Aerotriangulation von UAV-Bilddaten der Zeche Zollern – Die Ergebnisse verschiedener UAV-Systeme und zweier Softwarepakete im Vergleich

Thomas P. Kersten | Frederic S. Schlömer | Heinz-Jürgen Przybilla

1 Einführung

Unmanned Aerial Vehicles (UAV) haben sich als unbemannte Flugsysteme mit Kameras und anderen Sensoren ausgestattet wegen des flexiblen Einsatzes seit vielen Jahren für unterschiedliche geodätische Aufgaben 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 und verschiedene günstige bis hochwertige digitale Kameras als "fliegendes Stativ" transportieren. Eine Marktübersicht über Kameras für UAVs ist in Przybilla (2017) zusammengestellt. Für die Bestimmung der Bildorientierungen und der Kamerakalibrierung werden digitale Aerotriangulationen mit Bündelblockausgleichungen durchgeführt, wenn die Orientierungsparameter der Bilder durch entsprechende hochwertige Sensorik nicht direkt während des Bildfluges bestimmt werden können.

Erste Bildflüge mit einer digitalen Still Video Kamera Kodak DCS200 wurden bereits Mitte der 1990er Jahre in Australien (Fraser und Shortis 1995) und in der Schweiz (Kersten 1996) durchgeführt. Dabei wurde für einen Luftbildverband von 50 Bildern in Urmein (Schweiz) bei einem Bildmaßstab 1:20.000 und einer Längs- und Querüberdeckung von 60 % eine praktische Genauigkeit von $s_{XY} = 2 \text{ cm}$ und $s_Z = 4 \text{ cm}$ für 30 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 eines Luftbildverbandes mit mehr als 6000 gescannten Bildern einer kalibrierten analogen Luftbildkamera über die gesamte Schweiz vor, in der der Datenfluss und die Qualitätskontrolle durch zusätzliche Softwareentwicklungen weitestgehend automatisiert wurden.

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/innen verschiedener Universitäten mit unterschiedlichen Messprogrammen, Bündelblockausgleichungsprogrammen, Konfigurationen der Ausgleichungen (z. B. mit/ohne Verwendung von Projektionszentrumskoordinaten und Richtungsinformation aus GNSS/inertialen Systemen) und unterschiedlicher Passpunktkonfiguration 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 Passpunktkonfigurationen) verglichen wird.

In diesem Beitrag werden die geometrische Genauigkeit von Bildflügen aktueller und am Markt erhältlicher UAV-Systeme im 3D-Testfeld Zeche Zollern in Dortmund untersucht. Dazu werden die Abweichungen zu signalisierten Kontrollpunkten durch Aerotriangulation und Bündelblockausgleichung bei Verwendung unterschiedlicher Passpunktkonfigurationen bestimmt. Im Folgenden werden das UAV-Testfeld Zeche Zollern, die untersuchten UAV-Systeme und die Ergebnisse der Aerotriangulationen vorgestellt und diskutiert.

2 Das UAV-Testfeld Zeche Zollern

Die Zeche Zollern wurde 1898 bis 1904 am westlichen Stadtrand von Dortmund (δ 51° 31′ 4″ N, 7° 20′ 5″ O), im Stadtteil Bövinghausen, im Jugendstil errichtet. Nach ihrer Stilllegung (Ende der 1960er Jahre) integrierte der Landschaftsverband Westfalen-Lippe (LWL) die Zeche 1981 in das dezentrale Westfälische Industriemuseum (Wikipedia 2019). Die Zeche ist heute nicht nur Museum mit festen und wechselnden Ausstellungen, sondern auch Ort für Naherholung sowie kulturelle und wissenschaftliche Veranstaltungen.

Die Fläche des von der HSBO eingerichteten UAV-Testfeldes umfasst nahezu das komplette Areal der Zeche. Seine Ausdehnung beträgt $320 \text{ m} \times 220 \text{ m}$ (ca. 7 ha). Die höchste vertikale Ausdehnung ist über die ca. 40 m hohen Fördergerüste gegeben (Abb. 1 oben). Das Testfeld besteht aus 45 signalisierten Passpunkten am Boden (Abb. 1 oben rechts), die rasterförmig über das Areal angeordnet sind (Abb. 1 unten).



Abb. 1: Zeche Zollern – Blick auf die Fördertürme mit dem Maschinenhaus im Vordergrund (oben) und Konfiguration der signalisierten Passpunkte (unten) sowie signalisierter Passpunkt am Boden (oben rechts)

Die Passpunkte wurden durch geodätische Netzmessungen mit Tachymetern, Präzisionsnivellier und ein RTK-GNSS-System jeweils am Tag der Befliegungen (16.10.2017 und 5.11.2018) bestimmt. Eine ausführliche Beschreibung der geodätischen Messungen und der Netzausgleichung ist in Przybilla et al. (2018) und in Bäumker (2020) publiziert. Die Genauigkeiten für die Passpunkte werden für die photogrammetrischen Triangulationen der verschiedenen Bildverbände mit 5 mm in Lage und Höhe angenommen.

3 Die untersuchten UAV-Systeme

Für die Bildflüge und Untersuchungen im UAV-Testfeld standen folgende Systeme für die Kampagnen im Oktober 2017 und November 2018 zur Verfügung (Abb. 2): vier Multikopter von DJI (Phantom 4 Pro, Zenmuse X5S, Zenmuse X5S (modifizierte Optik), Inspire 2 Zenmuse X4S) und der Starr- bzw. Flächenflügler senseFly ebee (S.O.D.A. Kamera) Die wichtigen technischen Daten der UAV-Systeme und der dazugehörigen wichtigsten Bildflugparameter sind in Tab. 1 zusammengefasst.



Abb. 2: Untersuchte UAV-Systeme: Oben: senseFly ebee mit S.O.D.A. (links), DJI Phantom 4 Pro mit Zenmuse X4S (rechts). Unten (v. l. n. r.): DJI Inspire 2 mit Zenmuse X4S, mit Zenmuse X5S und mit Zenmuse X5S (modifizierte Optik)

Um eine Vergleichbarkeit der UAV-Systeme im Testszenario zu gewährleisten, wurde vorab für alle Systeme eine einheitliche Bodenauflösung (GSD) von 1,36 cm festgelegt (Fluganordnung: Regular/R als Parallelflug, Abb. 3 rot). Daraus resultierend ergaben sich unterschiedliche Flughöhen für die Plattformen (Tab. 1), da sie entsprechend der jeweiligen Brennweite angepasst wurden. Weiterhin wurden Flüge in einer Kreuzanordnung (Cross/C, höhere Flughöhe quer zum 1. Flug, Abb. 3 blau) geplant, wobei die Flughöhe jeweils um 20 % von den Normalanordnungen abweicht. Die Durchführung der Kreuzbefliegung

Plattform	senseFly ebee		DJI Inspire 2		DJI Phantom 4 Pro
Kamera	S.O.D.A.	Zenmuse X4S	Zenmuse X5S_mod	Zenmuse X5S	Zenmuse X4S
Objektiv	Integriert 10.6/2.8	Integriert 8.8/2.8	Schneider Apo- Xenoplan 24/2.0	DJI MFT ASPH 15/1.7	Integriert 8.8/2.8
Sensor	CMOS	CMOS	CMOS	CMOS	CMOS
Shutter	Global	Global	Rolling	Rolling	Global
Auflösung [MPx]	20	20	20,8	20,8	20
Sensor [mm]	13.1 × 8.8	13.2 × 8.8	17.3×13.0	17.3×13.0	13.2×8.8
Anzahl Pixel	5472 × 3648	5472 × 3648	5280 × 3956	5280 × 3956	5472 × 3648
Pixelgröße [µm]	2,4	2,4	3,28	3,28	2,4
Brennweite [mm]	10,6	8,8	24	15	8,8
Flugdatum	05.11.2018	05.11.2018	16.10.2017	16.10.2017	16.10.2017
Flughöhe Regular [m] /(# Fotos)	80 / (134)	50 / (253)	96 / (210)	60 / (203)	50 / (235)
Flughöhe Cross [m] /(# Fotos)	100 / (118)	60 / (179)	115 / (155)	72 / (154)	60 / (142)
Datenformat	JPG	JPG	RAW	RAW	RAW
GSD [mm]	19°	14°	14°	14°	14°

Tab. 1: Technische Daten der eingesetzten UAV-Systeme und wichtige Parameter der Bildflüge



Abb. 3: Konfiguration der Bildflüge Regular (rot: 50 m) und Cross (blau: 60 m) mit der DJI Phantom 4 Pro über dem UAV-Testfeld

als separate Flüge hat ihren wesentlichen Grund in der Tatsache, dass die verfügbaren Bildflug-Planungstools (z. B. Map Pilot, Pix4DCapture) eine Kreuzbefliegung mit variierender Flughöhe nicht zulassen. Bis auf das System senseFly S.O.D.A. wurden bei den Bildflügen gleiche GSD-Werte erreicht, die minimal kleiner sind als die vorgegebene GSD (Tab. 1).

Die Bildspeicherung erfolgte bei den Bildflügen im Jahr 2017 für die drei eingesetzten Systeme im RAW-Format, so dass für die nachfolgenden Auswertungen unterschiedliche Bildformate erzeugt werden konnten. Neben dem verlustfreien TIF-Format wurde das für viele Anwendungen als "Standardformat" eingesetzte JPG-Format (Kompressionsrate 80 %) mit dem Bildbearbeitungswerkzeug "CaptureOne" (PhaseOne 2019) generiert. Beim Speichern der RAW-Daten auf dem SD-Datenträger wird vorrangig bei den DJI-Systemen ein um den Faktor 3 höherer Zeitbedarf benötigt. Während die Datenspeicherung eines Fotos im JPG-Format weniger als 1 Sekunde benötigt, verlängert sich diese Zeit für die RAW-Daten Speicherung auf ca. 3 Sekunden. Damit einher geht eine deutlich zu reduzierende Fluggeschwindigkeit der Systeme von typischerweise 10 m/sec bis auf ca. 3,3 m/sec bei Speicherung von RAW-Daten. Daraus folgt, dass für die Betriebsdauer einer Akkuladung auch nur ein Drittel der Fotos erzeugt werden kann. 2018 wurden die Bilddaten für die Systeme senseFly ebee S.O.D.A. und DJI Inspire 2 Zenmuse X4S standardmäßig im Format JPG gespeichert.

Die beiden untersuchten UAV-Systeme mit der Kamera Zenmuse X5S 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/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 einer Phantom 4 beträgt 33 Millisekunden (Pix4D 2019). 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 4 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 (Rofallski und Luhmann 2017) und für die 3D-Punktbestimmung mit Bilddaten von

UAV-Systemen (Vautherin et al. 2016, Lindstaedt und Kersten 2018) untersucht und dokumentiert.

4 Die photogrammetrischen Softwarepakete

Für die Durchführung der Aerotriangulation wurden die marktgängigsten Softwarepakete Agisoft PhotoScan 1.4.4 und Pix4Dmapper 4.2.27 eingesetzt. Photo-Scan 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. Die aktuelle Version ist 1.5.5. (November 2019) und wird unter dem Namen Agisoft Metashape vertrieben. 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 tangentiale 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.

Pix4Dmapper ist wie PhotoScan/Metashape eine führende Photogrammetrie-Software für das professionelle UAV-Mapping. Die Firma Pix4D ist ein Schweizer Unternehmen, das im Jahr 2011 als Spin-off des Computer Vision Lab der École Polytechnique Fédérale de Lausanne in der Schweiz gegründet wurde. Sie entwickelt eine Reihe von Softwareprodukten, die Photogrammetrie und Computer Vision Algorithmen verwenden, um aus DSLR-, Fischaugen-, RGB-, Wärme- und Multispektralbilder texturierte 3D-Karten bzw. 3D-Modelle zu generieren. Für die Kamerakalibrierung verwendet Pix4Dmapper die folgenden Parameter zur Kompensation der systematischen Bildfehler: Bildhauptpunkt, Kamerakonstante, drei radial-symmetrische und zwei tangentiale Verzeichnungsparameter.

5 Ergebnisse der Aerotriangulationen

5.1 Bildflugkonfigurationen und Passpunktversionen im Vergleich

Die Bildpunktmessungen der Verknüpfungspunkte erfolgten in beiden Softwarepaketen automatisch, während alle Passpunkte manuell gemessen wurden. Für die Generierung der jeweiligen dünnen Punktwolke wurde in Agisoft PhotoScan die Einstellung "hoch Genauigkeit" und in Pix4Dmapper "volle Bildgröße" als empfohlene Parameter verwendet, wodurch in beiden Softwaren nur die halbe Bildgröße zur Punktmessung verwendet wurde. Die Ausgleichungen der Messungen wurde mit verschiedenen Passpunktkonfigurationen durchgeführt: 45 Passpunkte (Version 1), 22 Passpunkte und 23 Kontrollpunkte (Version 2), 12 Passpunkte und 33 Kontrollpunkte (Version 3) sowie 5 Passpunkte und 40 Kontrollpunkte (Version 4). In diesem Beitrag wurden nur die Ergebnisse der beiden Versionen 2 und 3 für die fünf untersuchten UAV-Systeme zusammengestellt, da sie realistische Szenarien mit einer genügenden Anzahl von gut verteilten Passpunkten und einer hohen Anzahl an Kontrollpunkten darstellen. Zusätzlich wurde für die im Jahr 2017 erfolgten Bildflüge der Einfluss des Bildformates TIFF und JPG auf das Ergebnis der Aerotriangulation untersucht. Zudem konnte der Einfluss der Aufnahmekonfigurationen (Regulärer Bildflug und Kreuzbefliegung) auf das Ergebnis der Aerotriangulation analysiert werden. In den Bündelblockausgleichungen der Kreuzbefliegungen wurde jeweils für die beiden Bildflüge immer eine gemeinsame Kamerakalibrierung durchgeführt. Im Kapitel 5.2. werden die Ergebnisse gemeinsamer und separater Kamerakalibrierung im Vergleich gegenübergestellt, um die Auswirkungen auf das Ergebnis aufzuzeigen. Erste detaillierte Ergebnisse über reguläre Bildflüge und den entsprechenden Kreuzbefliegungen verschiedener UAV-Systeme im Vergleich sind bereits in Przybilla (2019) veröffentlicht. Die Auswirkungen von unterschiedlichen Passpunktkonfigurationen auf die Ergebnisse von Aerotriangulationen und abgeleiteter Produkte (z. B. Oberflächenmodelle) sind in Lindstaedt und Kersten (2018) publiziert.

In den Abb. 5 und Abb. 6 werden die durchschnittlichen Abweichungen an den Kontrollpunkten (für X, Y und Z sowie für den Raumvektor) nach der Ausgleichung in PhotoScan bzw. Pix4Dmapper für die Bilddaten (JPG) von dem UAV-System senseFly S.O.D.A. vorgestellt.

Aus den beiden Grafiken der Abb. 4 und Abb. 5 ist ersichtlich, dass die Abweichungen an den Kontrollpunkten in PhotoScan generell etwas besser sind als in Pix4Dmapper. Das trifft insbesondere auf die Z-Koordinate zu. Die Abweichungen in der Lage sind in PhotoScan für beide Bildflug- und Passpunktkonfigurationen mit 3 bis 4 mm sehr gut. Das wird in Pix4Dmapper nur annähernd in der Kreuzbefliegung erreicht, während der reguläre Bildflug mit Lageabwei-



Abb. 4: Durchschnittliche Abweichungen an den Kontrollpunkten nach der Ausgleichung in PhotoScan für die Bilddaten (JPG) der senseFly S.O.D.A.



Abb. 5: Durchschnittliche Abweichungen an den Kontrollpunkten nach der Ausgleichung in Pix4Dmapper für die Bilddaten (JPG) von der senseFly ebee S.O.D.A.

chungen von 7 bis 9 mm deutlich schlechter abschneidet. Bei den Ergebnissen der senseFly zeigt sich, dass die Kreuzbefliegung insbesondere in Pix4Dmapper ein signifikant besseres Resultat liefert.

Die Ergebnisse der Aerotriangulationen für die Bilddaten (JPG) der DJI Inspire 2 X4S sind in den Abb. 6 und Abb. 7 zusammengefasst. Auch hier zeigt sich, dass einerseits die Kreuzbefliegung in beiden Softwarepaketen bessere Ergebnisse bzw. geringe Abweichungen an den Kontrollpunkten liefert, und dass andererseits mit PhotoScan insgesamt bessere Ergebnisse in den Lage- und Höhenabweichungen der Kontrollpunkte erreicht werden. Die Ergebnisse der DJI Inspire 2 X4S liegen in dem Genauigkeitsniveau der senseFly S.O.D.A.

In den Abb. 8 und Abb. 9 sind die Ergebnisse der Aerotriangulationen für die Bilddaten (JPG) der DJI Inspire 2 X5S mit dem modifizierten Objektiv, das mit 24 mm eine längere Brennweite aufweist, zusammengefasst. Durch die lange



Abb. 6: Durchschnittliche Abweichungen an den Kontrollpunkten nach der Ausgleichung in PhotoScan für die Bilddaten (JPG) von der DJI Inspire 2 X4S



Abb. 7: Durchschnittliche Abweichungen an den Kontrollpunkten nach der Ausgleichung in Pix4Dmapper für die Bilddaten (JPG) der DJI Inspire 2 X4S

Brennweite – verglichen mit den anderen Systemen – wird wegen der größeren Flughöhe eine geringe Genauigkeit in der Höhe erwartet. Die Höhengenauigkeit wird mit $\sigma_z = 0,1 \% h_g$ (= Flughöhe über Grund) für dieses UAV-System von $\sigma_z = 1 - 1,2$ cm abgeschätzt. Die Ergebnisse in den Abb. 9 und Abb. 10 zeigen jedoch, dass die theoretische Höhengenauigkeit bei weitem nicht erreicht wurde. Insbesondere das Ergebnis des regulären Fluges weist in Pix4Dmapper unerklärlich hohe Abweichungen an den Kontrollpunkten in Lage und Höhe auf. Erst durch die Kreuzbefliegung werden diese Abweichungen signifikant reduziert, allerdings nur in der Lage. Die Abweichungen in der Höhe sind zwar deutlich geringer geworden, doch immer noch um den Faktor 4 bis 5 höher als die Lage, was vermutlich auf Probleme bei der Kalibrierung der Kamerakonstante aufgrund der Instabilität des Sensors und des Objektives zurückzuführen ist.



Abb. 8: Durchschnittliche Abweichungen an den Kontrollpunkten nach der Ausgleichung in PhotoScan für die Bilddaten (JPG) von der DJI Inspire 2 X5S_mod



Abb. 9: Durchschnittliche Abweichungen an den Kontrollpunkten nach der Ausgleichung in Pix4Dmapper für die Bilddaten (JPG) der DJI Inspire 2 X5S_mod

Ein ähnliches Verhalten zeigt auch die DJI Inspire 2 X5S mit dem herstellereigenen Objektiv mit einer Brennweite von 15 mm. Die Ergebnisse für dieses UAV-System sind in den Abb. 10 und Abb. 11 zusammengefasst. Auch hier zeigen sich unerklärlich hohe Abweichungen für den regulären Flug bei der Auswertung mit Pix4Dmapper, während die Abweichungen an den Kontrollpunkten für die Kreuzbefliegung signifikant geringer sind und somit ein akzeptables Resultat im Vergleich zu anderen Systemen darstellen. Bei diesem System werden die Lageabweichungen für die Kreuzbefliegung in PhotoScan sogar deutlich größer, während die Höhenabweichungen signifikant geringer werden. Insgesamt lassen die Ergebnisse der DJI Inspire 2 X5S mit beiden eingesetzten Objektiven eine instabile Kamera vermuten, da die anderen UAV-Systeme deutlich bessere und stabilere Ergebnisse bei den Abweichungen an den Kontrollpunkten zeigen.



Abb. 10: Durchschnittliche Abweichungen an den Kontrollpunkten nach der Ausgleichung in PhotoScan für die Bilddaten (JPG) von der DJI Inspire 2 X5S



Abb. 11: Durchschnittliche Abweichungen an den Kontrollpunkten nach der Ausgleichung in Pix4Dmapper für die Bilddaten (JPG) der DJI Inspire 2 X5S

Die besten Ergebnisse in den Aerotriangulationen werden mit der DJI Phantom 4 Pro für beide eingesetzten Softwarepakete erreicht (Abb. 12 und Abb. 13). Für die Kreuzbefliegung erzielen PhotoScan und Pix4Dmapper mit Abweichungen von 3 mm in der Lage und 5 bis 6 mm in der Höhe sehr ähnliche Resultate, die den Erwartungen bzw. den a-priori-Abschätzungen entsprechen. Bei einem Bildmaßstab von 1:6800 und einer Bildmessgenauigkeit von ¼ Pixel sollte für die Phantom 4 Pro eine Lagegenauigkeit von 4 mm zu erreichen sein, die durch die Ergebnisse in Abb. 13 und Abb. 14 bestätigt wird. Die insgesamt homogenen und sehr guten Ergebnisse in beiden Softwarepaketen lassen auf eine stabile Kamera in der DJI Phantom 4 Pro schließen.



Abb. 12: Durchschnittliche Abweichungen an den Kontrollpunkten nach der Ausgleichung in PhotoScan für die Bilddaten (JPG) von der DJI Phantom 4 Pro



Abb. 13: Durchschnittliche Abweichungen an den Kontrollpunkten nach der Ausgleichung in Pix4Dmapper für die Bilddaten (JPG) der DJI Phantom 4 Pro

5.2 Auswirkungen auf die Kamerakalibrierungsparameter

Um die Auswirkungen der verschiedenen Passpunktkonfigurationen und der zwei Bildflugkonfigurationen (Regulär vs. Kreuzbefliegung) auf die Berechnung der Kamerakalibrierungsparameter beurteilen zu können, sind in Abb. 14 und Abb. 15 die Veränderungen der Parameter der inneren Orientierung für die beiden Softwarepakete zusammengestellt worden. Als Beurteilungskriterien wurden die Abweichungen der berechneten Kamerakonstanten von der nominellen Brennweite (f = 8,8 mm bzw. 3636,36 Pixel) und der ausgeglichenen Bildhauptpunktkoordinaten vom Bildmittelpunkt herangezogen. Die grafische Darstellung und die Zahlenwerte in Abb. 16 zeigen, dass die Parameter der inneren Orientierung nur bei den Ergebnissen der Kreuzbefliegung (Abb. 14 rechts)

in PhotoScan stabil bleiben, während beim Flug Regular in PhotoScan und bei beiden Flugkonfigurationen in Pix4Dmapper die Kamerakalibrierungsparameter zwischen einem und 32 Pixel streuen. Das bestätigt einerseits, dass die innere Geometrie der eingesetzten UAV-Kameras nicht sehr stabil ist, aber dass anderseits mit entsprechender Bildflugkonfiguration und Software quasi-stabile Kameraparameter erhalten werden können. Mit den unterschiedlichen Flughöhen in der Kreuzbefliegung wird die Kamerakonstante signifikant bestimmt, was



Abb. 14: Veränderungen der inneren Orientierung (Kamerakonstante *c*, Bildhauptpunkt x_{H} und y_{H}) in den verschiedenen Passpunktversionen der Aerotriangulation (45 PP bis 5 PP) für die zwei Bildflugkonfigurationen (regulärer Flug R vs. Kreuzbefliegung RC) mit der DJI Phantom 4 Pro (P4) in PhotoScan



Abb. 15: Veränderungen der inneren Orientierung (Kamerakonstante *c*, Bildhauptpunkt x_{μ} und y_{μ}) in den verschiedenen Passpunktversionen der Aerotriangulation für die zwei Bildflugkonfigurationen (regulärer Flug R vs. Kreuzbefliegung RC) mit der DJI Phantom 4 Pro in Pix4Dmapper



Abb. 16: Durchschnittliche Abweichungen an den Kontrollpunkten nach der Ausgleichung in PhotoScan für die Bilddaten der DJI Phantom 4 Pro (JPG) – Vergleich von gemeinsamer (U = Unified, links) und separater (S = Separate, rechts) Kamerakalibrierung bei der Kreuzbefliegung

durch eine deutlich geringe Standardabweichung (Faktor 2) bestätigt wird. Da der Bildhauptpunkt x_H sehr stark mit der Kamerakonstante korreliert, hat das auch positive Auswirkungen auf die Bestimmung des Bildhauptpunktes.

Eine Kreuzbefliegung hat je nach UAV-System oft zur Folge, dass wegen der geringen Batterieleistung zwei separate Bildflüge durchgeführt werden müssen. Da während des Batteriewechsels das System ab und wieder angestellt wird, entstehen konsequenterweise auch zwei unterschiedliche innere Kamerageometrien, die in der Bündelbockausgleichung entsprechend berücksichtigt werden müssten. In Abb. 16 sind die Ergebnisse beider Varianten (gemeinsame und separate Kamerakalibrierung) für die Kreuzbefliegung mit der DJI Phantom 4 Pro zusammengefasst. Die Abweichungen an den Kontrollpunkten zeigen bei beiden Passpunktversionen eine leichte Verbesserung für die gemeinsame Ausgleichung mit separater Kamerakalibrierung. Das ist wiederum ein weiteres Zeichen, dass die Parameter der inneren Orientierung nicht sehr stabil sind.

5.3 Kompensation des Rolling-Shutter-Effektes

Um die Auswirkungen des Rolling-Shutter-Effektes auf die Ergebnisse der Aerotriangulation zu zeigen, wurden beispielhaft für die Kreuzbefliegung der DJI Inspire 2 X5S die Abweichungen an den Kontrollpunkten mit der Software PhotoScan berechnet. In Abb. 17 ist dargestellt, dass eine Kompensation des Rolling-Shutter-Effektes signifikante Verbesserungen in den Ergebnissen bringt.

PhotoScan: CP DJI Inspire 2 X5S (JPG) Kreuzbefliegung ohne RS vs. mit RS 20 16 RMSE [mm] 12 8 4 0 RC / 23 CP RC / 33 CP RC / 23 CP RC / 33 CP mRS oRS oRS mRS RMSE x [mm] 9,7 8,2 3,5 4,1 RMSE y [mm] 13,1 12,5 5,6 5,3 RMSE z [mm] 9,5 5,8 8,4 15,1 3D RMSE [mm] 17,3 17,7 10,7 16,5

Kersten et al.: Aerotriangulation von UAV-Bilddaten der Zeche Zollern ...

Abb. 17: Auswirkungen des Rolling-Shutter-Effektes für die Kreuzbefliegung der DJI Inspire 2 X5S – ohne Rolling Shutter (oRS) und mit Rolling Shutter (mRS)

Ohne die Kompensation des Effektes erhalten besonders die Abweichungen in der Y-Koordinate der Kontrollpunkte einen hohen Wert, da sich vermutlich u. a. die Richtung einer der beiden Bildflüge in diese Koordinatenachse bewegt. Durch die Berücksichtigung des Rolling-Shutter-Effektes werden die Lagekoordinaten deutlich besser, während die Höhenkoordinaten wie erwartet etwas schlechter werden. Die Anzahl der Passpunkte und deren Verteilung im Aufnahmegebiet scheinen einen Einfluss auf die Kompensation des Effektes zu haben, wie auch bereits in Lindstaedt und Kersten (2018) bestätigt wurde.

5.4 Auswirkungen der Datenkomprimierung

Welche Auswirkungen die Datenkomprimierung auf die Ergebnisse der Aerotriangulationen (Abweichungen an den Kontrollpunkten) hat, ist exemplarischen für die Aerotriangulationen der Bilddaten von der DJI Phantom 4 Pro mit der Software PhotoScan in Abb. 18 dargestellt. Wie bereits oben erwähnt, wurde aus den aufgenommenen RAW-Bilddaten neben dem verlustfreien TIF-Format das JPG-Format (Kompressionsrate 80 %) mit der Software "CaptureOne" (PhaseOne 2019) generiert. In den vorliegenden Untersuchungsergebnissen ist der Einfluss des Bilddatenformates (TIF vs. JPG) aufgrund der leichten Komprimierungsrate vernachlässigbar gering, was in den fast identischen Abweichungen an den Kontrollpunkten in Abb. 18 ersichtlich wird, d. h. die durch eventuelle Kompressionsverluste zu erwartenden Änderungen der JPG-basierten Aerotriangulationsergebnisse gegenüber denen aus TIFF-Daten sind nicht signifikant. Diese Bewertung wird sowohl durch die Vergleiche der Ergebnisse der anderen UAV-Systeme (Schlömer 2019), als auch bei geometrischen Untersuchungen zur



Abb. 18: Vergleich der Aerotriangulationsergebnisse (Abweichungen an den Kontrollpunkten für die Versionen 23 und 33 CPs) für die Kreuzbefliegung der DJI Phantom 4 Pro mit den verschiedenen Datenformaten JPG und TIFF in PhotoScan

Qualität bildbasierter Punktwolken aus UAV-Bildflügen über dem Testfeld bestätigt (Przybilla et al. 2019).

6 Fazit und Ausblick

Die in diesem Beitrag vorgestellten Untersuchungen fassen die Aerotriangulationsergebnisse von UAV-gestützten Bildflügen mit fünf verschiedenen UAV-Systemen von DJI (Phantom 4 Pro, Zenmuse X5S, Zenmuse X5S_mod, Inspire 2 Zenmuse X4S) und von senseFly S.O.D.A. zusammen. Dabei wurden unterschiedliche Ergebnisse mit den beiden Softwarepaketen je UAV-System erreicht. Insgesamt können aus den dargestellten Ergebnissen folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Die Abweichungen an den Kontrollpunkten liegen f
 ür die meisten Systeme in dem erwarteten bzw. abgesch
 ätzten Genauigkeitsniveau von 5 bis 6 mm in der Lage und ca. 1 cm in der H
 öhe.
- Die Bildflüge der DJI Phantom 4 Pro liefern die besten Ergebnisse mit 2 bis 3 mm in der Lage und 4 bis 6 mm in der Höhe.
- Die Kreuzbefliegung bringt signifikant bessere Ergebnisse als der reguläre Bildflug, da durch die unterschiedliche Flughöhen und den gedrehten Bildern die inneren Orientierungsparameter signifikant bestimmt werden können. Bildflüge mit Kreuzbefliegung (Querstreifen) und mit Aufnahmen aus verschiedenen Höhen und Perspektiven (schräg) unterstützen somit eine zuverlässige Simultankalibrierung der zumeist unkalibrierten UAV-Kameras. Die aus dem bemannten Bildflug generierten Erfahrungen und die daraus ab-

geleitete Expertise der Luftbildphotogrammetrie aus Zeiten vor der direkten Georeferenzierung haben somit heute auch für Bildflüge mit Low-Cost-UAVs noch Gültigkeit und müssen berücksichtigt werden.

- Eine leichte Genauigkeitssteigerung wird erreicht, wenn die Kameras von mehreren Bildflügen separat kalibriert werden, da davon ausgegangen werden kann, dass sich die innere Kamerageometrie nach einem Batteriewechsel und abgeschaltetem System verändert.
- Die unterschiedlichen Ergebnisse derselben Bildflüge in den beiden Softwarepaketen lassen sich auch durch die verschiedenen Parameter der inneren Orientierung erklären. Die hohen Abweichungen an den Kontrollpunkten für die Aerotriangulationen der beiden DJI Inspire 2 X5S lassen eine unzureichende Kamerakalibrierung mit der Software Pix4Dmapper vermuten.
- In den vorgestellten Untersuchungen hat sich wie auch in Lindstaedt und Kersten (2018) 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.

In Zukunft kann die Anzahl der Passpunkte für UAV-basierte Bildflüge signifikant reduziert werden, da zunehmend UAV-Systeme mit RTK-GNSS (mit Zweifrequenz-Empfängern), wie z. B. die DJI Phantom 4 Pro RTK (www.dji.com/de/ phantom-4-rtk/info) und die DJI Phantom 4 Pro Klau PPK (https://klauppk. com/) auf den Markt drängen. Dann können die Aufnahmepositionen mit Genauigkeiten von besser als 3 cm in Lage und Höhe bestimmt werden. Przybilla et al. (2015) wiesen bereits 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. Grün und Runge (1988) zeigten in Untersuchungen mit zwei filmbasierten Luftbildverbänden, dass die Anzahl der Passpunkte auf das absolute Minimum von einem reduziert werden kann, wenn die Bildorientierungen mit genügender Genauigkeit gemessen werden können.

UAV-basierte Bildflüge mit RTK-GNSS wurden schon auf dem Testfeld der Zeche Zollern Ende September und Anfang Oktober 2019 durchgeführt. Die Ergebnisse werden im Jahr 2020 veröffentlich und man darf gespannt sein, wie die Ergebnisse aussehen und welche Herausforderungen noch gemeistert werden müssen.

Dank

Wir bedanken uns bei Prof. Dr.-Ing. Manfred Bäumker (Hochschule Bochum) und den Studierenden der Wahlpflichtveranstaltung "Ingenieurvermessung" 2017 und 2018 des Studiengangs Vermessung der Hochschule Bochum für die Passpunktbestimmung auf der Zeche Zollern.

Literatur

- Bäumker, M. (2020): Aufbau eines hybriden hochpräzisen 3D-Grundlagennetzes am Beispiel des UAV-Testfelds Zeche Zollern. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2020 – The Sky is the Limit? DVW-Schriftenreihe, Band 97, Augsburg, 103–120. (Dieser Tagungsband).
- Fraser, C. S., Shortis, M. R. (1995): Metric exploitation of still video imagery. The Photogrammetric Record, 15(85), 107–122.
- Gerke, M., Przybilla, H.-J. (2016): Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: Influence of onboard RTK-GNSS and cross flight patterns. PFG Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, (1), 17–30.
- Grün, A., Runge, A. (1988): The accuracy potential of self-calibrating aerial triangulation without control. The International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing, 27, 245–253.
- Jacobsen, K., Cramer, M., Ladstädter, R., Ressl, C., Spreckels, V. (2010): DGPF-project: evaluation of digital photogrammetric camera systems – geometric performance. Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation, (2), 83–97.
- Kersten, T. (1996): Aerotriangulation mit einer digitalen Stillvideo Kamera Kodak DCS200. VPK Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, Nr. 2, 70–74.
- Kersten, T. (1999): Digitale Aerotriangulation über die ganze Schweiz. VPK Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, Nr. 9, 473–478.
- 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., 3–13. DOI: 10.12902/zfv-0145-2016.
- Lindstaedt, M., Kersten, T. (2018): Zur Bedeutung von Passpunkten bei der Aerotriangulation UAV-basierter Bildflüge. In: DVW e. V. (Hrsg.): UAV 2018 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. DVW-Schriftenreihe, Band 89, Augsburg, 81–101.
- Luhmann, T. (2018): Nahbereichsphotogrammetrie Grundlagen, Methoden, Beispiele. 4., neu bearb. u. erw. Aufl., Wichmann, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 783 S.
- Phase One (2019): Capture One Pro. www.captureone.com/de-DE/products/pro, letzter Zugriff 01/2020.
- Pix4D (2019): Innovation Improved Accuracy for Rolling Shutter Cameras in Pix-4Dmapper. https://pix4d.com/rolling-shutter-correction/, letzter Zugriff 11/2019.
- Przybilla, H.-J. (2017): Kameras für UAS Eine Marktübersicht. In: DVW e.V. (Hrsg.): Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017). DVW-Schriftenreihe, Band 86, Augsburg, 51–66.

- Przybilla, H.-J. (2019): Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit aktueller bildgebender UAV-Sensoren. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e. V., Band 28, 483–497.
- Przybilla, H.-J., Kraft, T., Gessner, M., Zurhorst, A. (2017): Untersuchungen und erste Ergebnisse zur geometrischen Qualität marktgängiger Kameras für den UAV-Einsatz.
 Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017, T. Luhmann/C. Schumacher (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, 235–245.
- Przybilla, H.-J., Lindstaedt, M., Kersten, T. (2019): Untersuchungen zur Qualität bildbasierter Punktwolken aus UAV-Bildflügen. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2019, T. Luhmann/C. Schumacher (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 236–248.
- 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, 45–54.
- Rofallski, R., Luhmann, T. (2017): Untersuchung und Modellierung des Rolling-Shutter-Effekts für photogrammetrische Einzel- und Mehrbildauswertungen. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2017, T. Luhmann/C. Schumacher (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag, Berlin, Offenbach, 388–398.
- Schlömer, F. (2019): Geometrische Genauigkeitsuntersuchungen UAV-basierter Bildflüge und Punktwolken. Unveröffentlichte Masterarbeit im Studiengang Geodäsie und Geoinformatik der HafenCity Universität Hamburg, 137 S.
- 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), 139–146.
- Wikipedia (2019): Industriemuseum Zeche Zollern, Dortmund-Bövinghausen. https://de.wikipedia.org/wiki/Zeche_Zollern, letzter Zugriff 11/2019.

Kontakt

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

Frederic S. Schlömer Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung Neuenfelder Straße 19, 21109 Hamburg FredericSebastian.Schloemer@gv.hamburg.de

Heinz-Jürgen Przybilla Hochschule Bochum, Fachbereich Geodäsie Lennershofstraße 140, 44801 Bochum heinz-juergen.przybilla@hs-bochum.de