

Photogrammetrie auf Knopfdruck – Auswertung und Resultate UAV-gestützter Bildflugdaten*

Thomas P. Kersten und Maren Lindstaedt

Zusammenfassung

Unbemannte Flugsysteme mit Kameras oder in Einzelfällen mit Laserscannern als Aufnahmesensoren haben die Vermessung in den letzten Jahren zunehmend verändert. Durch den Einsatz solcher Systeme wurde der Aufgabenbereich nicht nur erweitert, sondern es konnten auch viele Projekte wirtschaftlich und flexibel bearbeitet werden. In diesem Beitrag werden Auswertungen und Resultate von Bildflugdaten unbemannter Flugsysteme anhand von vier unterschiedlichen Projektbeispielen vorgestellt, um das Anwendungspotenzial dieser Systeme aufzuzeigen. Dabei werden sowohl die heute verfügbaren Softwarepakete als auch der generelle Arbeitsablauf einer UAV-Befliegung von der Flugplanung bis zur Visualisierung der Ergebnisse vorgestellt. Der Automationsgrad bei der Auswertung und verschiedene abgeleitete Produkte werden anhand der Projektbeispiele präsentiert.

Summary

Unmanned flight systems with cameras or in some cases with laser scanners as recording sensors changed the surveying discipline in the last years increasingly. The spectrum of tasks could not only be extended using such systems, but many projects could also be processed economically and flexibly. In this contribution evaluations and results of aerial flight data of unmanned flight systems are presented on the basis of four different project examples, in order to demonstrate the application potential of these systems. Both the today available software packages and the general workflow of a UAV photo flight are presented from flight planning to the visualization of the results. The automation degree during data evaluation and the different derived products are presented based on the project examples.

Schlüsselwörter: Unmanned Aerial Vehicle, Bildflug, Kamera-kalibrierung, Punktwolke, 3D-Modellierung, Oberflächenmodell

1 Einleitung

Unmanned Aerial Vehicles (UAV), Unmanned Aerial Systems (UAS) oder Remotely-Piloted Aerial Systems (RPAS) haben sich als unbemannte Fluggeräte mit Kameras ausgestattet seit einigen Jahren für viele Anwendungen in der Vermessung etabliert. Als Systeme stehen überwiegend Flächenflugzeuge und sogenannte Kopter (Hubschrauber mit ein bis zwölf Rotoren) jeweils in unterschiedlichen Gewichtsklassen, aber auch Drachen, Gleitschirme und Ballons als Plattformen zur Verfügung, die mit verschie-

denen Sensoren (u. a. Kamera und GNSS-Empfänger) ausgestattet sind. Durch die UAVs hat die flexible und wirtschaftliche Erfassung photogrammetrischer Bilddaten von Arealen kleinerer bis mittlerer Größe (einige 10 ha) als Ergänzung zu den klassischen bemannten Bildflügen in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Welche wachsende Bedeutung die UAVs in der Photogrammetrie genommen haben, zeigt sich z. B. an den vier letzten Kongressen der ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing). Während sich 2004 in Istanbul erst drei Beiträge mit der Thematik befassten, wurden 2008 in Peking bereits drei Sitzungen mit insgesamt 21 Beiträgen abgehalten. 2012 in Melbourne waren es ca. 50 Beiträge zu UAV, die in neun Sitzungen präsentiert wurden (Colomina und Molina 2014), während in Prag auf dem 23. ISPRS-Kongress 2016 ca. 111 UAV-Beiträge in verschiedenen Sitzungen vorgestellt wurden. Die internationale photogrammetrische Gesellschaft misst dieser Thematik mit der Konferenz UAV-g (das g steht für Geomatics) gesteigerte Bedeutung zu, die seit 2011 alle zwei Jahre stattfindet: 2011 in Zürich (Schweiz), 2013 in Rostock und 2015 in Toronto (Kanada). Die nächste UAV-g ist 2017 in Bonn geplant. Diese Entwicklung wird auch durch die zunehmende Anzahl der inventarisierten UAVs von 544 (2005) auf 1708 (2013) unterstrichen (van Blyenburgh 2013 in Colomina und Molina 2014).

Die Bedeutung von UAVs für die Vermessung wurde schon früh durch die Photogrammetrie erkannt. Przybilla und Wester-Ebbinghaus (1979) führten zuerst einen Bildflug mit einer Kamera an einem ferngelenkten Kleinflugzeug durch. Ein zweiter Test erfolgte 1980 durch das gleiche Team mit einem Modellhubschrauber, bei dem eine Mittelformatkamera von Rollei angebracht war (Wester-Ebbinghaus 1980). Einen aktuellen Überblick über den Status, den Einsatz und die Perspektiven von UAVs für Anwendungen in der Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation geben verschiedene Autoren (Haarbrink 2011, Remondino et al. 2011, Nex und Remondino 2014 und Colomina und Molina 2014).

In diesem Beitrag werden die photogrammetrische Auswertung und verschiedene Resultate von UAV-Bildflügen vorgestellt. Was geht bereits auf Knopfdruck bzw. wie hoch ist der Automationsgrad bei der Datenprozessierung, wo liegen die Probleme und welche Produkte können

* Überarbeitete Fassung des Beitrags »Auf Knopfdruck – Auswertung und Resultate UAV-gestützter Bildflugdaten«, erschienen in: DVW e.V. (Hrsg.): UAV 2016 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen, Schriftenreihe des DVW, Band 82, Wißner-Verlag, Augsburg, 2016, S. 135–158.

aus diesen Daten abgeleitet werden? Im Abschnitt 2 wird der generelle Arbeitsablauf einer UAV-Befliegung von der Flugplanung bis zur Visualisierung der Ergebnisse vorgestellt. Die möglichen Softwarepakete (open-source, low-cost und kommerzielle Lösungen sowie Webservices), die für die Bearbeitung der Luftbilddaten eingesetzt werden können, werden in Abschnitt 3 zusammengefasst. Die Ergebnisse und Produkte verschiedener UAV-Bildflüge werden beispielhaft in Abschnitt 4 präsentiert.

2 Arbeitsablauf

Der generelle Arbeitsablauf für die Durchführung und Auswertung eines UAV-Bildfluges ist in Abb. 1 schematisch veranschaulicht. Dabei ist der Automationsgrad der

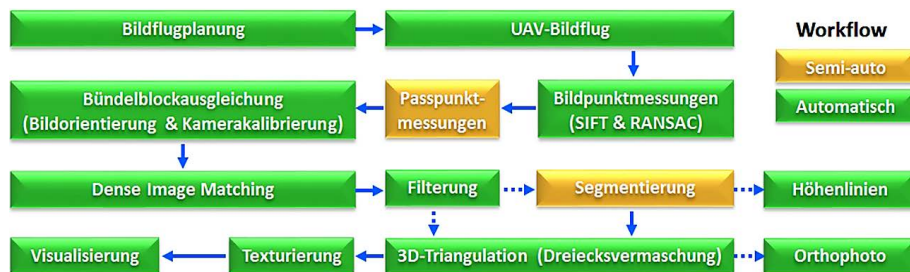


Abb. 1: Arbeitsablauf für die Durchführung und Auswertung eines UAV-Bildfluges

einzelnen Arbeitsschritte farblich gekennzeichnet (orange = halbautomatisch und grün = automatisch). Nach der Bildflugplanung werden die erstellten Parameter (in erster Linie die Aufnahmepositionen, die entsprechenden Fluglinien und die Kameraeinstellungen) an das Steuerungssystem des UAV übergeben, damit der Bildflug GNSS-gestützt automatisch erfolgen kann. In empirischen Untersuchungen zeigten Przybilla et al. (2015) den Einfluss verschiedener Befliegungsparameter auf die Qualität von UAV-Bildflügen mit einem Flächenflugzeug wie folgt auf: (a) Die Erweiterung des Bildflugs durch zusätzliche Aufnahmen einer Kreuzbefliegung führt zu signifikanten Genauigkeitssteigerungen bei gleichzeitiger Reduktion der Passpunkte. (b) Die mittels RTK-GNSS gemessenen Positionen der Aufnahmen (Äußere Orientierung) führen zu einer weiteren Qualitätssteigerung im Bildverband und bei der Simultankalibrierung der Kamera.

Nach erfolgtem Bildflug werden die Bilddaten und die mit RTK-GNSS gemessenen Aufnahmepositionen (falls verfügbar) der Auswertesoftware übergeben. Nach Einlesen der Fotos wird durch structure-from-motion bzw. Algorithmen aus dem Bereich des Computer Vision eine dünne Punktwolke generiert. Dabei werden mit dem SIFT-Operator (Scale Invariant Feature Transform, Lowe 2004) oder anderen ähnlichen Operatoren Merkmale in benachbarten Bildern extrahiert, die anschließend nach einer Korrespondenzanalyse meistens mit dem RANSAC-Verfahren (random sample consensus) zugeordnet oder eliminiert werden. Durch Bündelblockausgleichung wer-

den aus den erfolgreich zugeordneten Bildpunkten die (äußeren) Bildorientierungen und die Parameter für die Kamerakalibrierung (innere Orientierung) automatisch berechnet. Vorab werden jedoch noch zur Skalierung und Georeferenzierung des Objektes die Passpunkte mit entsprechenden Softwarepaketen in den Bildern manuell oder halbautomatisch gemessen. Eine Automation der Passpunktmessungen ist mit kodierten Messmarken generell möglich, aber bisher nur in industriellen Anwendungen der Nahbereichs- und nicht in der Luftbildphotogrammetrie erfolgreich eingesetzt worden. Mit den ausgeglichenen Orientierungsparametern der stark überlappenden Bildaufnahmen lassen sich mittels Verfahren zur dichten Bildzuordnung (Dense Image Matching) automatisch 3D-Punktwolken erstellen. Nach automatischer Filterung (oft zur Datenreduktion) und interaktiver Segmentierung zur Bereinigung der Punktwolke wird eine Dreiecksver-

maschung der Punkte berechnet, sodass daraus ein polygonisiertes 3D-Modell entsteht. Allerdings können aus der gefilterten und bereinigten Punktwolke auch Höhenlinien oder aus der Vermaschung ein Orthophoto abgeleitet werden. Das generierte 3D-Modell wird durch die verwendeten Bilddaten automatisch foto-realistisch texturiert, indem jedem Dreieck die entsprechende

Fototextur zugewiesen wird. Wenn aus einer transformierten und georeferenzierten, farbigen 3D-Punktwolke ein CAD-Modell konstruiert werden soll, erfolgt eine manuelle Weiterverarbeitung in einem CAD-Programm (z. B. AutoCAD) durch den Anwender. Das texturierte 3D-Modell kann anschließend in einer Visualisierungssoftware (z. B. 3D Studio, Cinema4D, Maya, etc.) weiter bearbeitet werden, um daraus z. B. Videosequenzen zu erstellen. Eine nutzergesteuerte Visualisierung kann nach dem Export der Daten z. B. mit der kostenlosen Software MeshLab, CloudCompare oder in einem 3D-PDF geschehen.

3 Softwarelösungen

Für die Auswertung von UAV-Bildflugdaten stehen verschiedene Softwarelösungen zur Verfügung, die man in fünf Kategorien einteilen kann: (1) open-source Software (Bundler/PMVS2, Apero/MicMac), (2) freie Software (VisualSFM), (3) Webservices (Microsoft Photosynth, Autodesk 123D Catch, ARC 3D), (4) low-cost Software (Agisoft PhotoScan) und (5) kommerzielle Software (Pix4Dmapper, aSPECT^{3D}, SURE, smart3Dcapture, ERDAS IMAGINE oder Trimble Business Center). Nachfolgend werden einige dieser Programme kurz beschrieben, doch für eine ausführliche Dokumentation wird auf die angegebene Literatur verwiesen. In den letzten Jahren wurden bereits viele Publikationen über Vergleiche einige dieser

Softwarelösungen aus Photogrammetrie und Computer Vision für die automatisierte und präzise 3D-Aufnahme und Modellierung von unterschiedlichen Objekten in diversen Anwendungen veröffentlicht (Neitzel et al. 2011, Kersten und Lindstaedt 2012, Kersten et al. 2012, Kersten und Mechelke 2013, Barrile et al. 2015, Schöning und Heidemann 2015). Remondino und Kersten (2012) zeigen bei Untersuchungen verschiedener Datensätze Probleme und Grenzen der freien und open-source Softwarelösungen in einem kritischen Überblick auf. Einen ersten Überblick über die klassischen photogrammetrischen Softwarepakete im Zusammenhang mit UAV-Photogrammetrie gibt Eisenbeiß (2009). Eine sehr umfangreiche Liste photogrammetrischer Softwarepakete im Vergleich ist auf Wikipedia unter der folgenden Adresse https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_photogrammetry_software zusammengestellt.

3.1 Bundler/PMVS2

Bundler (Snavely et al. 2008) und PMVS2 (Patch-based Multi-view Stereo Software, Furukawa und Ponce 2010) wurden an der Universität von Washington in Seattle (USA) in C und C++ unter der GNU General Public License als frei verfügbare Software entwickelt. Bundler arbeitet als *Structure from Motion* (SfM) System für beliebig angeordnete Bilddaten und wurde für das Photo Tourism Project von Microsoft entwickelt (Snavely et al. 2006). Die Merkmalsextraktion in den Bildern erfolgt durch den SIFT-Algorithmus. Die Software berechnet für einen beliebigen Bilddatensatz die Kalibrierungsdaten der Kamera (Brennweite f als Näherung aus den EXIF-Daten, zwei Parameter der radial-symmetrischen Verzeichnung k_1

und k_2), die Bildorientierungen und eine dünn besetzte 3D-Punktwolke der aufgenommenen Szene durch eine modifizierte Bündelblockausgleichung von Lourakis und Argyros (2004) als Ausgabe. Die Ergebnisse von Bundler werden in PMVS2 verwendet, um durch Dense Image Matching eine dichtere Punktwolke aller nicht-bewegten Objekte zu generieren. Dabei erhält jeder Punkt neben der 3D-Koordinate auch die Farbwerte des Objektes aus den Bildern. Für den Einsatz an der HCU Hamburg wurde eine Benutzeroberfläche (Abb. 2 oben) erstellt, die den Arbeitsablauf der benötigten Softwareteile automatisiert, d. h. nach Eingabe der Bilder laufen Bundler und PMVS2 automatisch nacheinander ab und das Ergebnis wird in MeshLab dargestellt. MeshLab ist ein portables und erweiterbares open-source Softwarepaket für die Verarbeitung und Editierung von unstrukturierten Punktwolken und Dreiecksvermaschungen, das am Visual Computing Lab des Istituto di Scienza e Tecnologie dell'Informazione »A. Faedo« in Pisa entwickelt wird (Cignoni et al. 2008).

3.2 VisualSFM

VisualSFM ist eine schnelle, auf Multicore-Berechnungen basierende SfM-Software mit grafischer Benutzeroberfläche (siehe Abb. 2 unten), die ebenfalls an der Universität von Washington entwickelt wurde (Wu 2007). Die Software stellt eine Re-Implementierung des SfM-Systems aus dem Photo Tourism Project dar. Sie enthält signifikante Verbesserungen hinsichtlich der Berechnungsgeschwindigkeit, indem sowohl der SIFT-Algorithmus auf dem Grafikprozessor (SiftGPU) als auch eine Multicore-Bündelausgleichung integriert wurden (Wu 2011). Die Kameraparameter werden für jedes Bild berechnet: Die Kamerakonstante (in Pixel) wird automatisch als Näherung aus den EXIF-Daten genommen; der Bildhauptpunkt wird für jedes Bild im Bildzentrum angenommen (außer bei vorgegebener Kalibrierung) und es wird nur ein Parameter der radial-symmetrischen Verzeichnung verwendet. Dichte Punktwolken zur Objektrekonstruktion werden in VisualSFM unter Verwendung von PMVS/CMVS (Patch oder Cluster basierte Multi View Stereo Software) erstellt (Furukawa und Ponce 2010).

3.3 Autodesk 123D Catch

Im Sommer 2010 stellte Autodesk das Projekt Photofly vor, bei dem es sich um einen freien Webservice handelt, mit dem man aus mindestens fünf sich überlappenden Bildern automatisch ein vermaschtes 3D-Modell des aufgenommenen Objektes ableiten kann (Abate et al. 2011). Eine Grundlage dieses Webservices ist die Software smart-3Dcapture von der französischen Firma acute3D in Nizza, deren grundlegende Algorithmen durch Courchay et al. (2010) beschrieben werden. Photofly verwendet Algorithmen aus den Bereichen Computer Vision und Photo-

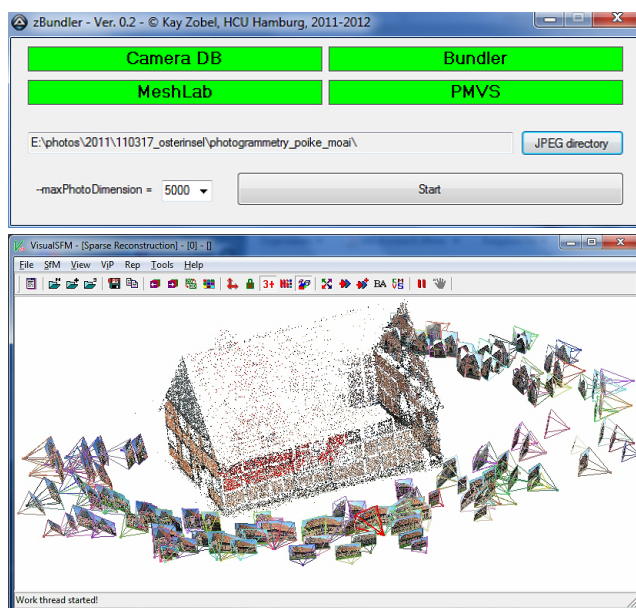


Abb. 2: HCU-Benutzeroberfläche für den automatischen Ablauf von Bundler/PMVS2 (oben) und grafische Benutzeroberfläche für eine benutzergeführte Datenverarbeitung mit VisualSFM (unten)

grammetrie als Grundlage und nutzt die Leistungsfähigkeit von Cloud Computing aus, um effizient 3D-Modelle aus 2D-Bilddaten zu erstellen. Im November 2011 wurde PhotoFly durch 123D Catch Beta abgelöst, nachdem im Oktober 2011 die Firma acute3D ihre Software smart3D-capture der Öffentlichkeit vorgestellt hatte.

Voraussetzung zur Nutzung der aktuellen Version von 123D Catch ist eine Registrierung als Anwender bei Autodesk und eine Installation der App auf dem Computer. Über die sehr übersichtliche Benutzeroberfläche dieser Software werden die ausgewählten Bilder auf den Server übertragen und das je nach Komplexität in kurzer Zeit (d.h. in einigen Minuten bis in wenigen Stunden) erstellte 3D-Modell kann dort auch bearbeitet werden. Wichtige Funktionen stellen das Auswählen von Teilen der Dreiecksvermaschung, Navigationsoptionen, das Auswählen von Punkten und das Festlegen einer Referenzstrecke für die Skalierung des Modells dar. Einzelne Bilder können noch nachträglich durch Messung von identischen Punkten (Verknüpfungspunkte) in das Modell eingefügt werden. Für die Generierung eines 3D-Modells stehen die drei Qualitätsstufen Mobile, Standard und Maximum (bestmögliches Ergebnis) zur Verfügung. Die Ergebnisse können in verschiedene Formate (z.B. DWG, DXF oder OBJ) exportiert werden. Bei Genauigkeitsuntersuchungen stellten Chandler und Fryer (2013) fest, dass 123D Catch nicht das hohe Genauigkeitsniveau, das in der Nahbereichsphotogrammetrie möglich ist, erreicht, aber dass die erzielte Genauigkeit dennoch für viele Anwendungen ausreicht.

3.4 Agisoft PhotoScan

Agisoft PhotoScan ist eine preiswerte 3D-Rekonstruktionssoftware von der Firma Agisoft LLC (www.agisoft.ru) in St. Petersburg, Russland, die genaue texturierte 3D-Modelle unter Verwendung digitaler Fotos von Szenen automatisch erstellt. Das Programm liefert robuste Bildorientierungen mit und ohne kodierte Zielmarken und ohne spezielle Bildaufnahmebedingungen. PhotoScan (aktuelle Version 1.2) kann für 179 US-Dollar als preiswerte Standardausgabe oder als professionelle Version für 3.499 US-Dollar gekauft werden. Die meisten der folgenden Ergebnisse in diesem Beitrag sind mit der professionellen Version 1.1.6 erstellt worden. Dieses Programm ist unter Windows-Betriebssystemen ausführbar, d.h. alle mit dieser Software erstellten Daten bleiben auf dem lokalen PC des Anwenders. Die Vorteile von PhotoScan können wie folgt zusammengefasst werden: (a) sehr einfacher Workflow mit Option zur Automation durch Batch-Prozessierung, (b) schnelle Berechnungen mit CPU und GPU, (c) genaue interaktive Bildpunktmessungen von Maßstäben und Passpunkten (nur in Professional Version), (d) Bildorientierung und Kamerakalibrierung durch Bündelblockausgleichung, (e) Modellierung der inneren Orientierung der Kamera(s) durch verschiedene Parameter

(Bildhauptpunkt, Kamerakonstante, sieben radial-symmetrische und tangentielle Verzeichnungsparameter und eine Scherung zwischen x- und y-Achse) sowie (f) verschiedene Exportmöglichkeiten der Ergebnisse.

3.5 Pix4Dmapper

Pix4Dmapper Pro ist ähnlich wie PhotoScan eine in sich geschlossene, professionelle und kommerzielle Software für die Bearbeitung von UAV-Bildflugdaten und anderen Fotos. Die aktuelle Version 2.0 von der Firma Pix4D, einer Spin-Off Firma der ETH Lausanne, Schweiz, kostet 6.500 Euro. Sie generiert automatisch 3D-Punktwolken, digitale Oberflächenmodelle und Geländemodelle, Höhenlinien, georeferenzierte Orthophotomosaik und texturierte vermaschte Modelle in einer Vielzahl von verschiedenen Ausgabeformaten. Zur präzisen Georeferenzierung der Daten können vorhandene Bildorientierungen, Passpunkte und GNSS-Flugdaten für jedes Bild (geotags) eingegeben werden. Mit Multispektral-Daten können sogar Vegetationskarten (z.B. NDVI) für landwirtschaftliche Anwendungen erstellt werden. Pix4D bietet im Internet eine Support-Seite, die auch ein Forum für Diskussionsbeiträge enthält, und freie einstündige Webinars an. Eine erste Anwendung der Software Pix4Dmapper wird in Vallet et al. (2011) vorgestellt, während Vergleiche mit anderen Softwarepaketen bei der Triangulation von Bildverbänden durch Gini et al. (2013), beim Monitoring eines aktiven Vulkanes durch Nakano et al. (2014) und beim Monitoring von bebauten Gebieten durch Unger et al. (2014) präsentiert werden.

3.6 ASPECT^{3D} und SURE

Aspect^{3D} ist eine weitere professionelle und kommerzielle Softwarelösung von der Firma ArcTron 3D GmbH in Altdorf, die aus digitalen Bildsequenzen hochaufgelöste 3D-Modelle erstellt. Der Just-Start-Modus bietet dem Anwender die Möglichkeit, vollautomatisch mit nur wenigen Klicks ein fotorealistisch-texturiertes 3D-Modell zu erstellen. Dagegen kann man im Advanced Mode auf alle Berechnungsparameter z.B. bei der Kamerakalibrierung und bei der Passpunktmessung zur automatischen Georeferenzierung Einfluss nehmen. Weitere Produkte der Software sind True Orthophotos und digitale Oberflächenmodelle sowie weiche Kamerafahrten um die 3D-Modelle in Full-HD-Auflösung und auch in Stereo-3D. Schaich (2013) gibt einen Überblick über die Software mit verschiedenen Anwendungsbeispielen. Grundlage dieser Software ist der Matching-Algorithm der Software SURE (photogrammetric SURface REconstruction from imagery) von der Firma nframes aus Stuttgart, bei dem ein Referenzbild mit seinen überlappenden Bildern jeweils als Stereopaar durch eine erweiterte Version des Semi-Global Matching (SGM) gemessen wird (Wenzel et al. 2013).

Voraussetzung für das Matching mit SURE sind Bildorientierungs- und Kamerakalibrierungsdaten aus z.B. Bundler oder PhotoScan.

3.7 Weitere Softwarelösungen

Die folgende Auswahl weiterer Softwarelösungen ist verfügbar, ist aber für die Projekte in diesem Beitrag nicht eingesetzt wurden: Open-source Software *Apero/MicMac* (Pierrot-Deseilligny und Paparoditis 2006 und Pierrot-Deseilligny und Cléry 2011) vom Matis-Labor des französischen IGN (Institut Géographique National) in Paris und *Gipuma* von der ETH Zürich (Galliani et al. 2016), kommerzielle low-cost Software *Photomodeler Scanner* (Przybilla et al. 2010) und weitere Webservices *Arc3D* (Vergauwen und Van Gool 2006), *Hypr3D* (Gede und Mészáros 2012) und *My3DScanner* (www.my3dscanner.com).

4 Ergebnisse und Produkte von UAV-Bildflügen

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse und verschiedene Produkte vier ausgewählter UAV-Bildflüge (Abb. 3) vorgestellt. Die Bearbeitung der hier aufgeführten UAV-Bilddaten erfolgte mit der Software *PhotoScan*, da sie den kompletten Arbeitsablauf vom Datenimport (Fotos, Koordinaten) bis zum texturierten 3D-Modell bietet. In Tab. 1 sind die in diesem Beitrag vorgestellten UAV-Bildflüge mit dem verwendeten UAV-System, der eingesetzten Kamera sowie die Anzahl von Fotos und Passpunkten als wichtigste Informationen zusammengefasst. Bei dem Objekt *Seedorf* (Landkreis Bad Segeberg, Schleswig-Holstein) handelt es sich um ein historisches Torhaus, das sowohl von der Luft als auch vom Boden u. a. mit Kameras aufgenommen wurde. Das *Brodtener Steilufer* ist ein Monitoring-Projekt an der Ostsee bei Travemünde (Schleswig-Holstein), bei dem der Abbruch eines Uferabschnittes über zehn Jahre durch terrestrisches Laserscanning und neuerdings durch UAV-Bilddaten dokumentiert wird. Bei den anderen beiden Bildflügen wurden archäologische Objekte erfasst: archäologisches Denkmal Ringwallanlage *Lembecksburg* (Nordseeinsel Föhr) und *Quebrada*

Vaipu (Osterinsel, Chile) als archäologisches Grabungsgebiet des Deutschen Archäologischen Instituts in Bonn.

4.1 UAV-Bildflug des Torhauses in Seedorf mit einem Trikotter

Das 1583 erbaute Torhaus in Seedorf (im Landkreis Bad Segeberg, Schleswig-Holstein) wurde im September 2014 mit einer Canon IXUS 125 HS ($c = 4$ mm) an einem Trikotter mit 60 Bildern aus der Luft und mit einer Nikon D800 ($c = 18$ mm) sowie einer Nikon D7000 ($c = 50$ mm) mit 155 Bildern vom Boden fotografiert (Abb. 3a). Vor der Aufnahme wurden 14 Passpunkte am Boden und am Gebäude signalisiert und mit vier zusätzlichen natürlichen Passpunkten im Dachbereich geodätisch mit einer Genauigkeit von ca. 3 mm in einem örtlichen Koordinatensystem eingemessen. Um vergleichende Daten zu erfassen, wurde das Gebäude auch noch mit einem terrestrischen Laserscanner *IMAGER 5010* der Firma *Zoller + Fröhlich* aufgenommen (Abb. 4).

Aus mehreren UAV-Bildflügen, die in verschiedenen Höhen über dem Gebäude in Fluglinien oder im Kreis geflogen wurden, wurden 60 Fotos für die Berechnungen ausgewählt. Zusammen mit 99 Fotos der D800 und 56 Fotos der D7000 wurden die UAV-Bilder in *PhotoScan* bearbeitet. Mit den 215 Bildern wurde eine dünne Punktwolke von knapp 7.000 Punkten berechnet, die neben den manuellen Passpunktmessungen die Grundlage für

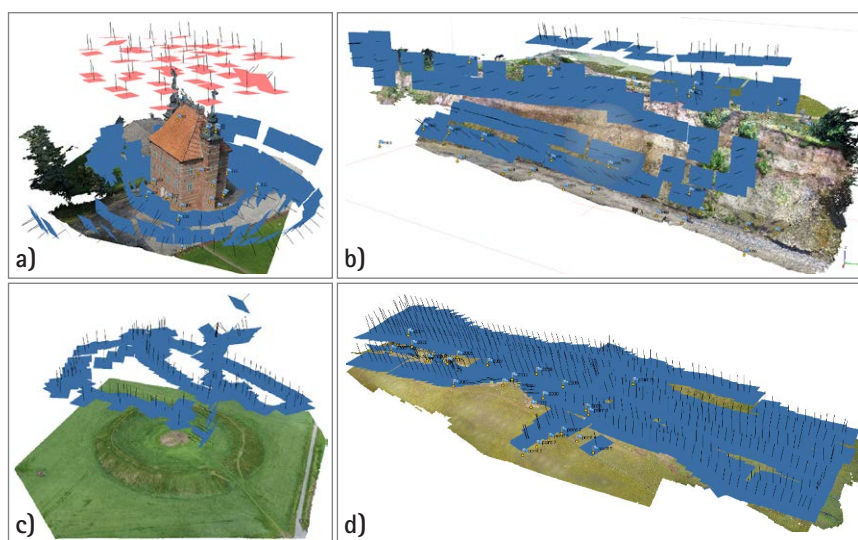


Abb. 3: UAV-Bildflüge: a) Torhaus Seedorf, b) Steilufer Brodten, c) Lembecksburg, d) Quebrada Vaipu, Osterinsel

Tab. 1: Zusammenfassung der vorgestellten UAV-Bildflüge

Objekt	UAV-System	Kamera	c [mm]	# Fotos	# Passpunkte
Seedorf	Trikotter	Canon IXUS 125	4	60	18
Brodten	Quadrokoetter	Sony EXMOR	20	180	14
Lembecksburg	Hexakoetter	Sony Nex-5	16	186	5
Osterinsel	Oktokoetter	Sony Nex-5R	16	702	14

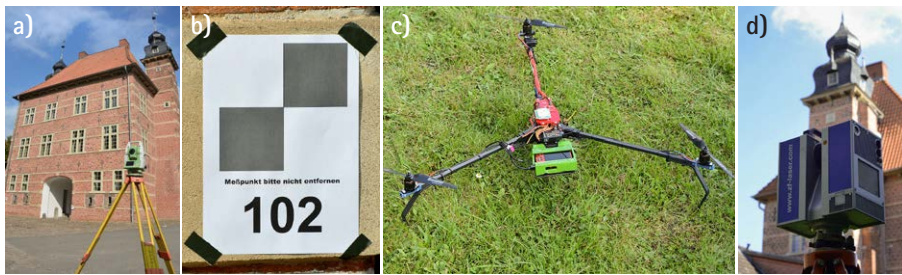


Abb. 4:

a) Passpunktmessung mit Totalstation Leica TCRA 1201+, b) signalisierter Passpunkt, c) Trikotter, d) terrestrischer Laserscanner IMAGER 5010

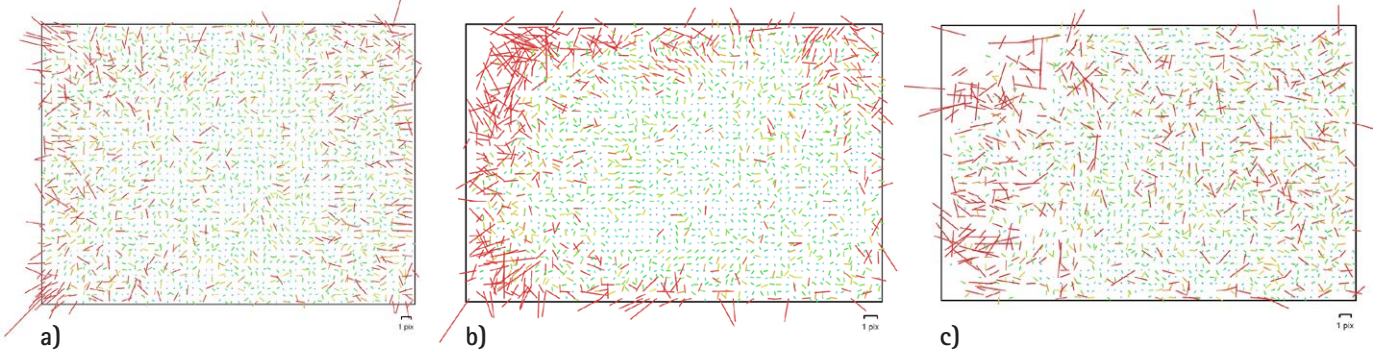


Abb. 5: Bildpunktverbesserungen als Ergebnisse der Kamerakalibrierung: a) Canon IXUS 124 HS ($c = 4,3$ mm), b) Nikon D800 ($c = 18$ mm), c) Nikon D7000 ($c = 50$ mm)

die Bildorientierungen und Kamerakalibrierung bildeten. Die 18 Passpunkte wurden durchschnittlich in 26 Bildern gemessen und die Abweichungen zu den Sollkoordinaten lagen bei 1,2 cm in XYZ. Die Bildmessgenauigkeit betrug 0,4 Pixel für die Passpunktmessungen und ca. 1 Pixel für die Verknüpfungspunkte. Als ein Ergebnis der Auswertung sind in Abb. 5 die Bildpunktverbesserungen nach der Kalibrierung der drei verwendeten Kameras dargestellt, die eine Systematik besonders am Bildrand aufweisen. Als Parameter der Kalibrierung wurden neben Kamerakonstante und Bildpunkt, vier Parameter der radialsymmetrischen und zwei Parameter der tangentialen Verzerrung sowie die Affinität und Scherung berechnet.

Im nächsten Schritt wurde mit den ausgeglichenen Parametern der inneren und äußeren Bildorientierungen durch Dense Image Matching eine dichte Punktwolke (ca. 35,9 Mio. Punkte) vom Gebäude berechnet. Viele Fehlmessungen an der Dachkante und um die Turmspitzen wurden manuell gelöscht. Der auszuwertende Bereich des Gebäudes wurde anschließend manuell in der Punktwolke segmentiert. Mit den nun segmentierten und bereinigten Daten (13,4 Mio. Punkte) wurde eine Vermaschung mit 2,7 Mio. Dreiecken gerechnet, die anschließend automatisch texturiert wurde. Das vermaschte 3D-Modell des Torhauses (Datenmenge 294 Mbyte) ist in der Abb. 6a dargestellt. Aus der bereinigten Punktwolke wurde mit Hilfe der Software Geomagic Studio und AutoCAD mit dem Plugin PointSense von der Firma kubit bzw. Faro ein komplettes

CAD-Volumenmodell (27 Mbyte) generiert (Abb. 6c/d). Eine detaillierte Beschreibung der CAD-Modellierung ist in Gerdau (2015) gegeben. Ein 3D-Vergleich zeigt, dass die vermaschten Laserscanningdaten sehr gut mit der Punktwolke aus PhotoScan zusammenpassen (Abb. 7b), während systematische Abweichungen des CAD-Modells von der Laserscanning-Punktwolke besonders auf dem Dach und an den Türmen aufgrund der Diskrepanz zwischen tatsächlicher Bauweise und Generalisierung bei der Modellierung in Abb. 7c klar veranschaulicht sind.

4.2 UAV-Bildflug des Steilufers in Brodten mit einem Quadroptor

Das Brodtener Ufer ist eine über 4 km lange Steilküste an der Lübecker Bucht (Ostsee) zwischen Travemünde und Niendorf in Schleswig-Holstein. Durch die einsetzende Eisschmelze in der letzten großen Eiszeit formte eine gewaltige Gletscherzunge die heutige Lübecker Bucht, indem sich die mit dem Gletscher transportierten Sandmassen, Mergel und mannsgroßen Findlinge in Form einer

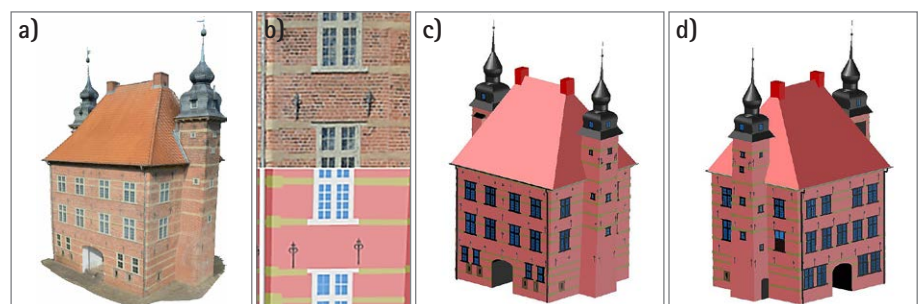


Abb. 6: a) Torhaus Seedorf (Vorderseite) als vermaschtes 3D-Modell, b) Ausschnitt der Punktwolke und der entsprechenden CAD-Modellierung, c) und d) CAD-Modelle des Torhauses

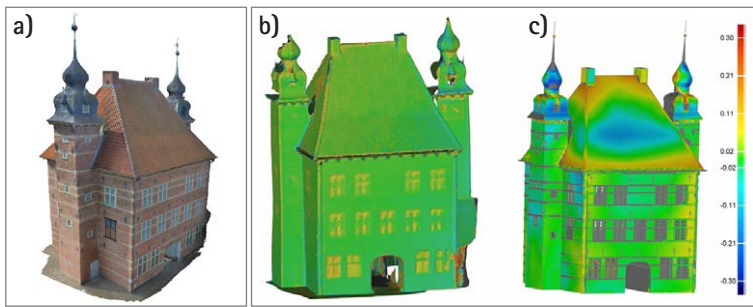


Abb. 7: a) Torhaus Seedorf (Rückseite) als vermaschtes 3D-Modell und b/c) zwei 3D-Vergleiche: b) TLS-Vermaschung vs. Punktwolke PhotoScan und c) TLS-Punktwolke vs. CAD-Modell (grün < 2 cm)

Moräne abgelagerten und den Verlauf der heutigen Ostseeküste prägten. Die bis zu 20 m hohe Steilküste stellt in weiten Teilen ein aktives Kliff dar, das durch die Einwirkung von peitschendem Wellenschlag der Winterstürme aus Ost-Nordost, starker Regenfälle mit einhergehender Aufweichung und Auswaschung der unterschiedlichen Sedimentschichten und auch durch gefrierendes, sich im Volumen ausbreitendes Sickerwasser im Durchschnitt bis zu einem Meter pro Jahr zurückweicht. In unmittelbarer Nähe des Steilufers befindet sich das Ausflugslokal Hermannshöhe, das vor dem Ersten Weltkrieg errichtet, 2011 abgerissen und durch einen im Mai 2012 eröffneten Neubau ersetzt wurde. Die HCU Hamburg führt im Abschnitt Hermannshöhe seit 2004 Messungen mit terrestrischen Laserscannern durch, um die rasanten Veränderungen bzw. den Abbruch zu dokumentieren. Am 21. Juni 2016 wurde der Abschnitt des Brodtener Steilufers erneut durch terrestrisches Laserscanning und zusätzlich durch eine 15-minütige UAV-Befliegung mit der dji Phantom 3 (Kamera Sony EXMOR mit $c = 20$ mm, 4000×3000 Pixel) in 180 Fotos aufgenommen. Der Bildflug wurde manuell gesteuert, wobei an der oberen Kante des Steilufers Senkrecht- und am Hang Schrägaufnahmen gemacht wurden (siehe Abb. 3b).

Von den insgesamt 26 Passpunkten (siehe Abb. 8), die mit zwei Totalstationen ungefähr zeitgleich von oben und unten eingemessen und an das UTM-Koordinatensystem angeschlossen wurden, konnten 14 für die Bildtriangulation der UAV-Aufnahmen verwendet werden. Vier Passpunkte waren ebenerdig für die Bildtriangulation der UAV-Aufnahmen und die weiteren als Schachbrettzielzeichen auf Lotstäben oder im Hang hauptsächlich für die

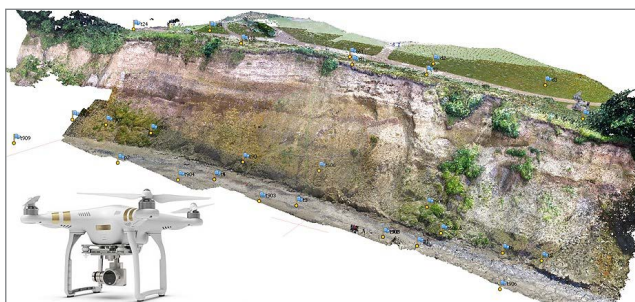


Abb. 8: Punktwolke vom Brodtener Steilufer mit Passpunktverteilung – UAV-Befliegung mit einer dji Phantom 3

Registrierung der terrestrischen Laserscans angebracht. Für die Bildorientierung von 170 verwendeten Fotos und für die Kamerakalibrierung wurde in PhotoScan eine dünne Punktwolke mit 26.719 Punkten erstellt. Die Passpunkte wurden durchschnittlich in 11 Bildern gemessen und die Verbesserungen der Passpunktkoordinaten lagen bei 10 mm in XY und 9 mm in Z. Die Bildmessgenauigkeit betrug 0,9 Pixel für die Passpunktmessungen und 0,3 Pixel für die Verknüpfungspunkte. Im nächsten Schritt wurde mit den ausgeglichenen Parametern der inneren und äußeren Bildorientierungen eine

dichte Punktwolke mit ca. 2,6 Mio. Punkten in der niedrigen Auflösung vom Steilufer durch Dense Image Matching berechnet. Im Auswertgebiet wurde die Vegetation manuell segmentiert und eliminiert, sodass aus dem bereinigten Datensatz eine Dreiecksvermaschung (1,0 Mio. Dreiecke) mit einer Dreieckslänge von ca. 10 cm berechnet werden konnte. Die Abb. 9a zeigt die Veränderungen der Lage der Oberflächenmodelle und der Ober- und Unterkante des Steilufers. Die Oberkante des Steilufers (gemessen ca. 2 m unterhalb der obersten Kante für eine bessere Vergleichbarkeit) hat sich zwischen Juni 2005 und Juni 2016 auf einem Abschnitt von 100 m zwischen 4 m und 11,5 m landeinwärts verschoben; bei der Unterkante bewegt sich dieser Wert sehr viel konstanter zwischen 6 m und 8 m (Abb. 9b). Das abgetragene Volumen beläuft sich auf diesem Abschnitt mit 100 m Länge und 22 m Höhe auf ca. 15.500 m^3 in den letzten elf Jahren.

Die UAV-Aufnahme und die automatisierte Auswertung der Bilddaten mit PhotoScan haben insgesamt 1,5 Stunden gedauert, während nur das terrestrische Laserscanning mit dem parallelen Einsatz eines Faro Fokus^{3D} X330 im Uferbereich (acht Standpunkte) und eines Z+F IMAGER 5010 am oberen Rand des Steilufers (fünf Standpunkte) ca. 5 Stunden mit mehreren Personen

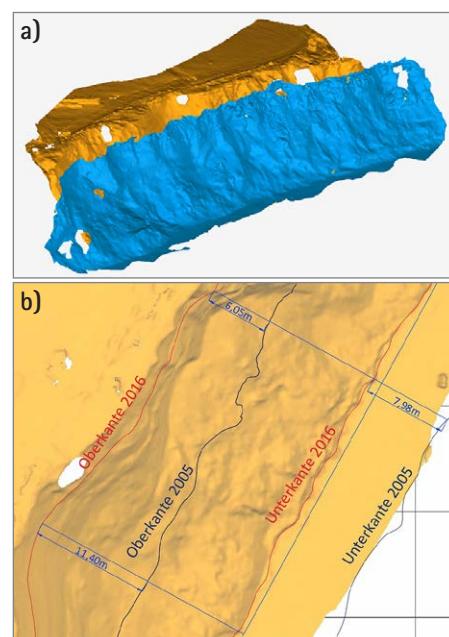


Abb. 9: a) Die Lage zweier Oberflächenmodelle des Steilufers Brodten: 2005 (blau) und 2016 (orange)

b) Veränderungen der jeweiligen Unter- und Oberkante des Steilufers

dauerte. Da für das Monitoring des Steilufers nicht sehr hohe Genauigkeiten erforderlich sind, kann somit durch eine regelmäßige UAV-Befliegung eine sehr effiziente Projektbearbeitung mit guten Ergebnissen gewährleistet werden. Dabei erfolgt durch die Auswertung der Bilddaten eine eindeutigere Bestimmung der oberen Bruchkante als mit den Daten des terrestrischen Laserscannings.

4.3 UAV-Bildflug der Lembecksburg mit einem Hexakopter

Die Ringwallanlage Lembecksburg auf der Insel Föhr (Landkreis Nordfriesland) wurde im Rahmen einer Mess-Exkursion vom 26. bis zum 29. Mai 2015 durch das Labor für Photogrammetrie & Laserscanning der HafenCity Universität Hamburg durch Laserscanning und UAV-Bildflüge dreidimensional erfasst. Die bis in die Jungsteinzeit zurückdatierbare Lembecksburg ist ein gut erhaltener, stattlicher Ringwall 1 km nördlich des Dorfes Borgsum gelegen. Unter geschickter Ausnutzung der topographischen Verhältnisse erbaute man die Burg auf einer weitgehend isoliert liegenden Geestkuppe am Rand der Föhrer Marsch. Der Außendurchmesser der Burg beträgt heute etwa 142 m, der Innendurchmesser 92 m. Die Krone des steil geböschten Ringwalles liegt 3 bis 4 m über der Innenfläche der Burg, aber bis zu 10 m über der Außenfläche. Bei archäologischen Grabungen und Untersuchungen in den 50er Jahren des vorherigen Jahrhunderts konnten auch Fundstücke aus der römischen Kaiserzeit und der Wikingerzeit nachgewiesen werden (Segschneider 2009).

Die Lembecksburg (Abb. 10a) wurde am 27./28. Mai 2015 durch Luftaufnahmen mit der Kamera Sony Nex-5 (4592 × 3056 Pixel, $c = 16$ mm) an einem Hexakopter Sky Hero Spy 750 (Abb. 10b) befestigt aufgenommen. Die geplanten Fluglinien konnten wegen des böigen Windes (bis Windstärke 7) nicht eingehalten werden, sodass der Flugmodus aus Sicherheitsgründen von automatischer auf manuelle Flugsteuerung umgestellt werden musste. Von drei UAV-Bildflügen wurde ein Flug von acht Minuten mit 186 Fotos für die Erstellung eines 3D-Modells durch Dense Image Matching mittels des Softwarepaketes Agisoft PhotoScan ausgewählt. Die durchschnittliche Auflösung der Bilder am Boden lag bei 2,3 cm je Pixel.



Abb. 10: a) Ringwallanlage Lembecksburg inkl. Passpunkt-lage aus der Vogelperspektive, b) Hexakopter Sky Hero Spy 750 mit Steuereinheit 3D Robotics Pixhawk und Kamera Sony Nex-5 im Einsatz

Die Orientierung der 186 Bilder und die Kalibrierung der Sony-Kamera wurde mit einem Notebook (Schenker XMG 64 bit Betriebssystem, 32 GB RAM, 2 Nvidia GeForce GT780M, CPU Intel Core i7-4940MX CPU 3.1 GHz) in knapp 19 Minuten mit PhotoScan berechnet. Dafür wurde eine dünne Punktwolke mit 44.550 Punkten erstellt, was 240 Punkten pro Bild im Durchschnitt entspricht. Zur Georeferenzierung der Daten wurden fünf Passpunkte im Gelände signalisiert und durch geodätische Messungen an das übergeordnete Koordinatensystem angeschlossen. Die fünf signalisierten Passpunkte (siehe Abb. 10a) wurden durchschnittlich in 33 Bildern manuell gemessen und die Verbesserungen der Passpunktkoordinaten lagen bei 7 mm in X, 17 mm in Y und 7 mm in Z. Die Bildmessgenauigkeit betrug 0,4 Pixel für die Passpunktmessungen und 1,0 Pixel für die Verknüpfungspunkte. Die dichte Punktwolke wurde mit der Qualitätseinstellung Medium in 22 Minuten berechnet, was einer Datenmenge von ca. 8,8 Mio. Punkten entspricht. Diese dichte Punktwolke wurde in Geomagic Studio auf einen Punktabstand von 15 cm reduziert und eine Dreiecksvermaschung mit 1,6 Mio. Dreiecken erstellt. Dieses 3D-Modell der Lembecksburg wurde einer Qualitätskontrolle unterzogen, indem es mit 557 Referenzpunkten (siehe Abb. 11a) von einer Leica Totalstation verglichen wurde. Das Ergebnis entsprach einer systematischen Abweichung von 27 cm gegenüber der Referenz, d.h. das aus UAV-Bilddaten generierte Modell lag wegen des nicht geschnittenen Grases im inneren Bereich der Ringwallanlage erwartungsgemäß zu hoch. Die größten Abweichungen sind an der inneren Wall-

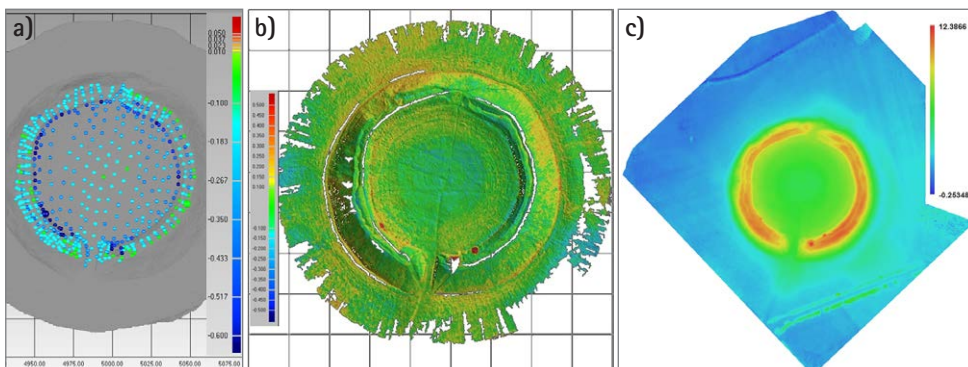


Abb. 11: a) Qualitätskontrolle des 3D-Modells aus UAV-Bilddaten durch Vergleich mit Referenzpunkten einer Totalstation, b) 3D-Vergleich der Modelle von UAV-Bilddaten und mobilem Laserscanning, c) farbkodierte Darstellung des Höhenmodells aus UAV-Bilddaten

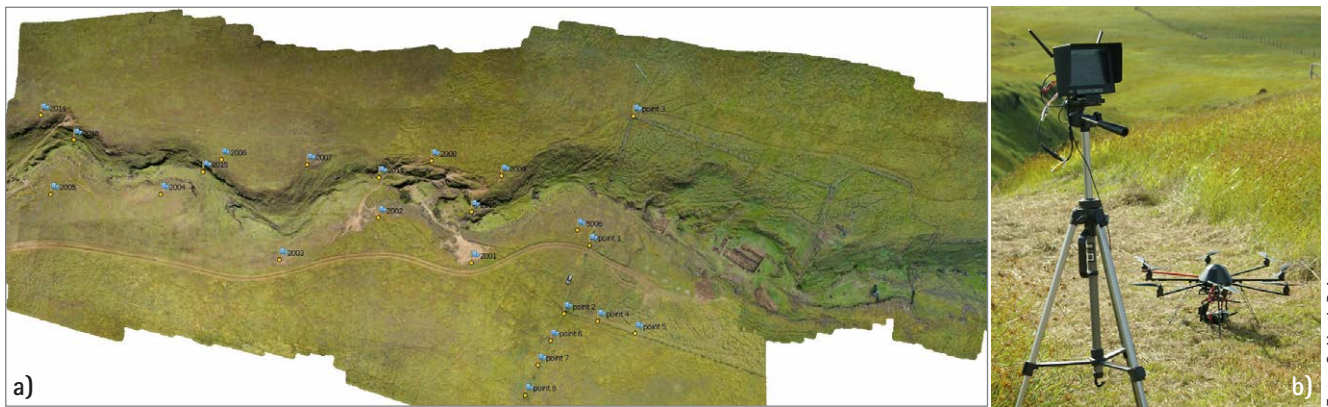


Abb. 12: a) Archäologisches Grabungsgebiet der Kommission für Archäologie Außereuropäischer Kulturen des Deutschen Archäologischen Instituts in Bonn auf der Osterinsel, b) MikroKopter ARF OktoXL

kante ersichtlich (siehe Abb. 11a). Ein Ergebnis mit gleichen systematischen Abweichungen wurde auch mit dem mobilen Laserscanningsystem von p3dsystems erreicht. Die Abweichungen zwischen den aus den UAV-Bilddaten und aus dem mobilen Laserscanning abgeleiteten Oberflächenmodellen sind in Abb. 11b farblich dargestellt.

Die Generierung des 3D-Oberflächenmodells mit ca. 1,8 Mio. Dreiecken dauerte in PhotoScan 6,5 Minuten, während das Texture Mapping knapp 4 min brauchte. Das digitale Orthophoto mit einer Pixelauflösung von 3 cm am Boden wurde in knapp 4 Minuten mit einem Worldfile exportiert.

4.4 UAV-Bildflug auf der Osterinsel mit einem Oktokopter

Das archäologische Grabungsgebiet der Kommission für Archäologie Außereuropäischer Kulturen des Deutschen Archäologischen Instituts in Bonn befindet sich im Zentrum der Osterinsel auf ca. 290 m Höhe unterhalb des Vulkanes Ma'unga Terevaka in der Quebrada Vaipu, die eine schmale Schlucht eines meistens trockenen Flusslaufes darstellt (siehe Abb. 12a).

Das Aufnahmegebiet der Quebrada Vaipu wurde mit einer digitalen Kamera Sony Alpha Nex-5R ($c = 16$ mm), die an einem MikroKopter ARF OktoXL von der Firma HiSystems GmbH, Moormerland befestigt war, in zwei Bildflügen am 20. und 24. März 2015 befliegen. Der nordwestliche Abschnitt des Gebietes beinhaltete nur die Schlucht mit dem Flussbett, während der südöstliche Bereich die archäologische Grabung enthielt. Das Flussbett wurde mit fünf parallel angeordneten Fluglinien aus einer Höhe von ca. 50 m (Senkrechtaufnahmen) und mit zwei Fluglinien als Schrägaufnahmen jeweils parallel zu den Hängen der Schlucht befliegen. Das Gebiet wurde mit 431 Fotos abgedeckt, die für die Auswertung in PhotoScan geladen wurden. Für die Bildorientierung und Kamerakalibrierung wurde eine dünne Punktwolke von 337.605 Punkten in einer Stunde und 50 Minuten gerechnet, von denen ca. 20.000 Punkte als schlechte Messungen herausgefiltert wurden. 21 Fotos konnten in dem Bildverband

nicht automatisch orientiert werden. Die 15 signalisierten Passpunkte (siehe Abb. 12a) wurden durchschnittlich in 28 Bildern manuell gemessen und die Verbesserungen der Passpunktkoordinaten lagen bei 2,7 cm in XY und 4,0 cm in Z. Die Bildmessgenauigkeit betrug 0,6 Pixel für die Passpunktmessungen wegen etwas zu großer weißer Passpunktssignale und 1,1 Pixel für die Verknüpfungspunkte. Für den zweiten Bildverband mit 273 Fotos wurde die dünne Punktwolke von 190.000 Punkten in 45 Minuten berechnet. Hier konnten 36 Fotos nicht automatisch orientiert werden. Auf eine manuelle Verknüpfung dieser Fotos wurde wie im ersten Bildflugabschnitt verzichtet. Beide Bildverbände wurden über zwei gemeinsame Passpunkte und acht identische 3D-Punkte verknüpft bzw. der zweite Bildverband ohne ausreichend Passpunkte wurde an den ersten Bildverband angehängt. Die dichte Punktwolke wurde mit der Qualitätseinstellung Medium in 51 Minuten berechnet, was einer Datenmenge von knapp 65 Mio. Punkten entspricht. Die Erstellung des 3D-Oberflächenmodells mit ca. 12,9 Mio. Dreiecken dauerte in PhotoScan eine Stunde und 47 Minuten, während

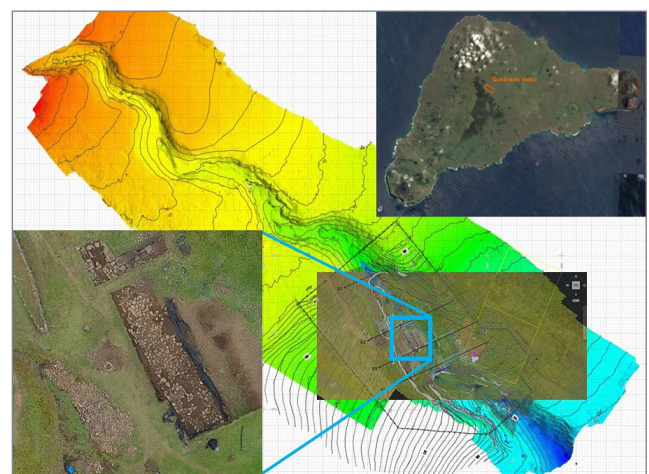


Abb. 13: Quebrada Vaipu, Osterinsel – Lage des archäologischen Grabungsgebietes (oben rechts), farbkodierte Darstellung des Geländemodells mit Höhenlinien (im Hintergrund) und Orthophotoausschnitt mit überlagerten Vektordaten der Grabung sowie detailliertem Ausschnitt des Orthophotos (unten links)

die Texturierung in knapp 10 Minuten erfolgte. Das digitale Orthophoto mit einer Pixelauflösung von 3 cm am Boden wurde in 13 Minuten mit einem Worldfile exportiert.

Die Abb. 13 zeigt die Lage der Quebrada Vaipu auf der Osterinsel (oben rechts) und weitere aus den UAV-Bilddaten generierte Geodaten: Orthophotoausschnitt mit überlagerten Vektordaten der archäologischen Grabung sowie detailliertem Ausschnitt des Orthophotos (unten links) und eine farbkodierte Darstellung des Geländemodells mit Höhenlinien (im Hintergrund).

5 Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag wurden der Arbeitsablauf, diverse Softwarepakete für die Auswertung von UAV-Bilddaten und vier UAV-Bildflüge vorgestellt, aus denen verschiedene Produkte wie 3D-Punktwolken, 3D-CAD-Modelle, 3D-Oberflächenmodelle, digitale Orthophotos und Höhenlinien für zahlreiche Anwendungen generiert wurden. UAV-Bildflüge sind sehr einfach, sehr schnell, sehr flexibel und sehr kostengünstig durchzuführen, wenn die gesetzlichen Rahmenbedingungen erfüllt sind und die Flugerlaubnis erteilt ist. Die meisten Arbeitsschritte können bei der Auswertung bereits auf Knopfdruck bzw. per Mausklick automatisch ablaufen, bei manchen Anwendungen können die erforderlichen Arbeitsschritte sogar in einen Batch-Prozess zur vollautomatischen Prozessierung der Daten eingebettet werden. Trotz Automation in fast allen Arbeitsschritten ist photogrammetrisches Expertenwissen für die Parametereinstellung und Qualitätskontrolle besonders bei der Bildorientierung und Kamerakalibrierung durch Bündelblockausgleichung wünschenswert bzw. erforderlich, um qualitativ hochwertige Produkte abgeben zu können. Die aktuellen Anforderungen für die Bearbeitung der UAV-Bildflugdaten ähneln den Prozessen der digitalen Luftbildphotogrammetrie in den 1990er und 2000er Jahren, nur liegen die Bilddaten mit einem UAV aufgenommen in einem größeren Bildmaßstab vor. Die wichtigsten Anforderungen an die Auswertesoftware von UAV-Bildflugdaten sind genaue, manuelle oder halbautomatische Bildpunktmessungen von Passpunkten und eine photogrammetrische Kamerakalibrierung durch Bündelblockausgleichung, bei der die Kameraparameter von Brown (1971) verwendet werden und bei der die verschiedenen Beobachtungen (Bildkoordinaten, Passpunktkoordinaten und ggf. die Parameter der äußeren Orientierung) unterschiedlich gewichtet in die Ausgleichung einfließen. Eine ausführliche Dokumentation der erzielten Ergebnisse für eine Analyse nach photogrammetrisch-geodätischen Gesichtspunkten liefert leider fast keine auf dem Markt verfügbare Software. Daher muss man oft die generierten Ergebnisse sehr kritisch betrachten und hinterfragen, ob man den errechneten Orientierungs- und Kalibrierungsdaten vertrauen kann.

In Zukunft können wir Genauigkeitssteigerungen bei UAV-Bildflügen erwarten, wenn sich zunehmend RTK-GNSS-Lösungen mit Zwei-Frequenz-GNSS-Empfängern bei der Datenaufnahme durchsetzen (Przybilla et al. 2015). Natürlich muss man dabei auch die Rolle des Aufnahmesystems, also der Kamera, betrachten. Durch eine Fixierung instabiler Objektive können Vibrationen durch das UAV kompensiert werden, sodass schärfere Aufnahmen gelingen (Cramer und Leinss 2016). Die Entwicklung einer metrischen Kamera für UAVs wurde in der photogrammetrischen Gesellschaft zu verschiedenen Anlässen kontrovers diskutiert. Das DLR in Berlin-Adlershof hat nun eine solche metrische Kamera gebaut, die in nächster Zeit in verschiedenen UAV-Bildflugszenarien getestet wird. Erste Ergebnisse mit dieser metrischen Kamera wurden bereits präsentiert (Kraft et al. 2016a, Kraft et al. 2016b).

Dank

Besonderer Dank gilt den beiden UAV-Piloten für die Aufnahmen der Objekte: Dr.-Ing. Johannes Prenting (Aerophoto Hamburg) für die Aufnahmen des Torhauses in Seedorf und der Lembecksburg und Dipl.-Ing. Christian Hartl-Reiter (Landesarchäologie Mecklenburg-Vorpommern) für die UAV-Aufnahmen auf der Osterinsel (Chile).

Literatur

- Abate, D., Furini, G., Migliori, S., Pierattini, S. (2011): Project Photofly: New 3D Modelling Online WEB Service. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 38 (5/W16).
- Barrile, V., Bilotta, G., Lamari, D., Meduri, G.M. (2015): Comparison between Techniques for Generating 3D Models of Cultural Heritage. *Recent Advances in Mechanics, Mechatronics and Civil, Chemical and Industrial Engineering. Mathematics and Computers in Science and Engineering Series 49*, 140–145.
- Brown, D.C. (1971): Close-range Camera Calibration. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 37, 855–866.
- Chandler, J., Fryer, J. (2013): Autodesk 123D Catch: How Accurate is it? *Geomatics World*, 2 (21), 28–30.
- Cignoni, P., Callieri, M., Corsini, M., Dellepiane, M., Ganovelli F., Ranzuglia, G. (2008): MeshLab: an Open-source Mesh Processing Tool. *Eurographics Italian Chapter Conference*, V. Scarano, R. De Chiara, U. Erra (Eds.), The Eurographics Association, 129–136.
- Colomina, I., Molina, P. (2014): Unmanned Aerial Systems for Photogrammetry and Remote Sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97.
- Courchay, J., Pons, J.-P., Monasse P., Keriven, R. (2010): Dense and Accurate Spatio-temporal Multi-view Stereovision. *Computer Vision – ACCV 2009, Lecture Notes in Computer Science 5995*, 11–22.
- Cramer, M., Leinss, B. (2016): Welche ist am besten? – Ein paar Anmerkungen zur Auswahl von Kamerasystemen in der UAS-Luftbildphotogrammetrie. In: DVW e.V. (Hrsg.): *UAV 2016 – Vermessung mit unbemannten Fluggeräten*. DVW-Schriftenreihe, Bd. 82/2016, Wißner-Verlag, Augsburg, 97–118.
- Eisenbeiß, H. (2009): UAV Photogrammetry. DISS. ETH Nr. 18515, IGP Mitteilungen Nr. 105, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, doi: 10.3929/ethz-a-005939264.
- Furukawa, Y., Ponce, J. (2010): Accurate, Dense, and Robust Multi-view Stereopsis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 32 (8): 1362–1376.

- Galliani, S., Lasinger, K., Schindler, K. (2016): Gipuma: Massively Parallel Multi-view Stereo Reconstruction. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 25, T. Kersten (Hrsg.), 36. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, Tagungsband auf CD-ROM, 361–369.
- Gede, M., Mészáros, J. (2012): The Possible Use of Free On-line Tools for Digitizing Old Relief Models. e-Perimtron, Vol. 7, No. 2, 82–88.
- Gerdau, O. (2015): 3D-CAD-Modellierung des Seedorfer Torhauses in bild-basierten Punktwolken aus UAV-gestützter Bildaufnahme. Bachelorarbeit, HafenCity Universität Hamburg, 89 S.
- Gini, R., Pagliari, D., Passoni, D., Pinto, L., Sona, G., Dosso, P. (2013): UAV Photogrammetry: Block Triangulation Comparisons. Inter. Arch. of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 40 (1/W).
- Haarbrink, R. (2011): UAS for Geo-information: Current Status and Perspectives. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 38 (1/C22), 207–212.
- Kersten, T., Lindstaedt, M. (2012): Automatic 3D Object Reconstruction from Multiple Images for Architectural, Cultural Heritage and Archaeological Applications Using Open-Source Software and Web Services. Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation, Heft 6, 727–740.
- Kersten, Th., Lindstaedt, M., Mechelke, K., Zobel, K. (2012): Automatische 3D-Objektrekonstruktion aus unstrukturierten digitalen Bilddaten für Anwendungen in Architektur, Denkmalpflege und Archäologie. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 21, Hrsg. E. Seyfert, CD-ROM, 137–148.
- Kersten, T., Mechelke, K. (2013): Fort Al Zubarah in Katar – 3D-Modell aus Scanner- und Bilddaten im Vergleich. AVN – Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 2, 50–58.
- Kraft, T., Geßner, M., Meißner, H., Przybilla, H.-J., Gerke, M. (2016a): Introduction of a Photogrammetric Camera System for RPAS with Highly Accurate GNSS/IMU Information for Standardized Workflows. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XL-3/W4, 71–75.
- Kraft, T., Geßner, M., Meißner, H., Cramer, M., Gerke, M., Przybilla, H. J. (2016b): Evaluation of a Metric Camera System Tailored for High Precision UAV Applications. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLI-B1, 901–907.
- Lourakis, M.I.A., Argyros, A.A. (2004): Design and Implementation of a Generic Sparse Bundle Adjustment Software Package Based on the Levenberg-Marquardt Algorithm. Institute of Computer Science, Heraklion, Crete, Greece – FORTH-ICS, Tech. Rep. 340, www.ics.forth.gr/~lourakis/sba.
- Lowe, D.G. (2004): Distinctive Image Features from Scale-invariant Keypoints. International Journal of Computer Vision, 60 (2), 91–110.
- Nakano, T., Kamiya, I., Tobita, M., Iwahashi, J., Nakajima, H. (2014): Landform Monitoring in Active Volcano by UAV and SfM-MVS Technique. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 40 (8), 71–75.
- Neitzel, F., Klonowski, J., Siebert, S., Dasbach, J.-P. (2011): Mobile 3D Mapping mit einem low-cost UAV-System am Beispiel der Deponievermessung. AVN – Allgemeine Vermessungsnachrichten 10: 336–347.
- Nex, F., Remondino, F. (2014): UAV for 3D Mapping Applications: a Review. Applied Geomatics, 6 (1), 1–15.
- Pierrot-Deseilligny, M., Paparoditis, N. (2006): A Multi-resolution and Optimization-based Image Matching Approach: an application to surface reconstruction from SPOT5-HRS stereo imagery. Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 36 (1/W41).
- Pierrot-Deseilligny, M., Cléry, I. (2011): APERO, an Open Source Bundle Adjustment Software for Automatic Calibration and Orientation of a Set of Images. Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 38 (5/W16).
- Przybilla, H.-J., Wester-Ebbinghaus, W. (1979): Bildflug mit ferngelenktem Kleinflugzeug. Bildmessung und Luftbildwesen, 47, 137–142.
- Przybilla, H.-J., Peipe, J., Junghans, O. (2010): Untersuchungen zur photogrammetrischen Erfassung von Punktwolken mit dem System PhotoModeler Scanner. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2010. Th. Luhmann, Ch. Müller (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, 106–113.
- Przybilla, H.-J., Reuber, C., Bäumker, M., Gerke, M. (2015): Untersuchungen zur Genauigkeitssteigerung von UAV-Bildflügen. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 24, T. Kersten (Hrsg.), 35. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, Tagungsband auf CD-ROM, 45–54.
- 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, Volume 38 (1/C22), 25–31.
- Remondino, F., Kersten, T. (2012): Low-cost und open-source Lösungen für die automatisierte Generierung von 3D-Punktwolken – ein kritischer Überblick. In: DVW e. V. (Hrsg.): Terrestrisches Laserscanning (TLS 2012). DVW-Schriftenreihe, Bd. 69/2012, Wißner-Verlag, Augsburg, 63–80.
- Schaich, M. (2013): Combined 3D Scanning and Photogrammetry Surveys with 3D Database Support for Archaeology & Cultural Heritage. A Practice Report on ArcTron's Information System aSPECT^{3D}. Photogrammetric Week 2013, Fritsch, D. (Hrsg.), Wichmann, 233–246.
- Schöning, J., Heidemann, G. (2015): Evaluation of Multi-view 3D Reconstruction Software. Computer Analysis of Images and Patterns, Springer International Publishing, 450–461.
- Segschneider, M. (2009): Die Ringwälle auf den nordfriesischen Inseln. Schriften des Archäologischen Landesmuseums, Band 5, Ringwälle und verwandte Strukturen des ersten Jahrtausends n. Chr. an Nord- und Ostsee, Wachholtz Verlag, Neumünster, 99–112.
- Snively, N., Seitz, S.M., Szeliski, R. (2006): Photo Tourism: Exploring Photo Collections in 3D. ACM Transactions on Graphics 25 (3), 835–846.
- Snively, N., Seitz, S.M., Szeliski, R. (2008): Modeling the World from Internet Photo Collections. Int. J. Comput. Vision 80 (2), 189–210.
- Unger, J., Reich, M., Heipke, C. (2014): UAV-based Photogrammetry: Monitoring of a Building Zone. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-5, 601–606.
- Vallet, J., Panissod, F., Strecha, C., Tracol, M. (2011): Photogrammetric Performance of an Ultra Light Weight Swinglet UAV. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 38 (1/C).
- van Blyenburgh, P. (2013): 2013–2014 RPAS Yearbook: Remotely Piloted Aircraft Systems: The Global Perspective 2013/2014. Technical Report. UVS International, Paris, France.
- Vergauwen, M., Van Gool, L. (2006): Web-based 3D Reconstruction Service. Machine Vision Applications, 17 (6), 411–426.
- Wenzel, K., Rothermel, M., Haala, N., Fritsch, D. (2013): SURE – The ifp Software for Dense Image Matching. Photogrammetric Week 2013, Fritsch, D. (Hrsg.), Wichmann, 59–70.
- Wester-Ebbinghaus, W. (1980): Aerial Photography by Radio Controlled Model Helicopter. The Photogrammetric Record, 10, 85–92.
- Wu, C. (2007): SiftGPU: A GPU implementation of Scale Invariant Feature Transform (SIFT). <http://cs.unc.edu/~ccwu/siftgpu>, Zugriff: 14. Dez. 2015.
- Wu, C. (2011): VisualSFM: A Visual Structure from Motion System. www.cs.washington.edu/homes/ccwu/vsfm, Zugriff: 14. Dez. 2015.

Anschrift der Autoren

Thomas P. Kersten | Maren Lindstaedt
HafenCity Universität Hamburg
Labor für Photogrammetrie & Laserscanning
Überseeallee 16, 20457 Hamburg
thomas.kersten@hcu-hamburg.de
maren.lindstaedt@hcu-hamburg.de

Dieser Beitrag ist auch digital verfügbar unter www.geodaesie.info.