

# Konzeption und geometrische Bewertung der flächenhaften Berechnung von Digitalen Oberflächenmodellen aus Luftbildern

MARIUS RÖDER<sup>1</sup>, ANNETT HEUSINGER<sup>2</sup> & ANSGAR BRUNN<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Das Land Bayern erstellt zurzeit einen flächendeckenden 3D-Gebäudebestand. Die Erfassung erfolgt aktuell aus Punktwolken des flugzeuggetragenen Laserscannings. Die Verwendung von Digitalen Oberflächenmodellen (DOM) aus photogrammetrischen Befliegungen wird zurzeit diskutiert. In diesem Beitrag wird daher die Generierung von digitalen Oberflächenmodellen aus Luftbilddaten der regelmäßigen Befliegung der Stadt Würzburg untersucht. Zum Einsatz kommt die Software „Erda Imagine 2014“, die den Semi-Global Matching Algorithmus (SGM) implementiert. Das Verfahren wird unter wirtschaftlichen, die erzielten Punktwolken unter geometrischen Aspekten beurteilt. Zur Bewertung der geometrischen Qualität der Ergebnisse werden die erzeugten Punktwolken mit LoD2-Daten der Bayerischen Vermessungsverwaltung überlagert und verglichen. Die Ergebnisse zeigen eine hohe geometrische Qualität in radiometrisch gut strukturierten Bereichen. Defizite sind in verschatteten Modellbereichen und teilweise in der Laufzeit der Berechnungen vorhanden.*

## 1 Motivation

„Die Zukunft ist dreidimensional“ – unter diesem Titel erschien ein Artikel in der Schriftenreihe des Deutschen Vereins für Vermessungswesen (DVW) im Februar 2014 (HÜMMER & ROSCHLAUB 2014). Darin wird auf die Initiative zum Aufbau eines landesweiten 3D-Gebäudebestands der Bayerischen Vermessungsverwaltung eingegangen. In Zukunft soll gar das komplette Liegenschaftskataster Bayerns dreidimensional geführt werden. Dabei spielt die Erstellung von Digitalen Oberflächenmodellen (DOM) aus Luftbildern eine wichtige Rolle. Daraus können Folgeprodukte wie 3D-Gebäudemodelle abgeleitet oder DGM partiell fortgeführt (KREY et al. 2016) werden. Dies mindert wiederum die Durchführung des kostenintensiveren (TILSNER 2012) flugzeuggetragenen Laserscannings (engl.: Airborne Laserscanning (ALS)). Aber nicht nur für die Bayerische Vermessungsverwaltung, sondern auch für Ingenieurbüros und Städte bzw. Kommunen werden die DOM aus Luftbildern als Planungsgrundlage immer wichtiger. Ohne die dreidimensionalen Geoinformationen eines DOM können beispielsweise bauliche Aspekte mit Höhenbezug (z. B. Lärmschutz, etc.) in kommunalen Planungen nur unzureichend behandelt werden (HÜMMER & ROSCHLAUB 2014). Nicht zuletzt deshalb soll in diesem Beitrag auf die Erstellung eines Konzepts zur Generierung von DOM aus Luftbildern am Beispiel Würzburg eingegangen werden und die Genauigkeit der DOM bewertet werden.

---

<sup>1</sup> Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt, Labor für Photogrammetrie & Laserscanning, Röntgenring 8, D-97070 Würzburg, E-Mail: marius.roeder@web.de, ansgar.brunn@fhws.de

<sup>2</sup> Stadt Würzburg, Tiefbauamt, Geodaten und Vermessung, Veitshöchheimer Straße 1, D-97080 Würzburg, E-Mail: annett.heusinger@stadt-wuerzburg.de

## 2 Digitale Oberflächenmodelle

Die in der Vergangenheit am meisten verwendete Methode, große Punktmengen der Erdoberfläche zur Erstellung von DOM zu erfassen, ist das ALS. Für diesen Beitrag ist das ALS insofern von Bedeutung, als dass die geometrische Bewertung der DOM aus Luftbildern durch einen Vergleich mit LoD2-Daten stattfindet. Diese wurden hauptsächlich aus ALS-Daten abgeleitet (LDBV 2015).

Eine weitere, häufig angewandte Methode, große Punktmengen von der Erdoberfläche zu erzeugen, ist die Punktgenerierung durch Bildkorrelation (KERSTEN et al. 2001). Die Erzeugung von DOM aus Luftbildern basiert im Wesentlichen auf dem Verfahren der Stereophotogrammetrie. Ausgangsdatensatz ist hier im Allgemeinen ein Verband von digitalen Luftbildern, der mit speziellen Luftbildkameras von einem Messflugzeug aus aufgenommen wurde (STOLZ 2013).

Eine wichtige Komponente der Bildkorrelation ist die Einbeziehung der Epipolargeometrie. Dadurch wird versucht, die zweidimensionale Korrelation in eine eindimensionale Korrelation zurückzuführen (KRAUS 2004). Die Begriffe Disparität und Disparitäts- bzw. Tiefenbild stehen in engem Zusammenhang zur Epipolargeometrie und sind für den später erläuterten SGM-Algorithmus von besonderer Bedeutung.

Die Identifikation von korrespondierenden Pixeln in zwei oder mehreren Bildern ist ein Zuordnungsproblem. Die Zuordnung vieler Millionen korrespondierender Pixel wird heute durch effiziente Bildkorrelationsverfahren ermöglicht. Jedes Stereobildpaar wird dabei zunächst in ein Ausgangsbild (Referenzbild) und ein Suchbild eingeteilt. Dann wird versucht, jedem Pixel des Ausgangsbildes das korrespondierende Pixel im Suchbild zuzuordnen. Die Zuordnung basiert auf der Berechnung eines Ähnlichkeitswertes. Daraus kann abgeleitet werden, wie ähnlich sich die beiden untersuchten Pixel sind (STOLZ 2013).

Für die Berechnung eines Ähnlichkeitswertes gibt es verschiedene Korrelationsstrategien. Die populärsten Zuordnungsverfahren sind die flächenbasierte Zuordnung (area-based matching) und die merkmalsbasierte Zuordnung (feature-based matching). Vor wenigen Jahren erfolgte dann ein maßgeblicher technischer Fortschritt mit der Zuordnung auf Basis globaler Kostenfunktionen. Dabei berechnet eine Kostenfunktion einen Kostenwert für ein einzelnes Pixel im Ausgangsbild und ein Pixel im Suchbild (pixelwise matching). Im Rahmen der Bachelorarbeit (RÖDER 2015) wurden die DOM für diesen Beitrag ausschließlich mit Semi Global Matching (SGM) berechnet - einem pixelbasierten Bildzuordnungsverfahren. Der SGM-Algorithmus wurde erst vor wenigen Jahren von Dr. Heiko Hirschmüller (HIRSCHMÜLLER 2008) entwickelt und ist heute schon in vielen kommerziellen Softwarepaketen implementiert. Der Grund für diesen Erfolg des SGM ist die effiziente Verbindung von dichter Punktkorrelation mit geringer Rechenzeit (STOLZ 2013). Dadurch ist er dem Facetten-Stereosehen (SCHLÜTER M. 1999) vorzuziehen.

Im ersten Schritt des SGM-Algorithmus werden die Matchingkosten mit „Mutual Information“ (MI) berechnet. MI gibt für jede Grauwertkombination die Stärke des statistischen Zusammenhangs an und ergibt sich aus der jeweiligen Entropie  $H$  (Informationsgehalt) der beiden Bilder und der gemeinsamen Entropie der Bilder. Ein Vorteil von MI besteht darin, dass radiometrische Transformationen möglich sind, während die lokale Abfolge der Grauwerte

erhalten bleibt (ARAND 2010). Die Matchingkosten  $C(p, D_p)$  für ein Pixel  $p$  und der Disparität  $D_p$  ergeben sich aus der negativen  $m_i$  (vgl. Formel (1)) (HIRSCHMÜLLER 2008).

$$C_{MI}(p, d) = -mi_{I_b, f_D(I_m)}(I_{bp}I_{mq}) \quad (1)$$

Sind für jedes Pixel die Matchingkosten berechnet, kommt es im zweiten Schritt zur Aggregation bzw. Anhäufung der Matchingkosten. Die pixelweisen Matchingkosten sowie die Glattheitsbedingung werden in eine vom Disparitätsbild abhängige Energiefunktion zusammengefasst (vgl. Formel (2)) (HIRSCHMÜLLER 2008).

$$E(D) = \sum_p \left( C(p, D_p) + \sum_{q \in N_p} P_1 T[|D_p - D_q| = 1] + \sum_{q \in N_p} P_2 T[|D_p - D_q| > 1] \right) \quad (2)$$

Das Hauptproblem besteht darin, das Disparitätsbild zu finden, welches die Energiefunktion minimiert. Die Energiefunktion ist global, d.h. sie müsste für alle möglichen Disparitäten eines jeden Pixels ausgewertet werden. Es würde folglich sehr lange dauern, das Disparitätsbild zu berechnen. Die entscheidende Innovation von Hirschmüller bestand darin, dies semiglobal durch verschiedene eindimensionale Pfade entlang verschiedener Richtungen vorzunehmen. Im dritten Schritt wird das Disparitätsbild berechnet, indem für jedes Pixel die Disparität mit den geringsten Summenkosten ausgewählt wird. Durch die bestimmte Disparität kann für jede Position im ersten Bild die Position im zweiten Bild berechnet werden. In einem weiteren Schritt kommt es noch zur Verfeinerung des Disparitätsbildes (HIRSCHMÜLLER 2008)

### 3 Konzept zur flächenhaften Berechnung von Digitalen Oberflächenmodellen

Die Erarbeitung eines Konzepts zur flächenhaften Berechnung von DOM ist neben der geometrischen Bewertung der Ergebnis-Punktwolke das Hauptthema dieses Beitrags. Bei der verwendeten Software handelt es sich um „Erdas Imagine 2014“ mit dem Produkt „Imagine Photogrammetry“ und dem darin enthaltenen Tool zur Punktwolkenberechnung „SGM“. Es sollen qualitativ bestmögliche Ergebnisse unter Beachtung wirtschaftlicher Aspekte erzielt werden. Zu den wirtschaftlichen Aspekten zählt vor allem die reibungslose Berechnung der Punktwolken. Fehlermeldungen während des Workflows sollen vermieden werden. Dadurch können Zeit und Aufwand für die Prozesse minimiert werden. Für Unternehmen und Verwaltungen bedeutet dies auch gleichzeitig die Einsparung von Kosten. Als Datenbasis dienen die Luftbilder der Befliegung des Stadtgebietes Würzburg aus dem Jahr 2012, welche von der Stadt Würzburg in Auftrag gegeben wurde. Zum Zeitpunkt der Befliegung trugen die Bäume noch kein Laub, so dass dadurch entstehende Störeffekte vermieden wurden. Tabelle 1 zeigt die Parameter des Bildflugs.

Tab. 1: Parameter des Bildflugs

<b>Bodenauflösung</b>	5 cm
<b>Längs- und Querüberlappung</b>	60 %
<b>Abmessungen Luftbild</b>	12096 x 11200 Pixel (605 x 560 m)
<b>Anzahl der verwendeten Luftbilder</b>	49 (7 Bilder in jedem der 7 Flugstreifen)

Zur dreidimensionalen Generierung von Punktwolken müssen die Luftbilder orientiert werden (Bestimmung der äußeren Orientierung). Dazu wurde ebenfalls das Programm „Imagine Photogrammetry“ der Software „Erdas Imagine 2014“ verwendet (RÖDER 2014).

Zu Beginn der Untersuchungen wurden die DOM mit den Standardeinstellungen der Software berechnet. Bei Verwendung der Standardeinstellungen kam es jedoch häufig zu Fehlermeldungen und zum Abbruch der Prozesse. Zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit war es notwendig, die Standardeinstellungen im Laufe der Berechnungen Schritt für Schritt zu variieren und dadurch die Ergebnisse zu optimieren. Dadurch soll ein reibungsloser Ablauf der Berechnungen möglich sein.

Der in der Software enthaltene Parameter „Urban Processing“ erwies sich als der entscheidende Faktor bei den Berechnungen der DOM aus Luftbildern mit dem „SGM“-Tool. Ist der Parameter aktiv, kommt es häufig zu Prozessabstürzen. Bei aktiviertem „Urban Processing“ werden die Einstellungen für die Korrelation in Stadtgebieten optimiert. Welche Parameter im Algorithmus genau verändert werden, lässt sich aus der Online Hilfe der Software nicht ableiten (SGM 2014). Bei aktivem „Urban Processing“ ist scheinbar eine ausreichend vielfältige Textur bis zum Rand der Stereomodelle notwendig. Aus dieser Erkenntnis lässt sich Folgendes ableiten: sind in Überlappungsbereichen zweier Luftbilder Gebiete vorhanden, die keine vielfältige Textur aufweisen, so ist die Gefahr hoch, dass die Berechnung fehlschlägt. Solche Bereiche ohne vielfältige Textur können z.B. Schattenbereiche neben hohen Gebäuden sein. Im Innenstadtbereich Würzburgs kann dies v.a. in der Nähe von Kirchen auftreten (vgl. Kapitel 4). Durch „Urban Processing“ werden in Bereichen ohne ausreichend vielfältige Textur sehr leicht Ausreißer produziert. Durch diese Ausreißer kommt es im Prozess wiederum zu Fehlermeldungen und Prozessabstürzen, da in der Software festgelegte Grenzwerte überschritten werden.

Leider ist es mit der Software nicht möglich, pauschal die Überlappungsbereiche herauszufiltern, bei denen es zu einem Absturz mit aktiviertem „Urban Processing“ kommen könnte. Somit ergeben sich für den Anwender drei mögliche Vorgehensweisen:

- 1. Variante: Die Punktwolken werden ohne aktiviertes „Urban Processing“ berechnet und somit auf qualitative Verbesserungen im Stadtbereich verzichtet.
- 2. Variante: Der Benutzer aktiviert den Parameter „Urban Processing“ und geht somit das Risiko ein, dass es zu Fehlermeldungen und zum Abbruch des Batch-Prozesses kommt. Anschließend müssen die fehlerhaften Prozesse nochmals ohne aktiviertes „Urban Processing“ durchgeführt werden.
- 3. Variante: Aufteilung der Projekte in separate Bereiche (für großflächige texturarme Gebiete)

Die Qualität der Punktwolken ohne aktives „Urban Processing“ stellt sich als nicht wesentlich schlechter als die der Punktwolken mit aktiviertem „Urban Processing“ heraus. Gerade bei großen Gebieten ist es daher wirtschaftlicher, die Punktwolken ohne „Urban Processing“ zu berechnen. Mit aktivem Parameter müsste der Anwender zunächst alle Überlappungsbereiche berechnen lassen und die fehlerhaften Überlappungsbereiche notieren. Die Fehlermeldung während eines Batch-Prozesses muss vom Nutzer selbst geschlossen werden, damit der nächste Teilprozess ausgeführt werden kann. Dadurch ist es auch nicht möglich, die Prozesse z.B. über Nacht vom Anwender unbeobachtet berechnen zu lassen. Dies bedeutet wiederum eine erhebliche Steigerung des Zeitaufwands. Der Zeitgewinn bei deaktiviertem „Urban Processing“ soll mit konkreten Zahlen wiedergegeben werden: wird für die Berechnung eines Überlappungsbereiches eine Zeit von 30 Minuten angesetzt, so würde sich - bei reibungslosem Verlauf der Berechnungen ohne Fehlermeldungen (d.h. „Urban Processing“ deaktiviert) - eine Berechnungszeit von ca. 50 Stunden für den orientierten Luftbildverband ergeben (RÖDER 2015). Bei aktiviertem „Urban Processing“ zogen sich die Berechnungen jedoch über mehrere Wochen hin. Aus rein wirtschaftlicher Sicht ist also die Deaktivierung von „Urban Processing“ definitiv zu empfehlen.

#### **4 Geometrische Bewertung der Ergebnisse**

Um die erzeugten Punktwolken geometrisch bewerten zu können, d.h. ihre Qualität und Genauigkeit zu bestimmen, bedarf es Vergleichsdaten. Dazu werden LoD2-Daten der Bayerischen Vermessungsverwaltung verwendet. Die Lagegenauigkeit der LoD2-Modelle entspricht der Genauigkeit der zugrundeliegenden Gebäudegrundrisse aus der digitalen Flurkarte. Da Standarddachformen verwendet werden, entspricht die Höhengenaugigkeit der Dachpunkte ca. 1 m, bei Einzelfällen und komplexen Dachformen kann diese auch größer sein (LDBV 2015). Zunächst werden die Punktwolken ohne Einbeziehung der Vergleichsdaten hinsichtlich ihrer Geometrie bewertet. Dazu werden alle erzeugten Punktwolken gemeinsam in einer Gesamtpunktwolke betrachtet. Am Rand der Ergebnis-Punktwolke ist die Punktdichte deutlich geringer als im Zentrum. Grund hierfür ist das Fehlen von Überlappungsbereichen unterschiedlicher Flugstreifen in den Randgebieten. Außerdem klaffen im Bereich des Flusses (Main) große Datenlücken. Hier werden wenige Punkte zugeordnet, da der SGM-Algorithmus eine ausreichend vielfältige Textur benötigt. Im Bereich von Flüssen ist die jedoch - ähnlich wie in Schattenbereichen - nicht der Fall. Im Bereich des Würzburger Ringparks existieren ebenfalls Datenlücken. Hier liegt durch die Bäume und deren Schatten ebenfalls eine nicht ausreichende Textur vor. Außerdem treten durch die Vegetation Verdeckungen auf, die es dem SGM-Algorithmus schwer machen, identische Punkte zu finden. Die Bewegung der Bäume im Wind erschwert ebenfalls die Identifikation korrespondierender Pixel in mehreren Bildern. Der Innenstadtbereich in der Mitte des Luftbildverbandes wurde mit einer hohen Punktdichte generiert.

Es soll auf einige Gebiete in der Ergebnis-Punktwolke speziell eingegangen werden. Der erste Detailausschnitt beinhaltet enge Bebauung mit großen Gebäudehöhen im Innenstadtbereich (vgl. Abb. 1).



Abb. 1: Punktwolke im Innenstadtbereich (Datenlücken: gelb)

V.a. im Schatten hoher Gebäude (Kirchen) treten hier Punktlücken auf (rote Ellipsen). Dies liegt zum einen an der nicht ausreichenden Texturierung im Schattenbereich und zum anderen an den Verdeckungen von identischen Punkten in den Luftbildern. Ähnlich verhält es sich in den engen Straßen im Innenstadtbereich. Besonders deutlich werden die Punktlücken bei der Vermaschung als 3D-Objekte mit der Software „Erdas Imagine“. Auf der südlichen, sonnenbeschienenen Seite der Gebäude ist eine sehr feine Vermaschungsstruktur zu erkennen, während in auf der schattigen Nordseite und in den senkrecht zur Flugrichtung verlaufenden Gassen eine grobe Struktur mit vielen Ausreißern zu erkennen ist. Im zweiten Gebiet wechseln sich bebaute Areale und Vegetationsflächen ab. Auch hier klaffen teilweise große Punktlücken. Die Gründe für die Datenlücken in Vegetationsgebieten wurden bereits genannt (s.o.). Wird die Punktwolke in diesem Gebiet vermascht, ist die eindeutige Trennung von Gebäude und Vegetation nicht mehr eindeutig erkennbar. Im dritten Bereich wird ein Gebiet mit weiträumiger Bebauung (Wohngebiet) und moderater Gebäudehöhe am Rande des Luftbildverbandes betrachtet (vgl. Abb. 2).



Abb. 2: Detailausschnitt der Punktwolke am Rand des Luftbildverbandes (Datenlücken: gelb)

Dort klaffen an den Gebäudeseiten, die in Richtung des Randes des Luftbildverbandes zeigen, Punktlücken (rote Ellipsen). Auf den gegenüberliegenden, in die Mitte des Luftbildverbandes gerichteten Seiten der Häuser werden Punkte bis an den Gebäudegrundriss berechnet (blaue Ellipsen). In der 3D-Vermaschung dieser Gebäude sind demnach auf der einen Seite gerade, auf der anderen Seite schräge Hauswände zu erkennen. Bei der flächenhaften Berechnung von DOM aus Luftbildern ist es demnach auch wichtig, vor der Berechnung genau zu definieren, von welchem Bereich eine lückenlose Punktwolke erstellt werden soll. Die Luftbilder, die für die Berechnung anschließend herangezogen werden, sollten das Gebiet dementsprechend großräumig abdecken. Dadurch werden solche Punktlücken, wie sie bei den angesprochenen Gebäuden vorkommen, vermieden.

Zusammenfassend für die Bewertung der Geometrie ohne Vergleichsdaten kann festgehalten werden, dass die Punktwolken insgesamt eine sehr gute Qualität aufweisen. Gerade durch die Berechnung von Überlappungsbereichen unterschiedlicher Flugstreifen wird eine hohe Punktdichte gewährleistet. Lediglich in den Randbereichen des Luftbildverbandes treten häufiger Punktlücken auf. Hier ist auch die Punktdichte geringer, da die Überlappungsbereiche unterschiedlicher Flugstreifen fehlen. Im Innenstadtbereich werden gerade auf den Dächern sehr viele Punkte zugeordnet. Auch an einigen Hausfassaden, die in zwei Luftbildern abgebildet sind, werden viele Punkte generiert (vgl. Profil in Abb. 3). Zu beachten ist außerdem, dass es gerade bei hohen Gebäuden (Kirchen), in engen Gassen, in Vegetationsgebieten und im Flussgebiet zu Punktlücken kommen kann.



Abb. 3: Ausschnitt eines Querprofils einer Punktwolke im Innenstadtbereich

Nach der Analyse der Punktwolkenqualität kann der Vergleich mit den LoD2-Daten stattfinden. Die LoD2-Daten sollen mit den Punktwolken in einer 2D-Szene überlagert werden, um herauszufinden, wie gut die Grundrisse des DOM zu denen der LoD2-Daten passen. Stichprobenartig sollen hier auch Maße abgegriffen werden, um die Differenzen zwischen LoD2-Daten und Punktwolken quantitativ darzustellen.

Es fällt auf, dass bei vielen Gebäuden der Grundriss gut zu den LoD2-Daten passt. Vor allem bei freistehenden Gebäuden ohne Dachüberhang ist dies der Fall (vgl. Abb. 4).

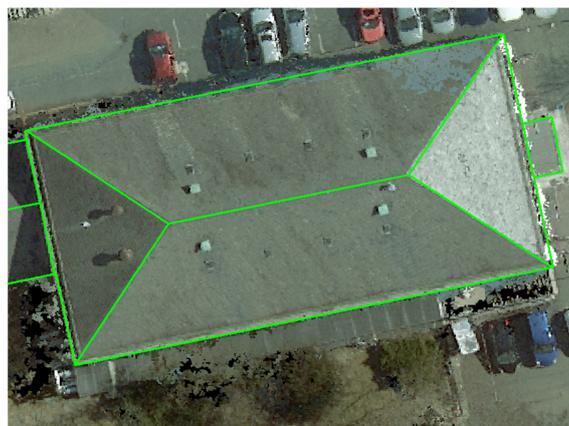


Abb. 4: Überlagerung der Punktwolke und der LoD2-Daten (grün)

Bei Gebäuden, die sich in unmittelbarer Nähe von hohen Bäumen oder anderer Vegetation befinden, kann in der Punktwolke nicht eindeutig nachgewiesen werden wie der Grundriss der Gebäude verläuft. Hier kommt es zu einer regelrechten „Verschmelzung“ von Gebäude und Vegetation. Auch bei sehr enger Bebauung im Innenstadtbereich treten zwischen den Gebäuden (v.a. in engen Gassen) häufig Ausreißer auf, wodurch der Grundriss der Gebäude nicht nachvollzogen werden kann. Abbildung 5 zeigt solch ein Gebiet. Am oberen und unteren Bildrand sind zwei Gebäudeblöcke und in der Mitte der Abbildung eine dazwischen liegende enge Straße zu erkennen.

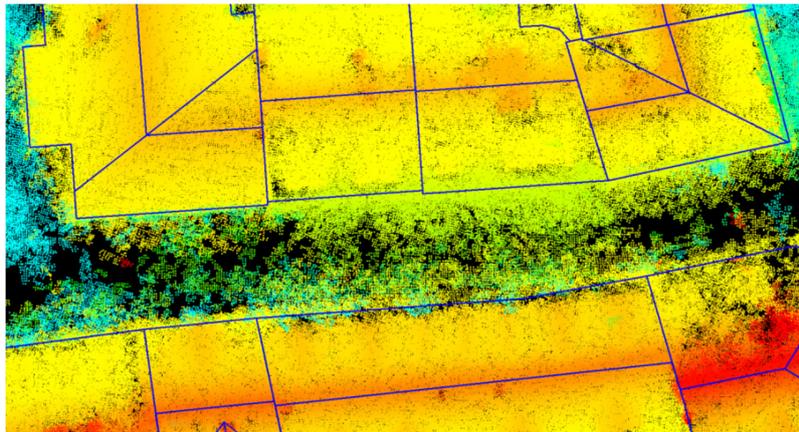


Abb. 5: Vergleich Punktwolke - LoD2-Daten (nach Höhe koloriert)

Im Bereich der Straße fällt auf, dass die Punkte ungefähr dasselbe Höhenniveau aufweisen wie die Dächer (gelbe Punkte). Eigentlich müssten hier die Punkte in der Gasse blau koloriert sein, da sie sich auf dem Höhenniveau der Straße befinden. Der Grundriss der Gebäude ist in der Punktwolke nicht genau erkennbar. Zumal wirkt es so, als seien die beiden Gebäudeblöcke miteinander „verschmolzen“.

In Abbildung 6 ist ein Gebäude in der Innenstadt (enge Bebauung) zu sehen, bei dem die Traufpunkte um ca. 80 cm und der Firstpunkt um ca. 150 cm lagemäßig gegenüber den LoD2-Daten verschoben sind. Die Differenzen wurden mit roten Pfeilen markiert.



Abb. 6: Vergleich Punktwolke – LoD2 Daten

Die durch Bildkorrelation erzeugte Punktwolke gibt in Bezug auf die Dachform wesentlich mehr Details wieder. Die LoD2-Daten stellen nur Standarddachformen dar. So wurde der Giebel links oben im Bild bei den LoD2-Daten erst gar nicht erfasst, sondern nur ein simplifiziertes Walmdach erzeugt. Ähnliche Vereinfachungen wurden bei der Erstellung der Dachformen durch die ALS-Messung bei den meisten Gebäuden im Stadtbereich durchgeführt.

Bei vielen Gebäuden passt der Grundriss gut zu den LoD2-Daten. V.a. bei freistehenden Gebäuden ohne Dachüberhang ist dies der Fall. Gebäude, die sich in unmittelbarer Nähe zu Vegetation oder anderer Bebauung befinden, zeigen das Gegenteil. In Bezug auf die Erstellung von LoD2-Daten/3D-Stadtmodellen ist die Berechnung von DOM aus Bildkorrelation durchaus mit dem ALS-Verfahren gleichzusetzen. Aufgrund der Tatsache, dass bei der Berechnung von DOM aus Bildkorrelation gleichzeitig radiometrische Informationen in den Punktwolken enthalten sind, ist diese Vorgehensweise dem ALS sogar vorzuziehen.

## 5 Fazit

Das gesamte Liegenschaftskataster der Bayerischen Vermessungsverwaltung soll in naher Zukunft dreidimensional geführt werden. Dazu müssen zwangsläufig flächendeckend von ganz Bayern dreidimensionale, zeitlich aktuelle Geoinformationen zur Verfügung stehen. Konventionell wurde dazu das teure ALS-Verfahren verwendet. Dieser Beitrag zeigt jedoch, dass sich für die flächenhafte Gewinnung von Punktwolken der Erdoberfläche die kostengünstigere Berechnung von DOM durch Bildkorrelation ebenfalls sehr gut eignet. Mit dem Konzept steht eine ausführliche Beschreibung der Erstellung von DOM mit der Software „Erda Imagine 2014“ zur Verfügung (RÖDER 2015). In Zukunft sollte der SGM-Algorithmus der Software in Bezug auf den Parameter „Urban Processing“ überarbeitet werden, damit ein reibungsloser Workflow nicht gestört wird. Die Einbeziehung von Überlappungsbereichen unterschiedlicher Flugstreifen in die Berechnungen ist unumgänglich. Durch den SGM-Algorithmus kann eine sehr dichte, detailreiche Punktwolke erzeugt werden. Jedoch waren auch in den Ergebnis-Punktwolken dieser Arbeit die für die Bildkorrelation typischen Probleme zu erkennen (z. B. wenige Punkte in Schatten- und Vegetationsarealen). Im Vergleich mit den LoD2-Daten der Bayerischen Vermessungsverwaltung passt gerade bei freistehenden Gebäuden ohne Dachüberhang der Grundriss aus der Punktwolke sehr gut zu den LoD2-Daten.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass in der Berechnung von DOM durch Bildkorrelationsverfahren ein enormes Potenzial steckt. Sollen flächendeckend für ein großes Gebiet Geoinformationen erfasst werden, so ist dieses Verfahren eine kostengünstige und gleichzeitig effektive Variante der Datenbeschaffung. Zur weiteren Optimierung des DOMs sollen bei zukünftigen Befliegungen die Längs- und Querüberlappung erhöht werden. Eine Anpassung der Flugplanung an die Hauptausrichtungen des Straßensystems wäre optimal für dichte Punktwolken in den Straßen und auf den Fassaden.

## 6 Literaturverzeichnis

- ARAND, S., 2010: Genauigkeitsuntersuchung von digitalen Oberflächenmodellen aus Bildzuordnungsverfahren in Stadtgebieten. Bachelorarbeit, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Leibniz Universität Hannover.
- HIRSCHMÜLLER, H., 2008: Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, **30** (2), 328-341.
- HÜMMER, F. & ROSCHLAUB, R., 2014: Die Zukunft ist dreidimensional - 3D Gebäudemodelle in Bayern. Mitteilungen des DVW-Bayern, Februar.
- KERSTEN, T., O'SULLIVAN, W. & ZANINI, M., 2001: DOM/10 und DOM/2.5 – Digitale Oberflächenmodelle durch Bildkorrelation. VPK – Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, (2), 60-66.
- KRAUS, K., 2004: Photogrammetrie Band 1 - Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen, de Gruyter Verlag, Berlin.
- KREY, T., MÄRKL, P., MÖST, K. & ROSCHLAUB, R., 2016: Partielle Fortführung eines Digitalen Geländemodells aus Laserscanning mittels bildbasierter Digitaler Oberflächenmodelle. Mitteilungen des DVW-Bayern, Januar.
- LDBV, 2015: Kundeninformation LoD2. Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung Bayern, November.
- RÖDER, M., 2014: Erstellung von Digitalen Oberflächenmodellen aus Luftbildern im Innenstadtbereich. Projektarbeit, Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt, September.
- RÖDER, M., 2015: Konzeption und geometrische Bewertung der flächenhaften Berechnung von Digitalen Oberflächenmodellen aus Luftbildern. Bachelorthesis, Hochschule für angewandte Wissenschaften Würzburg-Schweinfurt, März.
- SCHLÜTER, M., 1999: Photogrammetrische Oberflächenrekonstruktion durch Mehrbildzuordnung mit dem Facetten-Stereosehen. Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie **4**, 7-21
- SGM, 2014: Intergraph: SGM Online-Hilfe.
- STOLZ, M., 2013: Digitale Oberflächenmodelle aus Bildkorrelation. Mitteilungen des DVW-Bayern, Februar.
- TILSNER, A., 2012: 3D-Messdaten. Informationsveranstaltung „3D-Geobasisinformation – die Produkte des LGLN“. Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Niedersachsen, September 2012.