

Ein systematischer Vergleich verschiedener Multi-View Stereo-Lösungen für die luftbildgestützte dreidimensionale Infrastrukturkartierung

PASCAL SCHÄR¹, STEFAN CAVEGN^{1,2}, DAVID NOVAK³, BENJAMIN LOESCH³,
HANNES EUGSTER^{1,3} & STEPHAN NEBIKER¹

Zusammenfassung: Aus der Vogelperspektive abgebildete Infrastrukturanlagen über einen Webdienst am Arbeitsplatz zugänglich zu machen, verspricht grosses Potential. Der Ablauf, um von beliebigen Luftbildaufnahmen zu den in den Webdienst integrierbaren 3D-Bildern zu kommen, beinhaltet die zwei Hauptteile Bildorientierung (Structure-from-Motion) und Multi-View Stereo (MVS). Um die beste Lösung für den zweiten Teil zu bestimmen, werden die drei MVS-Tools SURE, COLMAP und CMVS/PMVS evaluiert. Zur effizienten und pragmatischen Untersuchung wurde ein Workflow implementiert, welcher die automatische Berechnung der Vergleichsergebnisse ermöglicht. Dieser wird sowohl für den Vergleich, wie auch für die Untersuchung ausgewählter Steuerparameter dieser drei MVS-Algorithmen verwendet. Alle MVS-Untersuchungen werden anhand von vier realen Szenen von Infrastrukturanlagen vorgenommen. Diese zeichnen sich durch verschiedenartige Infrastrukturtypen, Befliegungsmuster und Aufnahmesensoren aus. COLMAP generiert die grösste Punktmenge und SURE rekonstruiert die homogenste Punktwolke. Durch gezielte Parametersteuerung können die guten Resultate der Standardparameter weiter verbessert werden.

1 Motivation und Ausgangslage

Seit einigen Jahren werden Infrastruktur-Inspektionen und 3D-Kartierungen zunehmend nicht mehr vor Ort sondern anhand von Webdiensten effizient am Arbeitsplatz vorgenommen. Die vorausgehende Datenerfassung erfolgt in der Regel entlang von Strassen- und Schienenkorridoren aus der Fahrzeugperspektive (EUGSTER et al. 2013; PUENTE et al. 2013; STANEK & EUGSTER 2017). Dazu werden für die präzise Erfassung fixe Stereokonfigurationen von Kameras in Kombination mit GNSS und Inertialnavigationssystemen (INS) eingesetzt (BURKHARD et al. 2012; CAVEGN & HAALA 2016).

Immer öfter werden Infrastrukturanlagen und Objekte auch mit Luftbildern inspiziert und vermessen (NEITZEL & KLONOWSKI 2011; REMONDINO et al. 2011; NEX & REMONDINO 2014). Dazu werden unterschiedliche Trägerplattformen wie Flugzeuge, Helikopter oder UAVs verwendet. Die aus Luftbildaufnahmen ermittelten Produkte wie Punktwolken, Orthophotos oder Vermessungen (DOM, DGM) erfüllen die Ansprüche der Kunden, in einfacher Form Informationen abzuleiten, oft nicht zur Genüge. Diese Endprodukte lassen sich zudem für spezifische Fragestel-

¹ Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Geomatik, Gründenstrasse 40, CH-4132 Muttenz, Schweiz
E-Mail: [pascal.schaer, stefan.cavegn, stephan.nebiker]@fhnw.ch

² Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie, Geschwister-Scholl-Str. 24D, D-70174 Stuttgart

³ iNovitas AG, Oberrohrdorferstrasse 1c, CH-5405 Baden-Dättwil, Schweiz
E-Mail: [david.novak, benjamin.loesch, hannes.eugster]@inovitas.ch

lungen nur umständlich bis gar nicht einsetzen oder die Weiterverarbeitung ist für die Kunden komplex und problematisch.

Das Forschungsprojekt *INFRA BirdView* des Instituts Geomatik (IGEO) der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) in Zusammenarbeit mit der iNovitas AG hat zum Ziel, beliebige Luftbildaufnahmen einer Infrastrukturanlage in einfacher und effizienter Form mittels 3D-Bildern dem Kunden über einen Webdienst zur Verfügung zu stellen. Die Bilder aus der Luft, je nach Objekt ergänzt durch terrestrische Aufnahmen, können einen entscheidenden Mehrwert zur Beurteilung und Vermessung von Infrastrukturanlagen bieten. Der Web-Viewer ermöglicht eine virtuelle Befliegung der Infrastrukturanlage inklusive Mess- und Erfassungsmöglichkeiten. Die Generierung der dazu nötigen 3D-Bilder aus den Luftbildern und die entsprechende Einbindung in einen Webdienst bergen im Vergleich zur Stereokonfiguration einige neue Herausforderungen. Aufgrund der deutlich vergrößerten Aufnahmedistanz zu den abzubildenden Infrastrukturobjekten sind physische Stereomesssysteme unvorteilhaft, was die Bestimmung von virtuellen Stereobasen mittels bildbasierter Georeferenzierung erfordert. Zudem ist die effiziente Handhabung deutlich grösserer Bilddateien mit der Möglichkeit zur massiven Skalierung bzw. Parallelisierung sämtlicher Prozessschritte nicht trivial.

3D-Bilder sind eine Kombination der verzeichnungsfreien Originalbilder und den dazu berechneten Tiefenkarten, welche Tiefeninformationen ausgehend vom Bildstandpunkt beinhalten (NEBIKER et al. 2015). Orthophotos weisen, aufgrund der vereinfachten 2.5D Geometrie, im Gegensatz zu 3D-Bildern einen Informationsverlust bei Untersichten oder vertikalen Flächen auf. Eine kombinierte Nutzung von fahrzeuggestützten Stereobildern und Luftbilddaten benötigt eine Co-Registrierung beider Aufnahmen (NEBIKER et al. 2012; NEBIKER et al. 2013; KAMER et al. 2013; GERKE et al. 2016).

Der entwickelte Workflow (vgl. Abb. 1), um Tiefenkarten für die Ausgangsbilder zu ermitteln, unterstützt beliebige Luftbildaufnahmen, folglich auch Befliegungen von Objekten wie Gebäude oder Brücken. Dieser Workflow kann in die drei Hauptteile *Bildorientierung* (Structure-from-Motion (SfM)), *Multi-View Stereo* (MVS) und *Aufbereitung der Tiefenkarten* unterteilt werden. Für den MVS-Teil wurden drei Lösungen untersucht und evaluiert, um diese optimal im Workflow einzusetzen. Zusätzlich konnten für unterschiedliche Szenarien optimierte Steuerungsparameter abgeleitet werden. Auf diese Untersuchungen und Resultate wird in diesem Beitrag vertieft eingegangen.

HAALA (2014) vergleicht und beurteilt die Resultate von elf Dense Image Matching-Tools, die im Rahmen eines Benchmarks mit Nadir-Luftbildaufnahmen generiert wurden. Eine Erweiterung dieses Benchmarks um Oblique-Luftbildaufnahmen einer Leica RCD30 wird in CAVEGN et al. (2014a) sowie HAALA & CAVEGN (2015) vorgestellt. Auch wurden bereits erste Leistungsuntersuchungen von *SURE* und *Agisoft PhotoScan* anhand von terrestrischen Laserscans als Referenzdaten vorgenommen und in HAALA & CAVEGN (2016) weitergeführt. NEX et al. (2015) stellen einen weiteren Benchmark-Datensatz inkl. Referenzdaten vor, welcher Oblique-Aufnahmen von einem Flugzeug, UAV-Aufnahmen, aber auch terrestrische Bildaufnahmen umfasst. Die Leistungsfähigkeit der vier Dense Image Matching-Algorithmen *SURE*, *MicMac*, *PMVS* und *Agisoft PhotoScan* wird von REMONDINO et al. (2014) anhand von acht Datensätzen evaluiert. SCHÖPS et al. (2017) analysierten in ihrem Multi-View Stereo Benchmark vier unterschiedliche MVS-Tools – zwei davon wurden für diesen Beitrag ebenfalls evaluiert – mit hochauflösenden

Spiegelreflexkamerabildern sowie synchronisierten niedrig aufgelösten Stereo-Videos. Dafür nahmen SCHÖPS et al. (2017) sowohl Aussen- wie auch Innenraumszenen auf und bestimmten mit einem Laserscanner Referenzdaten, welche zur Ableitung für Qualitäts- und Genauigkeitsaussagen dienen. SEITZ et al. (2006) untersuchten verschiedene MVS-Algorithmen anhand von 38 Innenraumszenen mit niedrig aufgelösten Bildern (VGA-Auflösung) und Referenzdaten von einem Streifenprojektionsscanner. SCHARSTEIN et al. (2014) lieferten mit 6 Megapixel den höher aufgelösten *Middlebury* Datensatz und zeigten damit Schwierigkeiten für MVS-Algorithmen im Bereich von Auflösung und Szenenkomplexität auf. GEIGER et al. (2012) verwendeten für ihren MVS-Benchmark mit dem *KITTI* Datensatz niedrig aufgelöste Bilder (0.5 Megapixel), welche von einer mobilen autonom fahrenden Plattform erfasst wurden. REMONDINO et al. (2017) beurteilen den automatisierten photogrammetrischen Rekonstruktionsprozess kommerzieller Softwarelösungen anhand terrestrischer aber auch Luftbildaufnahmen. Um die Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Dense Image Matching-Lösungen bezüglich Oblique-Luftbildaufnahmen zu vergleichen, entwickelten CAVEGN et al. (2014b) eine Untersuchungsmethodik mit Analysen im Bild- und Objektraum, welche weitgehend system- und formatunabhängig einsetzbar ist. Die Vergleiche im vorliegenden Beitrag basieren auf einer pragmatischen und effizienten Herangehensweise. Dafür werden hochaufgelöste Luftbilder mit bis zu 30 Megapixel verwendet. Zusätzlich kommen durchaus grössere Blickwinkelunterschiede in den für die Untersuchungen verwendeten Luftbilddatensätzen vor.

2 Grundlagen für MVS-Untersuchungen

In diesem Kapitel wird der Gesamtworkflow vom erfassten Luftbild bis zur Tiefenkarte, sowie die untersuchten MVS-Matcher und die Infrastruktur-Anlageszenen beschrieben. Allen Untersuchungen und Daten ist dabei gemein, dass keine Referenzdaten vorliegen oder erfasst werden konnten. Die Resultate der untersuchten MVS-Matcher können untereinander, jedoch nicht mit Soll-Daten verglichen werden. Die Qualitätsbeurteilung der MVS-Algorithmen ist daher nicht auf Grundlage einer Referenz möglich. Da auch HAALA (2014) über keine Referenzdaten verfügte, verwendete er den Median aller Matching-Resultate als Vergleichswert.

Der Gesamtworkflow ist in Abb. 1 visualisiert und zeigt auf, mit welchen Prozessschritten aus Rohdaten in Form von Luftbildern die entsprechenden Tiefenkarten berechnet werden, um diese im Webdienst einzusetzen. Die Bilder können von unterschiedlichen Plattformen und Sensoren erfasst und gemeinsam ausgewertet werden. Für die Bildorientierung (SfM) wird eine adaptierte und erweiterte Version der Open Source Software COLMAP eingesetzt, mit welcher die inneren (IOP) sowie äusseren Orientierungen (EOP) zur Effizienz- und Zuverlässigkeitssteigerung eingebunden werden können. Über Passpunkte (GCP) lassen sich die Luftbilder (präziser) in ein gefordertes Bezugssystem einbinden. Die Angabe von IOP, EOP und GCP sind optional. Bei keiner Eingabe dieser Parameter erfolgt die Berechnung in einem lokalen nicht-metrischen Bezugssystem. Aus dem Bildorientierungsprozess (SfM) resultieren die inneren und äusseren Orientierungsparameter aller Luftbilder, welche die Ausgangslage für die anschliessende Multi-View Stereo (MVS) Berechnung bilden. Das Ziel der MVS-Berechnung ist die komplette Rekonstruktion eines 3D-Modells basierend auf den erfassten Luftbildern mit bekannter innerer und äusserer Orientierung. Dafür existieren die zwei bekannten und in Abb. 1 dargestellten Ansätze.

Der *Stereo Matching* Ansatz berechnet aus jeweils zwei Bildern mit überlappenden Bildbereichen die entsprechenden Normalbilder (Stereonormalfall – Eliminierung der y-Parallaxe), um den Suchraum der dichten Bildkorrelation (Dense Image Matching) einzuschränken. Die daraus resultierenden rohen Tiefenkarten aus jeweils zwei Bildern werden im darauffolgenden Schritt zu einer Tiefenkarte pro Bild fusioniert. Der *Multi-View Matching* Ansatz generiert direkt über die epipolare Beziehung zweier oder mehrerer Bilder 3D-Punkte, welche nach diversen Filteroperationen eine 3D-Punktwolke ergeben. Aus dieser Punktwolke wird anschliessend für jedes Luftbild eine Tiefenkarte zurück gerechnet. Die resultierende Tiefenkarte (TK) pro Luftbild wird danach zusammen mit dem verzeichnungsbereinigten Luftbild im Viewer des Webdienstes eingebunden.

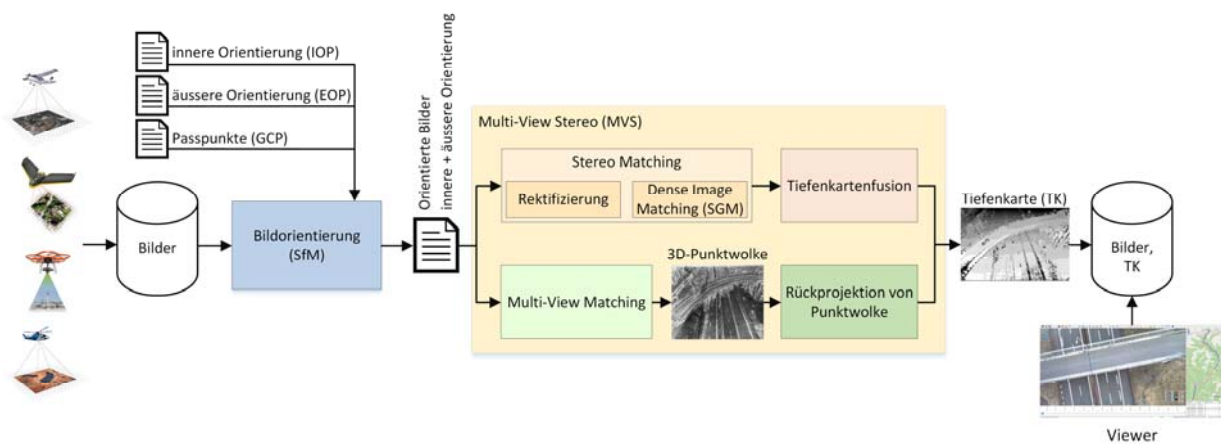


Abb. 1: Ablauf von den erfassten Luftbildern über die Bildorientierung und Multi-View Stereo zu den resultierenden Tiefenkarten

2.1 Untersuchte MVS-Lösungen

Um eine möglichst optimale MVS-Lösung im Gesamtworkflow zu integrieren, wurden die drei MVS-Tools SURE (ROTHERMEL et al. 2012; WENZEL et al. 2013), COLMAP (SCHÖNBERGER et al. 2016) sowie CMVS (FURUKAWA et al. 2010) & PMVS (FURUKAWA & PONCE 2010) evaluiert und untersucht. Die Auswahl erfolgte primär aufgrund der einfachen Verfügbarkeit der Programme, sowie der Möglichkeit zur Einbindung in den Gesamtworkflow. Tab. 1 liefert eine Übersicht über Ansatz, Input und Output der drei MVS-Tools, welche nachfolgend detaillierter beschrieben sind.

2.1.1 SURE

SURE (ROTHERMEL et al. 2012; WENZEL et al. 2013) ist eine kommerziell vertriebene MVS-Software von *nFrames* und wurde ursprünglich am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart entwickelt. SURE verwendet einen hierarchischen Ansatz, welcher niedrig aufgelöste Matchingresultate nutzt, um die dichte Bildkorrelationsuche höher aufgelöster Bilder einzuschränken. Dadurch werden Rechenzeit und Rechenressourcen (RAM Speicherbedarf) bei gleichbleibender Qualität der Resultate entscheidend reduziert. Die dichte Bildkorrelation (Dense Image Matching) basiert auf der Semi-Global Matching (SGM) Methode von HIRSCHMÜLLER

(2008). Anschliessend folgt eine rechenaufwändige Fusion der redundanten Tiefeninformationen zu einer vollständigen Tiefenkarte pro Bild. Diese Fusion relativiert die ursprünglich hohe Geschwindigkeit des hierarchischen SGM. SURE bietet unter anderem Schnittstellen für den Import von Bildorientierungen aus *VisualSFM*, *Bundler* oder *Pix4D*. Die Prozessierung kann dabei wahlweise auf der CPU oder einer *CUDA* fähigen *NVIDIA* GPU ausgeführt werden.

Tab. 1: Eingabedaten und Ausgabeprodukte der untersuchten MVS-Algorithmen. Produkte in [] können optional ausgegeben werden.

	SURE	COLMAP	CMVS & PMVS
Ansatz	Stereo Matching	Stereo Matching	Multi-View Matching
Input	Bilder Projektionsmatrix P Steuerparameter	Bilder Projektionsmatrix P Steuerparameter	Bilder Projektionsmatrix P Steuerparameter
Output	Punktwolke [Tiefenkarte] Oberflächenmodell (DSM) Orthophoto	Punktwolke Tiefenkarte Normalenkarte [Konsistenzgraph] Mesh	Punktwolke

2.1.2 COLMAP

Die Open Source Software COLMAP deckt sowohl den Bildorientierungsteil (SfM) (SCHÖNBERGER & FRAHM 2016) wie auch den MVS-Teil (SCHÖNBERGER et al. 2016) ab. Der SfM-Teil wurde für den Einsatz zu Vermessungszwecken adaptiert und erweitert. Der MVS-Teil besteht aus den vier Modulen Bereinigung der Bildverzeichnung, dichte Bildkorrelation, Tiefenkartenfusion und der Vermaschung, welche sequentiell zu durchlaufen sind. Die Berechnung kann wahlweise auf der CPU oder einer *CUDA* fähigen *NVIDIA* GPU ausgeführt werden. COLMAP MVS basiert auf dem Framework von ZHENG et al. (2014). Dieses wurde erweitert und unter anderem durch die pixelweise Schätzung der Normalen oder die pixelweise Filterung unter Verwendung von Triangulationswinkel, Einfallswinkel und Bildauflösung optimiert.

2.1.3 CMVS & PMVS

CMVS und PMVS sind zwei unterschiedliche und grundsätzlich voneinander unabhängige MVS-Tools. CMVS (FURUKAWA et al. 2010) selektiert und clustert Eingabebilder möglichst optimal für MVS-Algorithmen in handhabbare Teilmengen, so dass ein minimaler Verlust von Inhalt und Detail der MVS-Resultate auftritt. Die Verknüpfungspunkte der Bildorientierung (sparse point cloud) werden von CMVS zum Clustering verwendet. Die Bildcluster werden einzeln prozessiert und die Resultate anschliessend zusammengeführt. Bilder, die voraussichtlich einen kleinen Beitrag zur kompletten Rekonstruktion liefern, werden vom Algorithmus herausgefiltert. CMVS unterstützt daher die Berechnung grosser MVS-Projekte und trägt zur Skalierung bei. Zudem bietet CMVS eine nahtlose Schnittstelle zu PMVS (FURUKAWA & PONCE 2010), welches mit einer musterbasierten Multi-View Matching (patch match) Methode dichte Punktwolken erzeugt. Dafür werden Flächenmuster über Verknüpfungspunkte (aus Harris Cor-

ner Detector und Difference of Gaussian) initialisiert. Anschliessend werden ausgehend von diesen Flächenmustern weitere übereinstimmende angrenzende Bildbereiche gesucht, um ein 3D-Modell zu rekonstruieren. PMVS verarbeitet – begründet durch den Multi-View Matching Ansatz – mehrere Bilder simultan, was einen grossen Bedarf an Arbeitsspeicher (RAM) auslöst. In Kombination mit CMVS wird PMVS zu einem einsetzbaren MVS-Tool. Für die Untersuchungen wurde die frei zugängliche und leicht erweiterte Version CMVS-PMVS2 (MOULON et al. 2011) verwendet.

2.2 Szenen von Infrastrukturanlagen

Die MVS-Algorithmen wurden anhand von vier realen Szenen von Infrastrukturanlagen untersucht. Diese Anwendungsfälle zeichnen sich durch verschiedenartige Infrastrukturtypen, Befliegungsmuster und Aufnahmesensoren aus. Zudem stellen heterogene Beleuchtung, homogene Flächen und spiegelnde Flächen grosse Herausforderungen für MVS dar. Die vier Infrastrukturanlageszenen und die entsprechenden Befliegungsdetails werden nachfolgend vorgestellt (vgl. Tab. 2). Abb. 2 zeigt zudem je ein charakteristisches Luftbild pro Szene.

Tab. 2: Übersicht der vier Infrastruktur-Anlageszenen und Befliegungsinformationen

Bezeichnung	Espark	Brenner	FHNW-Campus	Strommast
Infrastrukturobjekt	Industriegebäude mit Solardach	zweispurige Autobahn	Grossbaustelle	Strommasten mit Transportleitungen
Befliegungsmuster	Zirkular	Linear	Flächig	Dreidimensional
Sensorplattform	Multikopter UAV	Helikopter	Flächenflügel UAV	Multikopter UAV
Ausdehnung	70x50x10 m	5 km	300x300x70 m	30x30x100 m
Ø Entfernung	20 m	80 m	140 m	15 m
Befliegungsdauer	15 min	1 – 1.5 h	25 min	1 h
Befliegungsdatum	10.08.2016	23.02.2016	18.10.2016	20.09.2016
Anzahl Bilder	365	626'000	170	635

Die Szene des Industriegebäudes *Espark* zeichnet sich durch einige homogene Flächen mit wiederholenden Strukturen aus. Insbesondere der Vorplatz und die Solarpanels auf dem Dach stellen für die MVS-Algorithmen eine Herausforderung dar. Die Luftbilder wurden mit einer schräg ausgerichteten *dji Phantom 3* Kamera (9 MP, 4096×2160 Pixel) erfasst. Die Kamera wurde nicht kalibriert und die verwendete Drohne konnte den Bildern keine Geotags hinzufügen. Die starke Verschwenkung der Bilder erschwert zudem die automatische Bildorientierung.

Bei der Befliegung der *Brenner* Autobahn wurden zwei Kameras mit unterschiedlicher Auflösung mitgeführt. Die *Allied Vision AVT – GE4000 prosilica* Industriekamera war Nadir ausgerichtet und erfasst Bilder mit einer Auflösung von 11 MP (4008×2672 Pixel). Die zweite *Allied Vision* Kamera vom Typ *piA 1900-32GC* war Oblique ausgerichtet und liefert mit 2 MP (1920×1080 Pixel) niedriger aufgelöste Bilder. Zur Kalibrierung der Kameras wurde ein mit ca. 30 Punkten erstelltes 50×50 m grosses Kalibrierfeld überflogen. Mittels direkter Sensororientierung wurden Näherungswerte für die äussere Orientierung auf Grund von GNSS und INS-Messungen berechnet. Der lineare Perimeter erstreckt sich über eine Länge von 5 km und weist

neben der Autobahn ebenfalls Brücken, Ein- und Ausfahrten, Kandelaber und Verkehrsschilder auf. Die Homogenität der Fahrbahn ist herausfordernd für MVS-Algorithmen.

Der *FHNW-Campus* wurde in einer Kreuzbefliegung (Überlappung $L=80\%$, $Q=80\%$, GSD 4 cm) mit einer *Sony DSC-WX220* (CMOS Sensor) mit 18 MP (4896×3672 Pixel) aufgenommen. Die Kamera wurde Nadir ausgerichtet und nicht kalibriert. Neben dem markanten Rohbau prägen Industriegebäude und das angrenzende Einfamilienhausquartier sowie die Bahnlinien die Szene.

Der *Strommasten* mit Transportleitungen ragen ca. 80 m in die Höhe, wobei der Hintergrund sich mit zunehmender Flughöhe weiter weg befindet. Dies ist eine ungünstige Situation für die Bildorientierung und Rekonstruktion des Mastes. Zudem weist der Strommasten eine homogene grüne Oberfläche mit runden Verstrebungen auf. Für die Befliegung wurde bewusst eine für photogrammetrische Zwecke optimale Flugkonfiguration gewählt. Aufgrund der unterschiedlichen Entfernungen zum Objekt bei der Aufnahme, wurden scharfe Bilder höher gewichtet als die Kamerakalibrierung. Die hochauflösenden Vollformat-Bilder mit 36 MP (7360×4912 Pixel) wurden mit einer *SONY ILCE-7R* Kamera mit einer Pixelgrösse von 4.9 μm (CMOS Sensor) aufgenommen.



Abb. 2: Charakteristische Luftbilder der vier untersuchten Szenen: Espark (oben links), Brenner-Autobahn (oben rechts), Grossbaustelle FHNW-Campus (unten links) und Strommasten (unten rechts)

3 Untersuchungen zu Multi-View Stereo

Für die effiziente Untersuchung und Evaluierung der in Kap. 2.1 vorgestellten MVS-Algorithmen wurde ein automatischer Workflow umgesetzt. Dieser deckt einen Teil des Gesamtworkflows ab (vgl. Kap. 2) und wird nachfolgend erläutert. Zuvor wird aber auf die Parameteruntersuchungen der drei MVS-Algorithmen eingegangen.

3.1 Parameteruntersuchung

Die Parameteruntersuchungen basieren hauptsächlich auf Vergleiche der MVS-Resultate. Aus Effizienzgründen, den vielfältigen Möglichkeiten für Vergleiche und da alle MVS-Algorithmen eine Punktwolke als Output liefern, wurden diese als Vergleichsbasis gewählt (vgl. Abb. 3). Da das Ableiten von aussagekräftigen Werten, welche die Qualität von Punktwolken beschreiben, aufwändig ist, wird eine pragmatische Herangehensweise gewählt. Die Punktwolken und somit die MVS-Resultate werden anhand von Punktwolkenansichten (Renderings) und Querschnitten (Profilen) von identischen Positionen aus für jede Punktwolke visuell beurteilt (vgl. Abb. 3). Dies hat den Vorteil einer grossen Effizienz, jedoch den Nachteil einer gewissen Aussagenunschärfe mangels abgeleiteter Qualitätswerte. Die Parameteruntersuchung hat zum Ziel, optimale Parameter der drei MVS-Algorithmen für die unterschiedlichen Infrastrukturanlageszenen abzuleiten. Dafür wurden 4-5 Steuerungsparameter pro MVS-Algorithmus ausgewählt, die gemäss Beschreibungen und Erfahrung den grössten Einfluss haben. Zusätzlich wurde versucht, gleiche oder ähnliche Steuerungsparameter festzulegen, so dass eine gewisse Vergleichbarkeit der Resultate möglich bleibt. Die gewählten Steuerungsparameter sind in den nachfolgenden Tab. 3 – 5 aufgelistet. Es wurde für jeden Steuerungsparameter ein Tief- (TW) und ein Hochwert (HW) (faktorieller 2^k -Versuchsplan) bestimmt und prozessiert. Daraus resultieren gesamthaft 96 zu beurteilende Punktwolken ($(1+9+8+6 \text{ Parameter}) \square 4 \text{ Szenen} = 96$).

Die Wahl der Steuerungsparameter fiel hauptsächlich auf die Pyramidenstufe (Auflösungsstufe) der prozessierten Bilder, sowie der Beschränkung der Triangulationswinkel (Minimum und Maximum). Ergänzt wurde die Wahl durch Parameter, welche die minimale Anzahl Modelle, Bilder oder fusionierter Pixel definieren, dass ein 3D-Punkt rekonstruiert und nicht gefiltert wird.

Tab. 3: Ausgewählte Steuerungsparameter von SURE, sowie Standardwert (SW), Tiefwert (TW) und Hochwert (HW) der Parameteruntersuchung

Nr.	Parameter	SURE			Kurzbeschreibung
		SW	TW	HW	
1	pyr	0	–	1	Pyramidenstufe
2	fold	2	1	3	minimale Anzahl Modelle pro Pixel
3	minangle	4°	0.5°	5°	minimaler Triangulationswinkel
4	maxangle	–	140°	–	maximaler Triangulationswinkel

Tab. 4: Ausgewählte Steuerungsparameter von COLMAP, sowie Standardwert (SW), Tiefwert (TW) und Hochwert (HW) der Parameteruntersuchung

Nr.	Parameter	COLMAP			Beschreibung
		SW	TW	HW	
1	windows_radius	5	3	7	Grösse Kreuzkorrelationsfenster
2	sigma_spatial	5	3	7	(Gewichtungs-) Parameter der Kreuzkorrelationsberechnung
	sigma_color	0.2	0.1	0.3	
	ncc_sigma	0.6	0.4	0.8	
3	min_triangulation_angle	1	0.5°	5°	minimaler Triangulationswinkel
4	filter_min_num_consistent	2	–	3	minimale Anzahl Bilder pro Pixel
5	min_num_pixels	5	2	3	minimale Anzahl fusionierter Pixel

Tab. 5: Ausgewählte Steuerungsparameter von PMVS, sowie Standardwert (SW), Tiefwert (TW) und Hochwert (HW) der Parameteruntersuchung. *SW = 1 wurde für Untersuchungen auf 0 angepasst.

Nr.	Parameter	PMVS			Beschreibung
		SW	TW	HW	
1	level	0*	–	1	Pyramidenstufe
2	threshold	0.7	0.4	0.85	Kreuzkorrelationsgrenzwert
3	maxAngle	10°	0.5°	5°	minimaler Triangulationswinkel
4	minImageNum	3	2	–	minimale Anzahl Bilder pro Pixel
5	wsize	2	5	15	Grösse Kreuzkorrelationsfenster

3.2 Workflow für MVS-Vergleich

Der in Abb. 3 dargestellte Workflow für die Multi-View Stereo (MVS) Untersuchungen ermöglicht die vollautomatische Prozessierung beliebiger Flugprojekte mit den drei in Kap. 2.1 vorgestellten MVS-Algorithmen. Für einen korrekten Vergleich der MVS-Resultate muss die Ausgangslage, d.h. die Bildorientierung zwingend identisch sein. Dafür wird die COLMAP-Bildorientierung (SfM) (SCHÖNBERGER & FRAHM 2016) des Gesamtworkflows (vgl. Abb. 1) eingesetzt. Diese liefert die äussere Orientierung in Form von Rotationsmatrix und Translationsvektor. Die Schnittstelle zum jeweiligen MVS-Tool transformiert diese vorliegenden Bildorientierungsdaten ins jeweilig benötigte Input-Format (vgl. Tab. 1). Für die Berechnung der verzeichnungsbereinigten Luftbilder wird auf das Modul zur Bildverzeichnisbereinigung von COLMAP (SCHÖNBERGER et al. 2016) zurückgegriffen (vgl. Kap. 2.1.2). Die definierten Steuerungsparameter (vgl. Tab. 3 – 5) werden den MVS-Tools übergeben, welche jeweils eine Punktwolke als Einzelresultat pro Parametersatz liefern. Für jede Punktwolke werden anschliessend automatisiert und daher basierend auf der äusseren Orientierung der Luftbilder identische Ansichten gerendert und kongruente Vertikalschnitte erzeugt, welche zur visuellen Leistungs- und Qualitätsbeurteilung herangezogen werden. Für das Rendering wird die frei erhältliche Software VTK 8.0 (KITWARE INC. 2018) eingesetzt.

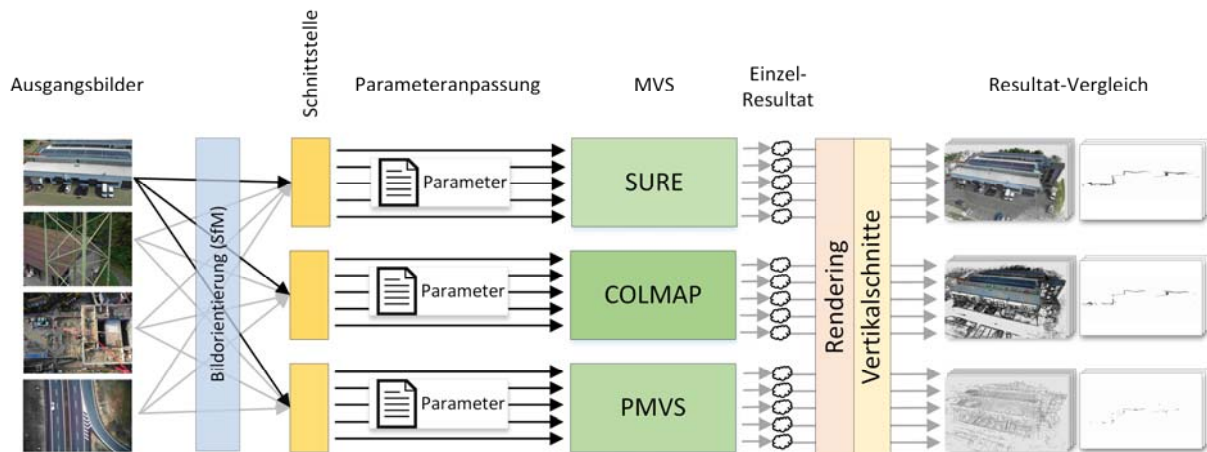


Abb. 3: Implementierter Workflow für effiziente Multi-View Stereo (MVS) Untersuchungen

4 Ergebnisse

Die gerechneten Punktwolkenansichten und Vertikalschnitte lassen eine visuelle Beurteilung der Punktwolkendichte, Punktverteilungen, Streuverhalten, Kantenschärfe sowie Problemzonen und Limitierungen der MVS-Algorithmen zu. Dies sind Qualitäts- und Leistungsmerkmale der untersuchten MVS-Algorithmen. Zusätzlich werden die Gesamtpunktmengen und Prozessierungszeiten des implementierten Workflows dokumentiert. Die Resultate wurden mit einem *DELL Precision Tower 7910* Rechner mit nachfolgend aufgelisteten Hardwarekomponenten generiert. Für die MVS-Prozessierung der 96 unterschiedlichen Konfigurationen benötigte dieser Computer eine Rechenzeit von 233.8 h (9 T 18 h).

- CPU: 3.0 GHz *Intel Xeon Octo Core*
- RAM: 32 GB, + 20 GB ausgelagert auf einer SSD (swap)
- GPU: *CUDA 8.0* fähige *NVIDIA GeForce GTX 1080* mit 8 GB OnBoard Memory

Die Parameteruntersuchung zeigt, dass die Standardparameter des jeweiligen MVS-Tools bereits gute Resultate liefern. Bei guten Oberflächenstrukturen generiert COLMAP die dichteste Punktwolke. Über den ganzen Projektperimeter gesehen erzeugt aber SURE die homogenste Punktwolke der drei MVS-Algorithmen. PMVS liefert lückenhafte Resultate, extrahiert jedoch insbesondere Begrenzungslinien gut. In den nachfolgenden zwei Kapiteln wird detaillierter auf die Resultate der Parameteruntersuchungen und des MVS-Vergleichs eingegangen.

4.1 Parameteruntersuchung

Für die Parameteruntersuchung werden die Resultate aus der Berechnung mit den Standardparametern, mit den jeweiligen des Hoch- und Tiefwerts eines angepassten Steuerparameters verglichen. Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass mit den Standardparametern gute Resultate generiert werden, welche für gewisse Szenen durch gezielte Anpassung noch optimiert werden können. Der grösste Einfluss bei SURE hat der Steuerparameter *fold* (minimale Anzahl Modelle um 3D-Punkt zu rekonstruieren). Für den Tiefwert (TW) liefert SURE eine beinahe komplette

Punktwolke, welche jedoch viele grobe Fehler aufweist. Der Hochwert (HW) von *fold* bewirkt insbesondere in Randbereichen eine lückenhafte Punktwolke, dafür ist die Streuung geringer und mit COLMAP vergleichbar. Es gilt herauszustreichen, dass der Steuerparameter *pyr = 1* (Bildpyramidenstufe 1 – reduzierte Bildauflösung) erstaunlich gute Resultate liefert und dies bei stark reduzierter Berechnungsdauer. In gewissen Bereichen ist das Resultat sogar besser als bei voller Auflösungsstufe (Bildpyramidenstufe 0). Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Sensoren aufgrund des Bayermusters die Szene tatsächlich mit einer geringeren Auflösung erfassen als ausgegeben. Den grössten Einfluss der untersuchten Steuerparameter bei COLMAP haben die Parameter *Nr. 2* (vgl. Tab. 7), welche die Kreuzkorrelation steuern. Die tiefen Werte (TW) liefern eine lückenhafte Punktwolke. Die hohen Werte (HW) ergeben eine dichtere Punktwolke bei relativ kleiner Zunahme der Streuung. Die Wahl des COLMAP-Parameters *filter_min_num_consistent* beeinflusst die Zuverlässigkeit der Rekonstruktionen und die Reduktion von Ausreissern bei gleichzeitiger Ausdünnung der Randbereiche und Eliminierung teils korrekter Resultate. Tab. 6-8 fassen die Resultate der Parameteruntersuchungen zusammen, wobei *Zeit* und *Punkte* sich nur auf die Szene des Industriegebäudes *Espark* beziehen. Diese sind für die anderen Szenen vergleichbar.

Tab. 6: Zusammenstellung der Resultate der Parameteruntersuchung von SURE.
(Für Erläuterungen siehe Tabellenlegende weiter unten)

SURE							
Nr	Parameter	SW	TW	HW	Zeit TW, HW	Punkte TW, HW	Erkenntnis
0	Standard				1:24	7.2	
1	<i>pyr</i>	0	–	1	0:24	7.0	HW: gute Resultate möglich
2	<i>fold</i>	2	1	3	1:27, 1:20	10.2, 4.3	HW bei hoher Bilddichte
3	<i>minangle</i>	4°	0.5°	5°	1:25, 1:24	9.1, 6.6	Allg. Empfehlung 3°
4	<i>maxangle</i>	–	140°	–	1:29	7.2	bei Objektbefliegung sinnvoll

Tab. 7: Zusammenstellung der Resultate der Parameteruntersuchung von COLMAP.
(Für Erläuterungen siehe Tabellenlegende weiter unten)

COLMAP							
Nr	Parameter	SW	TW	HW	Zeit TW, HW	Punkte TW, HW	Erkenntnis
0	Standard				3:45	12.9	
1	<i>windows_radius</i>	5	3	7	3:46, 3:46	12.9, 12.9	TW: Reduktion Ausreisser
2	<i>sigma_spatial</i>	5	3	7	3:28, 3:51	3.7, 13.4	TW: lückenhaftes Punktw. HW: dichter, grössere Streuung
	<i>sigma_color</i>	0.2	0.1	0.3			
	<i>ncc_sigma</i>	0.6	0.4	0.8			
3	<i>min_triangulation_angle</i>	1	0.5°	5°	4:00, 3:47	12.9, 12.9	Allg. Empfehlung 2°-3°
4	<i>filter_min_num_consistent</i>	2	–	3	3:51	11.5	Randbereiche stark gefiltert
5	<i>min_num_pixels</i>	5	2	3	4:00, 3:47	12.9, 12.9	Allg. Empfehlung 4

Tab. 8: Zusammenstellung der Resultate der Parameteruntersuchung von PMVS.
(Für Erläuterungen siehe Tabellenlegende weiter unten)

Nr	Parameter	PMVS					Erkenntnis
		SW	TW	HW	Zeit TW, HW	Punkte TW, HW	
0	Standard				0:29	0.7	
1	level	0*	–	1	0:07	0.3	HW: weniger Ausreisser
2	threshold	0.7	0.4	0.85	1:20, 0:14	0.8, 0.6	mehr Punkte & Ausreisser
3	maxAngle	10°	0.5°	5°	0:27, 0:26	0.7, 0.7	Allg. Empfehlung 2°-3°
4	minImageNum	3	2	–	1:14	0.5	
5	wsize	2	5	15	0:26, 1:11	0.6, 1.08	Empfehlung 8-10

Tabellenlegende

grün Parameter mit den besten Resultaten

orange Parameter mit schlechten Resultaten

blau optimale Parameter liegen zwischen diesen Werten

gelb stark szenen- und objektabhängig inkl. Aufnahmegrund

Zeile ohne Einfärbung – Steuerparameter hat keinen sichtbaren Einfluss

Zeit Berechnungszeit der Infrastrukturszene *Espark*

Punkte Punktmenge der Infrastrukturszene *Espark* in der Grössenordnung Million

Die Berechnungszeiten und Punktmenge der Infrastrukturszene *Espark* stehen stellvertretend für alle Szenen, welche ähnliche Resultatverhältnisse aufweisen.

4.2 Vergleich der MVS-Tools

Der Vergleich der MVS-Tools erfolgt anhand von Resultaten, die mit Standardparametern prozessiert wurden. SURE weist über das gesamte Bild bzw. den gesamten Projektperimeter die homogenste Punktwolke auf. Dies vor allem da SURE auch bei homogenen Oberflächenstrukturen wie Fenster, Belag, Schattenwurfbereiche und vertikale homogene Fassadenelemente 3D-Punkte rekonstruieren kann. SURE weist zudem eine geringe Anzahl an Ausreisser auf. Dafür ist die Streuung deutlich höher als bei COLMAP, insbesondere bei homogenen Oberflächenstrukturen. Die Kantenschärfe bei SURE ist ebenfalls niedriger als bei COLMAP. Dies macht sich besonders bei abstehenden Objekten wie Kandelaber, Fahrleitungsmaste, Strassenschilder oder kahle Baumstämme bemerkbar, welche SURE mässig bis gar nicht und COLMAP zumindest erkennbar rekonstruiert. SURE hat zudem Mühe, 3D-Punkte abzuleiten, wenn ein vorgelagertes Objekt dahinterliegende Bereiche teilweise verdeckt.

COLMAP rekonstruiert mit 1.1 bis 1.8 Mal mehr als SURE und bis zu 25 Mal mehr als PMVS die grösste Punktmenge der drei Tools. Im Besonderen bei markanten Oberflächenstrukturen liefert COLMAP die höchste Punktdichte, weist jedoch bei Fenstern, Belag, Schattenwurfbereichen und vertikalen homogenen Fassadenelementen wenige bis keine Punkte auf. Ein Vorteil von COLMAP ist die geringe Streuung und hohe Kantenschärfe. Vereinzelt kommen jedoch grobe Ausreisser vor. Diese Ausreisser sind Teilflächen, welche grob falsch sind, jedoch mit zunehmender Bildanzahl bzw. Bildüberlappung abnehmen.

PMVS liefert lückenhafte Resultate mit der kleinsten Punktmenge, extrahiert dennoch Begrenzungslinien und somit Kanten mit einer geringen Streuung gut.

COLMAP benötigt deutlich am längsten für die Prozessierungen, dies trotz des GPU-Einsatzes. SURE ist mindestens um Faktor zwei schneller als COLMAP und dies obwohl die Prozessierung auf der CPU erfolgte. Es wird erwartet, dass der Einsatz einer GPU die Prozessierungsdauer von SURE senkt. PMVS benötigt mit Abstand am wenigsten Zeit für die Berechnung. Tab. 9 ergänzt diese Erkenntnisse zum MVS-Vergleich in übersichtlicher Weise. Der darauffolgende Abschnitt geht auf Detailkenntnisse des MVS-Vergleichs der einzelnen Szenen ein.

Tab. 9: Zusammenfassung der wichtigsten Resultate und Erkenntnisse des Vergleichs der MVS-Tools. Zur Erläuterung des Tabelleninhalts wird auf die untenstehende Tabellenlegende verwiesen.

Kriterien	SURE	COLMAP	PMVS
Punktmenge	E: 7'212'690 B: 5'530'526 C: 8'891'132 M: 25'236'429	E: 12'921'428 B: 8'544'771 C: 14'887'627 M: 27'858'406	E: 775'443 B: 1'174'864 C: 762'936 M: 1'098'145
Zeit [h:m]	E: 1:24 B: 0:27 C: 1:30 M: 1:52	E: 3:45 B: 3:13 C: 7:29 M: 3:48	E: 0:29 B: 0:17 C: 0:30 M: 1:07
Punktdichte	homogene Dichte über ganzen Bereich	hohe Dichte bei Strukturen geringe-mittlere Dichte bei homogenen Oberflächen	stark lückenhaft
Problemzonen	freistehende Objekte: (Kandelaber, Fahrleitungsmast, Baumstamm)	homogene und/oder repetitive Strukturen (Fenster, Belag, Fassade, Fahrbahn, Schattenwurf)	homogene und/oder repetitive Oberflächenstrukturen
keine oder geringe Problemzonen	- Filterung bewegter Objekte - homogene oder repetitive Strukturen	- Filterung bewegter Objekte - freistehende Objekte	- Filterung bewegter Objekte
Streuung (Genauigkeit)	mittel, wenig Ausreisser	gering, z.T. grobe Ausreisser	{mittel}
Kantenschärfe	mittel	hoch	{mittel}
CPU / GPU	CPU & GPU	CPU & GPU	CPU
Lizenz	kommerzieller Vertrieb	GNU General Public License 3	GNU General Public License 3
Kosten	- Lizenzkosten - Prozessierungskosten (GPU-Prozessierung löst höhere Kosten aus) - Speicherbedarf	- Prozessierungskosten (GPU-Prozessierung löst höhere Kosten aus) - Speicherbedarf	- Prozessierungskosten (CPU-Prozessierung geringere Kosten) - Speicherbedarf

Tabellenlegende

[]	Einheitsangabe
{ }	aufgrund der Resultate schwierig zu beurteilen
gelb	gemessene Grössen
orange	visuelle Beurteilung basierend auf Punktwolkenrenderings
violett	visuelle Beurteilung basierend auf Profilen (Vertikalschnitt) durch die Punktwolke
E B C M	vier untersuchte Szenen von Infrastrukturanlagen (E: E spark, B: B renner-Autobahn, C: FHNW- C ampus, M: M strommast)
fett	verwendete Hardwarekomponente, um Untersuchungsergebnisse zu prozessieren
Punktmenge	basierend auf Standardparameter
Zeit	basierend auf Standardparameter
GNU 3	www.gnu.org/copyleft/gpl.html , www.gnu.org/licenses/quick-guide-gplv3

Insbesondere bei der Szene des Industriegebäudes *Espark* (vgl. Abb. 4 & Abb. 5) ist die homogene Dichte von SURE, im Gegensatz zu COLMAP und PMVS, ersichtlich. Vor allem die Solarpanels auf dem Dach, die vertikale Fassade und die Glaskonstruktionen werden von SURE erstaunlich gut rekonstruiert. COLMAP hat Mühe mit der homogenen vertikalen Frontfassade, dem Belag und den Fenstern. PMVS liefert bei homogenen Oberflächenstrukturen und Glaselementen keine rekonstruierten Punkte. In den Profilen lässt sich die grosse Streuung bei homogenen Oberflächen mit SURE, sowie die geringe Streuung von COLMAP und die damit verbundene Kantenschärfe erkennen. Bei der Szene der *Brenner* Autobahn ist auffallend, dass COLMAP im Vergleich zu SURE eine deutlich dichtere Punktwolke von der Wiese mit starken Strukturen liefert. SURE hat des Weiteren im Gegensatz zu COLMAP Mühe, eine Autobrücke, Kandelaber und kahle Baumstämme zu rekonstruieren. Für den Bereich am Perimeterrand beim *Brenner* liefert SURE keine und COLMAP durchaus plausible Resultate. Dies hängt wohl mit den unterschiedlich aufgelösten Bildern zusammen, da der Randbereich nur von den niedrig aufgelösten Bildern abgedeckt wird. Alle drei Tools filtern bewegte Objekte wie Autos heraus. Anders als bei der *Brenner* Szene weist COLMAP in den Randbereichen des *FHNW-Campus* lückenhafte Resultate auf. Die hauptsächlich auf den klassischen Luftbildfall ausgerichtete Software SURE generiert für diese Szene klar die besten Resultate. Der Unterschied ist besonders in Schattenwurfbereichen, Strassenbereichen (Belag) und am Perimeterrand erkennbar. Mit der Glasfassade des Campus und dem in der Höhe stark versetzten sowie mit vielen Objekten versehenen Baustellendach haben wie erwartet alle Algorithmen Mühe. Beim *Strommast* liefern SURE und COLMAP sehr ähnliche Resultate. Einzig die teils vom Masten verdeckten Bereiche kann SURE im Gegensatz zu COLMAP nicht rekonstruieren. PMVS extrahiert vor allem den Mast, die Hintergrundszene schlecht bis gar nicht. Es lässt sich zusammenfassend sagen: COLMAP – geringe Streuung mit hoher Kantenschärfe, bei homogenen Flächen wenig Rekonstruktionen, SURE – geringe Kantenschärfe bei mittlerer Streuung, extrahiert jedoch homogene Flächen am besten, PMVS – lückenhafte Resultate.



Abb. 4: Lage des extrahierten Profils in Abb. 5 rechts

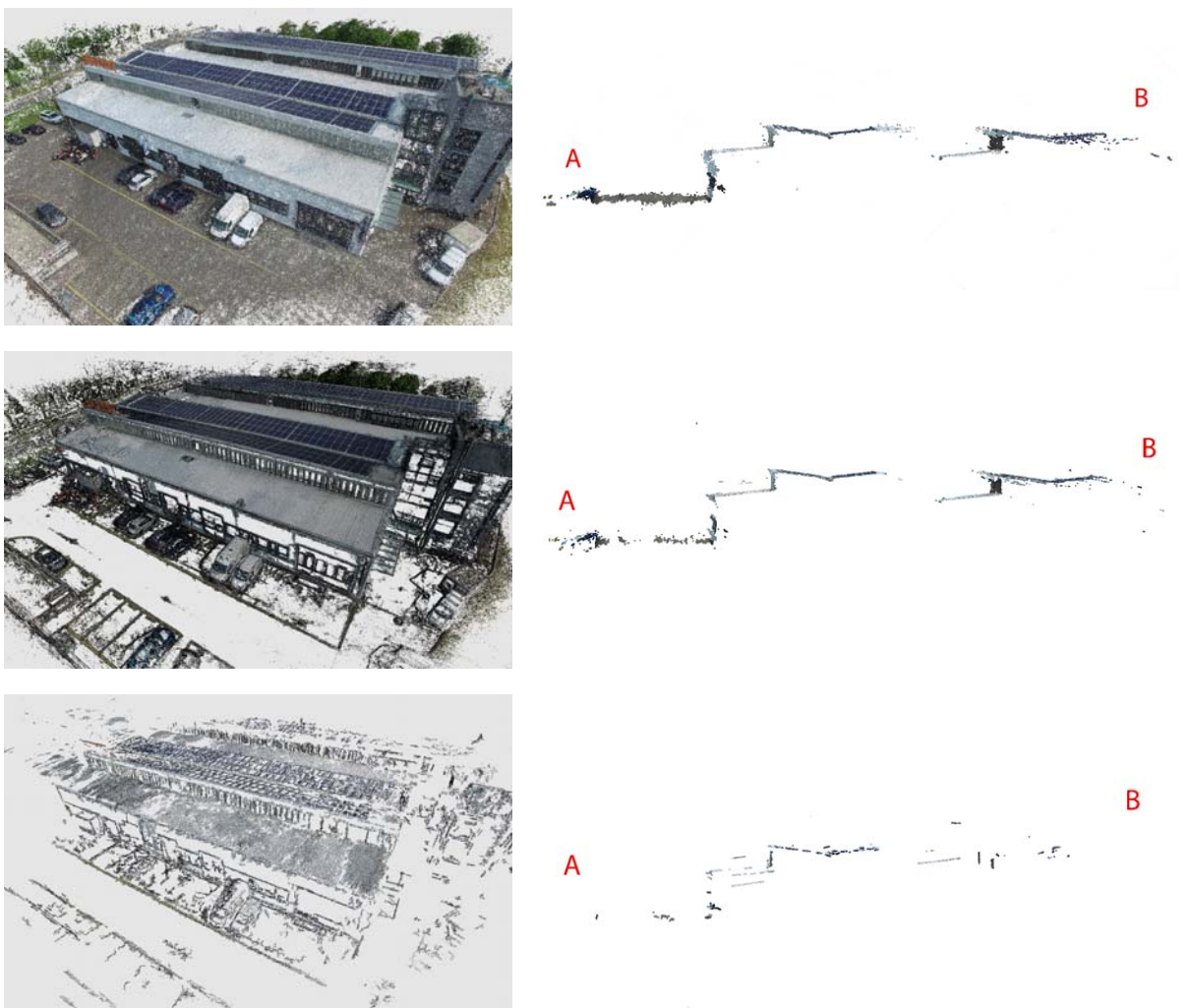


Abb. 5: Beispielhafte Beurteilungsgrundlagen für die Szene *Espark*. Punktwolkenrendering (links) und Profile (rechts) von SURE (oben), COLMAP (Mitte) sowie PMVS (unten).

5 Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag wurden die drei MVS-Algorithmen SURE, COLMAP und PMVS zur Integration in einem Gesamtworkflow evaluiert. Dafür wurden die drei Tools mit dem implementierten Workflow, welcher die vollautomatische Prozessierung von Punktwolken, Renderings und Profilen ermöglicht, verglichen. Dieser Workflow lässt ebenfalls die Untersuchung der Steuerparameter zu, welche für jeweils vier oder fünf Parameter pro MVS-Algorithmus umgesetzt wurde. Die hauptsächlich pragmatische visuelle Beurteilung der Resultate ist sehr effizient – insbesondere bei den 96 zu untersuchenden Punktwolken von vier unterschiedlichen Infrastrukturszenen – verunmöglicht jedoch präzise quantitative Aussagen wie Differenzen oder Standardabweichungen.

Der Vergleich der MVS-Tools zeigt, dass COLMAP eine geringe Streuung und hohe Kantenschärfe aufweist, jedoch homogene Flächen nur spärlich rekonstruiert. SURE weist dagegen eine geringe Kantenschärfe bei mittlerer Streuung auf, rekonstruiert aber homogene Oberflächen ohne grobe Ausreisser am besten. PMVS weist lückenhafte Punktwolkenresultate auf. Die Parameteruntersuchung zeigt, dass die Standardparameter bereits gute Resultate liefern. Diese lassen sich jedoch mit minimalen Anpassungen je nach Szene verbessern. Minimale Unterschiede der Steuerparameterauswirkungen liessen sich besser anhand von Differenzbildern beurteilen.

Die effiziente Handhabung deutlich grösserer Bildformate mit der Möglichkeit zur massiven Skalierung bzw. Parallelisierung sämtlicher Prozessschritte ist nicht trivial, wie bereits von FURUKAWA et al. (2010) festgehalten. Eine Abhilfe dafür könnte ein Clustering des Projekts schaffen. Lineare Objekte eignen sich beispielsweise dazu. Die Skalierung erfordert neben grosser RAM-Kapazität ebenfalls grosse Speicherkapazität, da die MVS-Tools grosse Datenmengen erzeugen. Gerade COLMAP benötigt für die Prozessierung der gleichen Projekte mehr RAM. Die gemessenen Zeiten sind stark abhängig von dem zur Verfügung stehenden RAM bzw. der Leistung des Computers. Aufgrund der Erkenntnisse durch die Untersuchungen wird für klassische Luftbildfälle oder bei Verwendung von Tiefenkarten der Einsatz von SURE empfohlen, hauptsächlich begründet durch die homogenen Resultate und kurze Berechnungsdauer. Liegt der Fokus einer Aufnahme auf sich abgrenzende und strukturierte Objekte wie Strommasten, Kandelaber oder ähnliches, wird der Einsatz von COLMAP empfohlen.

Bei den untersuchten Datensätzen lagen keine Kamerakalibrierungen (innere Orientierungen) vor. Es wird erwartet, dass die Qualität der Resultate bei kalibrierten Kameras steigt. Allerdings ist eine konstant zu haltende Kammerkonstante für Aufnahmen mit stark unterschiedlichen Objektdistanzen durchaus eine Herausforderung, um immer noch scharfe Bilder aufzunehmen.

6 Dank

Das Forschungsprojekt *INFRA BirdView* wird vom Forschungsfonds Aargau (FFAG) finanziell unterstützt.

7 Literaturverzeichnis

- BURKHARD, J., CAVEGN, S., BARMETTLER, A. & NEBIKER, S., 2012: Stereovision Mobile Mapping: System Design and Performance Evaluation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **39**(B5), 453-458.
- CAVEGN, S., HAALA, N., NEBIKER, S., ROTHERMEL, M. & TUTZAUER, P., 2014a: Benchmarking High Density Image Matching for Oblique Airborne Imagery. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **40**(3), 45-52.
- CAVEGN, S., NEBIKER, S. & DEUBER, M., 2014b: Dense Image Matching mit Oblique Luftbildaufnahmen – Ein systematischer Vergleich verschiedener Lösungen mit Aufnahmen der Leica RCD30 Oblique Penta. *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V.*, Band 23, Seyfert, E., Gülch, E., Heipke, C., Schiewe, J., Sester, M. (Hrsg.).
- CAVEGN, S. & HAALA, N., 2016: Image-Based Mobile Mapping for 3D Urban Data Capture. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **82**(12), 925-933.
- EUGSTER, H., GOTTSMANN, F., KÄSER, C., NEBIKER, S. & KOCH, R., 2013: 3DRoadTV-Service – Georeferenzierter 3D-Bilddatendienst für die Infrastrukturpflege und -verwaltung. *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V.*, Band 22, E. Seyfert (Hrsg.), 33. *Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, Dreiländertagung D - A - CH*, 27. Februar – 1. März 2013 in Freiburg i. B., Tagungsband auf CD-ROM, 344-353.
- FURUKAWA, Y., CURLESS, B., SEITZ, S. M. & SZELISKI, R., 2010: Towards Internet-Scale Multiview Stereo. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1434-1441.
- FURUKAWA, Y. & PONCE, J., 2010: Accurate, Dense, and Robust Multiview Stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **32**(8), 1362-1376.
- GEIGER, A., LENZ, P. & URTASUN, R., 2012: Are We Ready for Autonomous Driving? The KITTI Vision Benchmark Suite. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 3354-3361.
- GERKE, M., NEX, F. & JENDE, P., 2016: Co-Registration of Terrestrial and UAV-Based Images - Experimental Results. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **40**(3/W4), 11-18.
- HAALA, N., 2014: Dense Image Matching Final Report. *EuroSDR Publication Series, Official Publication No.*, **64**, 115-145.
- HAALA, N. & CAVEGN, S., 2015: Benchmark zur Evaluation dichter Bildzuordnungsverfahren in Luftbildern. *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V.*, Band 24, T. Kersten (Hrsg.), 35. *Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF*, 16.-18. März 2015 an der Universität zu Köln, Tagungsband auf CD-ROM, 244-253.
- HAALA, N. & CAVEGN, S., 2016: High Density Aerial Image Matching: State-of-the-Art and Future Prospects. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **41**(B4), 625-630.
- HIRSCHMÜLLER, H., 2008: Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **30**(2), 328-341.

- KAMER, K., EUGSTER, H. & NEBIKER, S., 2013: Integrierte Georeferenzierung von luft- und bodengestützten Stereobilddaten im Strassenbereich: Strategien und Ergebnisse. *Geomatik Schweiz*, **111**(2013/9), 496-501.
- KITWARE INC., 2018: VTK - The Visualization Toolkit. <https://www.vtk.org> (31.01.2018).
- MOULON, P., HIESTAND, R. & BOUDRAND, É., 2011: CMVS-PMVS2. GitHub. <https://github.com/pmoulon/CMVS-PMVS> (31.01.2018).
- 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. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **39**(B4), 79-84.
- NEBIKER, S., KAMER, K. & EUGSTER, H., 2013: Integrierte Georeferenzierung von luft- und bodengestützten Stereobilddaten im Straßenbereich – Strategien und Ergebnisse. *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V.*, Band 22, E. Seyfert (Hrsg.), 33. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, Dreiländertagung D - A - CH, 27. Februar – 1. März 2013 in Freiburg i. B., Tagungsband auf CD-ROM, 499-508.
- NEBIKER, S., CAVEGN, S. & LOESCH, B., 2015: Cloud-Based Geospatial 3D Image Spaces—A Powerful Urban Model for the Smart City. *ISPRS International Journal of Geo-Information* **4** (4), 2267-2291.
- NEITZEL, F. & KLONOWSKI, J., 2011: Mobile 3D Mapping with a Low-Cost UAV System. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **38**(1/C22), 39-44.
- NEX, FRANCESCO & REMONDINO, F., 2014: UAV for 3D Mapping Applications: A Review. *Applied Geomatics*, **6**(1), 1-15.
- NEX, F., GERKE, M., REMONDINO, F., PRZYBILLA, H.-J., BÄUMKER, M. & ZURHORST, A., 2015: ISPRS Benchmark for Multi-Platform Photogrammetry. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **2** (3/W4), 135-142.
- PUENTE, I., GONZÁLEZ-JORGE, H., MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, J. & ARIAS, P., 2013: Review of Mobile Mapping and Surveying Technologies. *Measurement*, **46**(7), 2127-2145.
- REMONDINO, F., BARAZZETTI, L., NEX, F., SCAIONI, M. & SARAZZI, D., 2011: UAV Photogrammetry for Mapping and 3D Modelling - Current Status and Future Perspectives. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **38**(1/C22), 25-31.
- REMONDINO, F., SPERA, M. G., NOCERINO, E., MENNA, F. & NEX, F., 2014: State of the Art in High Density Image Matching. *The Photogrammetric Record* **29** (146), 144-166.
- REMONDINO, F., NOCERINO, E., TOSCHI, I. & MENNA, F., 2017: A Critical Review of Automated Photogrammetric Processing of Large Datasets. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **42**(2-W5), 591-599.
- ROTHERMEL, M., WENZEL, K., FRITSCH, D. & HAALA, N., 2012: SURE: Photogrammetric Surface Reconstruction from Imagery. *Proceedings LC3D Workshop*.
- SCHARSTEIN, D., HIRSCHMÜLLER, H., KITAJIMA, Y., KRATHWOHL, G., NEŠIĆ, N., WANG, X. & WESTLING, P., 2014: High-Resolution Stereo Datasets with Subpixel-Accurate Ground Truth. *GCPR 2014, Pattern Recognition*, Springer, Cham, 31-42.

- SCHÖNBERGER, J. L. & FRAHM, J.M., 2016: Structure-from-Motion Revisited. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 4104-4113.
- SCHÖNBERGER, J. L., ZHENG, E., FRAHM, J.M. & POLLEFEYS, M., 2016: Pixelwise View Selection for Unstructured Multi-View Stereo. Computer Vision – ECCV 2016, Springer, Cham, 501-518.
- SCHÖPS, T., SCHÖNBERGER, J. L., GALLIANI, S., SATTLER, T., SCHINDLER, K., POLLEFEYS, M. & GEIGER, A., 2017: A Multi-View Stereo Benchmark with High-Resolution Images and Multi-Camera Videos. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 3260-3269.
- SEITZ, S. M., CURLESS, B., DIEBEL, J., SCHARSTEIN, D. & SZELISKI, R., 2006: A Comparison and Evaluation of Multi-View Stereo Reconstruction Algorithms. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 519-528.
- STANEK, H. & EUGSTER, H., 2017: 3D-Bildbasierte Infrastrukturplattformen – Eine Neufokussierung aus Anwendersicht. 19. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2017, Herbert Wichmann Verlag, Berlin/Offenbach.
- WENZEL, K., ROTHERMEL, M., HAALA, N. & FRITSCH, D., 2013: SURE – The ifp Software for Dense Image Matching. D. Fritsch (Hrsg.) Photogrammetric Week '13, Wichmann, Berlin & Offenbach, 59-70.
- ZHENG, E., DUNN, E., JOJIC, V. & FRAHM, J.M., 2014: PatchMatch Based Joint View Selection and Depthmap Estimation. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1510-1517.