

# Dense Image Matching mit Oblique Luftbildaufnahmen – Ein systematischer Vergleich verschiedener Lösungen mit Aufnahmen der Leica RCD30 Oblique Penta

STEFAN CAVEGN<sup>1</sup>, STEPHAN NEBIKER<sup>1</sup> & MARIANNE DEUBER<sup>1</sup>

*In diesem Beitrag wird eine Untersuchungsmethodik vorgestellt, die einen systematischen Leistungsvergleich unterschiedlicher Dense Image Matching Implementierungen ermöglicht. Die erarbeitete Systematik umfasst verschiedene Untersuchungen im Bild- und Objektraum und sollte weitgehend system- und formatunabhängig einsetzbar sein. Die Tauglichkeit der entwickelten Untersuchungssystematik konnte anhand von Aufnahmen der Leica RCD30 Oblique Penta im Bereich Zürich West mit unterschiedlichen Dense Image Matchern validiert werden. Dabei umfassten die Untersuchungen sowohl Nadir-Stereobilder als auch Schrägluftbilder in Längs- und Querrichtung. Nach einer Vorstellung der Grundlage- und Referenzdaten sowie den untersuchten DIM-Lösungen wird der Ablauf für die Generierung von Tiefenkarten und Punktwolken und den darauf aufbauenden Untersuchungen präsentiert. Im Anschluss werden eine Auswahl dieser Untersuchungen für den Bild- und Objektraum mit ersten Ergebnissen vorgestellt und diskutiert. Diese ersten empirischen Untersuchungen zeigen absolute Punktgenauigkeiten im Objektraum in der Grössenordnung von ca. 1 Pixel in Lage und Höhe für Nadir- sowie Schrägaufnahmen in Querrichtung und von 1-2 Pixel für Schrägaufnahmen in Längsrichtung.*

## 1 Einleitung

Erste photogrammetrische Schrägluftbildkameras mit mehreren Sensorköpfen wurden bereits in den 1930er-Jahren entwickelt (PETRIE, 2009). Deren Anwendung blieb jedoch lange Zeit auf den militärischen Bereich beschränkt. In der zivilen Luftbildphotogrammetrie hielten Schrägaufnahmen um das Jahr 2000 mit der Einführung von digitalen Luftbildkameras mit vorwärts- und rückwärtsblickenden Zeilensensoren Einzug (u.a. Leica ADS40). Etwa um dieselbe Zeit wurden erste kommerzielle Geobilddienste mit georeferenzierten Schrägluftbildern lanciert, die mit mehrköpfigen Kameras erfasst wurden (KARBO & SCHROTH, 2009). Mit der Integration von Schrägluftbildern in globale Kartendienste wie Google Maps, Microsoft Bing Maps oder Nokia Here setzte ein eigentlicher Boom ein. Nachdem die Schrägaufnahmen in einer ersten Phase als georeferenzierte Bilder in diese Dienste integriert wurden, dienen diese neuerdings auch der vollautomatischen Extraktion der darin enthaltenen 2.5D- bzw. 3D-Gebäudemodelle. Durch die Verbreitung dieser neuen 3D-Stadtmodellierungsansätze und neuer Geobilddienste, die sich vermehrt auch an professionelle Anwenderinnen und Anwender richten, steigt der Bedarf nach leistungsfähigen Schrägluftbildsystemen wie der Leica RCD30 Oblique Penta (WAGNER ET AL., 2013) und nach genauen Kalibrierungs- und Auswerteverfahren. Nach großen Fortschritten in der Multi-Sensor Kalibrierung sowie der direkten und integrierten

---

<sup>1</sup> Stefan Cavegn, Stephan Nebiker, Marianne Deuber, FHNW Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Vermessung und Geoinformation, Gründenstrasse 40, 4132 Muttenz, Schweiz;  
E-Mail: stefan.cavegn@fhnw.ch, stephan.nebiker@fhnw.ch, marianne.deuber@fhnw.ch

Sensororientierung steht in dieser Arbeit die 3D-Extraktion aus Schrägluftbildern mittels Dense Image Matching (DIM) im Vordergrund.

Zum DIM von Nadir-Luftbildern existieren bereits zahlreiche Forschungsarbeiten (z.B. HAALA & ROTHERMEL, 2012) und systematische Untersuchungen wie im Falle des EuroSDR Benchmarks (HAALA, 2013). Ähnlich systematische Untersuchungen und Benchmarks existieren für fahrzeuggestützte horizontale Stereoaufnahmen wie im Beispiel des KITTI Benchmarks (GEIGER ET AL., 2012). Erste Untersuchungen zum DIM mit Schrägluftbildern wurden von GERKE (2009) und FRITSCH & ROTHERMEL (2013) präsentiert. Mit der Untersuchungssystematik, die in diesem Beitrag vorgestellt wird, sollen wichtige weitere Erkenntnisse zur Evaluation der Leistungsfähigkeit und von Limitierungen unterschiedlicher DIM-Algorithmen bzw. von DIM-Implementierungen mit Nadir- und Schrägluftaufnahmen gewonnen werden.

## **2 Grundlagedaten und Dense Image Matching-Algorithmen**

### **2.1 Luftbilddaten von Zürich West mit der Leica RCD30 Oblique Penta**

Die Mittelformat-Luftbildkamera Leica RCD30 Oblique Penta von Leica Geosystems ist seit Sommer 2012 auf dem Markt erhältlich. Sie besteht aus fünf RCD30-Kameraköpfen mit je 60 MP, einer Pixelgröße von 6  $\mu\text{m}$ , einer radiometrischen Auflösung von 14 Bit und der Möglichkeit einer exakt co-registrierten Erfassung der Kanäle RGB und NIR (WAGNER, 2013). Die vier Sensorköpfe für die Schrägaufnahmen weisen gegenüber der Nadir-Kamera einen Winkel von je 35° nach vorne, nach hinten, nach links und nach rechts auf.

Das Gebiet Zürich West, welches eine Ausdehnung von ca. 5 km x 3.5 km aufweist (siehe Abb. 1), wurde am 24. April 2013 als Block mit 11 Streifen à 40 Bilder pro Kamerakopf in einer Höhe von etwa 520 m über Grund erfasst. Bei einer Kamerakonstanten von 53 mm beträgt die geometrische Auflösung im Nadir-Bereich 6 cm und in den Schrägaufnahmen 6-13 cm. Die Überlappungen der Nadiraufnahmen betragen längs 70% und quer 50%. Während dem die Schrägaufnahmen mit RGB erfolgten, wurde im Nadir zusätzlich der NIR-Kanal erfasst.

Um die Luftbilder hochgenau zu orientieren, erfolgte eine integrierte Georeferenzierung mit 10 Bodenpasspunkten im Bezugssystem WGS84 UTM Zone 32N. Es wurde eine Bündelblockausgleichung mit allen Bildern der fünf Kameraköpfe dieses Flugblocks (total 2110 Bilder) in ORIMA durchgeführt. Daraus resultierte eine Standardabweichung der Gewichtseinheit von 2.2  $\mu\text{m}$  ( $\sigma_0$ ) bzw. etwa 1/3 der Pixelgröße, was einem sehr guten Resultat für ein Multihead-Oblique-Kamerasystem entspricht. Bei den 10 Bodenpasspunkten wurde eine Koordinatendifferenz-Genauigkeit (RMS) von 3.2 cm in X-Richtung, von 2.6 cm in Y-Richtung und von 9.1 cm in Z-Richtung berechnet. Die mittlere Standardabweichung (RMS) aller 43901 Verknüpfungspunkte beträgt 10.4 cm in X-Richtung, 9.6 cm in Y-Richtung und 13.4 cm in Z-Richtung, woraus eine 3D-Punktgenauigkeit von 19.5 cm resultiert.

### **2.2 Referenzdaten**

Vom Untersuchungsgebiet Zürich West liegen verschiedene Referenzdaten vor (siehe Abb. 1). Dies sind unter anderem Mobile Mapping-Daten sowie Luftbilddaten, welche mit dem

Zeilensensor ADS100 erfasst und von Leica Geosystems zur Verfügung gestellt wurden. Im Rahmen einer Messkampagne wurden zusätzlich mehrere kleinere Gebiete mit einem terrestrischen Laserscanner erfasst.



Abb. 1: Übersicht der Ausdehnungen der Grundlagedaten und des Untersuchungsgebiets (Ausschnitt aus Google Earth). Rot: RCD30-Luftbilddaten. Weiss: ADS100-Daten. Blau: Mobile Mapping-Daten. Orange: Standorte des terrestrischen Laserscanning. Grün: Untersuchungsgebiet.

Im Rahmen der Planung einer neuen Tramlinie in Zürich wurden die Rosengarten- und Bucheggstrasse mit einem stereobildbasierten Mobile Mapping System befahren (WOLF, 2013). Von diesem Gebiet liegen somit georeferenzierte Bilddaten sowie aus den Stereobildern generierte dichte Punktwolken vor. Auf Basis dieser Bilddaten können mit dem infra3D-Webdienst relative Messungen mit einer Genauigkeit von ca. 1 cm sowie absolute Messungen mit einer Genauigkeit in der Lage von 3-4 cm und von 1 cm in der Höhe durchgeführt werden (NEBIKER & EUGSTER, 2013).

Über das Untersuchungsgebiet stehen ebenfalls Bilddaten aus einer Befliegung mit einer Leica ADS100 zur Verfügung. Die Befliegung fand am 23. September 2013 statt und aus mehreren Kreuzflügen liegen von gewissen Gebieten mehrere Punktwolken vor. Die Genauigkeit des mit der Software XPro generierten digitalen Oberflächenmodells beträgt gemäss Datenlieferant relativ 2 cm und absolut 4 cm.

In ausgewählten Gebieten erfolgte die Referenzdatenerfassung mit einer Leica ScanStation2. Für die Registrierung und Georeferenzierung der Scans wurden pro Scan-Standort vier bis fünf Passpunkte, welche vorgängig mit einem GNSS-Sensor bestimmt worden waren, mit Zielmarken signalisiert. Die mittlere absolute Genauigkeit eines Punktes der terrestrischen Laserscanning-Punktwolken beträgt gemäss DEUBER (2014) in der Lage 1.7 cm und in der Höhe 2.2 cm.

### 2.3 Untersuchte Dense Image Matcher

Nachfolgend sind die bei den Untersuchungen verwendeten Dense Image Matching-Algorithmen bzw. die Softwarepakete, in welchen diese implementiert sind, kurz beschrieben. Die meisten dieser Matcher basieren auf dem Prinzip oder auf Abwandlungen des Semi-Global-Matching-Algorithmus von HIRSCHMÜLLER (2008).

- *PhotoScan* ist ein Softwareprodukt der Firma Agisoft LLC und basiert auf Computer Vision-Algorithmen (AGISOFT, 2014). PhotoScan unterstützt den gesamten Workflow zur weitgehend automatischen Generierung hochaufgelöster, georeferenzierter und texturierter Oberflächenmodelle aus (Luft-)Bildern.
- *Leica XPro SGM* wurde ursprünglich entwickelt, um auf Basis des SGM-Algorithmus aus Aufnahmen der ADS-Zeilensensoren digitale Oberflächenmodelle zu generieren. XPro SGM wurde seither in die Prozessierungs-Software Leica XPro integriert und später für Nadir-Frameaufnahmen bspw. mit der Leica RCD30 angepasst (GEHRKE ET AL. 2010 und GEHRKE ET AL. 2012). Die Algorithmen sind zurzeit noch nicht für Schrägluftbilder optimiert.
- *StereoSGBM* (Stereo Semi-Global-Block-Matching) ist eine Funktion der frei verfügbaren OpenCV-Bibliothek (OPENCV, 2014). Im Vergleich zum von HIRSCHMÜLLER (2008) entwickelten SGM-Algorithmus wird standardmässig blockweise und nicht pixelweise gematcht und die Kosten werden nur entlang von fünf anstatt von acht Pfaden aggregiert, was sich positiv auf den Speicherbedarf und die Berechnungszeit auswirkt.
- *SURE* ist eine Software für die Generierung von dichten Punktwolken aus einer Vielzahl von Bildern, die an der Universität Stuttgart entwickelt und nun vom Startup-Unternehmen nFrames vertrieben wird (ROTHERMEL & WENZEL, 2014). Es verfügt über Module für die Rektifizierung, fürs Dense Image Matching, für die Punktwolkengenerierung und für die Generierung von digitalen Oberflächenmodellen. Das SGM-Modul konnte so implementiert werden, dass im Vergleich zu HIRSCHMÜLLER (2008) weniger Zeit und Speicher für den Berechnungsvorgang benötigt wird. Weitere Informationen zu SURE sind u.a. in ROTHERMEL ET AL. (2012) und in WENZEL ET AL. (2013) zu finden.

### 3 Workflow

Eine spezielle Herausforderung bei der Erarbeitung einer Untersuchungssystematik für DIM mit Oblique-Luftbilddaten stellen die unterschiedlichen Inputs und Outputs der verschiedenen Matcher dar. Weiter variieren bei einigen DIM-Algorithmen die Anzahl verwendeter Kanäle sowie die radiometrische Auflösung und zudem sind die Unterschiede in der Anzahl einzustellender Parameter markant.

Wie Abb. 2 zeigt, sind bei den vier untersuchten DIM-Implementierungen verschiedene Eingabedaten erforderlich. Während bei Agisoft PhotoScan, Leica XPro SGM und SURE zeichnungsfreie Bilder genügen, setzt OpenCV StereoSGBM Normalbilder voraus. Die Generierung von zeichnungskorrigierten Bildern, die auf den Bildhauptpunkt und auf eine Kamerakonstante von 53 mm umgerechnet wurden, erfolgte mit der Software Leica FramePro. Als Eingabe für OpenCV StereoSGBM wurden die mit SURE generierten Normalbilder verwendet. Bei SURE und Agisoft PhotoScan sind als Ausgabe sowohl Tiefenkarten als auch Punktwolken möglich, bei OpenCV StereoSGBM lediglich Tiefenkarten und bei Leica XPro SGM nur Punktwolken.

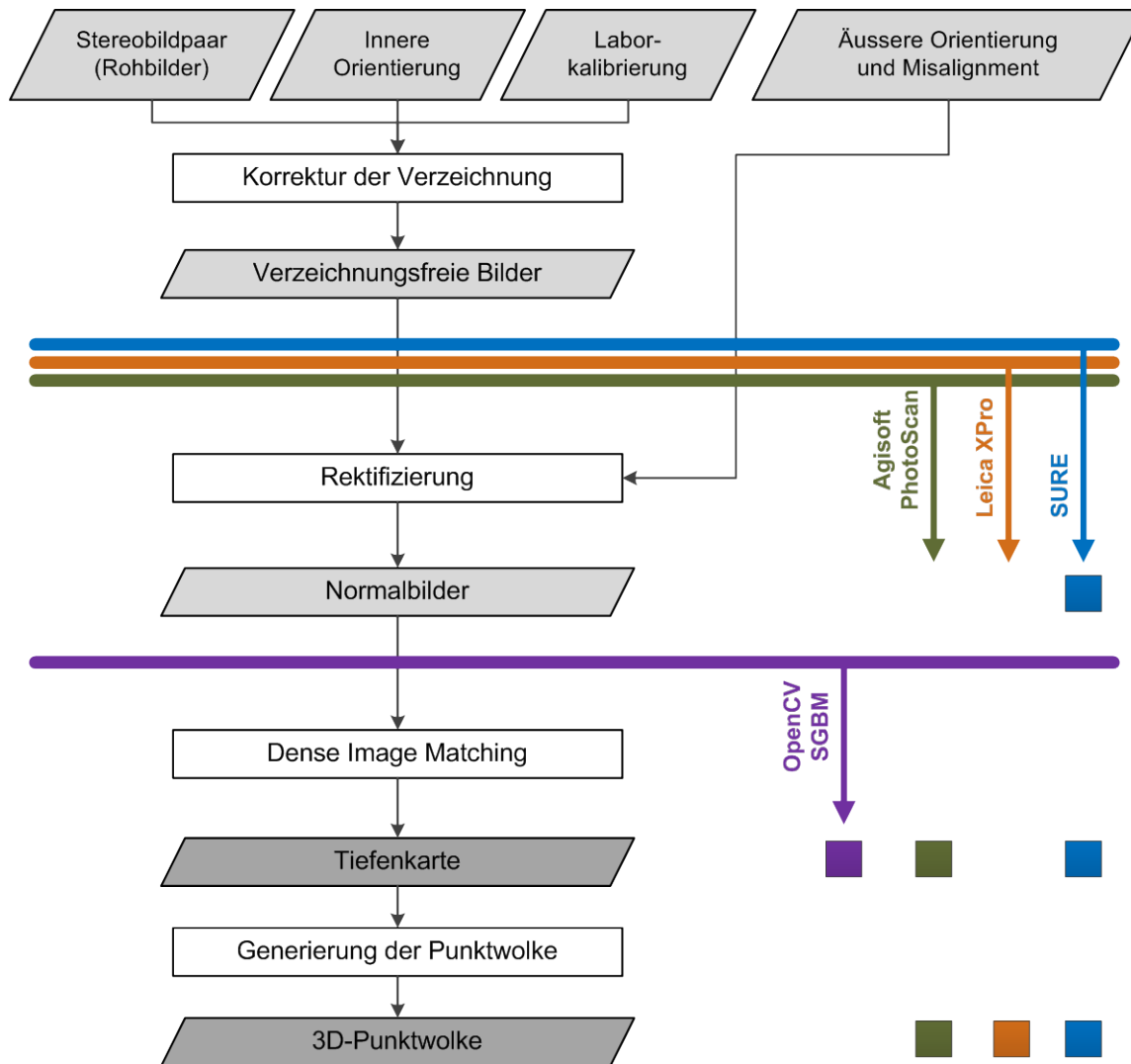


Abb. 2: Ablauf vom Stereobildpaar zur 3D-Punktvolke mit eingezeichneten Positionen, an welchen die untersuchten DIM-Algorithmen in den Workflow einsetzen (horizontale Linien) und mit der Angabe der Resultate, die ausgegeben werden können (Quadrate).

## 4 Untersuchungssystematik und erste Ergebnisse

Um verschiedene DIM-Implementierungen einander gegenüber zu stellen und diese miteinander zu vergleichen, entwickelte DEUBER (2014) eine Untersuchungssystematik, mit der sowohl für Nadir- als auch für Oblique-Bilder aussagekräftige Schlüsse gezogen werden können. Einige der vorgestellten Punktwolken-Vergleiche wurden auch schon von GEHRKE ET AL. (2010), NEBIKER ET AL. (2012) oder HAALA (2013) durchgeführt. Im Vergleich zu reinen Nadir-Untersuchungen sind beim Einbezug von Oblique-Luftbilddaten nicht nur horizontale und geneigte Flächen, sondern auch vertikale Flächen von Bedeutung. Die entwickelten Untersuchungsmethoden sind allgemein anwendbar und damit unabhängig von spezifischen Kamerasystemen oder DIM-Implementierungen und lassen sich wie folgt strukturieren:

### Untersuchungen im Bildraum

- Vollständigkeit von Tiefenkarten
- **Differenz von Tiefenkarten und von absoluten Höhenwerten**

### Untersuchungen im Objektraum

- Dichte der Punktwolken
- Streuung der Punktwolken
- **Profile in den Punktwolken**
- Differenz von Strecken in den Punktwolken
- **Differenz von absoluten 3D-Punkt-Koordinaten**
- Flächendifferenzen in den Punktwolken

### Allgemeine Untersuchungen

- Prozessierungszeiten
- Limitierungen der Algorithmen

Die fett markierten Untersuchungen werden in der Folge kurz erläutert und erste Ergebnisse präsentiert. Die Untersuchungen wurden in einer ersten Phase jeweils mit zwei benachbarten Bildern in Nadir-, Forward- und Left-Richtung vom Untersuchungsgebiet (Abb. 1) vorgenommen.

## 4.1 Untersuchungen im Bildraum

Werden Untersuchungen im Bildraum bzw. in 2D anstatt 3D vorgenommen, können bei Schrägluftaufnahmen alle generierten Werte miteinander verglichen werden, auch wenn für die gleiche Lagekoordinate im Objektraum mehrere Höhenwerte vorliegen.

### 4.1.1 Differenz von Tiefenkarten und von absoluten Höhenwerten

Im Bildraum können sowohl Disparitäts- als auch Tiefenwerte miteinander verglichen werden. Als Referenz können Objektpunkte, bspw. aus terrestrischen Laserscans, in Tiefenwerte für die vorgegebene Bildgeometrie umgerechnet und so mit den Tiefenwerten der unterschiedlichen DIM-Implementierungen verglichen werden. Es hat sich allerdings gezeigt, dass die ausgegebenen Disparitäts- und Tiefenkarten bei einigen Matchern nicht die volle numerische Auflösung der internen Tiefenwerte aufweisen, was einen fundierten Vergleich verunmöglicht. Eine Lösungsmöglichkeit besteht darin, für jeden Bildpunkt einen absoluten Höhenwert zu berechnen, was in der Gesamtheit als Oblique-Höhenraster betrachtet werden kann. Der Vorteil eines solchen Höhenrasters gegenüber einer Tiefenkarte besteht darin, dass je nach System- und Aufnahmekonstellation die Tiefenauflösung höher ist.

In Abb. 3 sind exemplarisch die absoluten Höhenwertdifferenzen für einen Fassaden-Ausschnitt dargestellt. Als Referenz dienten terrestrische Laserscanning-Aufnahmen und die Differenz wurde nur dort ermittelt, wo das Referenzhöhenraster und das DIM-Höhenraster Werte aufwies. Sind Untersuchungen von Gebieten mit einer größeren Ausdehnung von Interesse, könnte wie in HAALA (2013) ein Median-Höhenraster aus den zu vergleichenden Datensätzen als Referenzraster dienen.



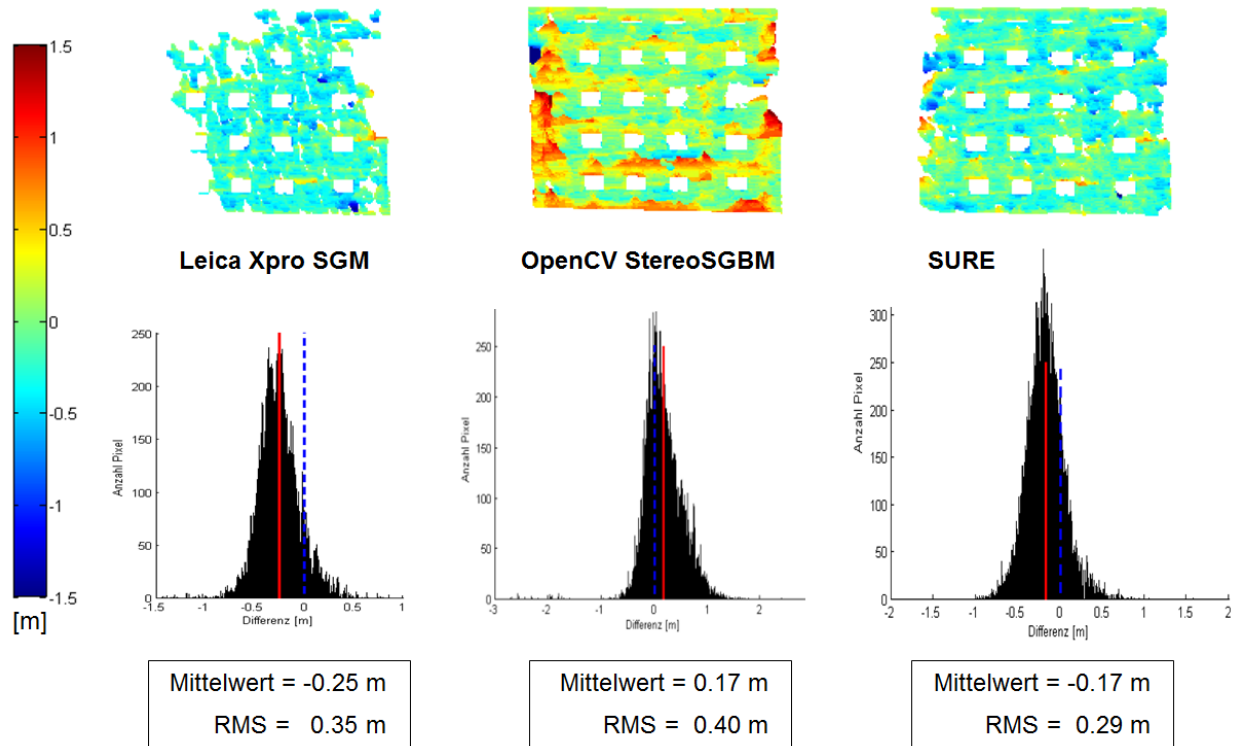


Abb. 3: Absolute Höhenwertdifferenzen eines Fassaden-Ausschnitts, die auf Grund von Oblique-Höhenraster aus Left-Stereobildern berechnet wurden.

## 4.2 Untersuchungen im Objektraum

### 4.2.1 Profile in den Punktwolken

Objekte des Untersuchungsgebiets werden durch die generierten Punktwolken unterschiedlich detailliert abgebildet und die Streuungen sind verschieden. Diese Effekte können mit Schnitten bzw. Profilen an bestimmten Orten in den Punktwolken visuell oder analytisch ermittelt und – wenn vorhanden mit Referenzprofilen verglichen werden. Beim Profil in Abb. 5, das auf Punktwolken aus Forward-Bildern basiert, zeigen die verschiedenen DIM-Ergebnisse eine hohe Detailtreue im Bereich der Dachaufbauten und eine sehr gute Übereinstimmung mit den Referenzdaten. Große Unterschiede sind im Schattenbereich der Straße ersichtlich.

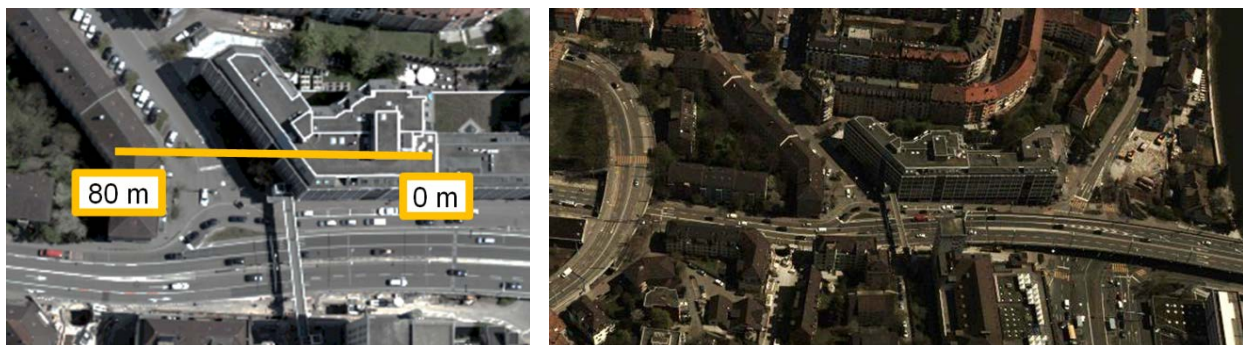


Abb. 4: Lage des in Abb. 5 dargestellten Profils (links) und Oblique-Ansicht in Forward-Richtung (rechts)

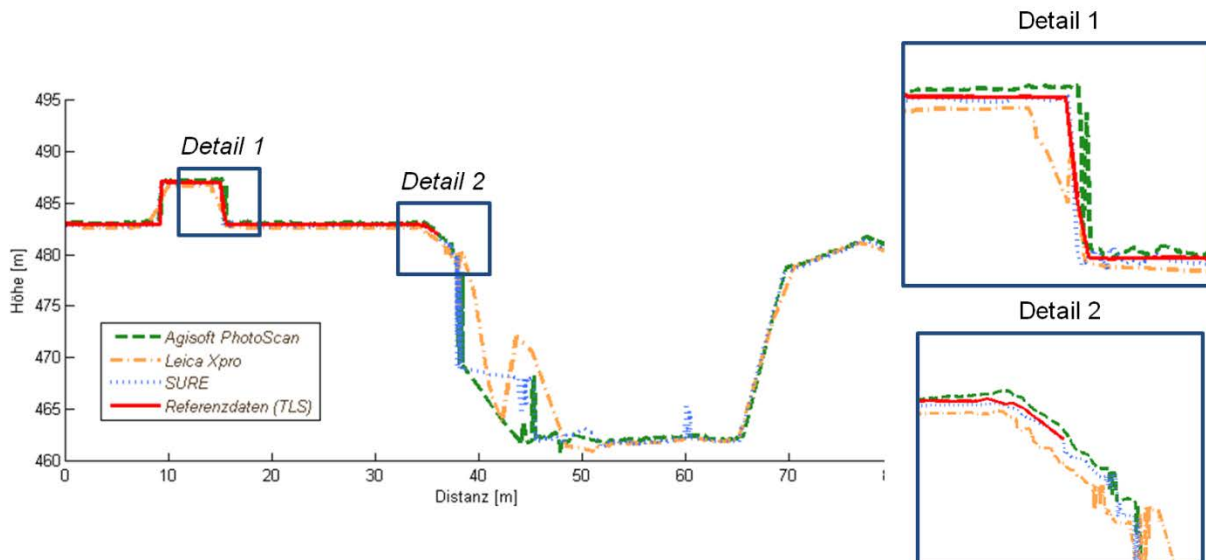


Abb. 5: Profil von Dächern und einer Straße in der Punktwolke aus Forward-Bildern

#### 4.2.2 Differenz von absoluten 3D-Punkt-Koordinaten

Beim Vergleich von 3D-Punkt-Koordinaten ist sicher zu stellen, dass die Referenzinformation und die untersuchten Punkte, Linien oder Flächen aus der generierten Punktwolke homolog sind. im Falle eines Punktvergleichs wird empfohlen, drei Ebenen in eine Punktwolke zu fitten und diese danach zu verschneiden (siehe Abb. 6). Um eine gute Definitionsgenauigkeit zu erreichen, setzt dies voraus, dass die Punkte nicht zu sehr streuen und dass eine minimale Punktdichte vorliegt. Werden die Koordinaten von einzelnen Punkten direkt in der Punktwolke ermittelt, hängt die Genauigkeit direkt von der Punktdichte und der Streuung der Punktwolke ab.

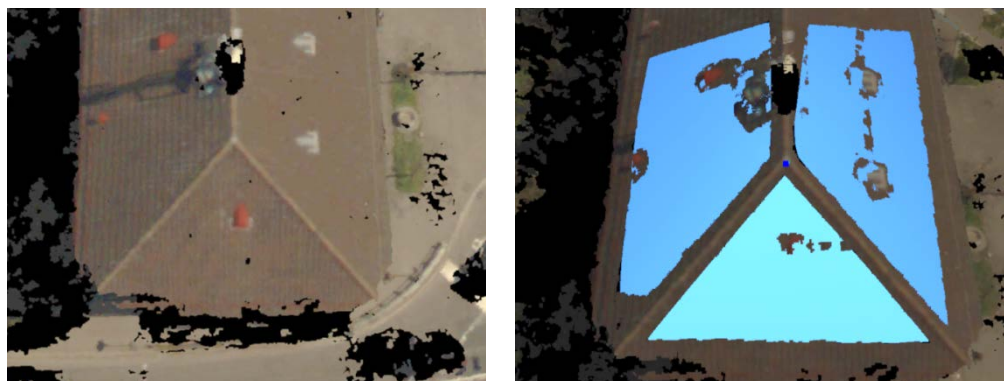


Abb. 6: Objekt das sich gut eignet für die Konstruktion eines Punktes über das Verschneiden von drei Ebenenfits. Links: Objekt ohne Ebenenfits. Rechts: Objekt mit drei Ebenenfits und dem konstruierten Punkt.

In Tab. 1 sind die Genauigkeiten der ersten Untersuchungen von absoluten Koordinatendifferenzen dargestellt. Für die Genauigkeitsbestimmung wurden im Schnitt pro Matcher und Blickrichtung die Koordinatendifferenzen von 12 Punkten berücksichtigt. Die größten Werte entsprechen etwa der doppelten GSD.



Tab. 1: Genauigkeiten (RMS) von absoluten Koordinatendifferenzen

[cm]	GSD	Leica XPro SGM			OpenCV SGBM			SURE		
		$\Delta E$	$\Delta N$	$\Delta h$	$\Delta E$	$\Delta N$	$\Delta h$	$\Delta E$	$\Delta N$	$\Delta h$
<b>Nadir</b>	6	8	11	9	11	5	11	10	13	10
<b>Forward</b>	6-13	16	9	26				10	9	18
<b>Left</b>	6-13	10	6	12	11	15	9	9	8	9

## 5 Fazit und Ausblick

Die vorgestellte Untersuchungssystematik erlaubt einen objektiven Vergleich verschiedener Dense Image Matcher trotz ihrer unterschiedlichen Inputs und Outputs. Die Systematik ist sowohl für Nadir- als auch für Oblique-Bilddaten geeignet und sie ist so ausgelegt, dass sie auf weitere Matcher anwendbar ist. Die erarbeitete Untersuchungssystematik und allenfalls auch die vorliegenden Bilddaten dürften einen nützlichen Beitrag zu möglichen Benchmarks für Dense Image Matching mit luftgestützten Oblique-Aufnahmen leisten.

Seit einiger Zeit erfolgt die photogrammetrische Datenerfassung verstärkt nicht nur mit flugzeugbasierten, sondern auch mit drohnen- und fahrzeugbasierten Systemen. Sobald Stereobilddaten von Bildaufnahmesensoren und geeignete Referenzdaten vorliegen, ist die präsentierte Untersuchungssystematik anwendbar.

Die vorgestellten ersten empirischen Untersuchungen zeigen absolute Punktgenauigkeiten im Objektraum in der Größenordnung von ca. 1 Pixel in Lage und Höhe für Nadir- sowie Schrägaufnahmen in Querrichtung und von 1-2 Pixel für Schrägaufnahmen in Längsrichtung. Zudem zeigen die ersten Untersuchungen gute Resultate bei der Abbildung vertikaler Objekte wie bspw. Gebäudefassaden aus den Schrägaufnahmen.

Es ist geplant, die vorliegenden Untersuchungen und die Arbeit von DEUBER (2014) zu erweitern und auf weitere Matcher wie MicMac vom IGN oder den Matcher von Pix4D anzuwenden.

## 6 Literaturverzeichnis

- AGISOFT, 2014: Agisoft PhotoScan. <http://www.agisoft.ru/products/photoscan/professional/> (31.1.2014).
- DEUBER, M., 2014: Oblique Photogrammetry – Dense Image Matching mit Schrägluftbildern. Master Thesis. FHNW Fachhochschule Nordwestschweiz.
- FRITSCH, D. & ROTHERMEL, M., 2013: Oblique Image Data Processing - Potential, Experiences and Recommendations. In: D. Fritsch (Ed.), Photogrammetric Week '13. Stuttgart: Wichmann, S. 73-88.
- GEHRKE, S., MORIN, K., DOWNEY, M., BOEHRER, N. & FUCHS, T., 2010: Semi-global Matching: An alternative to LiDAR for DSM generation? In: The 2010 Canadian Geomatics Conference and Symposium of Commission I, ISPRS Convergence in Geomatics – Shaping Canada's Competitive Landscape, Calgary, Canada.

- GEHRKE, S., DOWNEY, M., UEBBING, R., WELTER, J. & LAROCQUE, W., 2012: A multi-sensor approach to semi-global matching. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, Melbourne, Australia, Vol. XXXIX Part B3, S. 17-22.
- GEIGER, A., LENZ, P., STILLER, C. & URTASUN, R., 2013: The KITTI Vision Benchmark Suite. [http://www.cvlibs.net/datasets/kitti/eval\\_stereo\\_flow.php?benchmark=stereo](http://www.cvlibs.net/datasets/kitti/eval_stereo_flow.php?benchmark=stereo) (31.1.2014).
- GERKE, M., 2009: Dense matching in high resolution oblique airborne images. In: U. Stilla, F. Rottensteiner & N. Paparoditis (Eds.), *CMRT09, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, Paris, Vol. XXXVIII, Part 3/W4, S. 77-82.
- HAALA, N. & ROTHERMEL, M., 2012: Dense Multi-Stereo Matching for High Quality Digital Elevation Models. *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation*, **2012** (4), S. 331-343.
- HAALA, N., 2013: The Landscape of Dense Image Matching Algorithms. In: D. Fritsch (Ed.), *Photogrammetric Week '13*. Stuttgart: Wichmann, S. 271-284.
- HIRSCHMÜLLER, H., 2008: Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **30** (2), S. 328-341.
- KARBØ, N. & SCHROTH, R., 2009: Oblique Aerial Photography: A Status Review. In: D. Fritsch (Ed.), *Photogrammetric Week '09*. Stuttgart: Wichmann, S. 119-125.
- NEBIKER, S., CAVEGN, S., EUGSTER, H., LAEMMER, K., MARKRAM, J. & WAGNER, R., 2012: Fusion of airborne and terrestrial image-based 3D modelling for road infrastructure management - vision and first experiments. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, Melbourne, Australia, Vol. XXXIX, Part B4, S. 79-84.
- NEBIKER, S. & EUGSTER, H., 2013: 3DCityTV - Cloud-basierte Stereovision Mobile Mapping Services. In: K. Hanke & T. Weinold (Eds.), *17. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2013*, Obergurgl, Ötztal: Wichmann, S. 144-153.
- OPENCV, 2014: Camera Calibration and 3D Reconstruction. StereoSGBM. [http://docs.opencv.org/modules/calib3d/doc/camera\\_calibration\\_and\\_3d\\_reconstruction.html#stereosgbm](http://docs.opencv.org/modules/calib3d/doc/camera_calibration_and_3d_reconstruction.html#stereosgbm) (31.1.2014).
- PETRIE, G., 2009: Systematic oblique aerial photography using multiple digital frame cameras. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Journal of the American society for photogrammetry and remote sensing*, **75** (2), S. 102-107.
- ROTHERMEL, M., WENZEL, K., FRITSCH, D. & HAALA, N., 2012: SURE: Photogrammetric Surface Reconstruction from Imagery. In: *Proceedings LC3D Workshop*, Berlin.
- ROTHERMEL, M. & WENZEL, K., 2014: SURE - Photogrammetric Surface Reconstruction from Imagery. <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/software/sure/index.en.html> (31.1.2014).
- WAGNER, R., LIECKFELDT, P., ROTHE, R. & MARKRAM, J., 2013: The Leica Geosystems CityMapper Solution. In: D. Fritsch (Ed.), *Photogrammetric Week '13*. Stuttgart: Wichmann, S. 89-99.
- WENZEL, K., ROTHERMEL, M. & FRITSCH, D., 2013: SURE - The ifp Software for Dense Image Matching. In: D. Fritsch (Ed.), *Photogrammetric Week '13*. Stuttgart: Wichmann, S. 59-70.
- WOLF, R., 2013: Mobile Mapping für die Planung einer neuen Tramlinie in Zürich. *Geomatik Schweiz*, **111** (4), S. 152-155.