier vorgestellten Arbeit diese Punktwolken verwendet um ein Gebäudemodell der TU München (TUM) mit Fenstern zu versehen.

Ansätze zur Fensterdetektion und -rekonstruktion aus terrestrischen Laserscanning-Daten basieren in den meisten Fällen darauf, dass Fenster als Löcher in den Punktwolken erscheinen. In PU & VOSSELMAN (2009) und BOULAASSAL et al. (2011) werden die Fensterkantenpunkte anhand von langen Dreiecksanten in einer Vermaschung der Punktwolke detektiert und Linien an diese Punkte angepasst. In WANG et al. (2012) werden die Kantenpunkte anhand von lokalen Nachbarschaften der Punkte bestimmt. Anschließend werden mit einem plane-sweeping-Verfahren ein vertikales und ein horizontales Profil der Kantenpunkte erstellt, in denen die Maxima die Fensterkanten darstellen. Dabei wird implizit von einer gitterartigen Anordnung der Fenster ausgegangen. Die Annahme, dass die Fenster einer Fassade eine oder mehrere zweidimensionale periodische Strukturen formen wird von MESOLONGITIS & STAMOS (2012) genutzt. Sie versuchen eine Gitterstruktur in ein Binärbild einzupassen, das aus Löchern in den Punktwolken generiert wurde.

1) Photogrammetrie & Fernerkundung, Technische Universität München, Arcisstraße 21, 80333 München, <http://www.pf.bv.tum.de>

Der Ansatz von SCHMITTWILKEN & PLÜMER (2010) unterscheidet sich von den vorhergenannten Arbeiten, da dieser auf Lage- und Formparameter für Fassadenelementen aus Trainingsdaten basiert, die zur Klassifikation und Rekonstruktion verwendet werden. Auch der bildbasierte Ansatz von REZNIK & MAYER (2008) beruht auf Trainingsdaten für die Detektion von Fenstern. Es wird hier ebenfalls die Annahme genutzt, dass Fenster i.d.R. periodische Strukturen formen. Die Arbeit von LEE & NEVATIA (2004) zielt auf die Integration von Fenstern in bestehende 3D-Gebäudemodelle ab, wofür in diesem Fall Texturen verwendet werden. Aus diesen werden Fensterkanten aus vertikalen und horizontalen Histogrammen von Kantenpixeln abgeleitet. Bei der Fassadenrekonstruktion werden auch formale Grammatiken eingesetzt, wobei im Ansatz von BECKER (2009) abgeleitete Fensterstrukturen synthetisch in nicht durch Daten abgedeckte Gebäudebereiche eines Gebäudemodells eingepasst werden. Bei RIPPERDA & BRENNER (2009) werden die Grammatiken in einem rjMCMC (reversible jump Markov Chain Monte Carlo) Ansatz verwendet um Fassaden zu rekonstruieren.

Die Evaluierung von Ergebnissen bei der Fassadenmodellierung aus terrestrischen Laserscanning-Daten, wird von LANDES et al. (2012) behandelt.

2 Methodik

Die in Kapitel 1 genannten Ansätze für Punktwolken sind auf hohe Punktdichten, z.B. für das Anpassen der Fensterkanten, angewiesen, wohingegen die hier vorgestellte Methode mit einer Punktdichte im Bereich von 10 Punkte/m² auskommen muss, da es auf Schrägsicht-ALS Punktwolken angewendet wird. Ein wesentlicher Unterschied zu den anderen Ansätzen besteht darin, dass die Fensterdetektion (Abschnitt 2.2) auf die im Gebäudeinneren liegenden Punkten beruht, die ein einfaches und universelles Merkmal für Fenster darstellen. Die Fensterrekonstruktion wird in Abschnitt 2.3 beschrieben. Auch dieser Ansatz ist auf eine geringe Punktdichte hin angepasst. Vor diesen beiden Punkten steht die Koregistrierung von Gebäudemodell und Punktwolke, welche in Abschnitt 2.1 dargestellt wird. Dabei wird auf die Schwierigkeiten eingegangen, die aufgrund der unterschiedlichen Erfassungsarten entstehen. Die Punktwolkendaten werden zu einem Modell registriert, dass manuell aus einem Stereoluftbildpaar generiert wurde.

2.1 Registrierung von Gebäudemodell und Punktwolke

Für die Korigistrierung von Modell und Punktwolke wird ein ebenenbasiertes Verfahren nach HEBEL & STILLA (2009) verwendet. Dabei werden Transformationsparameter (3 Translationen, 3 Rotationen) für eine Best-Fit-Transformation berechnet, die auf zwei Bedingungen basiert (1: Der Vektor vom Mittelpunkt der Punktwolkenebene zum Mittelpunkt der Modellebene soll senkrecht zum Normalenvektor der Modellebene stehen; 2: Die Normalenvektoren beider Ebenen sollen parallel sein). Um korrespondierende Ebenen zu finden, müssen zunächst zu den Modellebenen Punktwolken-Punkte zugeordnet werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass die räumliche Lage der beiden Datensätze auf wenige Meter genau übereinstimmt. Der Unterschied in der Vororientierung beruht auf folgenden Fehlerquellen:

- Georeferenzierung Laserscanning (UTM) und Luftbilddaten (GK)
- Erfassung der Gebäudeumrisse bei der Erstellung der Gebäudemodelle
- Transformationsparameter (GK zu UTM)

Aufgrund der Charakteristik der Erfassungsweise der beiden Datensätze ist eine eindeutige Transformation von Punktwolke zu Modell nicht möglich. Da die Erfassung des Gebäudemodells aufgrund von Dachformen erfolgte, ist hier die Gebäudegröße durch die Größe des Dachbereichs festgelegt. In der Schrägsicht-Laserpunktwolke werden jedoch die Fassadenflächen an der wahren Position abgebildet, die je nach Gebäude mehr oder weniger weit von der Dachkante zurückgesetzt ist. Außerdem sind aufgrund der manuellen Erstellung des Gebäudemodells auch Abweichungen der Dachflächenneigung von mehreren Grad möglich. Aus diesen Gründen wurde die in Abb. 1 dargestellte Vorgehensweise entwickelt, um korrespondierende Punkte bzw. Ebenen zu detektieren und daraus die Transformation zu berechnen.

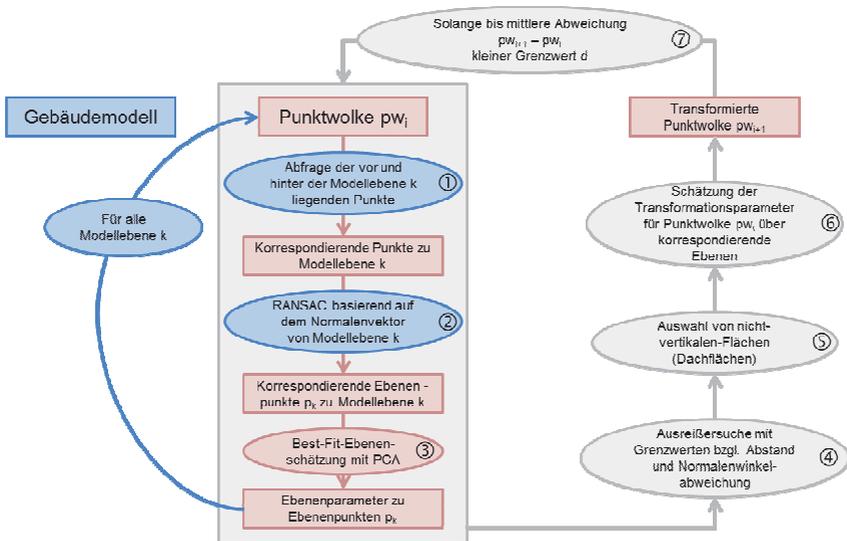


Abb. 1: Ablaufdiagramm zur Registrierung von Punktwolke und Gebäudemodell

Zunächst werden für jede Modellebene die Punkte ausgewählt, die in einem bestimmten Abstand a vor und hinter der Fassade liegen (1). Anschließend wird in diesen Punkten mit RANSAC die Ebene gesucht, die der Modellebene entspricht (2). Um hierbei in jedem Fall die zur Modellebene gehörende Ebene zu erhalten werden nur bestimmte Punkte als Samples (3 Punkte als Minimalkonfiguration einer Ebene) akzeptiert. Ist der Raumwinkel zwischen der Normalenrichtung aus der Ebene des Samples und der Normalenrichtung der Modellebene größer als ein Grenzwert γ (hier 15°) wird das Sample verworfen. Aus den resultierenden

Punkten (Inliers) werden mit Hilfe einer PCA (Hauptkomponentenanalyse) die Ebenenparameter geschätzt (3). Um bestmögliche Transformationsparameter zu erhalten, werden Ebenenpaare mit zu großen Abweichungen im Abstand der Schwerpunkte oder der Normalenrichtungen aussortiert (4). Um das oben beschriebene Problem bzgl. der Lage der Fassadenflächen zu umgehen werden nur Dachflächen berücksichtigt, d.h. vertikale Flächen werden ausgeschlossen (5). Die Schätzung der Transformationsparameter erfolgt dann über alle verbleibenden Ebenenpaare (6). Da die Punktwolke zu Beginn noch etwas zum Modell verschoben ist, kann nicht garantiert werden, dass alle zu einer Ebene gehörenden Punkte ausgewählt werden, wenn die Punkte vor und hinter der Modellebene verwendet werden. Aus diesem Grund wird der in Abb. 1 gezeigte Ablauf iterativ durchgeführt, solange bis die mittlere Abweichung zwischen den Koordinaten der Punktwolken vor und nach der Transformation einen Grenzwert d unterschreitet (7).

2.2 Fensterdetektion

Die Fensterdetektion beruht auf der Identifikation von im Gebäude liegenden Punkten (TUTTAS & STILLA, 2012). In dieser Arbeit wird die Detektion jedoch bezüglich einer vorgelagerten Ebenensegmentierung durchgeführt. Dabei ergab sich das Problem, dass in einem Ebenensegment Fassadenteile mit kleinem Versatz zusammengefügt sein können und somit leicht zurückliegende Teile komplett als innen liegende Punkte detektiert werden können. Da hier jedoch auf ein Gebäudemodell zurückgegriffen werden kann, sind alle Fassadenteile eindeutig getrennt. Deshalb beruht hier die Detektion der innen liegende Punkte nicht auf einem Schwellwert auf der Verteilung der Punkte, sondern es werden alle hinter der geschätzten Hauptebene liegenden Punkte verwendet. Die Hauptebene wird über eine Anpassung einer Ebene mit RANSAC bestimmt. Hieraus lässt sich auch erkennen, dass der Ansatz auf Gebäude bezogen ist, bei denen die Wandfläche gegenüber der Fensterfläche überwiegt. Im Falle einer Glasfassade ist es beispielsweise nicht möglich eine Hauptebene zu schätzen.

Eine weitere Neuerung bezüglich der oben genannten Veröffentlichung besteht darin, dass nun die innen liegenden Punkten nicht mit dem genäherten Einfallswinkel von 45° auf die Hauptebene projiziert werden, sondern der Strahl von Reflexionspunkt zu Sensorposition mit der Hauptebene geschnitten wird, um die Fensterposition auf dieser zu bestimmen.

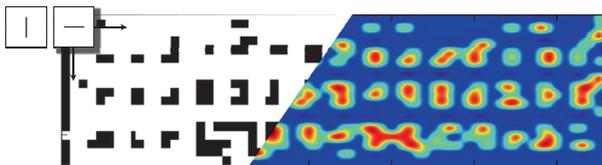


Abb. 2: Binärbild und Bild der Korrelationssumme aus vertikalem Linienmerkmal und Binärbild

Aus den detektierten Punkten wird ein Binärbild mit 1 m Auflösung erstellt, bei dem jedes Pixel den Eintrag 1 erhält wenn ein innen liegender Punkt vorliegt. Das Bild wird auf 10 cm Auflösung gesampelt und anschließend die Korrelationssumme, jeweils mit einem horizontalen und vertikalen Merkmal, gebildet (siehe Abb. 2). Dies dient der Glättung der Fensterinformation,

da je Fenster nur sehr wenige Punkte (ca. 1-10) detektiert werden. Die Länge der Linienmerkmale beträgt 2 m, der umgebende Bereich ist 4x4 m groß. Die Werte aus dem Bild der Korrelationssumme werden zeilen- und spaltenweise summiert und die Kombination aller Maxima als initiale Fensterpositionen verwendet.

2.3 Fensterrekonstruktion

Für die Fensterrekonstruktion wird der in TUTTAS & STILLA (2012) beschriebene Algorithmus verwendet. Die im vorherigen Abschnitt detektierten initialen Fensterpositionen werden als Startpunkte für die Schätzung eines Rechteckes verwendet. Aufgrund der Punktdichte von nur ca. 10 Punkte/m² ergeben sich bei diesem Vorgehen stark variierende Fenstergrößen, da die Fensterkanten durch die wenigen Punkte nicht eindeutig definiert sind. Deshalb wird die Unsicherheit in der Position jeder Fensterkante mit Hilfe einer Rayleigh-Verteilung modelliert, woraus dann eine endgültige Position geschätzt wird. Dazu werden die Funktionen zeilen- und spaltenweise aufsummiert. Das nächstliegende Maximum der resultierenden Funktion zur ursprünglichen Kante definiert dann die finalen Fensterumrisse. Hierbei soll genutzt werden, dass mehrere gleiche Fenster die Hypothese einer bestimmten Kante unterstützen, andersartigen Fenstern jedoch eine eigene Kante zugewiesen werden kann.

Da die Rekonstruktion auf den geschätzten Hauptfassaden aus der Punktwolke beruht, liegen die Fenster auch auf dieser Fassadenebene. Im letzten Schritt werden deshalb die Fenster auf die Ebene des Gebäudemodells projiziert. Dies geschieht entlang der Normalenrichtung der Ebene aus der Punktwolke.

3 Ergebnisse und Evaluierung

3.1 Koregistrierung

Die Eingangspunktwolke wurde mit dem Verfahren von HEBEL & STILLA (2009) erzeugt. Sie wurde aus Punktwolken von vier Überflügen, unter Verwendung des unter 2.1 genannten ebenenbasierten Verfahrens, zusammengesetzt.

Das Ergebnis der Koregistrierung ist in Abb. 3 für alle Punkte, die zu einer Modellebene zugeordnet worden sind, zu sehen. Die Koregistrierung erfolgte, leicht variierend je nach Iterationsschritt, jeweils über ca. 150 Dachflächen. Der Grenzwert d für den Abbruch der Iteration wurde auf 10 cm gesetzt, was zu 9 Durchläufen führte. Für den Abstand a für die Punktssuche vor und hinter der Modellebene wurde 5 m gewählt. Die Grenzwerte für die in Abb. 1 (Schritt 4) aufgeführte Ausreißersuche betragen 5 m für den Abstand und 25° für den Winkel zwischen den Normalen.

In Abb. 4 sind die Abstände des Schwerpunkts der Modellebene zur geschätzten Hauptfassade in der Punktwolke sowie die Winkel zwischen deren Normalenvektoren aufgezeigt. Die Abweichungen sind bei 90% der Fassaden unter 1 m bzw. 1°. Diese Werte spiegeln die Größenordnung wieder, wie gut Modell und Punktwolke übereinstimmen. Die sehr großen Werte bei den Schwerpunkten zeigen falsch erfasste Fassaden im Modell auf. Die Abweichungen machen es notwendig, die oben genannte Projektion der Fensterumrisse von Punktwolken- auf Modellebene durchzuführen.

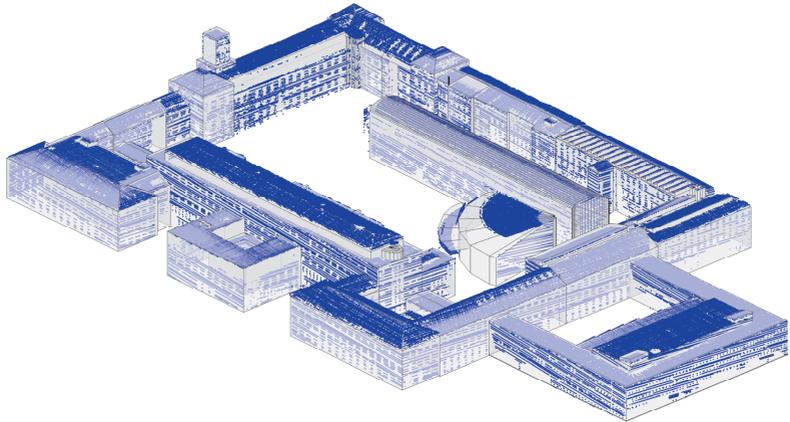


Abb. 3: Gebäudemodell und Punktwolke (nur den jeweiligen Modellebenen zugeordnete Punkte) nach der Koregistrierung

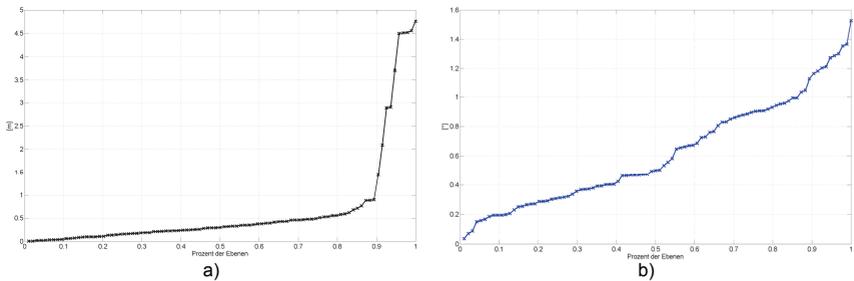
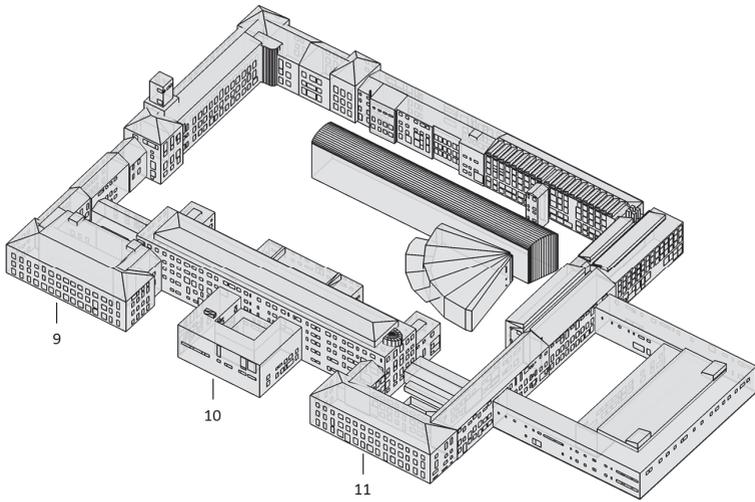


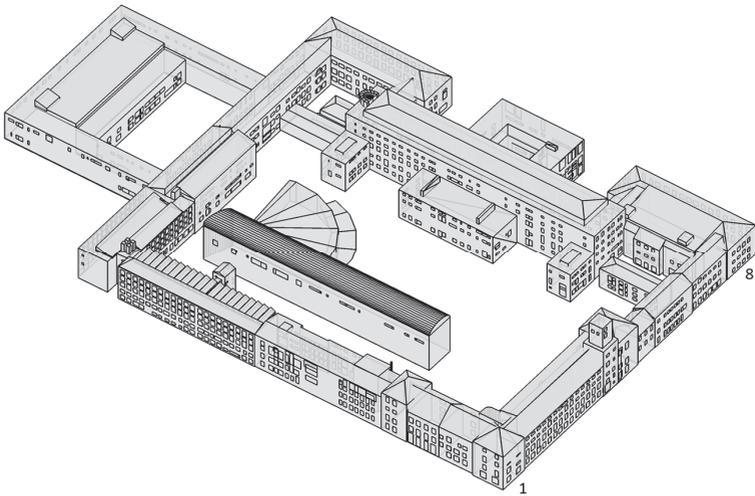
Abb. 4: Abstand des Schwerpunkts der Modellebene von der geschätzten Punktwolken-Ebene (a) sowie Winkel zwischen den Normalenvektoren beider Ebenen (b) von den 94 Ebenen für die Fenster berechnet wurden.

3.2 Fensterdetektion und -rekonstruktion

In Abb. 5 ist das Ergebnis der Fensterrekonstruktion für das gesamte Gebäudemodell zu sehen. Für die Bestimmung der Hauptfassadenebene wurde im RANSAC-Algorithmus ein Schwellwert von 10 cm für den Abstand eines Punkts von der Ebene verwendet.



a)



b)

Abb. 5: Darstellung des Gebäudemodells mit Fenstern, Blick von Nordosten (a) und Südwesten (b)

Eine quantitative Evaluierung wurde für die Außenfassaden im Süden und Osten der TUM durchgeführt. In Abb. 6 und Abb. 7 sind die rekonstruierten Fenster zusammen mit Texturen für die genannten Fassaden gezeigt. In Tab. 1 sind für die Fassadenteile die Detektionsraten angegeben. Für alle Fassaden konnte eine Detektionsrate von 65% bei 14% Fehldetektionen erreicht werden. Da die Fassade 10 deutlich von der Charakteristik der anderen Fassaden abweicht und die große Zahl an dicht beieinanderliegenden Fenstern die Statistik verzerren, wird auch die Detektionsrate von 78% bei 9% Fehldetektionen angegeben, die sich ohne Fassade 10 ergibt. In allen Fällen werden jedoch die sehr kleinen Fenster in der obersten Reihe bei Fassaden 8, 9 und 11 miteinbezogen, die die Detektionsrate von 75% erklären, wenn auch zunächst alle Fenster detektiert erscheinen.

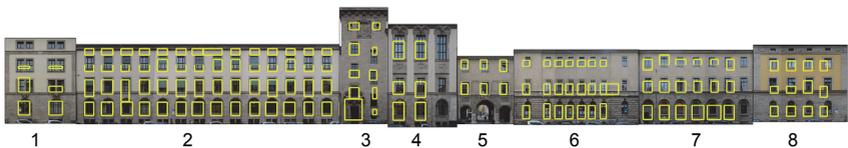


Abb. 6: Texturen und rekonstruierte Fenster für Fassadenteile 1 bis 8 (von links nach rechts)

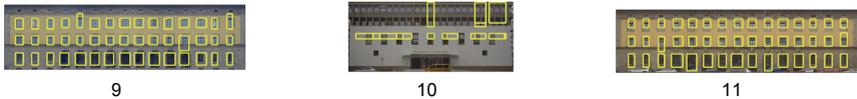


Abb. 7: Texturen und rekonstruierte Fenster für Fassadenteile 9 bis 11 (von links nach rechts)

Tab. 1: Detektionsraten (DR) und Falschalarmrate (FR) für die in Abb. 6 und Abb. 7 gezeigten Fassaden (GT= Ground Truth, D = Detektionen, TP = True Positives, FP = False Positives, FN = False Negatives)

												Σ	ohne 10
Nummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
GT	14	42	9	9	9	24	21	16	60	57	60	321	264
D	6	56	10	6	6	22	18	12	45	15	45	241	226
TP	2	42	9	6	6	21	18	12	45	2	45	208	206
FP	4	14	1	0	0	1	0	0	0	13	0	33	20
FN	12	0	0	3	3	3	3	4	15	55	15	113	58
DR	0.14	1.00	1.00	0.67	0.67	0.88	0.86	0.75	0.75	0.04	0.75	0.65	0.78
FR	0.67	0.25	0.10	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.87	0.00	0.14	0.09

Für die Fassaden aus Abb. 6 wurden die Referenzgrößen der Fenster aus photogrammetrischer Messung ermittelt. Dazu wurde ein Bündelblock aus Fassadenbildern gerechnet und anschließend Orthofotos der jeweiligen Fassaden berechnet. Die Messung der Fensterhöhe und

Fensterbreite erfolgte dann manuell in den Orthofotos. Zur Analyse wurden alle 116 korrekt detektierten Fenster der Fassaden 1 bis 8 herangezogen. Es werden nur die Abweichungen in der Fenstergröße und nicht die Positionsgenauigkeit betrachtet, da keine Koregistrierung von Textur und Punktwolke erfolgt ist. Der Betrag der Abweichung über alle Fenster ist in Abb. 8 für Höhe (a) und Breite (b) dargestellt. Der Mittelwert der Abweichungen beträgt 0.50 m für die Höhe und 0.41 m für die Breite.

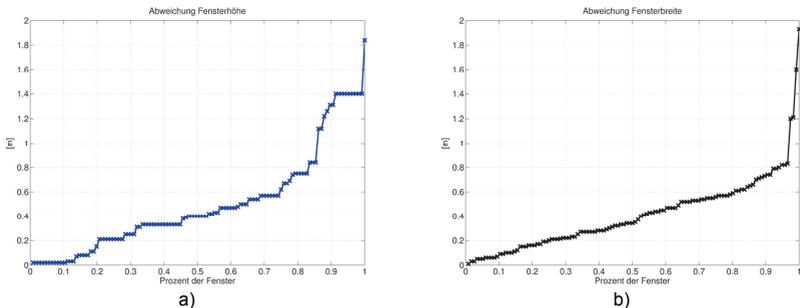


Abb. 8: Betrag der Abweichungen der Fensterhöhe (a) und der Fensterbreite für die in Abb. 6 gezeigten Fenster

4 Fazit und Ausblick

Der Artikel beschreibt einen Ansatz zur Anreicherung eines mit einer Schrägsicht-ALS Punktwolke koregistrierten Gebäudemodells mit Fenstern. Für eine Auswahl der Fassaden ist eine ausführliche Qualitätsanalyse durchgeführt worden. Wird eine Fassade mit stark irregulärer Anordnung nicht berücksichtigt erhält man eine Detektionsrate von 78%. Die Größenabweichung der Fenster zur Referenz variiert stark, von wenigen [cm] bis zu einem [m], was von der Anzahl der Fenster eines gleichen Typs sowie der lokalen Punktdichte beeinflusst wird.

Als zukünftige Aufgabe wird die Erkennung von gleichgearteten Fenstern angesehen, um diesen dann eine einheitliche Fenstergröße zuordnen zu können. Dies kann regelbasiert oder mit Hilfe von Texturinformationen erfolgen.

5 Danksagung

Wir bedanken uns bei Marcus Hebel (Fraunhofer IOSB) für die Bereitstellung der koregistrierten Punktwolke.

Die Arbeit wurde teilweise durch das DFG-Projekt STI 545/6-1 „Entwicklung eines automatisierten Verfahrens zur Baufortschrittskontrolle auf Basis der Integration von Punktwolkeninterpretation und 4D-Bauwerksmodellierung“ gefördert.

6 Literaturverzeichnis

- BECKER, S., 2009: Generation and application of rules for quality dependent façade reconstruction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **64** (6), S. 640-653.
- BOULAASSAL, H.; LANDES, T. & GRUSSENMEYER, P., 2011: 3D modelling of façade features on large sites acquired by vehicle based laser scanning. *Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing* edited by Polish Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 22: S. 215-226.
- LANDES, T.; BOULAASSAL, H. & GRUSSENMEYER, P., 2012: Quality Assessment Of Geometric Façade Models Reconstructed From TLS Data. *The Photogrammetric Record* **27** (138): S. 137-154.
- LEE, S.C. & NEVATIA, R., 2004: Extraction and integration of window in a 3D building model from ground view images. In: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2004)*, Washington, DC, USA, Vol. 2, S. 113-120.
- HEBEL, M. & STILLA U., 2009: Automatische Koregistrierung von ALS-Daten aus mehreren Schrägansichten städtischer Quartiere. *PFG Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, 2009 (3), S. 261-275.
- MESOLONGITIS, A. & STAMOS, I., 2012: Detection of windows in point clouds of urban scenes. *Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW)*, 2012 IEEE Computer Society Conference on, S. 17-24.
- PU, S. & VOSSELMAN, G., 2009: Knowledge based reconstruction of building models from terrestrial laser scanning data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **64** (6), S. 575-584.
- REZNIK S. & MAYER H., 2008: Implicit shape models, self-diagnosis, and model selection for 3D façade interpretation. *PFG Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, 2008 (3), S. 187-196.
- RIPPERDA, N. & BRENNER, C., 2009: Application of a Formal Grammar to Façade Reconstruction in Semiautomatic and Automatic Environments. *Proceedings of 12th AGILE Conference on GIScience*, Hannover, Germany, 2009.
- SCHMITTWILKEN, J. & PLÜMER, L., 2010: Model-based reconstruction and classification of façade parts in 3D point clouds. In: *Int. Archives Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, Sainte-Mandé, France, Vol. XXXVIII, Part 3A, S. 269-274.
- TUTTAS, S. & STILLA, U., 2012: Reconstruction of rectangular windows in multi-looking oblique view ALS data. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, I-3, S. 317-322.
- WANG, R., FERRIE, F. & MACFARLANE J., 2012: A Method for Detecting Windows from Mobile LiDAR Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **78** (11), S. 1129-1140.



Vorträge



33. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF

27. Februar – 1. März 2013
in Freiburg i. B.

Dreiländertagung D - A - CH