

Untersuchungen zur Genauigkeitssteigerung von UAV-Bildflügen

HEINZ-JÜRGEN PRZYBILLA¹, CHRISTIAN REUBER¹, MANFRED BÄUMKER¹ & MARKUS GERKE²

Zusammenfassung: Die Erfassung photogrammetrischer Bilddaten mittels UAV gewinnt stetig an Bedeutung. Die am Markt verfügbaren Navigationssysteme ermöglichen eine hinreichend genaue Durchführung eines Bildfluges, allerdings ist die Qualität der GNSS-Daten bisher nicht geeignet zur Lagerung der Bildverbände (direkte Georeferenzierung) beizutragen. Ein RTK-fähiges Zwei-Frequenz-GNSS-System, das seit Anfang 2014 in einem UAV-System des Anbieters MAVinci eingesetzt wird, verspricht hier erweiterte Möglichkeiten. Im Beitrag werden die Ergebnisse unterschiedlicher Bildtriangulationen analysiert, wobei neben unterschiedlichen Befliegungsanordnungen (Normal- und Kreuzbefliegung) und Variationen der Passpunkte auch die Einbeziehung der mittels RTK-GNSS gemessenen Positionsparameter der Äußeren Orientierungen untersucht wird. Es wird gezeigt, dass die verschiedenen Ansätze Qualitätssteigerungen im Block, bei gleichzeitiger Reduktion der Passpunkte, bewirken.

Abstract: The acquisition of photogrammetric imagery using unmanned aerial vehicles (UAV) is becoming increasingly important. The positioning of the device is largely done using L1 receivers. The quality of those GNSS observations is not good enough to support direct georeferencing. Since the beginning of 2014 the fixed-wing UAV provider MAVinci offers a two-frequency RTK GNSS system and the theoretically expectable accuracies for sensor positioning might enable one to use the estimated positions as a direct observation during bundle adjustment. In this paper we present results from a systematic analysis on the effects different flight configurations (normal flight and cross layout) have on the aero triangulation. In addition the added value of those aforementioned RTK observations on the UAV image orientation is assessed. We show that different approaches and configurations help to increase the quality of the bundle block adjustment and at the same time allow reducing the number of ground control points.

1 Einleitung

Die Erfassung photogrammetrischer Bilddaten mittels Unmanned Aerial Vehicles (UAV) ist in den letzten Jahren auf ein deutlich erweitertes Interesse gestoßen, insbesondere zur Erfassung von Arealen kleinerer bis mittlerer Größe (einige 10 ha). In Abhängigkeit von der Aufgabenstellung werden hierzu Multi-Kopter oder Flächenflugzeuge eingesetzt. Die Navigation dieser Systeme basiert in der Regel auf GPS-Verfahren, die sich wiederum auf Messungen von Ein-Frequenz-GNSS-Empfängern stützen. Die hiermit erreichbare Navigationsgenauigkeit (3-5m) ist für die meisten Anwendungen ausreichend, so dass Bildflüge entsprechend der vorherigen Planung umgesetzt werden können. Die erfassten Positionsdaten werden im Rahmen der nachfolgenden Auswertungen (Bildorientierung) als Näherungswerte für die Äußeren Orientierungen der

¹ Hochschule Bochum, Fachbereich Geodäsie, Lennerhofstr. 140, 44801 Bochum; E-Mail: [heinz-juergen.przybilla, christian.reuber, manfred.baumker]@hs-bochum.de;

² ITC, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation of the University of Twente, PO Box 217,7500 AE Enschede, The Netherlands; E-Mail: m.gerke@utwente.nl

Bilddaten genutzt. Für eine Verwendung der Daten im Sinne einer „zusätzlichen Beobachtung“, mit dem Ziel einen Bildverband zu stabilisieren und zu lagern, ist die verfügbare Qualität jedoch nicht ausreichend.

Höhere Positionsgenauigkeiten – bis in den Bereich des Zentimeters – lassen sich ausschließlich mit RTK-fähigen Zwei-Frequenz-GNSS-Empfängern erreichen. BÄUMKER ET AL. (2013) berichten über ein derartiges System auf Basis des TOPCON B110-Empfängers sowie einer Zwei-Frequenz-Antenne Maxtena M1227 HCT (Gesamtgewicht ca. 100 Gramm). Diese Komponenten wurden 2014 durch den UAV-Anbieter MAVinci in das Flugsystems SIRIUS PRO (MAVINCI 2014) integriert. Der Anbieter verspricht, die „Position der Kamera bei jedem einzelnen Bild so präzise zu messen, dass sie die Funktion eines Passpunktes erfüllt“.

Grundsätzlich ist diese Technik somit geeignet Aufgaben zur Lagerung eines Bildverbandes zu übernehmen [ACKERMANN 1997, CRAMER 1997, CRAMER 2001]. Damit einhergehen kann die Verringerung des örtlichen Aufwandes der Passpunktbestimmung sowie Qualitätsverbesserungen bei der Bündelblockausgleichung.

Dieser Aufsatz berichtet über eine systematisch durchgeführte und evaluierte Auswertung eines Bildflugs mit dem beschriebenen System SIRIUS PRO und stellt dabei eine durch RTK-Beobachtungen gestützte Bündelblockausgleichung einer komplett indirekt durchgeführten Blockorientierung gegenüber.

Dass eine Kreuzbefliegung, bei der ein zweiter Bildflug orthogonal zum Hauptblock in einer anderen Flughöhe durchgeführt wird, Vorteile für die Qualität einer Aerotriangulation mit sich bringen, ist keine neue Erkenntnis. Beim klassischen Bildflug wird wegen des erhöhten Aufwandes in der Regel darauf verzichtet. Für die UAV-Befliegung kann dieses Aufnahmekonzept ebenfalls Vorteile mit sich bringen, wobei der Mehraufwand in der Praxis oftmals vertretbar ist. Dieser Beitrag beleuchtet daher weiterhin das Potential zur Steigerung der Genauigkeit des Bündelblocks, das sich aus den zusätzlich erfassten Bildern ergibt.

2 Structure from Motion: Ein Standardverfahren zur Auswertung von UAV-Bildflügen

Die Software-Systeme zur Auswertung von UAV-Bildflügen versprechen eine weitestgehende Automatisierung der Auswertung und sollen auch für Nicht-Fachleute einsetzbar sein. Zur Erreichung des hohen Automatisierungsgrades, gerade bei der Aerotriangulation, kommen in der Regel Ansätze aus dem Bereich des „Structure from Motion“ (SfM) zum Einsatz, bei denen beispielsweise die Anforderungen an die Näherungswerte nicht hoch sind. Als Folge können Datensätze einerseits nur mit standardisierten Ansätzen verarbeitet werden, andererseits sind die Angaben zur Bewertung der Qualität einer Berechnung auf das Notwendigste / Einfachste reduziert.

Marktgängige Software-Produkte sind u.a. Agisoft Photoscan [AGISOFT 2015] sowie Pix4Dmapper [PIX4D 2015], die im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen eingesetzt wurden.

3 Testareale

Charakteristische Objektmerkmale, wie z. B. Variationen in der vertikalen Objektausdehnung, haben unmittelbaren Einfluss auf den Bildflug (wechselnde Überdeckungsverhältnisse, Möglichkeiten zur Kalibrierung des Aufnahmesensors). Die in die Untersuchung einbezogenen Testareale verfügen aus diesem Grund über verschiedenartige Geländeformationen.

3.1 Areal 1: Deponie

Die erfasste Deponie hat eine Fläche von ca. 65 ha (Ausdehnung 1100m * 600m) und verfügt über eine vertikale Ausdehnung von ca. 50m (Abb. 1). Zur Befliegung wurde Anfang 2014 das MAVinci-UAV SIRIUS PRO eingesetzt, das mit dem RTK-fähigen Zwei-Frequenz-GNSS-Empfänger ausgestattet war (Abb. 2).



Abb. 1: Deponie

Aus der Befliegung resultierte ein Bildverband mit ca. 1900 Fotos, einer mittleren Flughöhe von 105m sowie einem Bildmaßstab von 1:7500. Zum Zeitpunkt der Befliegung herrschte ein starker Wind, der dafür sorgte, dass die Fluggeschwindigkeiten je nach Windrichtung zwischen 30 und 80 km/h variierten. Trotz dieser widrigen Bedingungen konnten die geplanten Überdeckungsverhältnisse von ca. 85% Längs- und 65% Querüberdeckung weitestgehend eingehalten werden. Die klassische Bildflughöhenordnung wurde dahingehend erweitert, dass für ca. 20% der Gesamtfläche eine zusätzliche Kreuzbefliegung in einer Höhe von 75m über Grund erfolgte.

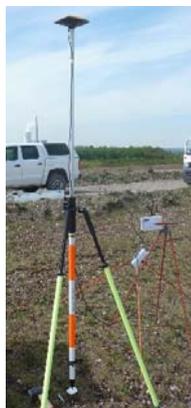


Abb. 2: MAVinci SIRIUS PRO und GNSS-Referenzstation



Abb. 3: Signalscheibe

Die mittlere Ground Sample Distance (GSD) für das Projekt betrug 2,7cm. Bei der eingesetzten Kamera handelt es sich um eine LumixGX1-Pancake14mm-PRO. Zur Lagerung wurden – über das Areal räumlich verteilt – 34 Passpunkte signalisiert (Abb. 3) und mittels GNSS-Messung koordinativ erfasst (Sigma = ± 2 cm).

3.2 Areal 2: Industriemuseum Zeche Zollern

Das zweite Areal umfasst das Gelände des Industriemuseum Zeche Zollern in Dortmund Bövinghausen (Ausdehnung ca. 500m * 350m, Fläche ca. 18 ha), welches im Rahmen des von F. NEX und M. GERKE initiierten „ISPRS Benchmark For Multi-Platform Photogrammetry“ erfasst wurde (NEX ET AL. 2015). Das Gelände ist weitestgehend eben. Geringe Höhenvariationen sind durch den Gebäudebestand einschließlich der zwei Fördertürme gegeben (Abb. 4).



Abb. 4: Industriemuseum Zeche Zollern

Als UAV kam ebenfalls das MAVinci-System zum Einsatz, allerdings ohne den RTK-Zwei-Frequenz-Empfänger. Die sonstigen Befliegungsparameter entsprachen denen des Areals 1. Auch in diesem Projekt erfolgt eine Kreuzbefliegung (Flughöhen über Grund: 75m bzw. 105m) mit insgesamt ca. 700 Fotos. Die Bestimmung der Passpunkte konnte durch zweifache statische GNSS-Messungen mit einem Sigma von besser $\pm 1,0$ cm durchgeführt werden.

4 Untersuchungsergebnisse

Im Beitrag werden die Ergebnisse unterschiedlich konfigurierter Bildtriangulationen analysiert. Die in Kapitel 3 vorgestellten Bildverbände wurden zu diesem Zweck mit den Systemen Photoscan der Firma Agisoft (AGISOFT 2015) sowie Pix4DMapper (PIX4D 2015) trianguliert. Durch Variation der Parameter

- Normal- und Kreuzbefliegung
- Anzahl und Verteilung der Passpunkte sowie
- Einbeziehung der mittels RTK-GNSS gemessenen Positionsparameter der Äußeren Orientierungen als zusätzliche Beobachtungen

werden die Auswirkungen auf die Ergebnisse der Bündelausgleichung beschrieben. Aufgrund der

eingeschränkten statistischen Angaben beider Programmsysteme – ein grundsätzliches Problem vieler Softwares aus dem Bereich des SfM – bilden die 3D-Restabweichungen an Passpunkten (GCP – Ground Control Point) und Vergleichspunkten (CP – Check Point) in Form eines RMS-Wertes das wesentliche Qualitätsmerkmal. Weiterhin wird mittels eines „Projection Errors“ die Genauigkeit im Bild angegeben. Über die Qualität der Bestimmung der Parameter der Inneren Orientierung gibt es keine Aussagen. Dies ist umso bedauerlicher, da eine simultane Kalibrierung des Aufnahmesystems aufgrund der eingesetzten Consumer-Kameras zwingend notwendig ist.

4.1 Einfluss der Flug- und Passpunktanordnung auf die Genauigkeit des Blocks

Abbildung 5 gibt einen Überblick der Passpunktverteilung in beiden Testarealen. Weiterhin ist die Bildfluganordnung zu erkennen. In beiden Blöcken ist die Kreuzbefliegung, mit Blick auf eine Aufwandsreduktion, nur in Teilen des jeweiligen Blocks ausgeführt worden.

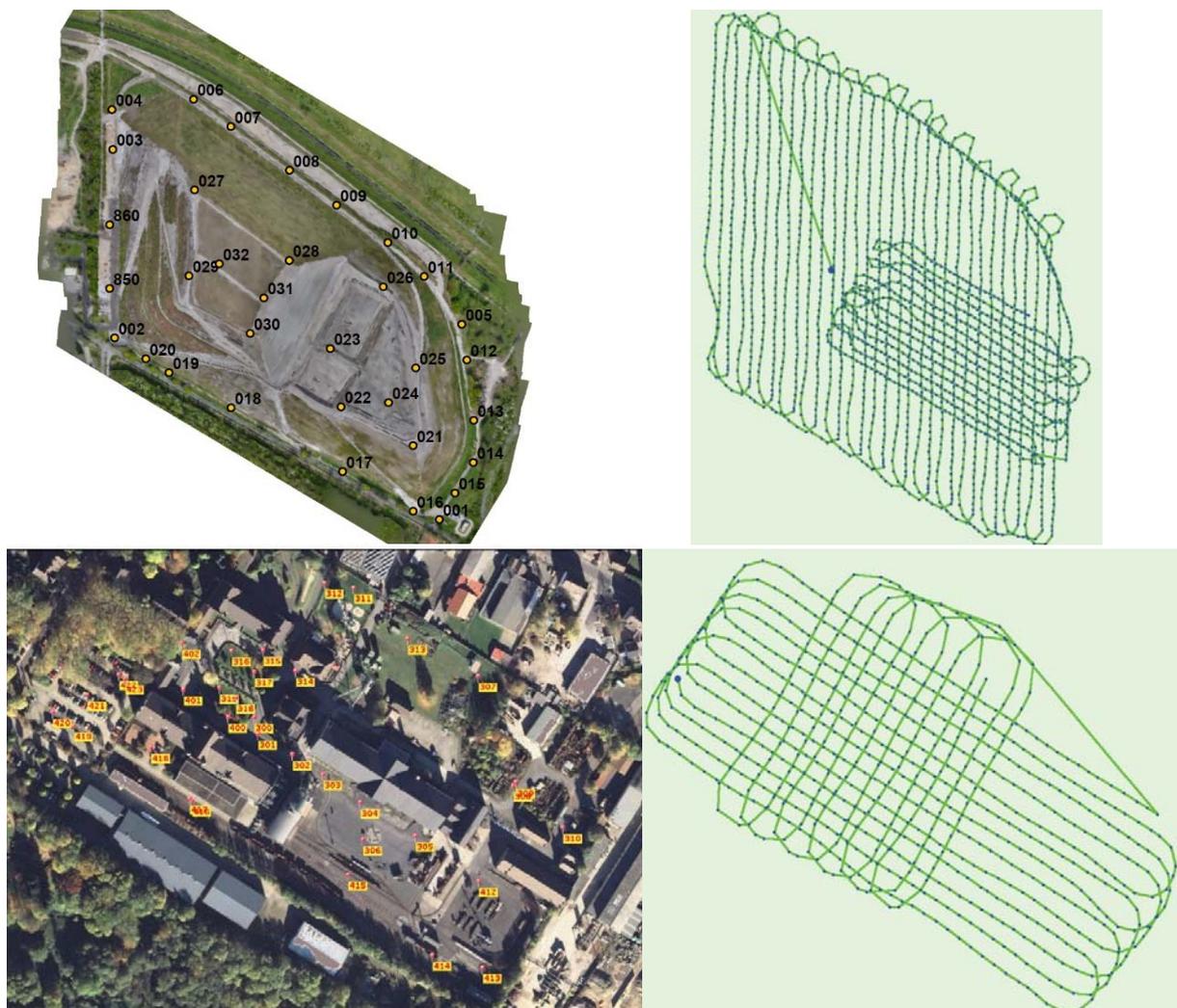


Abb.5: Passpunkte (li.) und Bildfluganordnung (re.).

Oben: Deponie. Unten: Zeche Zollern

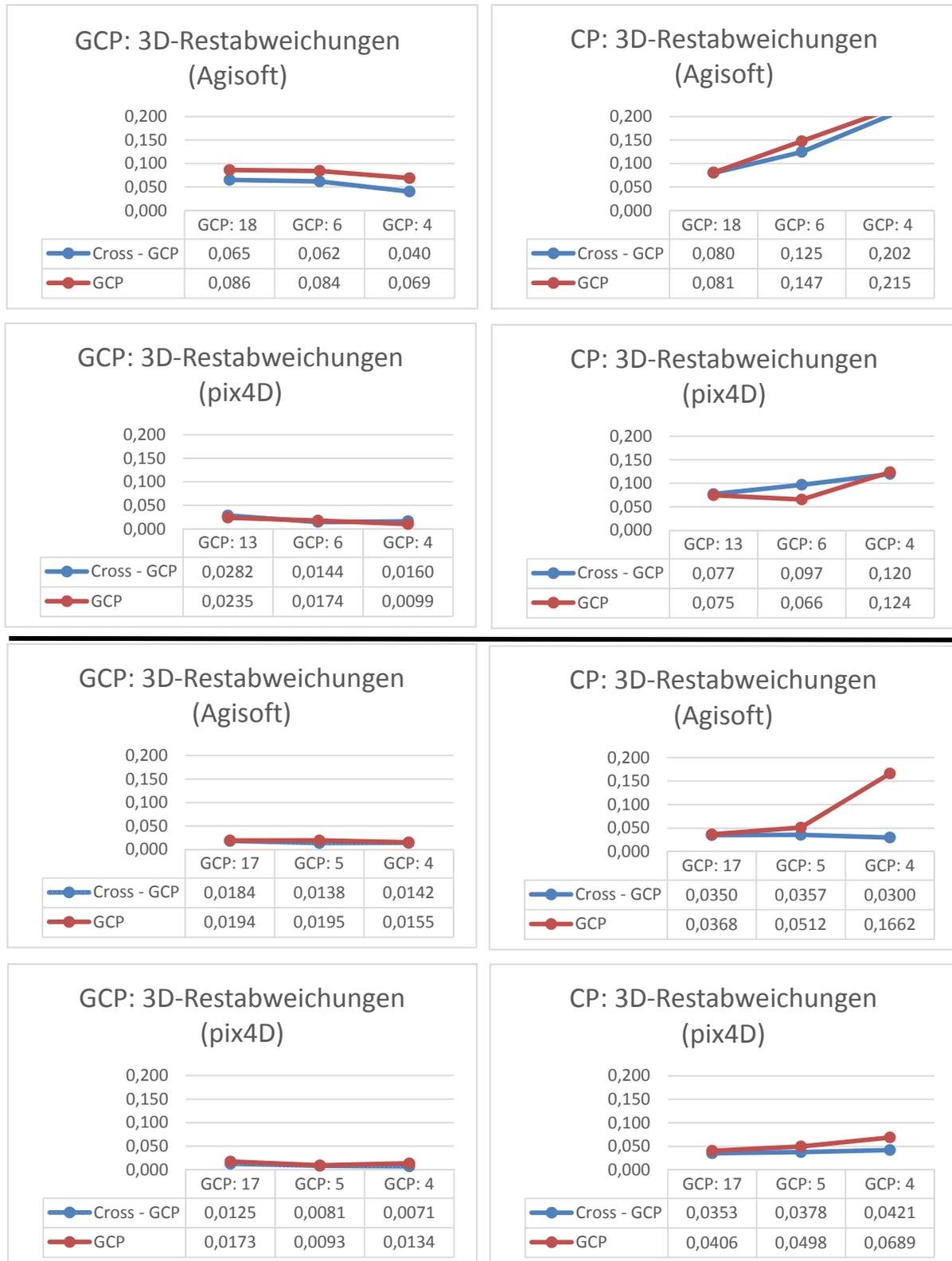


Abb. 6: RMS-Werte (aus 3D-Restklaffen) an Pass- (GCP) und Vergleichspunkten (CP), „Deponie“: oben; „Zeche Zollern“: unten. (Werte in [m]).

Die Resultate der Bündelausgleichungen in den jeweiligen Blöcken sind der Abb. 6 zu entnehmen. Dabei zeigen die Variationen in den Passpunktanordnungen den Genauigkeitsverlust durch eine Reduktion der Lagerungspunkte. Dieses ist deutlich erkennbar an den RMS-Werten der Vergleichspunkte. Hiervon insbesondere betroffen ist die vertikale Komponente.

Die Kreuzbefliegung zeigt in beiden Projekten eine deutlich erkennbare Verbesserung der Genauigkeiten. Der Effekt fällt allerdings erwartungsgemäß im stark tiefengegliederten Block der Deponie geringer aus, als im flachen Gelände der Zeche Zollern.

Unterschiedliche starke Auswirkungen dieser Effekte in den Programmsystemen von Agisoft bzw. Pix4D haben ihre Ursache zum größten Teil in einer nicht vollständig identischen Auswahl der Pass- und Vergleichspunkte sowie der Anzahl von Bestimmungsstücken (Messungen) je Punkt. Eine Angleichung der Anzahl der Beobachtungen konnte im Rahmen des aktuell vorliegenden Bearbeitungsstandes im Projekt bisher nicht realisiert werden.

4.2 Einfluss von RTK-Messungen (Positionsparameter) auf die Genauigkeit des Blocks

Mit dem RTK-fähigen Zwei-Frequenz-GNSS-Empfänger TOPCON B110 [TOPCON 2015] steht im MAVinci-UAV SIRIUS PRO eine GNSS-Lösung zur Verfügung, die die Messung der Positionsparameter im cm-Bereich ermöglicht. Die GNSS-Daten werden zu diesem Zweck mit einer Frequenz von 5 Hz aufgezeichnet und in der zugehörigen Software im Rahmen eines Postprocessings aufbereitet. Über einen Zeitstempel erfolgt die Verknüpfung mit den erfassten Bilddaten des Flugs. Die Genauigkeit der RTK-Lösung hängt hauptsächlich davon ab, ob die Mehrdeutigkeiten ermittelt werden können (FIX), oder ob nur eine FLOAT-Lösung berechnet werden kann. Einen Aufschluss hierüber gibt die Abb. 7. Sie zeigt in der Übersicht alle im Block „Deponie“ berechneten Positionsdaten, wobei Float-Lösungen in den zugehörigen Bildern „ROT“ gekennzeichnet sind. Diese Beobachtungen können dann nicht für die Lagerung des Bildverbandes genutzt werden.

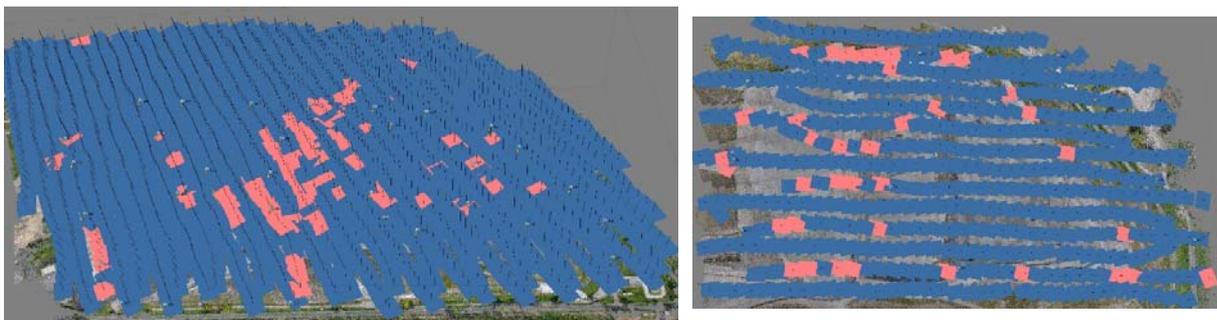


Abb. 7: Qualität der RTK-Positionsdaten: BLAU – GNSS Fix-Lösung; ROT: GNSS Float-Lösung

Innerhalb der MAVinci Software werden diese Daten über einen Filter in das Agisoft-Format überführt und dort direkt ein Projekt aufgesetzt. Derartige Konverter-Programme sind für verschiedene SfM-Softwares verfügbar. Da zum Beginn der Untersuchung nur das Agisoft System zur Verfügung stand, wurde ausschließlich hierfür der entsprechende Datensatz erzeugt. Anzumerken bleibt, dass die RTK-Daten leider nicht in die EXIF-Daten der Bilder übernommen. Dort enthalten sind weiterhin GNSS-Daten in L1-Qualität.

Da die Qualität der GNSS-Daten nicht vollständig homogen ist – es liegen sowohl FIX also auch FLOAT-Lösungen vor – wird in einem ersten Schritt die Bündelblockausgleichung mit Lagerung auf alle Projektionszentren ausgeführt (also ohne GCPs). Bilder, die Abweichungen vom Ausgangswert der Projektionszentren größer 3-4 cm haben, werden nachfolgend aus der Lagerung entfernt. Danach wird die Bündelausgleichung erneut gestartet (gegebenenfalls auch mehrfach) bis nur noch RTK-Beobachtungen enthalten sind, die als FIX-Lösungen betrachtet werden können und somit der Lagerung des Blocks dienen. Mit den nun "bereinigten" Positionsdaten (Äußere Orientierungen) können unter Berücksichtigung/Variation von GCP-Anordnungen weitere Bündelblockausgleichungen durchgeführt werden.

Die Ergebnisse dieser Vorgehensweise sind in Abb. 8 dargestellt. Der signifikante Einfluss der erweiterten Lagerung über die gemessenen Projektionszentren ist deutlich erkennbar: bereits mit 4GCPs wird in der Kreuzbefliegung eine Genauigkeit erreicht, die in derselben Größenordnung liegt, wie bei der indirekten Aerotriangulation mit 18 GCPs.

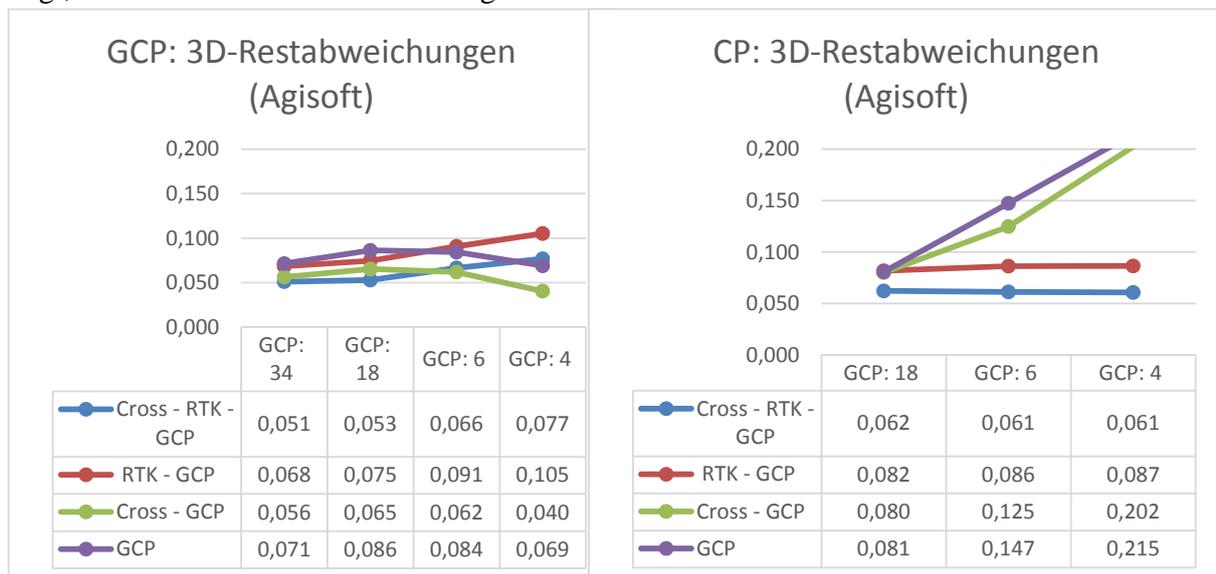


Abb. 8: Auswirkungen der RTK-Beobachtungen auf den Bündelblock: RMS-Werte (aus 3D-Restklaffen) an Pass- (GCP) und Vergleichspunkten (CP) im Block „Deponie“ (Werte in [m]).

4.3 Anmerkungen zur Simultanen Kamerakalibrierung

Für UAV-Bildflüge werden in der Regel Consumer-Kameras eingesetzt. Diese Vorgehensweise bietet durchaus einige Vorteile, z. B. bzgl. des eher geringen Kameragewichts, der Verfügbarkeit aktueller elektronischer Bauteile sowie geringer Anschaffungskosten. Dem gegenüber steht eine mehr oder weniger stabile Metrik (Innere Orientierung) sowie Abbildungsfehler der Objektive, die sowohl die geometrischen als auch radiometrischen Eigenschaften des Systems beeinträchtigen. Hieraus resultiert die Notwendigkeit der simultanen Kamerakalibrierung im Rahmen der Bildtriangulation. Objektgeometrie (hier insbesondere die vertikale Objektausdehnung), die räumliche Verteilung und die Anzahl von Passpunkten, als auch die Bildflughanordnung üben einen wesentlichen Einfluss auf die erreichbare Qualität der Kalibrierdaten aus. Während in einer terrestrischen photogrammetrischen Aufnahmeanordnung, z. B. dem klassischen Rundumverband, mit einer Kombination aus Normalfall- und Konvergenzaufnahmen, eine Simultankalibrierung

problemlos realisierbar ist, ist dies beim Bildflug mit seinen Senkrechtaufnahmen aus nur einer Aufnahmedistanz nur eingeschränkt möglich. Da die SfM-Softwares eher keine statistischen Angaben zur Qualität der berechneten Innere Orientierungsparameter machen, wird der Anwender über deren Zuverlässigkeit nicht informiert. Besonders problematisch ist dabei eine unzureichende Bestimmung des Parameters „Kamerakonstante“. Abb. 9 zeigt dessen Variationen in Abhängigkeit

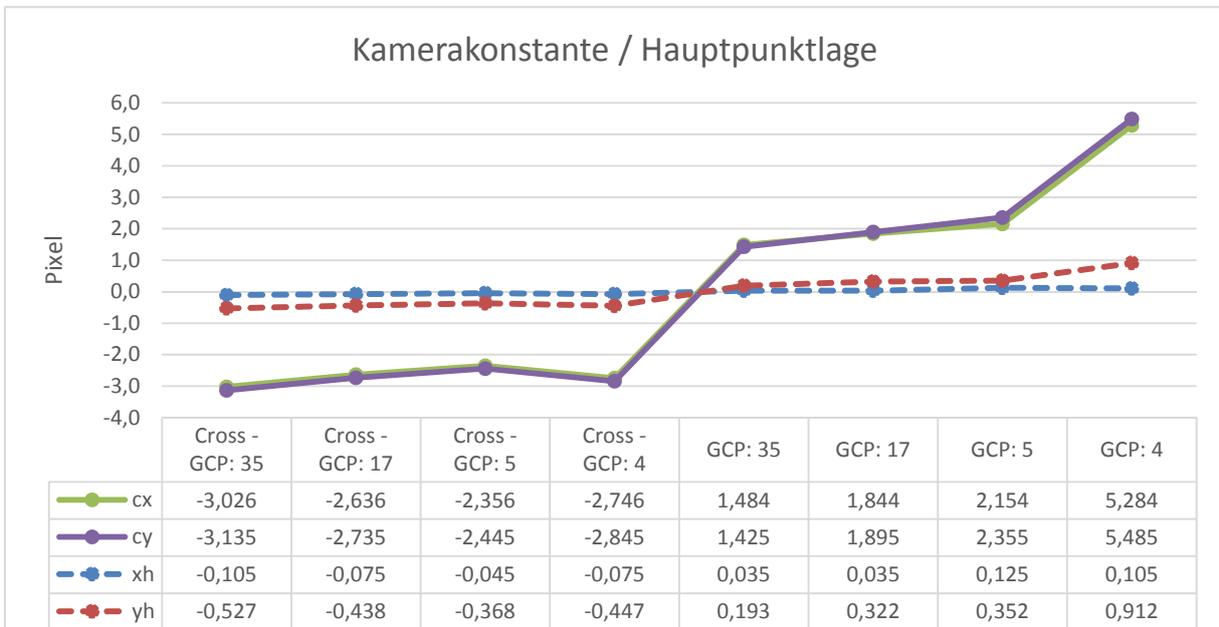
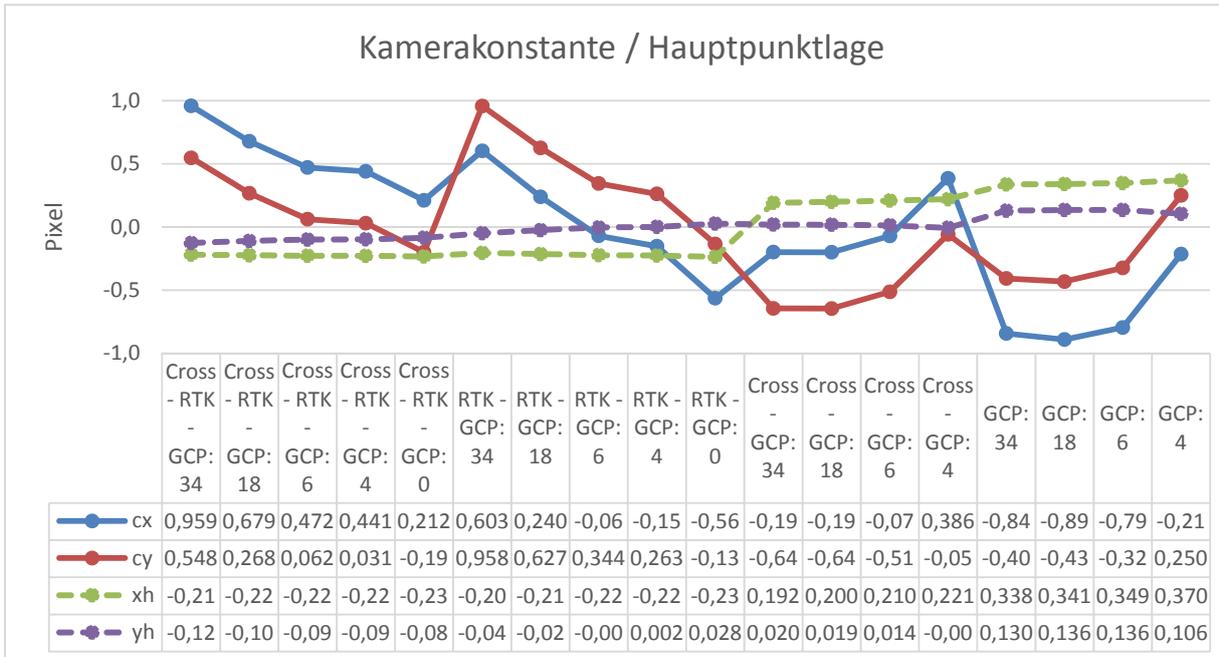


Abb. 9: Variationen von Kamerakonstante und Hauptpunktlage in Abhängigkeit von der Lagerung des Blocks. Projekt „Deponie“ (oben). Projekt „Zeche Zollern“ (unten).

von der Objektgestalt sowie den unterschiedlichen Ansätzen zur Lagerung des Bildverbandes. Während die Hauptpunktlage – das Gleiche gilt auch für die hier nicht dargestellten weiteren flächenhaften Parameter der Inneren Orientierung – eine hohe Konstanz aufweisen, sind insbesondere im quasi ebenen Block der Zeche Zollern signifikante Änderungen der Kamerakonstanten von bis zu 10 Pixeln (ca. 35µm) erkennbar.

5 Fazit

Der vorliegende Beitrag zeigt den Einfluss verschiedener Befliegungsparameter auf die Qualität von zwei UAV-Bildflügen, die mit einem Flächenflugzeug ausgeführt wurden. Es zeigt sich, dass die Erweiterung des Bildflugs durch zusätzliche Aufnahmen einer Kreuzbefliegung zu Genauigkeitssteigerungen führt, bei gleichzeitiger Reduktion der Passpunkte. Die mittels RTK-GNSS gemessenen Positionsparameter der Äußeren Orientierungen führen zu einer weiteren Qualitätsverbesserung im Block. Ähnlich positive Auswirkungen sind bei der Simultankalibrierung erkennbar. Gleichwohl stellt sich die Frage der Sensorqualität, die vielfach nicht überzeugend ist. Hier scheinen Verbesserungen sinnvoll und notwendig.

6 Danksagung

Wir danken Pix4D für die Bereitstellung einer Lehlizenz des Pix4dmapper, die für die genannten Versuche eingesetzt wurde.

7 Literaturverzeichnis

- ACKERMANN, F., 1997: Geo-Kodierung ohne Passpunkte. GIS - Geo-Informationen-Systeme **10**(2), S. 28-32.
- AGISOFT, 2015: www.agisoft.com, Webseite des Herstellers (Letzter Zugriff: 10.01.2015)
- BÄUMKER, M.; PRZYBILLA, H.-J. & ZURHORST, A., 2013: Enhancements in UAV flight control and sensor orientation. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W2, S. 33-38.
- CRAMER, M., 1997: GPS/INS Integration. Photogrammetrische Woche 1997, Fritsch, D. & Hobbie, D. (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg.
- CRAMER, M., 2001: Genauigkeitsuntersuchungen zur GPS/INS-Integration in der Aerophotogrammetrie. Dt. Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 537, München, 122 S.
- MAVINCI, 2015: www.mavinci.de/de/siriuspro, Webseite des Herstellers (Letzter Zugriff: 10.01.2015)
- NEX, F.; GERKE, M.; REMONDINO, F.; PRZYBILLA, H.-J.; BÄUMKER, M. & ZURHORST, A., 2015: ISPRS Benchmark For Multi-Platform Photogrammetry. Eingereichter Beitrag zum ISPRS-Workshop „PIA15 - Photogrammetric Image Analysis“, München, 25.-27.3.2015.
- PIX4D, 2015: <http://pix4d.com/>, Webseite des Herstellers (Letzter Zugriff: 10.01.2015)
- TOPCON, 2015. Website Topcon OEM GNSS Boards. <http://oem.topconpositioning.com/oem-products/gnss-boards> (Januar 2015)