

Zur Bedeutung von Passpunkten bei der Aerotriangulation UAV-basierter Bildflüge

Maren Lindstaedt | Thomas P. Kersten

1 Einführung

Unmanned Aerial Vehicles (UAV), Unmanned Aerial Systems (UAS) oder Remotely-Piloted Aerial Systems (RPAS) haben sich als unbemannte Flugsysteme mit Kameras und anderen Sensoren ausgestattet wegen des flexiblen Einsatzes seit einigen Jahren für viele unterschiedliche Anwendungen in der Vermessung etabliert. Durch diese unbemannten Systeme ist die Lücke zwischen Luftaufnahmen mit Flugzeug oder Helikopter und Aufnahmen vom Boden gerade für Areale kleinerer bis mittlerer Größe (einige 10 ha) geschlossen worden. Je nach Zuladungsgewicht können die Flächen- bzw. Starr- oder Rotorflügler als Aufnahmesensoren leichte Laserscanner, kostengünstige Kompaktkameras, Systemkameras, digitale Spiegelreflexkameras oder hochwertige Mittelformatkameras transportieren. Eine Marktübersicht über Kameras für UAVs gibt Przybilla (2017). Für die Bestimmung der Bildorientierungen und der Kamera kalibrierung durch digitale Aerotriangulation sind bei höheren Genauigkeitsanforderungen 3D-Passpunkte erforderlich, wenn die Orientierungsparameter der Bilder durch entsprechende hochwertige Sensorik nicht direkt während des Bildfluges bestimmt werden können, was bei low-cost bzw. Konsumer-UAVs meistens der Fall ist.

Erste Bildflüge mit digitalen Still Video Kameras wurden bereits Mitte der 1990er Jahre durchgeführt. Über den Einsatz einer digitalen hochauflösenden Still Video Kamera Kodak DCS200 bei einem Bildflug in einem Kleinflugzeug berichten Fraser und Shortis (1995). Ein Luftbildstreifen von sechs Bildern (Bildmaßstab 1:40.000, Überdeckung 60 %) wurde mit einem 28 mm Objektiv aus einer Höhe von 1.150 m über einer Kleinstadt im Bundesstaat Victoria (Australien) aufgenommen. Die Signalisierung der Passpunkte war 1 m × 1 m groß, was im Bild einer Größe von 3 × 3 Pixeln entsprach. In der Aerotriangulation wurde eine praktische Genauigkeit aus Vergleich mit GPS bestimmten Kontrollpunkten von 1,7 m in der Lage und in der Höhe erreicht.

Im Rahmen einer Pilotstudie des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP) der ETH Zürich wurde eine Kodak DCS200 bei einem Bildflug in einem Helikopter über der Gemeinde Urmein (Kanton Graubünden, Schweiz) für photogrammetrische Punktbestimmung durch digitale Aerotriangulation

eingesetzt (Kersten 1996). Für den Luftbildverband von 50 Bildern (Bildmaßstab 1:20.000, Längs- und Querüberdeckung von 60 %) wurde eine praktische Genauigkeit von $s_{xy} = 2$ cm und $s_z = 4$ cm für die signalisierten GPS-Kontrollpunkte bestimmt.

Ende der 1990er Jahre wurden digitale Aerotriangulationen trotz manueller Passpunktmessungen im Bild durch die automatische Punktübertragung sehr effizient. Kersten (1999) stellte eine angepasste und erweiterte Methode einer digitalen Aerotriangulation mit dem Helava Automated Triangulation System (HATS) am Beispiel eine Luftbildverbandes über die gesamte Schweiz vor, in der der Datenfluss und die Qualitätskontrolle durch zusätzliche Softwareentwicklungen weitestgehend automatisiert wurden. Von Oktober 1995 bis Juli 1998 wurde der Block Schweiz mit mehr als 6.000 gescannten Bildern einer kalibrierten analogen Luftbildkamera, bei denen der Bildmaßstab zwischen 1:22.000 und 1:54.000 variierte, in 43 Subblöcken bei Swisphoto Vermessung AG trianguliert. Es zeigte sich bei der digitalen Aerotriangulation über die ganze Schweiz deutlich, dass die Produktionsrate (zwischen 9 und 38 Minuten je Bild) sehr vom Geländetyp und der Blockkonfiguration abhing.

Das geometrische Potenzial digitaler groß- und mittelformatiger Luftbildkameras, auch unter Berücksichtigung der direkten Sensororientierung durch GNSS und inertialer Messeinheit, wurde im Rahmen eines Tests der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) untersucht (Jacobsen et al. 2010). Die Ergebnisse wurden von einer Gruppe wissenschaftlicher Mitarbeiter verschiedener Universitäten mit unterschiedlichen Datenerfassungsprogrammen, Bündelblockausgleichungsprogrammen, Konfigurationen der Ausgleichungen (z. B. mit/ohne Verwendung von Projektionszentrumskoordinaten und Richtungsinformation aus GNSS/inertialen Systemen) und unterschiedlicher Passpunktanordnungen erzeugt. Diese Ergebnisse geben einen Überblick über die Variation der Lösungen und Genauigkeiten, wie sie auch in operationeller Anwendung gegeben ist. Für UAV-basierte Bildflüge veröffentlichten Przybilla et al. (2015) und Gerke und Przybilla (2016) Untersuchungsergebnisse, in denen der Einfluss verschiedener Bildflugparameter (Aufnahmekonfiguration, Einsatz von Realtime-kinematischem (RTK) GNSS und Passpunktanordnungen) verglichen wird (siehe auch [Kap. 2](#)).

In diesem Beitrag werden Aerotriangulationen mit Bilddaten von drei verschiedenen Luftbildverbänden in Äthiopien und auf der Osterinsel ([Abb. 4](#)), die mit low-cost UAVs in den Jahren 2015 bis 2017 befliegen wurden, unter dem Aspekt verschiedener Passpunktanordnungen und deren Auswirkungen auf die Ergebnisse vorgestellt. Zusätzlich wird der Einfluss des Rolling-Shutter-Effektes der eingesetzten Kompakt- bzw. Systemkamera auf die Ergebnisse der Aerotriangulation aufgezeigt.

2 Passpunkte

In der Photogrammetrie werden Passpunkte für die Bestimmung der Orientierungsparameter eines Messbildes verwendet. Es handelt sich dabei um Punkte im Gelände, deren 3D-Koordinaten in einem entsprechenden Objektkoordinatensystem (z. B. Landeskoordinatensystem) bekannt sind und die in einem

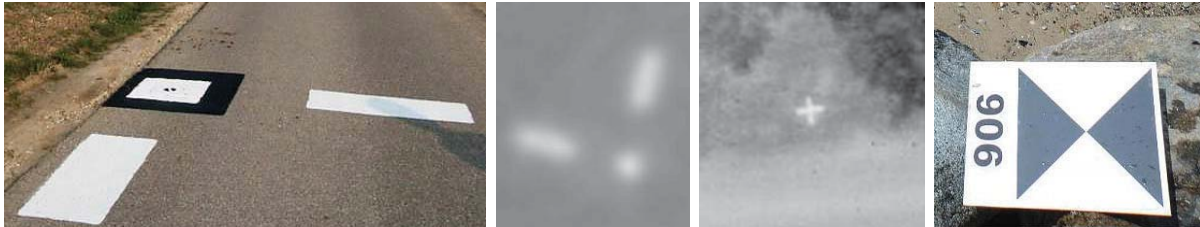


Abb. 1: Signalisierte Passpunkte im Gelände (links und rechts) und im Luftbild (Mitte)

Luftbild eindeutig zu identifizieren und zu messen sind. Dabei unterscheidet man in Vollpasspunkte, bei denen die Raumkoordinaten X , Y und Z bekannt sind, Lagepasspunkte, bei denen die Lagekoordinaten X und Y bekannt sind und Höhenpasspunkte, bei denen nur die Höhenkoordinate Z bekannt ist. Bei hohen Genauigkeitsanforderungen für die photogrammetrische Bestimmung von 3D-Objektpunkten und/oder der Bildorientierungsparameter müssen die 3D-Passpunkte vor dem Bildflug im Gelände signalisiert werden. Die Signalisierung der Passpunkte kann durch Aufmalen von entsprechender Farbe oder durch Auslegen von markierten Zielzeichen erfolgen (Abb. 1). Es können auch eindeutig identifizierbare Punkte im Gelände nach dem Bildflug durch geodätische Messverfahren (Tachymetrie oder GNSS) als Passpunkte bestimmt werden, wenn keine sehr hohe Genauigkeit bei der Aerotriangulation gefordert wird.

Da die Signalisierung und Bestimmung der Passpunkte zeitaufwändig und damit kostenintensiv ist, muss man sich bei der Projektplanung überlegen, welche Sensorik beim Bildflug eingesetzt wird bzw. eingesetzt werden kann und wie viele Passpunkte für den aufzunehmenden Bildverband erforderlich sind. Abb. 2 zeigt beispielhaft einen Luftbildverband von 108 Bildern (6 Flugstreifen mit je 18 Bildern), bei dem insgesamt 12 Vollpasspunkte (rot) und 23 Höhenpasspunkte (grün) zur Stützung des Bildverbandes verwendet wurden. Daraus wird empfohlen, dass ein Passpunktabstand von 6 bis 8 Bildbasen (Abstand zwischen zwei Projektionszentren) in Streifenrichtung für digitale Kameras realisiert werden sollte, wenn die Sensororientierung nicht direkt mit guter Genauigkeit durch GNSS und inertialer Messeinheit gemessen werden kann.

Es stellt sich dennoch die Frage, ob eine Aerotriangulation ohne Passpunkte möglich ist? Jacobsen (1997) veröffentlichte die Ergebnisse einer Blocktriangulation ohne Passpunkte, bei der eine Genauigkeit von 20 cm für die 3D-Punktbestimmung mit einem GPS-unterstützten Luftbildverband (6 Flugstreifen mit

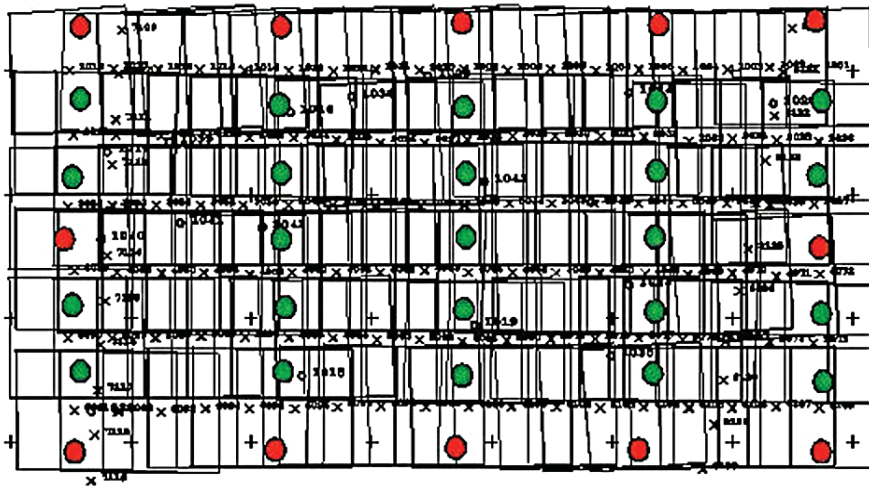


Abb. 2:
Beispiel eines Luftbildverbandes mit entsprechender Passpunktanordnung: 108 Bilder – 12 Vollpasspunkte (rot) + 23 Höhenpasspunkte (grün)

einem mittleren Bildmaßstab von 1:2.100) erreicht wurde. Eine Kontrolle der Ergebnisse ist dadurch jedoch nicht gewährleistet.

Przybilla et al. (2015) und Gerke und Przybilla (2016) zeigen den Einfluss verschiedener Befliegungsparameter auf die Qualität von zwei UAV-Bildflügen, die mit einem Starrflügler (Flächenflieger) MAVinci SIRIUS PRO ausgeführt wurden. Dabei führte die Erweiterung des Bildflugs durch zusätzliche Aufnahmen einer Kreuzbefliegung (Querstreifen) trotz gleichzeitiger signifikanter Reduktion der Passpunkte zu Genauigkeitssteigerungen. Die mittels RTK-GNSS direkt gemessenen Positionsparameter der Äußeren Orientierungen führten zu einer weiteren Qualitätsverbesserung im Luftbildverband. Ähnlich positive Auswirkungen sind bei der Simultankalibrierung der Kamera erkennbar.

Aus Gründen der Zuverlässigkeit sollte bei einem GNSS-gestützten UAV-Bildflug nicht komplett auf Pass- bzw. Kontrollpunkte verzichtet werden. Nur anhand dieser Punkte können während der Auswertung kritische Qualitätskontrollen durchgeführt werden. Daher empfiehlt sich für einen GNSS-gestützten UAV-Bildflug eine Aufnahme- und Passpunktanordnung wie in Abb. 3 dargestellt.

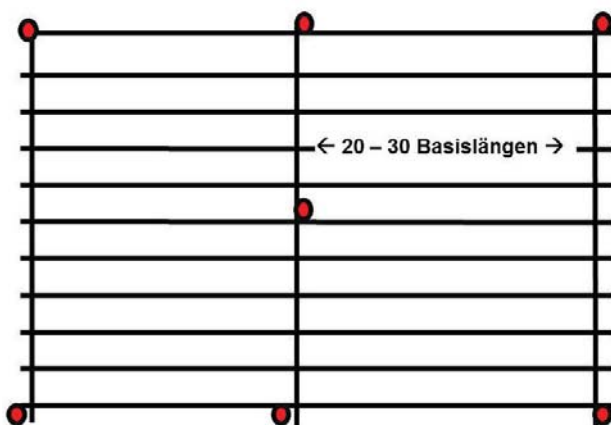



Abb. 3:
Empfohlene Passpunktanordnung für GNSS-gestützten Bildflug mit zusätzlichen Querstreifen und sieben Vollpasspunkten (rot)

3 Die eingesetzten UAV-Systeme


Für die Bildflüge der Testbildverbände in Äthiopien wurde das low-cost UAV DJI Phantom 3 Advanced mit einer festinstallierten Kamera eingesetzt, das seit April 2015 im Markt verfügbar ist und eine Weiterentwicklung der Vorgängermodelle DJI Phantom 2 und Phantom 2 VISION+ darstellt. Die wichtigen technischen Daten der DJI Phantom 3 Advanced und der dazugehörigen Kamera sind in [Tab. 1](#) und [Tab. 2](#) zusammengefasst.

Bei der Speicherung der Fotos im Bildformat JPEG wird bei der DJI Phantom 3 automatisch eine werkseitig vorkonfigurierte Korrektur der radial-symmetrischen Verzeichnung angebracht, die jedoch nicht die realen systematischen Abbildungsfehler beschreibt (Przybilla et al. 2017). Eine Speicherung der Fotos im Format DNG (RAW) ist während des Flugbetriebs nur mit Einschränkungen in der Anzahl Fotos möglich, da eine Datenspeicherung ca. 7 s je Foto braucht und damit die Fluggeschwindigkeit enorm reduziert wird. Zudem ist in

Tab. 1: Technische Daten der DJI Phantom 3 Advanced

Gewicht (mit Akku & Propellern)	1.280 g	
Diagonale Größe (ohne Propeller)	350 mm	
Max. Geschwindigkeit (Steig/Sink)	5 m/s / 3 m/s	
Max. Geschwindigkeit (kein Wind)	16 m/s	
Max. Höhe über NN (6000 m)	120 m über Startpunkt	
Betriebstemperatur	0 bis 40 °C	
Positionsbestimmung	GPS/GLONASS	
Max. Flugzeit	ca. 23 Minuten	

Tab. 2: Technische Daten der Kamera

Sensor Sony Exmor	1/2.3" CMOS, eff. Pixel: 12,4 MP	
Sensorformat, Pixel	6,16 mm × 4,62 mm, 1,54 µm	
Objektiv/Brennweite	FOV 94°, 4 mm, f/2.8 Fokus auf ∞	
ISO-Empfindlichkeit	100–1.600	
Elektr. Verschluss	8 s bis 1/8.000 s	
Max. Bildgröße	4.000 × 3.000 Pixel	
Betriebstemperatur	0 bis 40 °C	
Bildformat	JPEG, DNG (RAW)	

der verwendeten Pix4D Capture App nur die Möglichkeit zur JPEG-Aufnahme gegeben.

Das Aufnahmegebiet der Quebrada Vaipu auf der Osterinsel (Chile) wurde mit einer digitalen Systemkamera Sony Alpha Nex-5R ($c = 16$ mm), die an einem MikroKopter ARF OktoXL von der Firma HiSystems GmbH, Moormerland befestigt war, befliegen. Die technischen Daten der CMOS-Systemkamera sind in Przybilla (2017: 58) zusammengefasst. Der für diese Untersuchungen verwendete Bildverband Vaipu wurde bereits in Kersten und Lindstaedt (2016) vorgestellt.

Viele Spiegelreflexkameras, Kompakt- und Systemkameras sowie proprietäre Kameras mit CMOS-Sensoren, die auf UAV-Systemen eingesetzt werden, verwenden einen Rolling Shutter (rollenden Verschluss), um eine bessere Qualität der Fotos zu erhalten und um die Bewegungsunschärfe (motion blur) zu reduzieren. Bei einem Sensor mit Rolling Shutter werden die Pixel zeilen- oder spaltenweise nacheinander belichtet, wobei eine Bildperiode ($1/\text{Bildfrequenz}$) benötigt wird, bis alle Pixel auf dem Sensor aktiv bzw. lichtempfindlich sind. Dieser Effekt wird als Bildverzerrung sichtbar, wenn ein Objekt oder die Kamera sich während der Aufnahme bewegt (Luhmann 2018: 221). Da sich das UAV während der Aufnahme bewegt, entstehen durch die zeilenhafte Bildauslesung vertikale Verschiebungen im Bild, die einige Pixel betragen können. Jede ausgelesene Bildzeile besitzt somit eine eigene äußere Orientierung. Die Bildauslesezeit bei der Phantom 3 beträgt 33 Millisekunden (Pix4D 2017a). Bei einer mittleren Fluggeschwindigkeit von 8 m/s in einer Flughöhe von 50 m über Grund erhält man eine Verschiebung von 14 Pixeln durch den Rolling-Shutter-Effekt. Während der Bildauslesezeit hat sich die Phantom 3 bei der Geschwindigkeit um 26,4 cm weiter bewegt. Der Effekt kann mathematisch modelliert und durch zusätzliche Parameter in der Bündelausgleichung kompensiert werden. Der Einfluss von CMOS-Kameras mit Rolling-Shutter-Verschluss wurde für photogrammetrische Einzel- und Mehrbildauswertungen im Nahbereich (Rofalski und Luhmann 2017) und für die 3D-Punktbestimmung mit Bilddaten von UAV-Systemen (Vautherin et al. 2016) untersucht und dokumentiert. Eine Korrektur des Rolling-Shutter-Effekts wurde bereits in photogrammetrische Software wie Pix4Dmapper 2.1 und Agisoft PhotoScan 1.3 implementiert, um dadurch den Einsatz von low-cost und light-weight UAVs für professionelle 3D-Mapping-Anwendungen zu verbessern. Anmerkungen und Empfehlungen zur Auswahl von Kamerasystemen in der UAV-Photogrammetrie geben Cramer und Leinss (2016).

4 Photogrammetrische Software 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 1.4) 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 1.3.5 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 inklusive optionaler Korrektur um den Rolling-Shutter-Effekt, (e) Modellierung der inneren Orientierung der Kamera(s) durch verschiedene Parameter (Bildhauptpunkt, Kamerakonstante, sieben radial-symmetrische und tangentielle Verzeichnungsparameter, Affinität und Scherung zwischen x- und y-Achse) sowie (f) verschiedene Exportmöglichkeiten der Ergebnisse. Als Nachteile ergeben sich vor allem begrenzte Eingriffsmöglichkeiten durch den Nutzer. Die Ausgaben und Dokumentationen der Ergebnisse sind beschränkt und nur begrenzt aussagekräftig.

5 Testblöcke Äthiopien und Osterinsel

Für die Untersuchungen über den Einfluss von Passpunktanordnungen und vom Rolling-Shutter-Effekt auf die Ergebnisse der Aerotriangulationen wurden zwei Testblöcke aus Äthiopien verwendet, die mit dem low-cost UAV DJI Phantom 3 Advanced geflogen wurden. Die Befliegungen erfolgten für das Deutsche Archäologische Institut (Außenstelle Sana'a der Orient-Abteilung), um die archäologischen Untersuchungsgebiete großräumig zu dokumentieren. Ein dritter Testblock wurde auf der Osterinsel (Chile) vom archäologischen Untersuchungsgebiet in der Quebrada Vaipu mit dem MikroKopter ARF OktoXL ebenso für das Deutsche Archäologische Institut (Kommission für Archäologie Außereuropäischer Kulturen in Bonn) aufgenommen. Die Lage der drei Luftbildverbände ist in [Abb. 4](#) dargestellt und deren technischen Daten sind in [Tab. 3](#) zusammengefasst.

Tab. 3: Technische Daten der Luftbildverbände

Gebiet	Flugdatum	FD [min]	# SB	# S	# F	ØFH [m]	ØV [m/s]	# PP
Wuqro	24.02.17	28	3	21	502	30	3,9	34
Melazo	31.10.17	43	3	36	824	35	4,5–6	62
Vaipu	20.03.15	40	1	5	431	31	2,9	15

FD: Flugdauer, SB: Subblöcke, S: Streifen, F: Fotos, FH: Flughöhe, V: Fluggeschwindigkeit, PP: Passpunkte

**Abb. 4:** Geografische Lage der Testblöcke in Nordäthiopien (li.) und auf der Osterinsel (re.)

Die Aufnahmen der UAV-Bildflüge mit der DJI Phantom 3 wurden alle mit der App Pix4Dcapture (Android-Version) auf einem Tablet gesteuert (Abb. 5). In dieser App können Einstellungen gemacht werden hinsichtlich der Fluggeschwindigkeit, der Überlappung und der Blickrichtung der Kamera. Die meisten Einstellungen bezüglich der Kamera werden in der App allerdings automatisch gesetzt und können nicht weiter ausgewählt werden. Die Fokussierung wird bei fast allen UAV-Kameras auf unendlich gesetzt, die Blende und Belichtungszeit sowie der Weißabgleich werden aus der DJI Go App (nur auf Android-Systemen) übernommen (Pix4D 2017b). Diese Einstellung zum Weißabgleich hat allerdings nicht immer konstant funktioniert und zu Farbabweichungen der Bilder untereinander innerhalb eines Bildfluges geführt (siehe Abb. 7 und Abb. 10). Das gewünschte Flugareal kann über ein Rechteck bzw. ein Polygon auf der Karte bzw. im Satellitenbild definiert werden (Abb. 5 links), inzwischen lässt sich auch ein in Google Earth Pro erstelltes kml/kmz-file importieren.

Für den Bildflug mit dem MikroKopter ARF OktoXL wurde die Bildflugplanungssoftware von HiSystems GmbH verwendet (Abb. 6). Die Start- und Endpunkte sowie Richtung der Flugstreifen wurden über Wegpunkte festgelegt. Der Flug wurde auf einem Monitor im Feld beobachtet und überprüft.

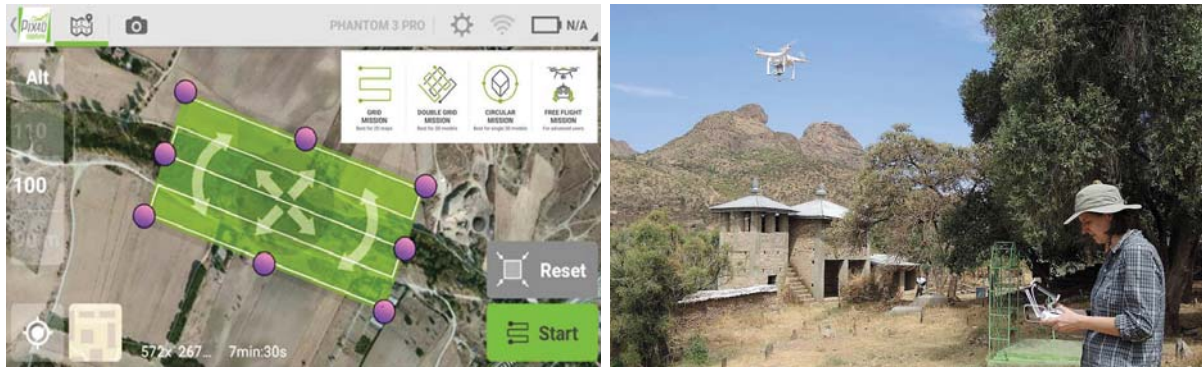


Abb. 5: Bildflugplanungssoftware von Pix4D für die Phantom 3 Advanced (links) und UAV-System in Äthiopien im Einsatz (rechts)

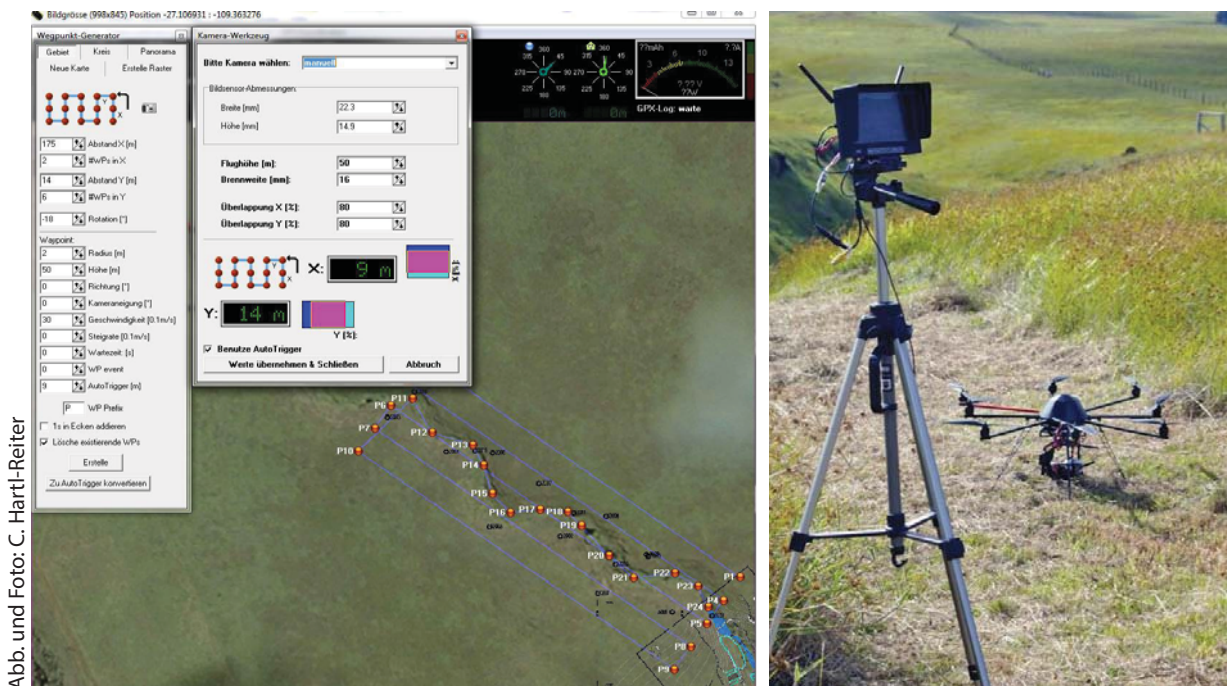


Abb. und Foto: C. Hartl-Reiter

Abb. 6: Bildflugplanungssoftware (links) und MikroKopter ARF OktoXL auf der Osterinsel im Einsatz (rechts)

6 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Aero-triangulationen von den drei Testblöcken Wuqro und Melazo (beide Äthiopien) sowie Vaipu (Osterinsel, Chile) zusammengefasst. Da die beiden eingesetzten UAV-Systeme keine RTK-GNSS-Lösung aufweisen, wurden alle Luftbildverbände über signalisierte Passpunkte orientiert und georeferenziert. Für alle Blöcke wurden jeweils Aero-triangulationen mit allen Passpunkten und mit einer ausgewählten minimalen Passpunkt-konfiguration in Agisoft PhotoScan gerechnet. Bei der jeweils minimalen Passpunktversion sind die nicht genutzten Passpunkte als Kontrollpunkte zur Bestimmung der empirischen Genauigkeit verwendet worden. Zusätzlich

wurde für jede Aerotriangulation jeweils eine Version ohne und mit Korrektur (Kompensation) des Rolling-Shutter-Effektes gerechnet, so dass für jeden Testblock vier verschiedene Versionen der Ergebnisse vorlagen. In den folgenden Abbildungen sind die Punktfehler (3D-Raumvektoren) als Ergebnis der Wurzel aus der Summe der Quadrate für die Abweichungen für jeden Pass- bzw. Kontrollpunkt in X, Y und Z dargestellt. In [Tab. 4](#), [5](#) und [6](#) sind neben den Passpunktresiduen die Abweichungen der Kontrollpunkte zu den Referenzwerten aus den Tachymetermessungen als empirische Genauigkeit zusammengefasst.

6.1 Testblock Wuqro

Der Bildflug für den Testblock Wuqro, ca. 35 km nordöstlich von der Stadt Mek'ele im Norden von Äthiopien gelegen, wurde am 24.2.2017 in 28 Minuten in einer durchschnittlichen Höhe von ca. 30 m mit der Phantom 3 Advanced durchgeführt. Der Testblock besteht aus drei Subblöcken, 21 Flugstreifen und insgesamt 502 Luftbildern, in denen 34 Passpunkte signalisiert und im Objekt-raum gut verteilt waren ([Abb. 7](#)). Die durchschnittliche Fluggeschwindigkeit betrug 3,9 m/s. Die Passpunkte wurden mit einer Totalstation durch polares Anhängen von bekannten Standpunkten mit einer Genauigkeit von 2 cm bestimmt.

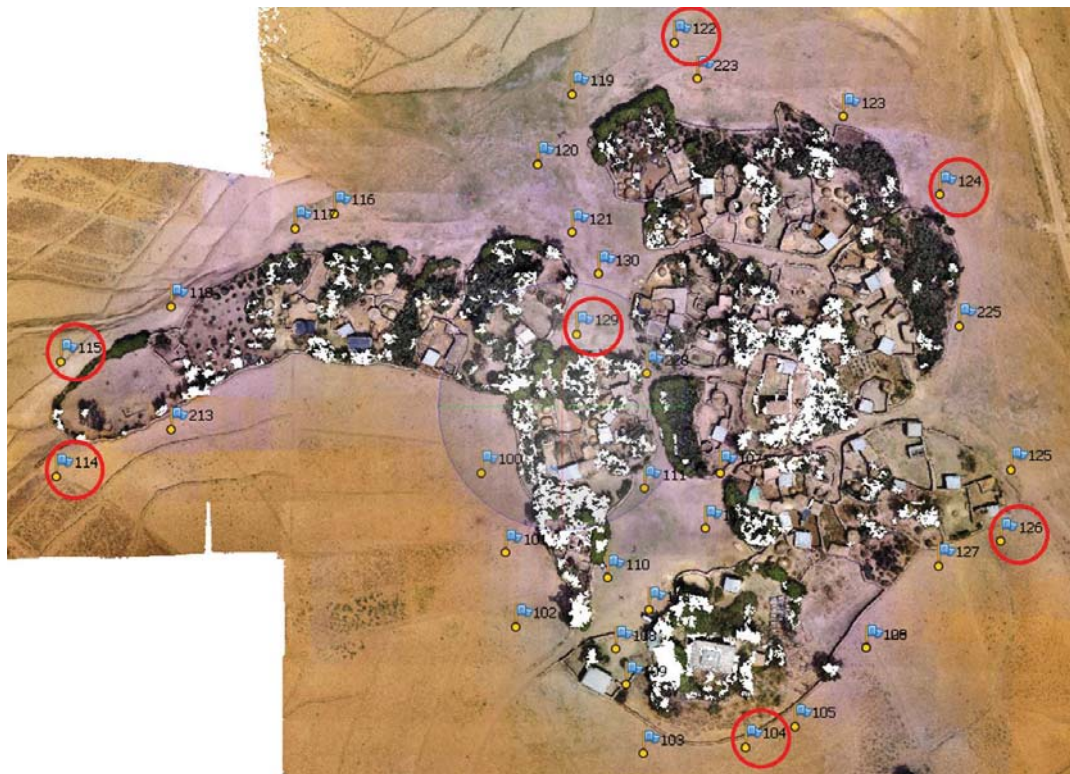


Abb. 7: Passpunktverteilung im Testblock Wuqro – alle Passpunkte (blaue Fähnchen) und gewählte minimale Passpunktconfiguration (rote Kreise)

Tab. 4: Ergebnisse der Ausgleichungen des Testblockes Wuqro

V	# PP/KP	Ø3D PF [cm]	ΔX	ΔY	ΔZ	μX [cm]	μY	μZ	μmax
1	34/0	2,37	1,25	1,20	0,94	–	–	–	–
2 RS	34/0	0,59	0,46	0,24	0,09	–	–	–	–
3	7/27	9,62	4,36	2,56	1,56	5,94	4,70	3,35	22,29
4 RS	7/27	3,92	0,68	0,48	1,16	1,68	0,80	3,13	8,23

V: Version, RS: Korrektur Rolling-Shutter-Effekt, PP: Passpunkte, KP: Kontrollpunkte, PF: Punktfehler, ΔXYZ: PP-Residuen, μXYZ: empirische Genauigkeit der Kontrollpunkte

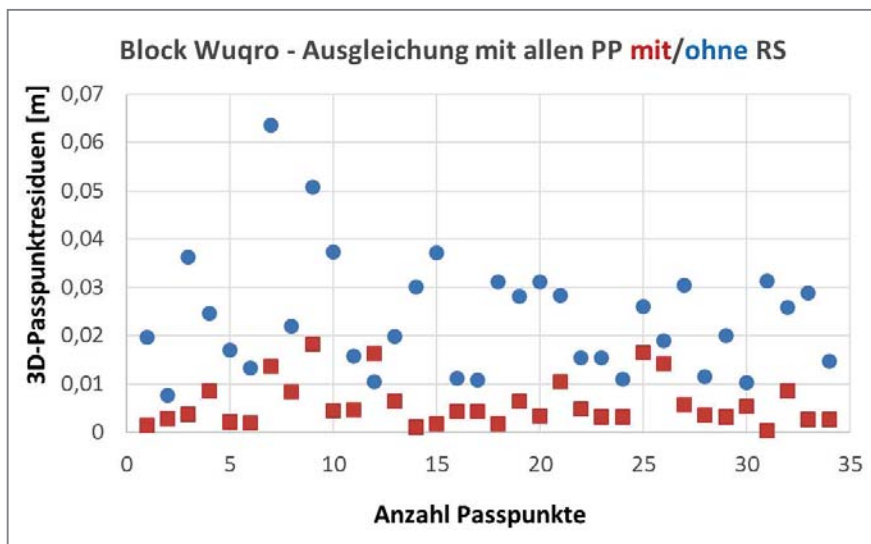


Abb. 8: Punktfehler der Passpunkte für die Ausgleichungen des Testblocks Wuqro mit **allen** Passpunkten in Agisoft PhotoScan – ohne (blau) und mit Korrektur (rot) um den Rolling-Shutter-Effekt

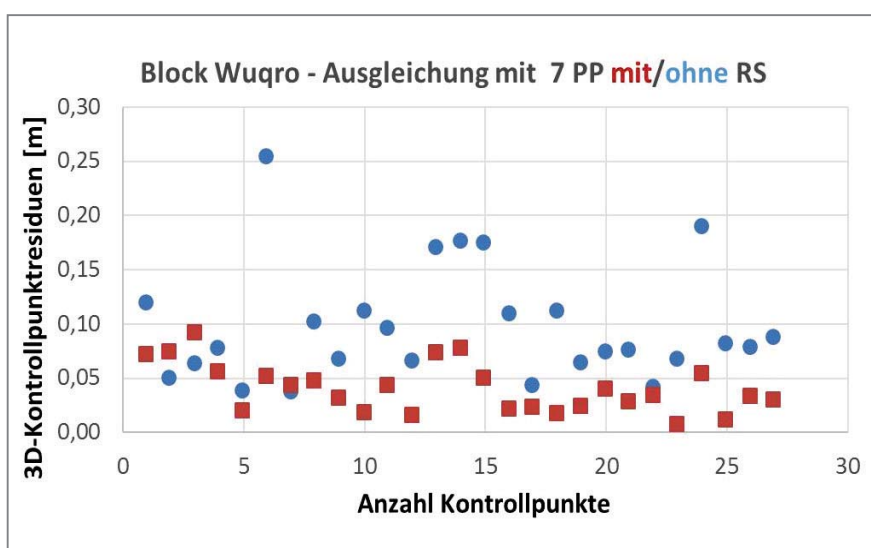


Abb. 9: Punktfehler der Kontrollpunkte für die Ausgleichungen des Testblocks Wuqro mit **sieben** Passpunkten (minimale Konfiguration) in Agisoft PhotoScan – ohne (blau) und mit Korrektur (rot) um den Rolling-Shutter-Effekt

Der gemittelte Punktfehler der Passpunkte beträgt nach der Bündelausgleichung mit allen Passpunkten 2,4 cm, der durch die Korrektur des Rolling-Shutter-Effektes noch auf 0,6 cm gesteigert wurde (Tab. 4), was einer Verbesserung um den Faktor 4 entspricht. Die Abb. 8 zeigt eine signifikante systematische Reduktion der Passpunktresiduen (Raumvektoren) auf genauer als 2 cm durch die Kompensation um den Rolling-Shutter-Effekt. Die Ausgleichung der minimalen Passpunktconfiguration mit der Lagerung des Luftbildverbandes auf insgesamt sieben Passpunkte (rote Kreise in Abb. 7) liefert ein schlechteres Ergebnis, da die empirische Genauigkeit für die 27 Kontrollpunkte auf 5 bis 6 cm für die Lage und 3 cm für die Höhe bestimmt wurde. Die Rolling-Shutter-Korrektur bringt bei der minimalen Passpunktversion eine signifikante Verbesserung der empirischen Genauigkeit in der Lage, während sie in der Höhe gleich bleibt. Die Abb. 9 zeigt auch eine systematische Verbesserung der Genauigkeit, jedoch ist das Niveau etwas schlechter als bei der Ausgleichung mit allen Passpunkten. Für eine Aero triangulation mit einem UAV-gestütztem Luftbildverband ist das erreichte Ergebnis sehr gut.

6.2 Testblock Melazo

Der Testblock Melazo liegt 10 km südwestlich von der Stadt Aksum (Abb. 4 links). Der Luftaufnahmen wurden am 31.10.2017 in drei Subblöcken mit insgesamt 36 Streifen in 43 Minuten ebenso mit der Phantom 3 Advanced gemacht.



Abb. 10:
Passpunktverteilung im
Testblock Melazo – alle Pass-
punkte (blaue Fähnchen) und gewählte
minimale Passpunktconfiguration (rote Kreise)

Tab. 5: Ergebnisse der Ausgleichungen des Testblockes Melazo (Äthiopien)

V	# PP/KP	Ø3D PF [cm]	ΔX	ΔY	ΔZ	μX [cm]	μY	μZ	μmax
1	46/0	8,24	5,25	4,34	3,15	–	–	–	–
2 RS	46/0	2,43	0,86	0,96	1,72	–	–	–	–
3	5/41	19,04	9,53	5,75	9,16	8,67	5,63	13,66	41,40
4 RS	5/41	15,80	0,76	0,88	0,23	6,90	5,20	10,97	25,22

V: Version, RS: Korrektur Rolling-Shutter-Effekt, PP: Passpunkte, KP: Kontrollpunkte, PF: Punktfehler, ΔXYZ: PP-Residuen, μXYZ: empirische Genauigkeit der Kontrollpunkte

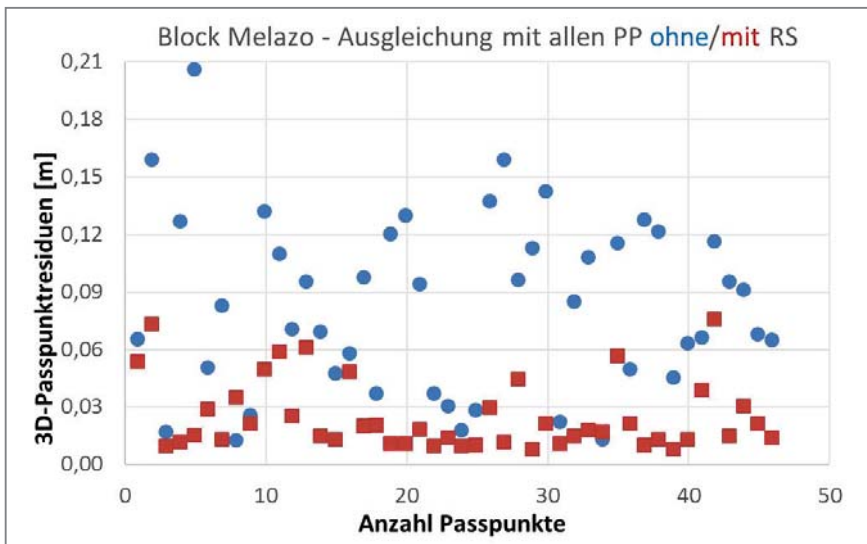


Abb. 11: Punktfehler der Passpunkte für die Ausgleichungen des Testblocks Melazo mit **allen** Passpunkten in Agisoft PhotoScan – ohne (blau) und mit Korrektur (rot) um den Rolling-Shutter-Effekt

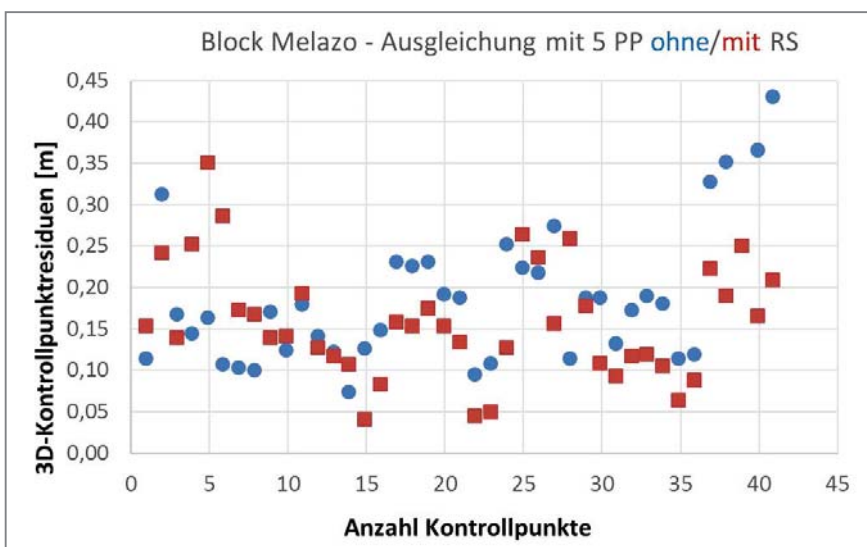


Abb. 12: Punktfehler der Kontrollpunkte für die Ausgleichungen des Testblocks Melazo mit **fünf** Passpunkten (minimale Konfiguration) in Agisoft PhotoScan – ohne (blau) und mit Korrektur (rot) um den Rolling-Shutter-Effekt

Die durchschnittliche Flughöhe für die 824 Fotos betrug 35 m, wobei die Fluggeschwindigkeit zwischen 4,5 und 6 m/s variierte (Tab. 3). Der Bildverband umfasst 62 gut verteilte signalisierte Passpunkte (Abb. 10), die wie beim Block Wuqro durch eine Totalstation mit einer Genauigkeit von 2 cm bestimmt wurden.

Die Ergebnisse der Aerotriangulationen bestätigen die Resultate mit dem Testblock Wuqro. Die Ausgleichung mit allen Passpunkten liefert grundsätzlich ein besseres Ergebnis als mit der minimalen Passpunktconfiguration. Die Kompensation um den Rolling-Shutter-Effekt führt in der Bündelausgleichung sowohl für die volle als auch für die minimale Passpunktversion zu höheren Genauigkeiten. Allerdings fallen die Verbesserungen der Genauigkeiten nicht so hoch aus wie beim Block Wuqro. In den Abb. 11 und Abb. 12 können die Verbesserungen für jeden Pass- bzw. Kontrollpunkt direkt verglichen werden. Durch die Rolling-Shutter-Korrektur schwanken die 3D-Abweichungen der Passpunkte zwischen 1 und 7 cm, während die Verteilung der Punktfehler ohne Korrektur wesentlich inhomogener ist und zwischen 1 und 21 cm schwankt (Abb. 11). Bei der Ausgleichung mit minimaler Passpunktconfiguration fallen die Verbesserungen bei weitem nicht so signifikant aus (um den Faktor 1,2 besser) wie bei dem Ergebnis mit allen Passpunkten (Steigerung um den Faktor 4). Allerdings sind bei den Kontrollpunkten die maximalen Abweichungen von 41 cm und 25 cm (jeweils der Z-Wert) recht hoch im Vergleich zu den Referenzwerten aus Tachymetermessungen, was sich ggf. auf Fehler bei der Bestimmung einzelner Passpunkte durch die Tachymeter zurückführen lässt.

6.3 Testblock Vaipu

Der Testblock Vaipu befindet sich in der Mitte der Osterinsel auf ca. 290 m Höhe unterhalb des Vulkanes Ma'unga Terevaka (511 m) in der Quebrada Vaipu (Abb. 4) und ist eine schmale Schlucht eines meistens trockenen Flusslaufes (Abb. 13). Der Bildflug wurde am 20.3.2015 in 40 Minuten in einer durchschnittlichen Höhe von 31 m über Grund mit einem Mikrokopter durchgeführt. Der Flusslauf wurde mit fünf parallel angeordneten Fluglinien (Senkrechtaufnahmen) und mit zwei Fluglinien als Schrägaufnahmen jeweils parallel zu den Hängen des Flussbettes befliegen. Insgesamt wurden 431 Luftbilder erfasst, in denen 15 Passpunkte signalisiert und im Objektraum gut verteilt sind (Abb. 13). Die durchschnittliche Fluggeschwindigkeit betrug hier nur 2,9 m/s, so dass die Auswirkung des Rolling Shutters auf die Bildaufnahme mit der Sony NEX 5R eher gering eingeschätzt wird. Die Passpunkte wurden für den Testblock Vaipu mit einer Leica-Totalstation innerhalb eines geodätischen 3D-Netzes mit einer Genauigkeit von 2 cm bestimmt.

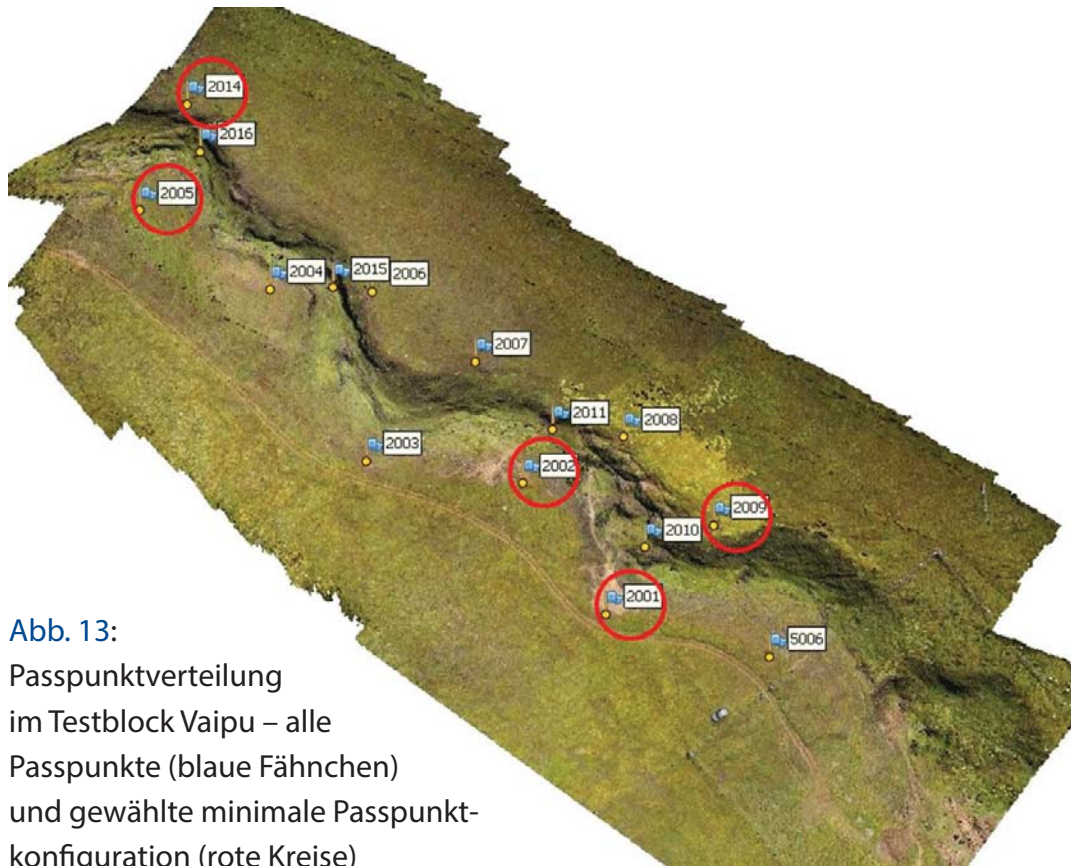


Abb. 13:
 Passpunktverteilung
 im Testblock Vaipu – alle
 Passpunkte (blaue Fähnchen)
 und gewählte minimale Passpunkt-
 konfiguration (rote Kreise)

Die Ergebnisse der Aerotriangulationen mit dem Block Vaipu bestätigen die Resultate der beide Testblöcke Wuqro und Melazo, denn die Ausgleichung mit der vollen Passpunktversion erreicht wiederum ein besseres Ergebnis als mit der minimalen Passpunktkonfiguration (rote Kreise in [Abb. 13](#)). Die Kompensation um den Rolling-Shutter-Effekt führt in der Bündelausgleichung auch hier sowohl für die volle (Faktor 1,4) als auch für die minimale Passpunktversion (Faktor 2,1) zu höheren Genauigkeiten. Allerdings ist die Genauigkeitssteigerung deutlich geringer als bei den anderen beiden Blöcken, was eventuell auf den anderen CMOS-Sensor und auf die geringere Fluggeschwindigkeit zurückgeführt werden kann. In den [Abb. 14](#) und [Abb. 15](#) können die Verbesserungen für jeden Pass- bzw. Kontrollpunkt direkt verglichen werden. Die durchschnittliche empirische Genauigkeit konnte anhand der Kontrollpunkte in der Lage gar nicht (ca. 3 cm) und in der Höhe von 6 cm auf 4 cm gesteigert werden.

6.4 Auswirkungen auf Berechnungen von Oberflächenmodellen

Um die Auswirkungen der Passpunktkonfigurationen auf die Berechnung von digitalen Oberflächenmodellen zu zeigen, wurden für die Blöcke Wuqro und Melazo jeweils das Oberflächenmodell mit allen Passpunkten und mit der jeweils minimalen Passpunktkonfiguration in Agisoft PhotoScan berechnet. Der

Tab. 6: Ergebnisse der Ausgleichungen des Testblockes Vaipu (Osterinsel)

V	# PP/KP	Ø3D PF [cm]	ΔX	ΔY	ΔZ	μX [cm]	μY	μZ	μmax
1	15/0	4,53	2,12	2,09	2,73	–	–	–	–
2 RS	15/0	3,14	1,31	1,54	1,89	–	–	–	–
3	5/10	8,28	1,18	2,57	4,39	3,06	2,50	6,11	21,39
4 RS	5/10	3,92	0,59	2,02	1,63	2,48	3,05	4,18	12,89

V: Version, RS: Korrektur Rolling-Shutter-Effekt, PP: Passpunkte, KP: Kontrollpunkte, PF: Punktfehler, ΔXYZ: PP-Residuen, μXYZ: empirische Genauigkeit der Kontrollpunkte

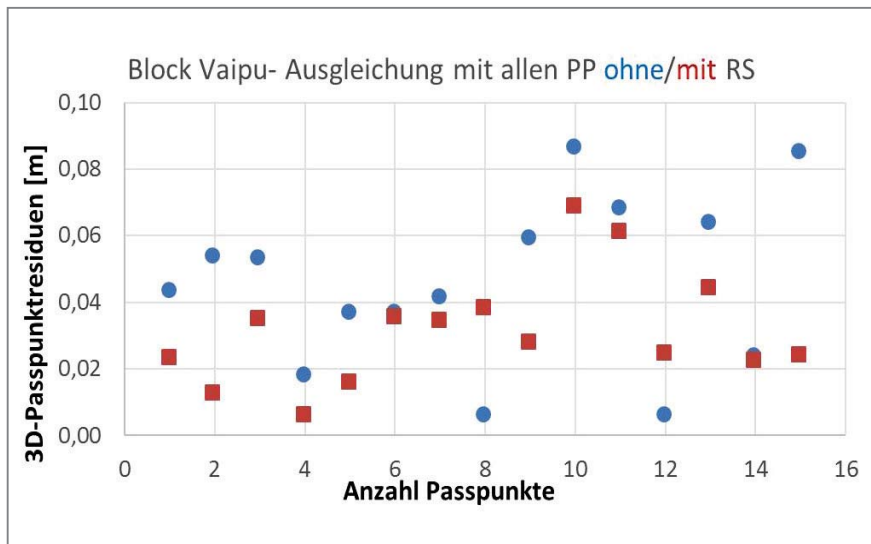


Abb. 14: Punktfehler der Passpunkte für die Ausgleichungen des Testblocks Vaipu (Osterinsel) mit **allen** Passpunkten in Agisoft PhotoScan – ohne (blau) und mit Korrektur (rot) um den Rolling-Shutter-Effekt

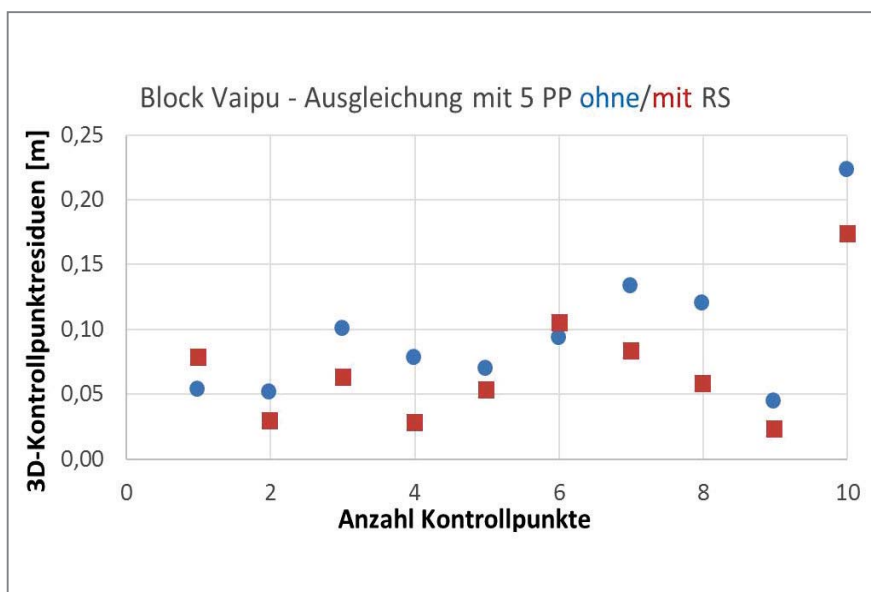


Abb. 15: 3D-Punktfehler der Kontrollpunkte für die Ausgleichungen des Testblocks Vaipu (Osterinsel) mit **fünf** Passpunkten (minimale Konfiguration) in Agisoft PhotoScan – ohne (blau) und mit Korrektur (rot) um den Rolling-Shutter-Effekt

3D-Vergleich, der mit der Software Geomagic berechnet wurde, zeigt die Abweichungen zwischen beiden Versionen farbkodiert (Abb. 16). Die grünen Bereiche stellen Abweichungen von -20 cm bis +20 cm zwischen beiden Oberflächenmodellen dar, d.h. in diesen Bereichen zeigt sich der positive Einfluss der verwendeten Passpunkte auf das Ergebnis. Blaue Bereiche stellen eine Wölbung nach unten und orange bis rote Bereiche eine Wölbung nach oben dar, hier sind die Distanzen zwischen zwei Passpunkten zu groß. Ergänzt man den Block um drei weitere Passpunkte (Abb. 17), so können die Deformationen – innerhalb eines gewissen Genauigkeitsniveaus – beseitigt werden.

In Abb. 18 (links) ist ein 3D-Vergleich zwischen den beiden Oberflächenmodellen, die mit der Version aus allen Passpunkten und ganz ohne Passpunkte berechnet wurden. Die farbkodierten Abweichungen zeigen eindeutig eine starke West-Ost-Kippung des Modells ohne Passpunkte gegenüber dem Modell mit

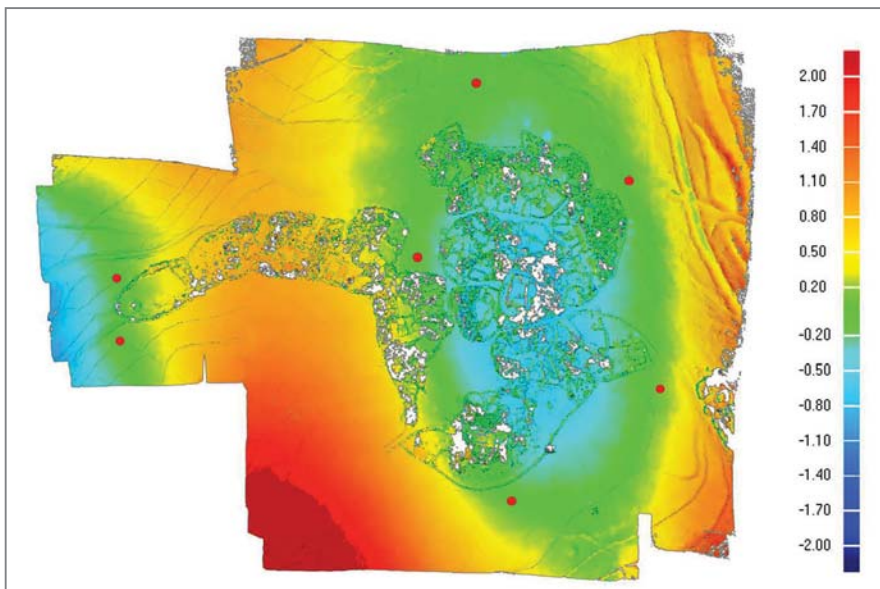


Abb. 16:
3D-Vergleich der Oberflächenmodelle im Testblock Wuqro – Version mit allen Passpunkten vs. minimale Passpunktanordnung (7 PP)

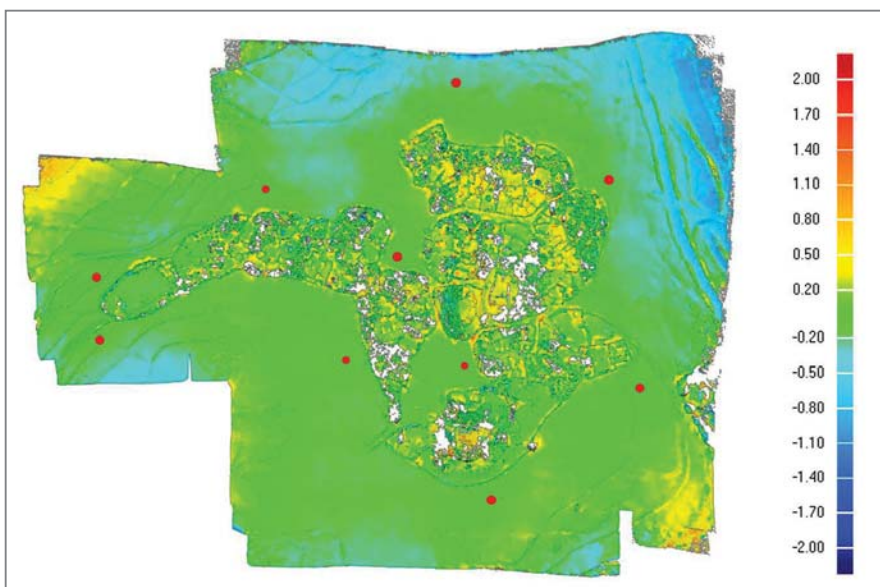


Abb. 17:
3D-Vergleich der Oberflächenmodelle im Testblock Wuqro – Version mit allen Passpunkten vs. 10 Passpunkte

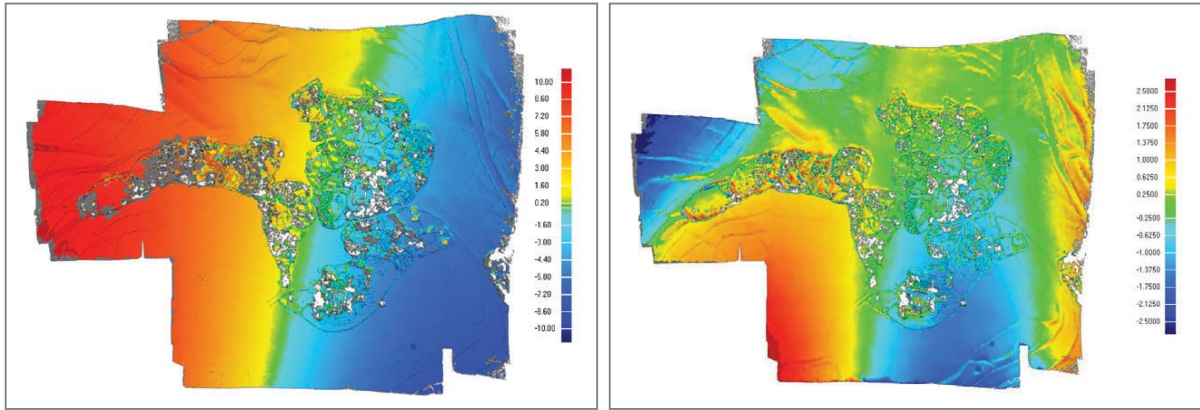


Abb. 18: 3D-Vergleich der Oberflächenmodelle im Testblock Wugro – Version mit allen Passpunkten vs. ohne Passpunkte (links) und als Best-Fit-Anpassung zur Elimination der Verkippung

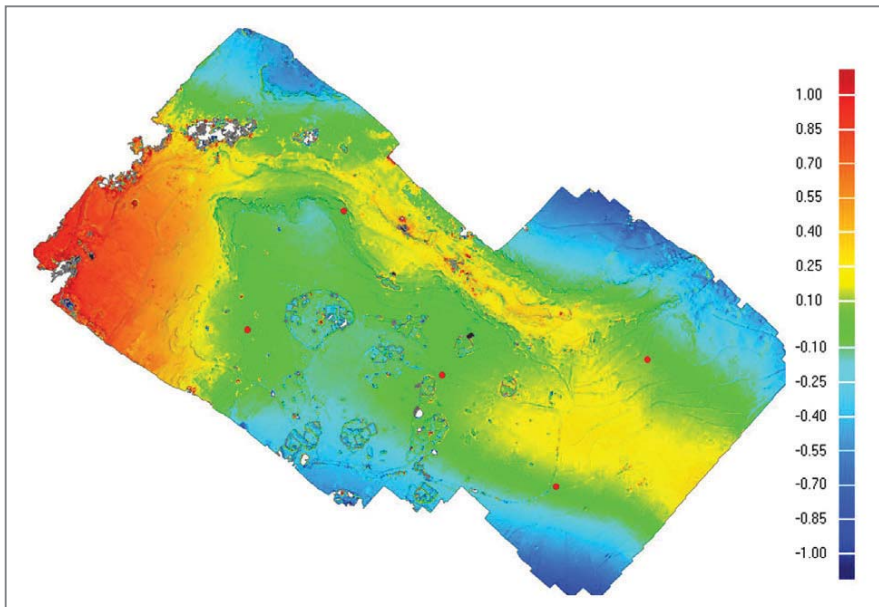


Abb. 19: 3D-Vergleich der Oberflächenmodelle im Testblock Melazo – Version mit allen Passpunkten vs. minimale Konfiguration (5 PP – rote Punkte)

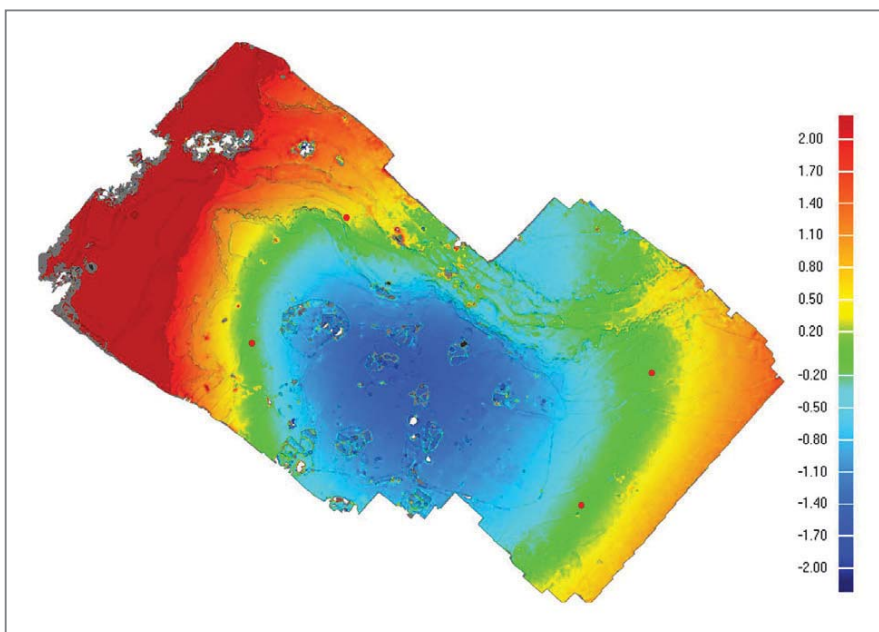


Abb. 20: 3D-Vergleich der Oberflächenmodelle im Testblock Melazo – Version mit allen Passpunkten vs. vier Passpunkte (rote Punkte) nach Entfernung des Passpunktes in der Blockmitte – Ergebnis negative Wölbung des Oberflächenmodells

allen Passpunkten von hoch (links) nach tief (rechts) auf. Aber selbst wenn man diese absolute Verkippung ignoriert und nur einen 3D-Vergleich der Geometrie an sich durchführt (Abb. 18 rechts), so ist eine große Deformation innerhalb des Blockes von mehreren Metern zu erkennen.

Im Vergleich zu dem Ergebnis vom Testblock Wuqro zeigt der 3D-Vergleich zwischen den beiden Oberflächenmodellen vom Block Melazo, die mit der Version aus allen Passpunkten und mit der minimalen Passpunktanzahl berechnet wurden, ein etwas besseres Resultat (Abb. 19). Hier werden die Abweichungen außerhalb des Passpunktrahmens (Umhüllende der vier ausgewählten äußeren Passpunkte in der minimalen Konfiguration, siehe Abb. 10) erwartungsgemäß deutlich größer, innerhalb des Passpunktrahmens sind die Abweichungen größtenteils nicht höher als ± 20 cm. Entfernt man jedoch den einen Passpunkt in der Mitte des Gebietes, so ist auch hier deutlich eine Durchbiegung (blaue Fläche in der Mitte des Modells) von mehr als einem Meter zu erkennen (Abb. 20).

7 Fazit und Ausblick

Die in diesem Beitrag vorgestellten Untersuchungen zu den Auswirkungen von verschiedenen Passpunktanordnungen bei UAV-gestützten Bildflügen zeigen deutlich, wie wichtig Passpunkte und deren optimale Verteilung im Objektraum für eine genaue Bildorientierung und 3D-Punktbestimmung durch Bündelblockausgleichung sind, wenn keine präzisen direkt gemessenen Bildorientierungen (direkte Georeferenzierung) durch RTK-GNSS (mit Zwei-Frequenz-Empfängern) verfügbar sind. Genauigkeiten von besser als 3 cm in Lage und Höhe der Pass- oder Kontrollpunkte sind heute bei Aerotriangulationen von Bildflügen, die mit low-cost UAV-Systemen aufgenommen wurden, möglich. Sind die Abstände zwischen den Passpunkten größer als zehn Bildbasen, so treten bei UAV-Bildflügen ohne RTK-GNSS deutliche Deformationen innerhalb des Blockes durch Wölbung im Oberflächenmodell auf. Je nach geforderter Genauigkeit sollten diese Aspekte bei der Passpunktverteilung bereits im Rahmen der Bildflugplanung berücksichtigt werden. Gruen und Runge (1988) zeigten in Untersuchungen mit zwei Luftbildverbänden, dass man die Anzahl der Passpunkte auf das absolute Minimum von einem reduzieren könnte, wenn man die Bildorientierungen mit genügender Genauigkeit messen kann. Przybilla et al. (2015) wiesen in empirischen Untersuchungen nach, dass die mittels RTK-GNSS gemessenen Bildorientierungsparameter eine Reduktion der Anzahl von Passpunkten auf vier Passpunkte erlauben, ohne eine signifikante Qualitätsverschlechterung im Block zu erhalten. Bildflüge mit Kreuzbefliegung (Querstreifen) und mit Aufnahmen aus verschiedenen Höhen und Perspektiven (schräg) unterstützen eine zuverlässige Simultankalibrierung der zumeist unkalibrierten

UAV-Kameras. Die aus dem bemannten Bildflug generierten Erfahrungen und die daraus abgeleitete Expertise der Luftbildphotogrammetrie aus Zeiten vor der direkten Georeferenzierung haben somit heute auch für Bildflüge mit low-cost UAVs noch Gültigkeit und sollten berücksichtigt werden.

In den vorgestellten Untersuchungen hat sich auch gezeigt, dass durch die Kompensation des Rolling-Shutter-Effektes bei CMOS-Sensoren das Ergebnis der Aerotriangulation verbessert wird. Es wird vermutet, dass die Stärke der Kompensation auch abhängig von der Anzahl und Verteilung der Passpunkte und von der Geländetopographie ist. Diese Annahme muss jedoch noch durch zusätzliche empirische Untersuchungen verifiziert werden, um die Auswirkungen des Rolling-Shutter-Effektes besser verstehen und abschätzen zu können.

Dank

Wir bedanken uns für die gute Zusammenarbeit und Projektunterstützung in Äthiopien bei Frau Dr. Iris Gerlach (Außenstelle Sana'a der Orient-Abteilung, Deutsches Archäologisches Institut) und auf der Osterinsel bei Dr. Burkhard Vogt (Kommission für Archäologie Außereuropäischer Kulturen, Deutsches Archäologisches Institut in Bonn). Dipl.-Ing. Christian Hartl-Reiter (Landesarchäologie Mecklenburg-Vorpommern) danken wir für die UAV-Aufnahmen auf der Osterinsel (Chile).

Literatur

- Cramer, M.; Leinss, B. (2016): Welche ist am besten? – Anmerkungen zur Auswahl von Kamerasystemen in der UAS-Luftbildphotogrammetrie. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2016 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 82, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 97–118.
- Fraser, C. S.; Shortis, M. R. (1995): Metric exploitation of still video imagery. *The Photogrammetric Record*, 15(85), S. 107–122.
- Gerke, M.; Przybilla, H.-J. (2016): Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: Influence of onboard RTK-GNSS and cross flight patterns. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, (1), S. 17–30.
- Gruen, A.; Runge, A. (1988): The accuracy potential of self-calibrating aerial triangulation without control. *The International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing*, 27, S. 245–253.
- Jacobsen, K. (1997): Operational block adjustment without control points. *ASPRS Annual Convention*, 2, S. 238–244.
- Jacobsen, K.; Cramer, M.; Ladstädter, R.; Ressel, C.; Spreckels, V. (2010): DGPF-project: evaluation of digital photogrammetric camera systems – geometric performance. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, (2), S. 83–97.
- Kersten, T. (1996): Aerotriangulation mit einer digitalen Stillvideo Kamera Kodak DCS200. *VPK – Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik*, Nr. 2, S. 70–74.

- Kersten, T. (1999): Digitale Aerotriangulation über die ganze Schweiz. VPK – Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, Nr. 9, S. 473–478.
- Kersten, T.; Lindstaedt, M. (2016): Auf Knopfdruck – Auswertung und Resultate UAV-gestützter Bildflugdaten. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2016 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 82, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 135–158.
- Kersten, T.; Lindstaedt, M. (2017): Photogrammetrie auf Knopfdruck – Auswertung und Resultate UAV-gestützter Bildflugdaten. In: zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Heft 1/2017, 142. Jg., S. 3–13.
- Luhmann, T. (2018): Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden, Beispiele. 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Wichmann, VDE Verlag GmbH Berlin Offenbach, 783 S.
- Passini, R.; Jacobsen, K. (2009): Accuracy and radiometric study on very high resolution digital camera images. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 38(1-4-7/W5).
- Pix4D (2017a): Innovation – Improved Accuracy for Rolling Shutter Cameras in Pix4Dmapper. <https://pix4d.com/rolling-shutter-correction>, letzter Zugriff 30.12.2017.
- Pix4D (2017b): (Android and iOS) Camera settings in Pix4Dcapture. <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/203204339#gsc.tab=0>, letzter Zugriff 8.1.2018.
- Przybilla, H.-J.; (2017): Kameras für UAS – Eine Marktübersicht. In: DVW e. V. (Hrsg.): Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017). DVW-Schriftenreihe, Band 86, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 51–66.
- Przybilla, H.-J.; Kraft, T.; Gessner, M.; Zurhorst, A. (2017): Untersuchungen und erste Ergebnisse zur geometrischen Qualität marktgängiger Kameras für den UAV-Einsatz. In: Luhmann, T.; Schumacher, C. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017, Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, S. 235–245.
- 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, S. 45–54.
- Rofallski, R.; Luhmann, T. (2017): Untersuchung und Modellierung des Rolling-Shutter-Effekts für photogrammetrische Einzel- und Mehrbildauswertungen. In: Luhmann, T.; Schumacher, C. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017, Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, S. 388–398.
- Vautherin, J.; Rutishauser, S.; Schneider-Zapp, K.; Choi, H.F.; Chovancova, V.; Glass, A.; Strecha, C. (2016): Photogrammetric Accuracy and Modeling of Rolling Shutter Cameras. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 3(3), S. 139–146.

Kontakt

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