

Extraktion von senkrechten Fassadenebenen aus 3D-Punktwolken von Schrägluftbildern

MAGDALENA LINKIEWICZ¹

Zusammenfassung: In dieser Arbeit wird eine Methode zur automatischen Extraktion von Fassadenebenen von Gebäuden aus einer hochaufgelösten 3D-Punktwolke von Schrägluftbildern vorgestellt. Dabei werden Methoden der lokalen Regression in der 2D-Ebene verwendet. Aus der lokalen Regression werden die lokale Richtung der Punktwolke sowie ein Maß für die Linearität der lokalen Punktwolke bestimmt. Anhand dieser Daten wird die 3D-Punktwolke nach Fassadenzugehörigkeit zu segmentiert. Weitere Algorithmen erzeugen aus der segmentierten Punktwolke den Gebäudegrundriss als geschlossenen Polygonzug. Die verwendeten Algorithmen wurden in MatLab implementiert und für Gebäude mit unterschiedlicher Komplexität angewendet.

1 Einleitung

In der Abteilung Sensorkonzepte und Anwendungen in der Einrichtung Optische Informationssysteme des Instituts für Robotik und Mechatronik am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) wird seit dem Jahr 2009 das Modulare Luftbild-Kamerasystem MACS (Modular Airborne Camera System) entwickelt (LEHMANN ET AL. 2011) (Figure 1), welches in einer Ausführung Obliqueaufnahmen (Schrägbildaufnahmen) bereitstellt. Im Gegensatz zum herkömmlichen Ansatz von senkrecht montierten Kameras haben Obliqueaufnahmen den Vorteil, dass Fassaden gut sichtbar sind.

Das Ergebnis der Prozessierung der Obliqueaufnahmen des MACS-Systems ist unter anderem eine hochaufgelöste 3D-Punktwolke (50 Punkte/m² auf der Fassade). Diese Punktwolke soll als Grundlage für die Entwicklung von Methoden zur Erstellung von photogrammetrischen Produkten, wie zum Beispiel einem 3D-Stadmodell, das dem Bedarf der Anwender auf dem Markt entspricht und die aktuellen Standards von LoD3 erfüllt, dienen.

In der hier entwickelten Methode werden Algorithmen zur automatischen Extraktion der senkrechten Fassadenebenen von Gebäuden aus der 3D-Punktwolke von Schrägluftbildern entwickelt. Ziel ist:

- eine hohe geometrischen Genauigkeit von unter 0,5 m ,
- die Bestimmung der Lage und Höhe einzelner Fassaden,
- die Zusammenfassung von Fassaden eines Gebäudes zu dem semantischen Objekt Gebäude.

¹ Magdalena Linkiewicz, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Abteilung Sensorkonzepte und Anwendungen, Rutherfordstr. 2, 12489 Berlin.

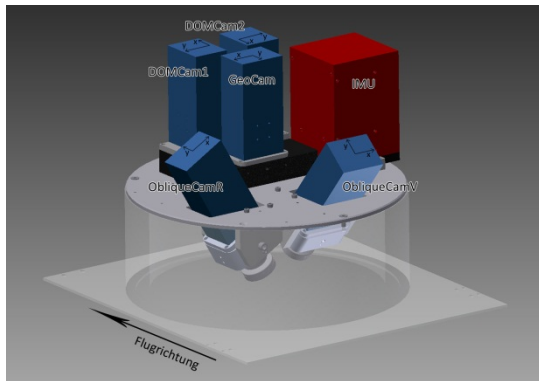


Figure 1: Aufbau des Kamerasystems MACS-Oblique. Quelle: DLR, Bearbeitung (KONECNY 2011).

2 Datengrundlage

Die Befliegung wurde alternierend mit einer Längsüberlappung von ca. 90% und einer Querüberlappung von ca. 50% durchgeführt. Diese Aufnahmekonstellation hat die Aufnahme von Luftbilddaten aus vier Perspektiven gewährleistet. Die Aerotriangulationen werden im Modul MATCH-AT der Software Inpho von Trimbel durchgeführt. Ein Oberflächenmodell wurde mit Hilfe des SGM-Algorithmus (Semi-Global Matching) erstellt (HIRSCHMÜLLER 2008, S. 328ff.).

3 Richtung und Maß für Linearität durch lokale Regression

In dieser Arbeit sollen die Fassadenebenen durch lineare Regression bestimmt werden. Die Überlegungen gehen dahin, die Punktwolke in kleine räumliche Bereiche aufzuteilen. Dieser Ansatz ist in der Literatur bekannt. Eine solche Methode der lokalen Regression haben beispielsweise Hoppe (HOPPE ET AL. 1992) und Mitra (MITRA ET AL. 2004) entwickelt. Bei Hoppe wird für jeden Punkt x_i aus einer Punktwolke eine Anzahl von k -nächstliegenden Punkten, als k -Nachbarschaft definiert. Für diese Punkte wird die Regression nach Pearson durchgeführt. Mitra entwickelt die Methode von Hoppe weiter, indem er optimale Werte für k findet. Die Methode zur Bestimmung der Fassadenebene soll nicht davon abhängen, in welchem Winkel eine Fassade im übergeordneten Koordinatensystem liegt. Wünschenswert ist eine Methode zur Bestimmung der Ausgleichsgerade, die vom Koordinatensystem unabhängig ist.

Zur Detektion der Fassadenrichtung werden die 3D-Punkte auf die zweidimensionale xy -Ebene projiziert. Die Ausgleichsgerade nach Pearson (PEARSON 1901) ergibt sich wie folgt.

Die Kovarianzmatrix für eine 2D-Punktwolke $p = \{p_i = (x_i, y_i) \in \mathbb{R}^2, i = 1, \dots, n\}$ ist eine 2x2-Matrix:

$$M_{\text{cov}}(p) := \begin{pmatrix} \text{cov}(x, x) & \text{cov}(x, y) \\ \text{cov}(x, y) & \text{cov}(y, y) \end{pmatrix}.$$

Der zum größten Eigenwert zugehörige Eigenvektor gibt die Richtung der Ausgleichsgerade an. Diese verläuft durch den Schwerpunkt der Punktwolke.

Die Quadratwurzeln der Eigenwerte entsprechen der Standardabweichung in Richtung des jeweiligen Eigenvektors. Das Verhältnis der kleineren zur größeren Standardabweichung ist ein Maß für die Linearität der Punktwolke:

$$\rho := \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}.$$

Es ist bekannt, dass das Rauschen einen negativen Einfluss auf die lineare Regression hat. Für die Extraktion von Fassadenrichtungen haben die Dach- und Bodenpunkte einen ähnlichen Einfluss wie Rauschen, da sie außerhalb der Fassade liegen.

Das Ziel der nachfolgend vorgestellten Filterung besteht darin, die Boden- und Dachpunkte, sowie alle weiteren unerwünschten Objekte aus der 3D-Punktwolke zu entfernen (Figure 2), so dass nur die Fassadenpunkte übrigbleiben. Dazu wird die Punktwolke in ein quadratisches Gitter in der xy-Ebene aufgeteilt. Für jede Zelle des Gitters werden diese mit den 8 benachbarten Zellen (3x3 Umgebung) zu einem sogenannten Fenster zusammengefasst. Einfache Überlegungen zeigen (LINKIEWICZ 2012), dass für Zellen, die Fassadenpunkte enthalten, ab einer bestimmten Fenstergröße, im Histogramm der z-Werte ein typisches Muster mit zwei deutlichen Maxima am unteren bzw. oberen Rand zu erwarten ist. Diese Maxima werden von den Boden bzw. Dachpunkten verursacht. Die Schwellenwerte zum lokalen Entfernen der Boden- und Dachpunkte ergeben sich durch den Wert der Histogrammklassen, die zu den Maxima benachbart sind. Weiterhin wird gefordert, dass der Abstand der Schwellenwerte einen Mindestbetrag überschreitet, um beispielsweise 3D-Punkte auf Vegetation zu entfernen. Diese Überlegungen gelten für Flachdächer, wie sie im Untersuchungsgebiet auftreten.

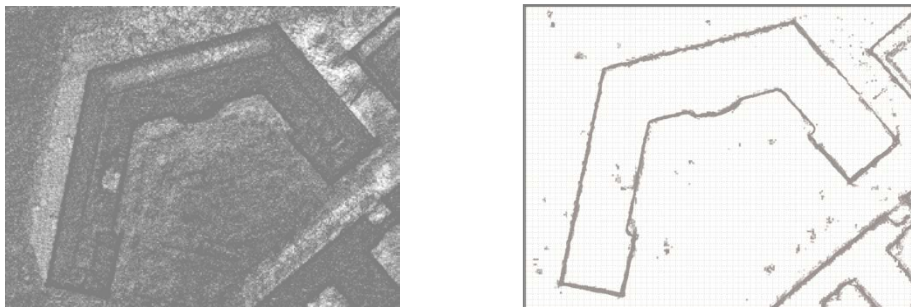


Figure 2: links: ursprüngliche 3D-Punktwolke; rechts: die 3D-Punktwolke nach dem z-Filter. Quelle: links: DLR, rechts: Eigene Abbildung in Matlab.

Für die Segmentierung nach Fassadenzugehörigkeit wird die gefilterte Punktwolke durch ein quadratisches Gitter in der xy-Ebene aufgeteilt. Für jede Zelle des Gitters ist das Regressionsfenster durch die 3x3-Umgebung der benachbarten Zellen definiert. Für jedes Regressionsfenster wird die Regression nach Pearson lokal durchgeführt und so die lokale Fassadenrichtung und das Maß für die Linearität ρ bestimmt.

Dies wird in Figure 3 an einem Ausschnitt aus dem Gebäude B4 dargestellt. Dieser zeichnet sich durch eine kurze Wand aus. Die Breite des Regressionsfensters beträgt hier 4,5m. Es werden die Ergebnisse der Regression mit nicht überlappenden Regressionsfenstern (links) und mit Verwendung der 3x3-Umgebung dargestellt (Mitte). Bei der Regression unter Verwendung einer 3x3-Umgebung überlappen sich die einzelnen Regressionsfenster und bedecken die Punktwolke dichter, als bei der Regression ohne überlappende Regressionsfenster. Die Überlappung der Regressionsfenster hat den Vorteil, dass Punkte, die in einem Regressionsfenster ungünstig liegen, beispielsweise wenn sich die Fassade nur zu einem kleinen Teil im Regressionsfenster

befindet, in einem benachbarten Regressionsfenster günstig liegen können. Dargestellt werden die Richtungen der Ausgleichsgerade, in Abhängigkeit vom Wert des Koeffizienten ρ im Intervall $[(0, 0.3) - \text{rot}, [0.3, 0.5] - \text{violett}, (0.5, 1] - \text{schwarz}]$. Weiterhin wird mit dünnen grauen Linien die Zuordnung der lokalen Ausgleichsgerade zur Zelle dargestellt. Im rechten Bild wurde die Regression mit 3x3-Umgebung durchgeführt, aber nur für Zellen mit einer Mindestanzahl von Punkten. Damit wird erreicht, dass die Regression nur berechnet wird, wenn die Punktwolke in etwa durch die Mitte der Zelle führt.

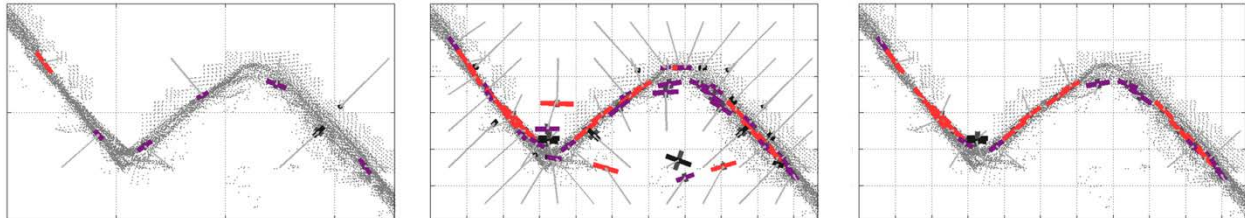


Figure 3: Einfluss der Verwendung der Umgebung auf die lokale Regression. links) nicht überlappende Regressionsfenster, Mitte) überlappende Regressionsfenster, rechts) reduzierte Anzahl von überlappenden Regressionsfenstern

Unter der Bedingung einer Mindestanzahl von Punkten werden die besten Ergebnisse erzielt. Am hier dargestellten Beispiel ist ersichtlich, dass das Regressionsfenster nicht zu groß gewählt werden darf, da sonst kürzere Fassaden nicht extrahiert werden. Es darf auch nicht zu klein gewählt werden, da sonst das Verhältnis der minimalen und maximalen Standardabweichung zu groß wird und die Fassadenrichtung nicht zuverlässig detektiert wird.

Die lokale Regression wird für im Folgenden unter Verwendung der 3x3-Umgebung als Regressionsfenster für alle Zellen mit einer Mindestanzahl von Punkten durchgeführt. Zellen bei denen der Quotient aus minimaler und maximaler Standardabweichung den Schwellenwert 0,3 unterschreitet, werden als Fassadenzellen bezeichnet. Zellen, die keine Fassadenzellen sind, sowie deren Punkte, werden für den weiteren Verlauf der Arbeit ignoriert. In Figure 4 sind lokalen Ausgleichsgeraden für das Gebäude B2 farbig dargestellt. Rot dargestellte Ausgleichsgeraden entsprechen Fassadenzellen. Es wird deutlich, dass fast der gesamte Gebäudeumriss von Fassadenzellen abgedeckt ist. Nur im Bereich der kurzen Fassade ist der Koeffizient ρ größer als 0,3.

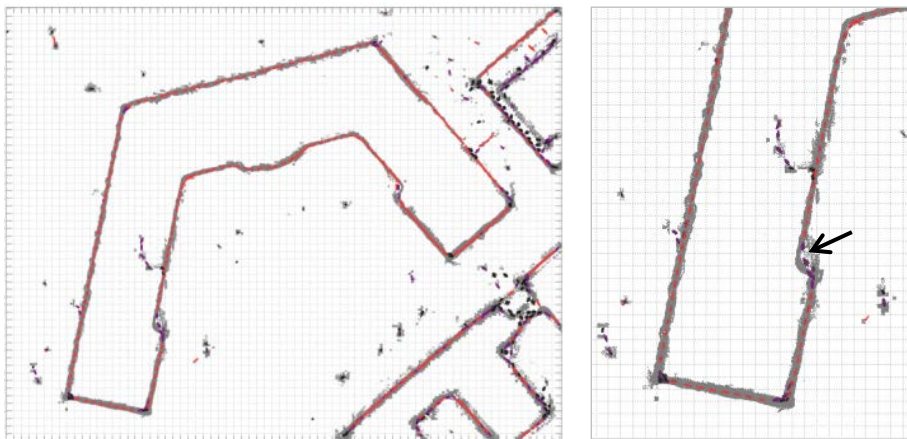


Figure 4: Ergebnisse der lokalen Regression für Gebäude B2. Pfeil markiert nicht detektierte Fassade.

4 Weitere Algorithmen

In diesem Kapitel wird ein mehrstufiger Ansatz beschrieben, um Fassaden als geschlossenen Polygonzug mit zusätzlichen Informationen über die untere und obere Fassadenkante zu extrahieren. Die Abfolge aller verwendeten Algorithmen werden am Beispiel des Gebäudes B2 illustriert (Figure 5). Der mehrstufige Ansatz umfasst folgende Schritte:

- Algorithmus A: Initialisierung von Gruppen von Fassadenzellen. Dabei wird eine Fassadenzelle einer Gruppe von Fassadenzellen hinzugefügt, wenn die Richtung der lokalen Ausgleichsgerade ähnlich der Richtung der Gruppe von Fassadenzellen liegt. Die Richtung der Gruppe von Fassadenzellen wird als Mittelwert der zuerst hinzugefügten Zellen dieser Gruppe bestimmt. Wenn es keine benachbarte Fassadenzelle gibt, wird eine neue Gruppe von Fassadenzellen erstellt.
- Algorithmus B: Zusammenfassen von Gruppen von Fassadenzellen. Wenn zwei Gruppen von Fassadenzellen benachbarte Zellen enthalten und die Richtungen der Gruppen von Fassadenzellen ähnlich sind, werden die Fassadenzellen der beiden Gruppen vereinigt.
- Algorithmus C: Regression pro Gruppe von Fassadenzellen.
- Algorithmus D: Bestimmung von Fassadenstrecken durch Berechnung von Anfangs- und Endpunkten der Ausgleichsgeraden pro Fassade. Dazu werden die Punkte der entsprechenden Fassadenzellen auf die Ausgleichsgerade projiziert. Die beiden äußersten Punkte definieren die Fassadenstrecke.
- Algorithmus E: Bestimmung von Nachbarschaftsbeziehungen zwischen Fassadenstrecken. Die Nachbarschaftsrelation verbindet das Ende einer Fassadenstrecke mit dem Ende einer anderen Fassadenstrecke. Dabei wird der minimale Abstand zu allen anderen Enden von Fassadenstrecken verwendet.
- Algorithmus F: Vereinigung von Fassadenstrecken. Benachbarte Fassadenstrecken mit ähnlicher Richtung werden vereinigt. Dabei bleiben die äußeren Enden der Fassadenstrecken erhalten. Die inneren werden gelöscht. Die Vereinigung wird nur durchgeführt, wenn der parallel gemessene Abstand der Geraden klein genug ist.
- Algorithmus G: Berechnung von Fassadenecken. Benachbarte Fassadenstrecken werden bis zu ihrem gemeinsamen Schnittpunkt verlängert, wenn ihr Schnittwinkel groß genug ist.
- Algorithmus H: Zusammenfassen von benachbarten Fassadenstrecken zu einem Gebäude. Durch die Nachbarschaftsrelation kann eine Schleife über alle benachbarten Fassadenstrecken durchgeführt werden. Ist die Schleife geschlossen, dann wird das Gebäude durch einen geschlossenen Polygonzug dargestellt. Ansonsten wird das Gebäude fehlerhaft durch einen offenen Polygonzug dargestellt.
- Algorithmus I: Berechnung der unteren und oberen Fassadenkanten. Dabei werden die z-Werte der Punkte der vollen 3D-Punktwolke mit einem maximalen Abstand von der Fassadenstrecke analysiert. Nach Abzug einer Quantile von z.B. 1% ergibt sich die Höhe der unteren und oberen Fassadenkanten. Die Höhe des Gebäudes wird als Median dieser Werte bestimmt.

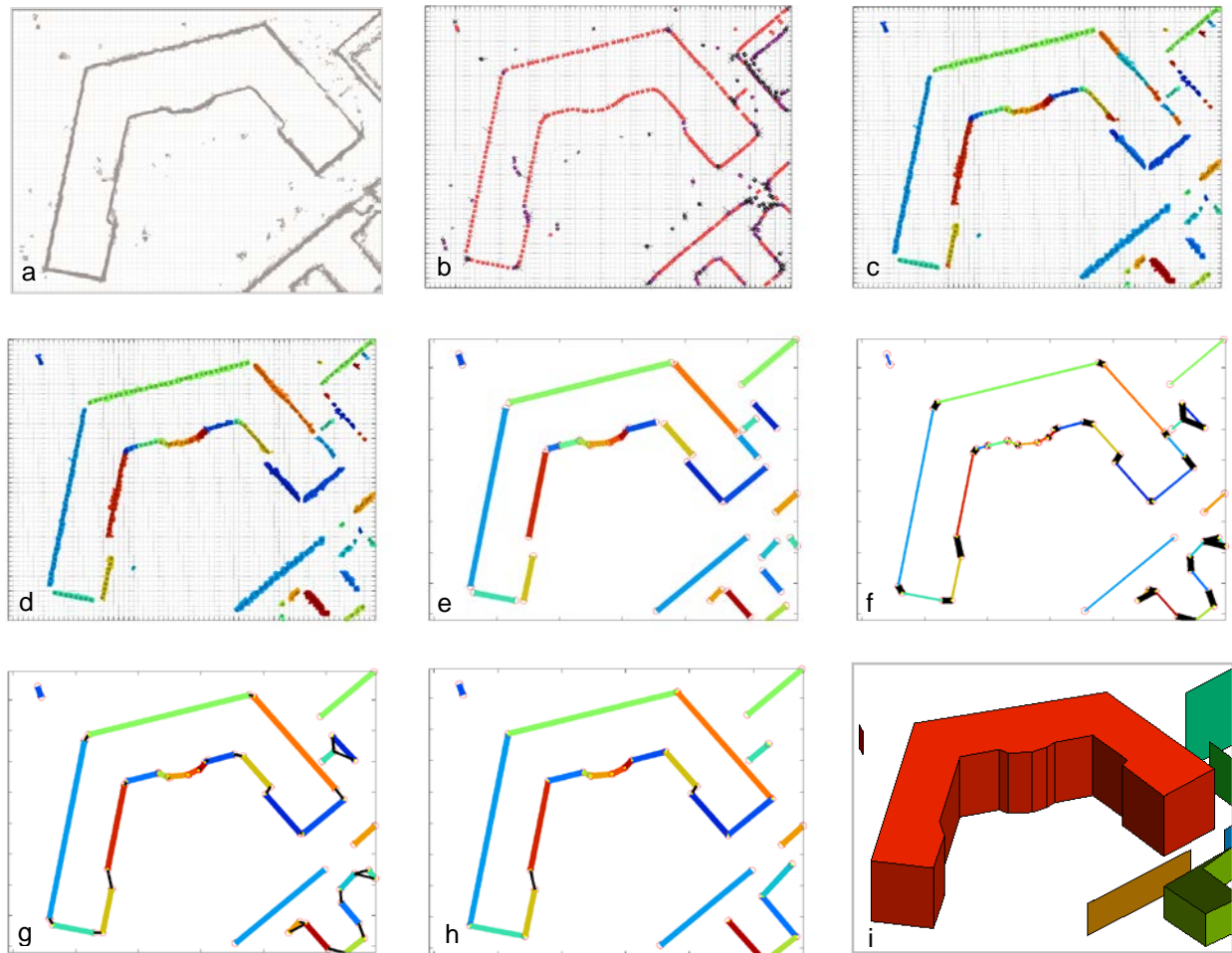


Figure 5: Folge von Algorithmen zur Fassadenextraktion, a) gefilterte Punktwolke, b) Richtungen aus lokaler Regression, c) Initialisierung von Gruppen von Fassadenzellen (Alg. A), d) Zusammenfassen von Gruppen von Fassadenzellen (Alg. B), e) Fassadenstrecken durch Regression (Alg. C,D), f) Nachbarschaftsbeziehungen (Alg. E), g) Vereinigung von Fassadenstrecken (Alg. F), h) Fassaden-ecken (Alg. G), i) Gebäude(Alg. H,I).

5 Ergebnisse

In den oben beschriebenen Algorithmen werden verschiedene Parameter verwendet. Deren Werte werden auf Grund der Untersuchungen an den Gebäuden B1, B2, B3 und B4 gewählt. Bei einer festen Kombination von voreingestellten Parametern werden bis auf fünf Fassaden alle Fassaden der vier getesteten Gebäude erkannt. Besonders gute Ergebnisse werden für Gebäude mit hohen Fassaden erzielt, die nicht durch Vegetation oder Anbauten verschattet werden. Problematisch sind kurzen Fassaden oder Fassaden, bei denen die Punktwolke durch Anbauten eine starke Abweichung von der Fassadenebene hat. Mit individuell angepassten Einstellungen konnten die fehlenden Fassaden (bis auf eine) erkannt werden. Die extrahierten Fassadenstrecken wurden anhand ihrer Koordinaten in ArcMap 10 digitalisiert. Ein Vergleich des Nadir-TrueOrthobildes mit den extrahierten Fassadenstrecken zeigt eine gute Übereinstimmung.

Im Gebäude B2 werden fast alle auf die xy-Ebene projizierten Fassadenebenen extrahiert (Figure 6). Eine Ausnahme stellen die zwei kurzen Fassaden dar, die als schwarze Strecken dargestellt werden. Die horizontale Länge dieser Fassaden beträgt 3m. Sie werden nicht extrahiert, da das



Figure 6: Ergebnisse für Gebäude B2.

Regressionsfenster eine Breite von 4,8m hat, was die Extraktion von Fassadenstrecken, die kürzer als 4,8m sind, verhindert. Trotzdem ist es hier, dank der Herstellung von Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den Fassadenstrecken gelungen, einen geschlossenen Polygonzug von Fassadenstrecken zu erstellen. Die Standardabweichung der Abstände der gefilterten Punkte zu den Fassadenstrecken betragen 0.19 – 0.31 m.

Bei Gebäude B1 wurden alle Fassaden detektiert (Figure 7). Die Breite der Fassade auf dem Nadir-TrueOrthobild beträgt 5 Pixel. Bei einer Bodenauflösung 0,15m und Berücksichtigung der diagonalen Lage ergibt sich eine absolute Breite von 0,85m. Die relative Lagegenauigkeit der extrahierten Fassade für das Gebäude B1 kann also mit mindestens 0,425m angegeben werden.

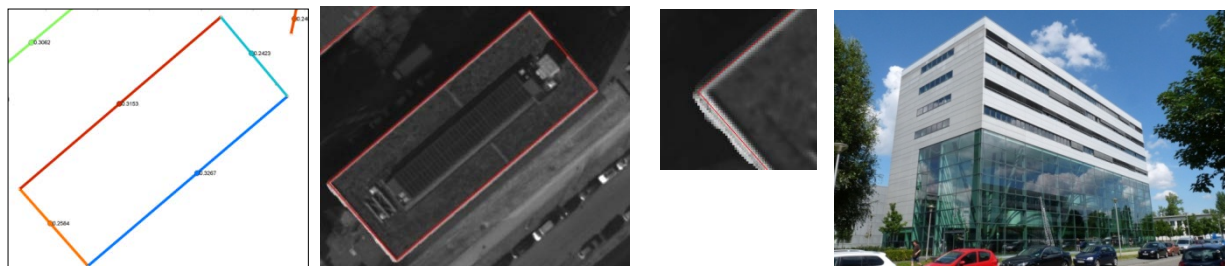


Figure 7: Ergebnisse für Gebäude B1.

Bei dem Gebäude B4 handelt es sich um einen Komplex von einem niedrigen und einem hohen Gebäude mit einem Verbindungsgang (Figure 8). Nicht extrahiert wurden niedrige und verdeckte Fassaden, sowie Fassaden mit Anbauten.

Zur Bewertung der Anwendbarkeit der entwickelten Algorithmen für praktische Berechnungen soll die Rechenzeit für ein Beispiel analysiert werden. Für das Gebäude B2 aus ca. 2.200.000 Punkten beträgt die Berechnungszeit 78 Sekunden. Die gefilterte Punktwolke enthält dabei ca. 330.000 Fassadenpunkte. Eine Analyse der Verteilung der Rechenzeit zeigt, dass diese hauptsächlich durch das Hinzufügen von Elementen zu Arrays verursacht werden. Die vergleichsweise hohe Rechenzeit beim Erweitern von Arrays ist eine Eigenschaft von MatLab. Die Berechnung der lokalen Regression und die Bestimmung der Fassadenstrecken als geschlossenes Polygon benötigen mit 5,3 Sekunden ca. 6% der Rechenzeit auf einer CPU.

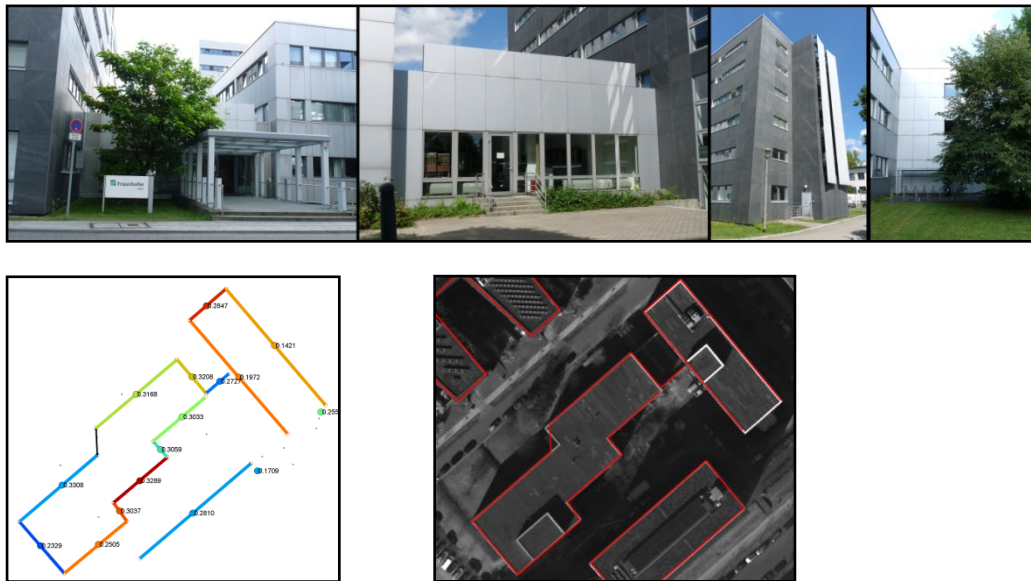


Figure 8: Ergebnisse für Gebäude B4. Nicht alle Fassaden wurden extrahiert.

6 Fazit

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass eine effiziente, vollautomatische Extraktion von Fassadenebenen durch lokale Regression für hochaufgelöste 3D-Punktwolken möglich ist. Allerdings hängt deren Qualität von der Komplexität der Gebäudegrundrisse und der Qualität der Punktwolke ab. Eine fehlerfreie Extraktion ist mit der in dieser Arbeit entwickelten Methodik nicht zu erwarten. Die entwickelte Methode wurde auf frei stehende Gebäude mit Flachdächern angewendet. Eine Anwendung in eng bebauten städtischen Gebieten steht aus.

Mit der entwickelten Methode werden sowohl planare senkrechte Fassaden, als auch gekrümmte senkrechte Fassaden, automatisch extrahiert. Letztere werden durch mehrere Fassadenebenen approximiert. Alle extrahierten Fassadenstrecken werden sortiert und als geschlossener Polygonzug exportiert. Als Ergebnis wird der Grundriss der Gebäude im zweidimensionalen Koordinatensystem erzeugt. Außerdem werden die absoluten Höhen der unteren und der oberen Fassadenkante eines jeden Gebäudes im dreidimensionalen Koordinatensystem bestimmt. Besonders gute Ergebnisse werden für Gebäude mit hohen Fassaden erzielt, die nicht durch Vegetation oder Anbauten verschattet werden. Problematisch sind kurze Fassaden oder Fassaden, bei denen die Punktwolke durch Anbauten eine starke Abweichung von der Fassadenebene hat.

7 Literaturverzeichnis

ESRI, 2011: ArcGIS Resource Center: Online: <http://help.arcgis.com/de/arcgisdesktop/10.0/help/> [Stand: 24.09.2012].

HIRSCHMÜLLER, H., 2008: Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Band 30, Nr. 2, 2008, S. 328-341.

HOPPE, H., DE ROSE, T., DUCHAMP, T., McDONALD, J. & STUETZLE, W., 1992: Surface Reconstruction from Unorganized Points: ACM SIGGRAPH 1992 Proceedings, S. 71-78, Online: <http://research.microsoft.com/en-us/um/people/hoppe/recon.pdf> [Stand: 29.08.2012].

INPHO GmbH, 2006: MATCH-AT 5.3 – Reference Manual: Stuttgart.

KONECNY, K., 2011: Evaluierung der Nutzbarkeit von Punktwolken aus Schrägluftbildern zur Kartierung von Grundrisselementen: Masterarbeit, Beuth Hochschule für Technik Berlin, Berlin.

LEHMANN, F., BERGER, R., BRAUCHLE, J., HEIN, D., MEISSNER, H., PLESS, S., STRACKENBROCK, B. & WIEDEN, A., 2011: MACS – Modular Airborne Camera System for generating photogrammetrichigh-resolution products: Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation. Nummer 6/2011, E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, S. 423-434.

LINKIEWICZ, M., 2012: Extraktion von senkrechten Fassadenebenen aus 3D-Punktwolken von Schrägluftbildern.- Masterarbeit, Beuth Hochschule für Technik Berlin, Berlin.

MITRA, N. & NGUYEN, A., 2004: Estimating Surface Normals in Noisy Point Cloud Data.- Special issue of Int. J. Computational Geometry and its Applications, Band 14 (4-5), S. 261-276, Online: <http://graphics.stanford.edu/projects/igl/papers/mn-esnnpcd-03/mn-esnnpcd-03.pdf> [Stand: 08.09.2012].

PEARSON, K., 1901: On lines and planes of closest fit to systems of points in space: Philosophical Magazine, S. 559-572, Online: <http://stat.smmu.edu.cn/history/pearson1901.pdf> [Stand 21.08.2012].

WIEDEN, A., 2012: Ableitung von Geoinformationen aus Schrägluftbildern. Ansätze zur Gebäuderekonstruktion: Masterarbeit, UNIGIS am Zentrum für GeoInformatik der Paris Lodron-Universität Salzburg, Salzburg.