

Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit aktueller bildgebender UAV-Sensoren

HEINZ JÜRGEN PRZYBILLA¹

Zusammenfassung: Das geodätisch-photogrammetrische Testfeld auf dem Areal des Industriedenkmal Zeche Zollern in Dortmund bietet ein Szenario zur Durchführung geometrischer und radiometrischer Tests von UAV-Systemen. Die Basis hierzu bildet ein geodätisches Präzisionsnetz (Lage- und Höhengenaugigkeit ca. 2 mm) mit insgesamt 45 Bodenpasspunkten, verteilt über eine Fläche von ca. 7 ha. Im Rahmen einer im Herbst 2017 durchgeführten Kampagne wurden verschiedene UAV-Sensorsysteme unter vergleichbaren Bedingungen getestet. Dieser Beitrag stellt geometrische Untersuchungen zweier aktueller DJI-Kameras, Zenmuse X4S (20Mpix) und X5S (20,8 Mpix), sowie einer Phase One IXU 1000 (100Mpix) vor. Die Zenmuse Kameras geben den aktuellen Entwicklungsstand des Herstellers DJI wieder, während das Mittelformat-Kamerasystem von Phase One vorrangig im klassischen Luftbildsegment zu finden ist. Allerdings macht der Wunsch nach gesteigerten Messgenauigkeiten (z. B. für Ingenieur Anwendungen) einen derartigen Hochleistungssensor auch für UAV-Applikationen interessant.

Voraussetzung für den Systemvergleich bilden, neben der Konfiguration des Testfeldes, identische Parameter für die Flugplanung, hier insbesondere Längs- und Querüberdeckung, die Durchführung einer vollständigen Kreuzbefliegung in unterschiedlichen Flughöhen sowie die Festlegung einer einheitlichen Bodenauflösung (GSD=14mm).

Die Untersuchung zeigt deutliche Unterschiede in der erreichbaren Qualität der Kameras. Das hochpreisige Phase One System zeigt die besten Ergebnisse, allerdings liefert das preiswerteste System, die Zenmuse X4S, nur geringfügig schlechtere Resultate, während die Zenmuse X5S deutlich abfällt. Hierfür verantwortlich ist vorrangig das mechanisch wenig stabile Kamerakzept mit Wechselobjektiven. Der abschließende Vergleich der Software-Produkte Pix4Dmapper und Agisoft PhotoScan zeigt zum Teil signifikante Unterschiede in den Ergebnissen der Bildorientierung.

1 Einleitung

Die UAV-basierte Bildaufnahme stellt mittlerweile ein etabliertes geodätisches/photogrammetrisches Datenerfassungsverfahren dar, welches in vielen Anwendungsbereichen mit unterschiedlichen Anforderungen an die Qualität der Ergebnisse – vom Dezimeter bis zum Millimeter – und wegen der großen Flexibilität eingesetzt wird. Im Rahmen der System-Beschaffung sind die Nutzer in der Regel an hochentwickelten UAV-Plattformen interessiert, vernachlässigen dabei vielfach sich hinreichend über die Qualität der integrierten Kamera zu informieren. Dabei stellt die Auswahl und Qualität/Geometrie der Kamera den wichtigsten Einflussfaktor mit Blick auf die zu erreichenden Ergebnisse dar (z. B. 3D-Punktwolken, Orthofotos, etc.). Der Markt digitaler Kameras, die in UAV-basierten Szenarien eingesetzt werden, ist einem kontinuierlichen Wandel unterlegen; es erscheinen sehr häufig neue Kameras, so dass bestehende Systeme schnell veralten.

¹ Hochschule Bochum, Labor für Photogrammetrie, Lennerhofstr. 140, D-44801 Bochum, E-Mail: [Heinz-Juergen.Przybilla]@hs-bochum.de

UAV des Herstellers DJI verfügen über eine erhebliche Markt Präsenz und finden dabei vorrangig Verwendung in Film- und Videoproduktionen. Allerdings haben sie zwischenzeitlich auch bei geodätischen Anwendungen eine weite Verbreitung gefunden. Die DJI-Kameras Zenmuse X4S (20Mpix) und X5S (20,8 Mpix) geben den aktuellen Entwicklungsstand des Herstellers wieder, sind konzeptionell jedoch sehr unterschiedlich aufgebaut (Tab. 1). Während die proprietären DJI-Kameras in Verbindung mit der Phantom 4 Pro- und Inspire 2-Serie verwendet werden, ist die Phase One IXU 1000 (100Mpix) ein Mittelformat-Kamerasystem, das typischerweise auf klassischen Luftbildplattformen eingesetzt wird. Für die vorliegenden Tests wurde ein leistungsstarkes UAV des Anbieters Coptersystems (COPTERSYSTEMS 2018), mit einem maximalen Startgewicht von 10 kg, eingesetzt. Die erreichbare Flugdauer mit diesem Kopter beträgt ca. 20 Minuten und liegt damit in einer mit den DJI-Flugplattformen vergleichbaren Größenordnung (Abb. 1).

Tab. 1: Technische Daten der eingesetzten Kamerasysteme

Hersteller	Phase One / Copter-systems	DJI	
Kamera	Phase One IXU1000	Zenmuse X5S	Zenmuse X4S (Phantom 4 Pro)
Objektiv	Rodenstock 50/5.6	DJI MFT ASPH 15/1.7	Integriert 8.8/2.8
Wechselobjektiv	Ja (mechanisch stabilisiert)	Ja	Nein
Fokussierung	mechanisch: ∞	elektronisch: ∞	elektronisch: ∞
Verschluss (Shutter)	Zentral (mechanisch)	Rolling	Zentral (mechanisch)
Pixelauflösung [MPx]	100	20,8	20
Sensorformat [mm]	53.4×40.0	17.3×13.0	13.2×8.8
Pixelanzahl	11.608×8708	5.280×3956	5.472×3648
Pixelgröße [μm]	4,6	3,28	2,4
Brennweite [mm]	50	15	8,8
Öffnungswinkel (FOV) / (Diagonal)	67,4°	73,6°	83,8°
Preis [€]	50 - 60.000 ^(*)	2.200	800

^(*) abhängig von der verwendeten Optik



Abb. 1: Eingesetzte Kameras und Trägerplattformen

In der manntragenden Luftbild-Photogrammetrie ist die Einrichtung und Nutzung von Testfeldern seit vielen Jahrzehnten ein probates Mittel für Untersuchungen zur Qualität photogrammetrischer Aufnahmesysteme. Exemplarisch ist hier das Testfeld Vaihingen/Enz zu nennen (CRAMER & KRAUß 2008). Auch für die in-situ Kalibrierung digitaler Luftbildkameras kommen Testfelder zum Einsatz (MUELLER & NEUMANN 2016). Den Ansprüchen zur Prüfung von UAV-Systemen werden diese Testfelder jedoch nicht gerecht: neben der (an den klassischen Bildflug angepassten) Testfeldgröße fehlt es vorrangig an der Qualität der Referenzpunkte, die im Falle eine UAV-Testfeldes im Sub-Zentimeter Bereich liegen müssen.

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, die beteiligten Kameras hinsichtlich ihrer geometrischen Qualität vergleichend zu untersuchen. Im Fokus der Untersuchungen stehen dabei auch Parameter, die Einfluss auf die geometrische Qualität der Bildverbände ausüben können.

2 Das UAV-Testfeld Zeche Zollern

Das UAV-Testfeld auf dem Areal des Industriemuseums Zeche Zollern in Dortmund (LWL 2018) wurde 2014 durch die Hochschule Bochum (HSBO) eingerichtet und bisher bei verschiedenen Kampagnen genutzt (NEX et al. 2015; PRZYBILLA et al. 2015; GERKE & PRZYBILLA 2016; CRAMER et al. 2017; PRZYBILLA et al. 2017).

Die Zeche Zollern wurde 1898-1904 am westlichen Stadtrand von Dortmund ($\delta 51^{\circ} 31' 4''$ N, $7^{\circ} 20' 5''$ 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 2018). 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 zwei ca. 40 m hohe Fördergerüste gegeben. Es besteht aus 45 rasterförmig angeordneten signalisierten Bodenpunkten (Abb. 2)

Eine Übersicht des UAV-Testfeldes mit der geodätischen Passpunktkonfiguration zeigt Abb. 3 (PRZYBILLA et al. 2018).



Abb. 2: UAV-Testfeld Zeche Zollern. Oben: Target zur Signalisierung der GCP sowie Blick auf das Areal Unten: Punktwolke mit signalisierten Bodenpasspunkten (UAV-Befliegung vom 16.10.2017)

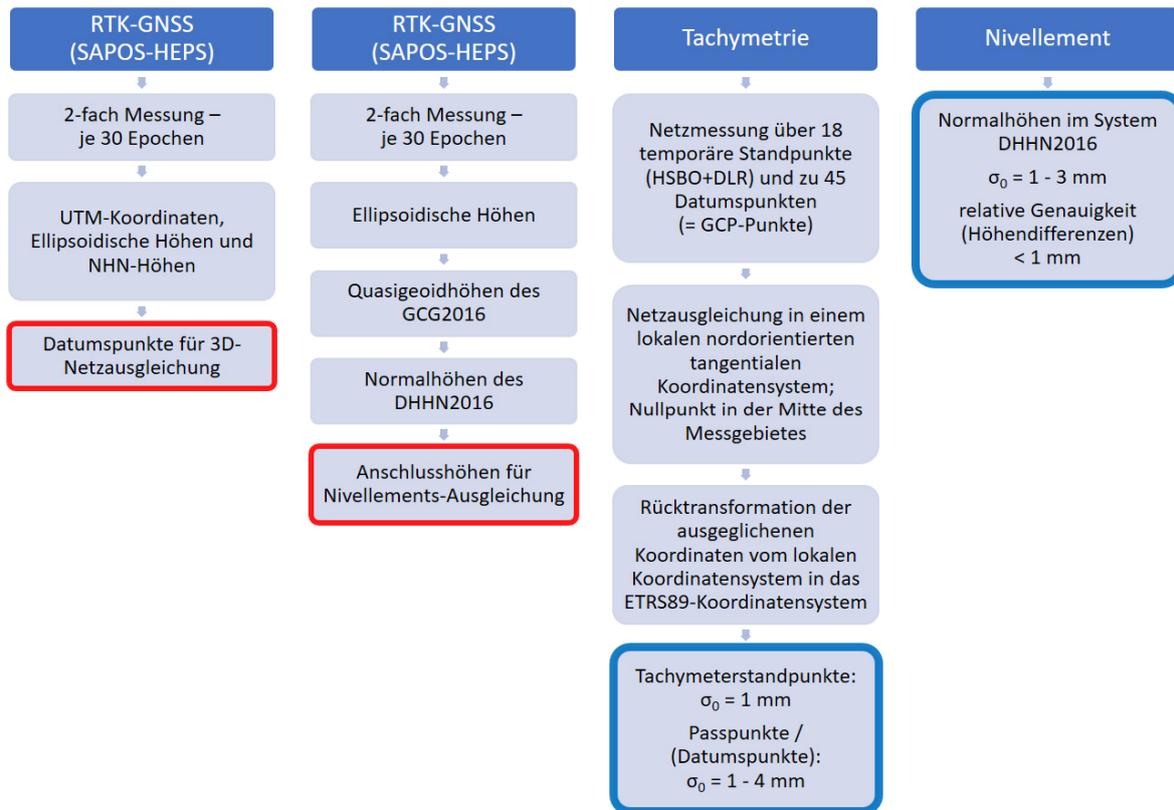


Abb. 3: Workflow der geodätischen Messungen und Datenprozessierung

3 Aufnahmekonzept

Um eine Vergleichbarkeit der Kamerasysteme im Testszenario zu gewährleisten, wurde vorab für alle Systeme eine einheitliche Bodenauflösung (GSD) von 14 mm festgelegt (Fluganordnung: Regular / R). Daraus resultierend ergaben sich unterschiedliche Flughöhen für die Plattformen (Tab. 2). Ergänzt wurde dies durch Flüge in einer Kreuzanordnung (Cross / C), wobei die Flughöhe jeweils um 20% von den Normalanordnungen abweicht (Abb. 4). Hintergrund für die Erweiterung des Aufnahmekonzepts um die Kreuzanordnung ist deren positive Auswirkung auf die in-situ Kalibrierung der jeweiligen Kamera (PRZYBILLA et al. 2015; GERKE & PRZYBILLA 2016).

Tab. 2: Systeme, Fluganordnung und -höhe

Kamera	Phase One IXU1000	DJI Zenmuse X5S	DJI Zenmuse X4S
Regular (R)	120m	60m	50m
Cross (C)	148m	72m	60m

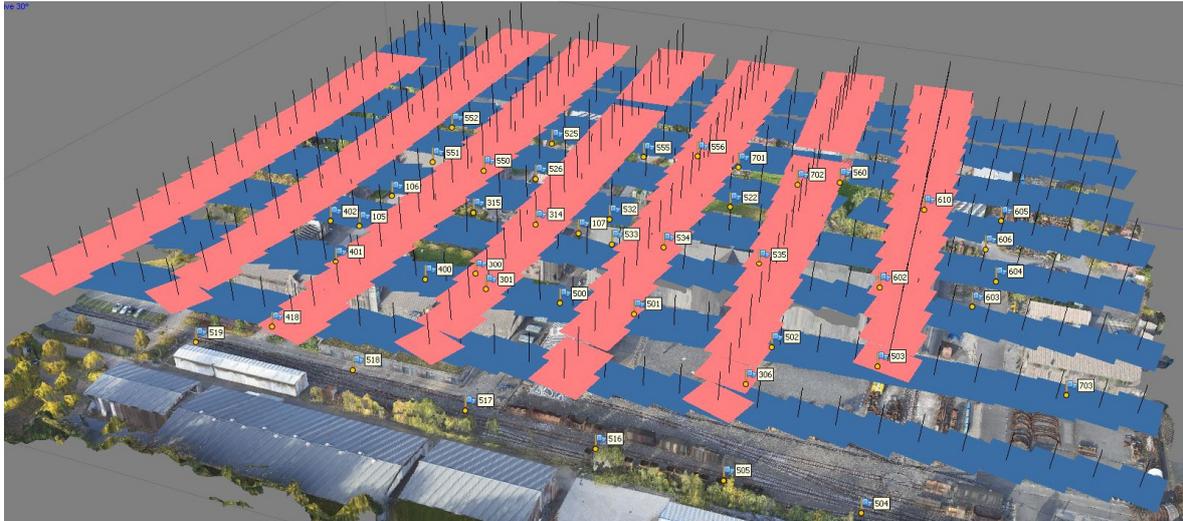


Abb. 4: Fluganordnung Regular (R) und Cross (C) (Block Zenmuse X4S/Phantom 4Pro)

4 Untersuchungsergebnisse

Im Fokus der Untersuchungen stehen Parameter, die Einfluss auf die geometrische Qualität der Bildverbände ausüben (Abb. 5). Ziel ist es daher, den Einfluss der Parameter auf die Geometrie der Bildverbände zu evaluieren.

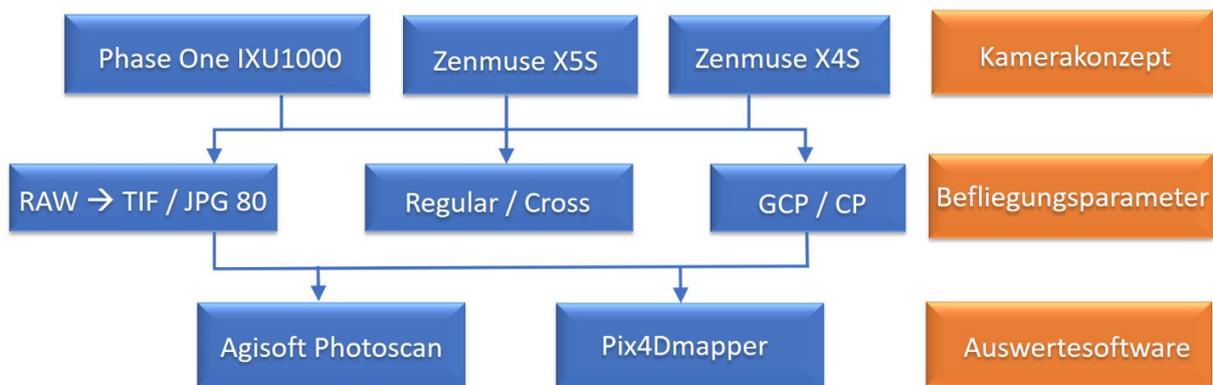


Abb. 5: Einflussgrößen auf geometrische Qualität der Bildverbände

Bewertungsgrößen sind die Restabweichungen an Pass- und Kontrollpunkten (RMSE-Werte) als Ergebnisse der Bündelausgleichungen mit der Auswertesoftware Agisoft PhotoScan und Pix4Dmapper. Die Berechnungsvarianten gliedern sich bezüglich der Parameter:

- Blocklagerung (Passpunktanzahl und -anordnung)
- Anzahl der Kameras im Prozess der Selbstkalibrierung (Innere Orientierung)
- Fluganordnung (Regular – R / Cross – C)
- Eingesetzte Auswertesoftware

Die Parametrisierung der Inneren Orientierung der jeweils verwendeten Kamera wurde für alle nachfolgenden Berechnungen mit Agisoft PhotoScan identisch gewählt (Kamerakonstante: f ; Hauptpunktlage: c_x, c_y ; radial-symmetrische Verzeichnung: $k_1 - k_3$; Affinität und Nichtorthogonalität: b_1, b_2 ; tangential-asymmetrische Verzeichnung: p_1, p_2).

4.1 Auswirkungen der Blocklagerung

Die Anzahl und Anordnung der Passpunkte übt in der Regel einen signifikanten Einfluss auf die Blockgeometrie aus. Auswirkungen von verschiedenen Passpunktanordnungen auf die Endprodukte (DGM) wurden u. a. von LINDSTAEDT & KERSTEN (2018) in mehreren UAV-basierten Befliegungen in Äthiopien gezeigt. Eine hohe Anzahl von Passpunkten stabilisiert einerseits den Block, erfordert andererseits jedoch einen erheblichen Aufwand bei der terrestrischen Vermessung vor Ort. Da UAV-Systeme differentielles GNSS (RTK) zur Blocklagerung bisher nur in geringem Maße zur Verfügung stellen, orientiert sich die Verteilung der Passpunkte häufig an Schemata aus der Zeit des „analogen“ Bildflugs (Abb. 6). Abweichend von dem hier Dargestellten werden in der Praxis alle Punkte als 3D-Koordinaten – häufig mittels GNSS – gemessen.

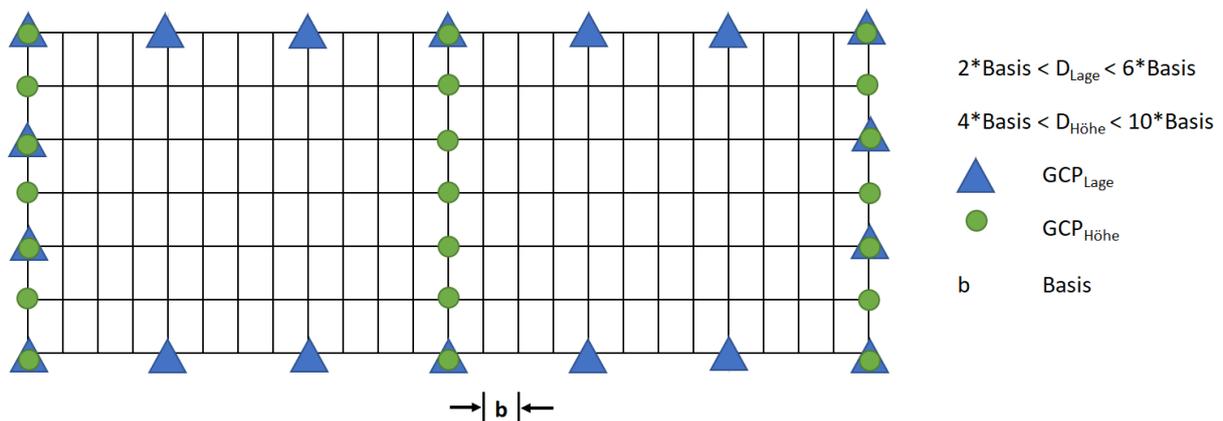


Abb. 6: Schematische Anordnung von Passpunkten beim (analogen) Bildflug (Kraus 1994)

Die Abb. 7-9 zeigen die Auswirkungen der variierenden Passpunktverteilungen für die drei untersuchten Kameras. Die dargestellten Ergebnisse basieren auf einer Lagerung der Blöcke mit 45, 22, 12 sowie 5 Passpunkten (GCP). Diese sind im Wesentlichen rasterförmig über das Areal verteilt (Abb. 2). Die Reduktion der Passpunkte führt im Gegenzug zu einer Erhöhung der Anzahl der Kontrollpunkte, von 0 über 23, 33 bis hin zu 40 CP und bietet somit die Möglichkeit einer Bewertung der Blöcke.

Die Basis für alle Berechnungen bildet eine Kreuzbefliegung (RC), die sich jeweils aus zwei separaten Teilflügen zusammensetzt. Das verwendete Bilddatenformat ist im Folgenden ein unkomprimiertes TIF, welches mit der Software Capture One aus den aufgezeichneten RAW-Bilddaten abgeleitet wurde. Für die in Abb. 7 dargestellten Ergebnisse wird EINE zu berechnende Innere Orientierung (UNIFIED – identisch für beide Teilflüge) eingeführt.

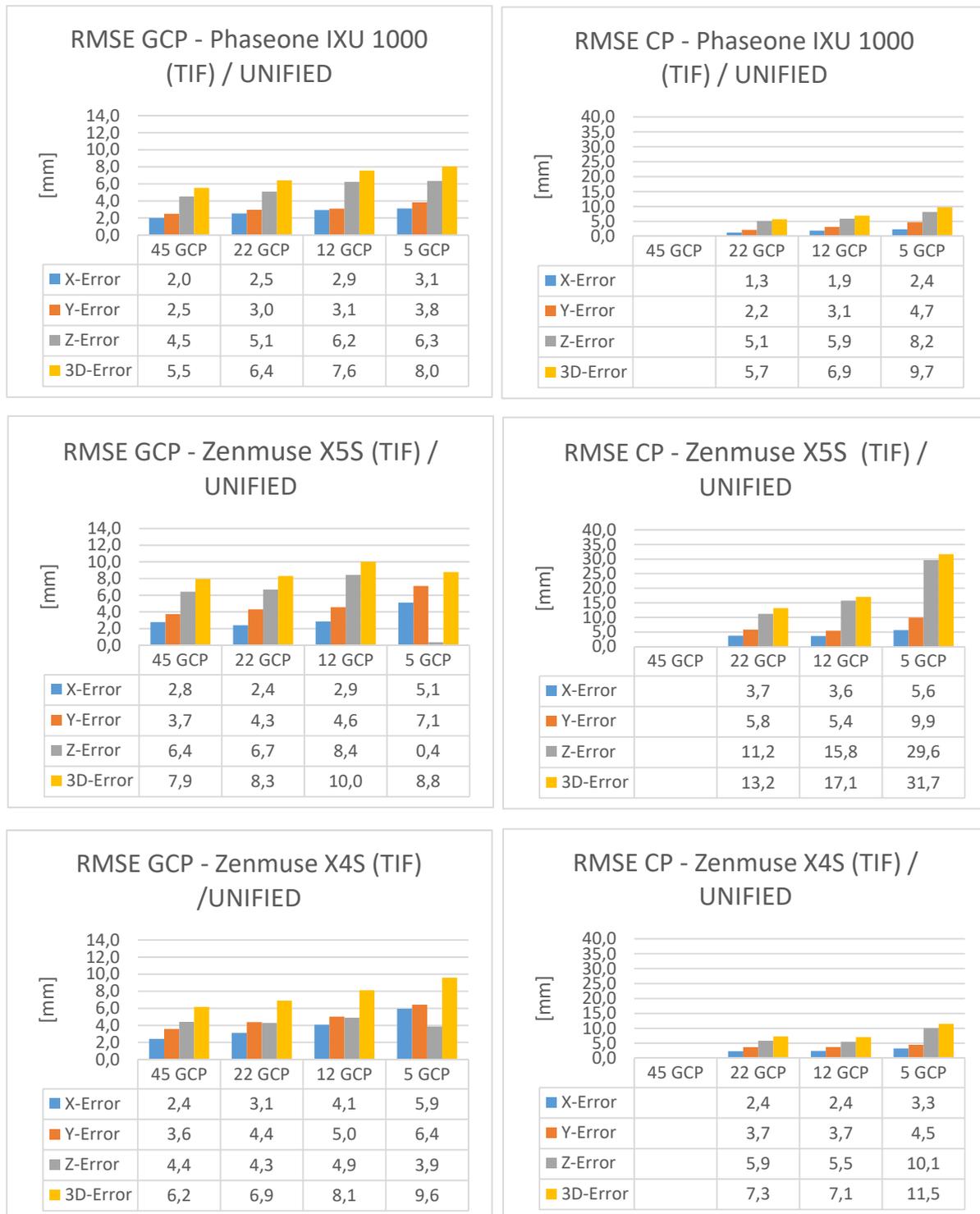


Abb. 7: RMSE-Werte an Passpunkten (GCP, links) und Kontrollpunkten (CP, rechts). Fluganordnung: RC. EINE Innere Orientierung (UNIFIED). Berechnung: Agisoft PhotoScan. HINWEIS: die Skalierung der RMSE-Werte variiert zwischen GCP und CP.

Der Vergleich der RMSE-Werte an den Kontrollpunkten (an denen eventuell vorliegende Modellverbiegungen detektiert werden können) zeigt signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Systemen. Das großformatige Phase One Kamerasystem liefert die geringsten RMSE-Werte – ein Ergebnis, dass bei allen Passpunktanordnungen erkennbar ist.

Selbst in der Minimalanordnung (5 GCP – in den Blockecken und der -mitte) führt dies zu 3D-Genauigkeiten, die deutlich unterhalb der GSD von ca. 14 mm liegen. Sowohl das große Bildformat als auch die mechanische Stabilität der Kamera sind hierfür verantwortlich.

Die im Phantom 4 PRO verbaute Zenmuse X4S zeigt nur geringfügig schlechtere Ergebnisse. Der 3D RMSE-Wert liegt auch bei minimaler Passpunktbesetzung unterhalb der GSD. Das in der Zenmuse X4S realisierte Kamerakzept mit einem Fixfokusobjektiv und mechanischem Zentralverschluss verfügt über eine hohe Stabilität und zeigt – zumindest im Rahmen der hier zeitnah durchgeführten Flüge – nahezu metrische Eigenschaften.

Die Resultate für die Zenmuse X5S fallen deutlich schlechter aus. Die vorhandene Wechseloptik in Verbindung mit der elektronischen Fokussierung auf ∞ führen zu einem in sich wenig stabilen Kamerasystem, das am Bajonett mechanisches Spiel zwischen Objektiv und Kamerakörper aufweist. Die RMSE-Werte sind gegenüber den Vergleichssystemen um einen Faktor von 2-3 schlechter und liegen nur bei dichter Passpunktanordnung (hier 22 GCP) unterhalb der GSD.

4.2 Auswirkungen separater Parameter für die Innere Orientierung

Die Durchführung der Kreuzbefliegung über 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. Darüber hinaus bedingt die Datenspeicherung im RAW-Format bei den DJI-Systemen die Reduktion der Fluggeschwindigkeit, damit genügend Zeit für das Speichern der Bilder auf der SD-Karte verfügbar ist (ca. Faktor 3 höherer Zeitbedarf im Vergleich zum „DJI-JPG“). Infolge dessen ist für die DJI-Systeme vor jedem Flug ein neues Setup durchzuführen, da diese durch den Wechsel der Akkus zwischenzeitlich stromlos sind und ihre Einstellungen verlieren.

Dieser Fakt lässt es sinnvoll erscheinen, im Rahmen der Kreuzbefliegungen die Bündelblockausgleichungen mit separaten Inneren Orientierungsparametern für die Teilflüge durchzuführen. Die Resultate sind in Abb. 8 zusammengefasst. Zwar sind die Ergebnisse der Varianten „RC UNIFIED“ bzw. „RC SEPARATE“ ähnlich, es ist jedoch erkennbar, dass die Variante „RC SEPARATE“ zu Genauigkeitssteigerungen führt, insbesondere für die Zenmuse X5S. Dies ist ein deutliches Indiz für die im Vergleich zur X4S und zur Phase One weniger stabilen Innere Orientierung. Für die DJI Systeme wäre es aus den o. a. Gründen sinnvoll, beim Wechsel der Stromquellen die Kameras durch einen Puffer-Akku eingeschaltet lassen zu können, so dass das Setup erhalten bleibt (ein leider bisher unerhörter Wunsch seitens photogrammetrischer Anwender an die DJI Entwickler!).

4.3 Auswirkungen der Einfach-Befliegung

Eine vollständige Kreuzbefliegung stellt in der Regel einen erheblichen Mehraufwand über die gesamte Prozesskette – von der Aufnahme bis zur Auswertung – dar. Beim Einsatz von Kameras mit stabilen metrischen Eigenschaften (typisch: digitale Luftbildkameras) kann jedoch auf diese erweiterte Fluganordnung verzichtet werden.

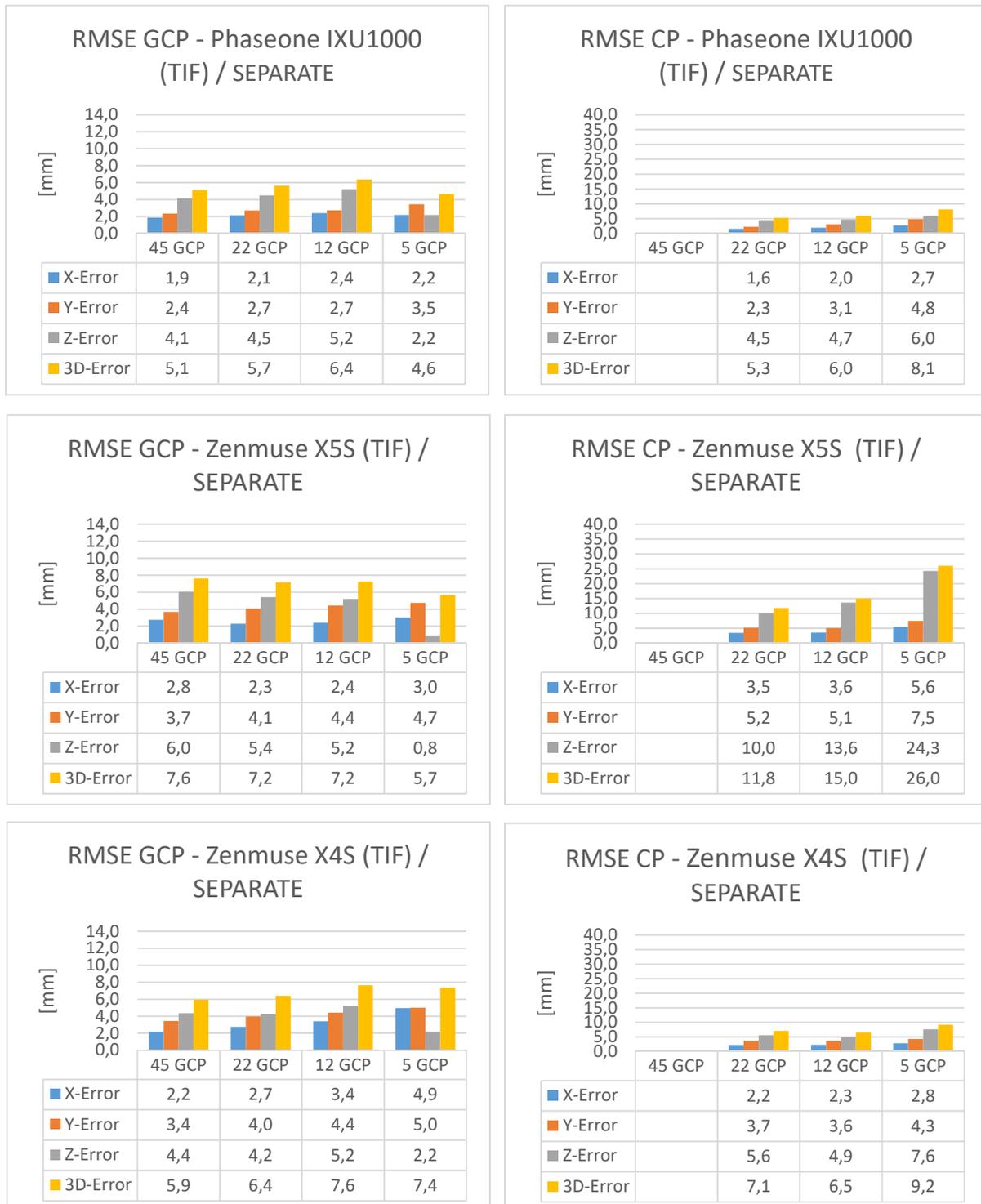


Abb.8: RMSE-Werte an Passpunkten (GCP, links) und Kontrollpunkten (CP, rechts). Fluganordnung: R+C. ZWEI Innere Orientierungen (SEPARATE). Berechnung: Agisoft PhotoScan. HINWEIS: die Skalierung der RMSE-Werte variiert zwischen GCP und CP.

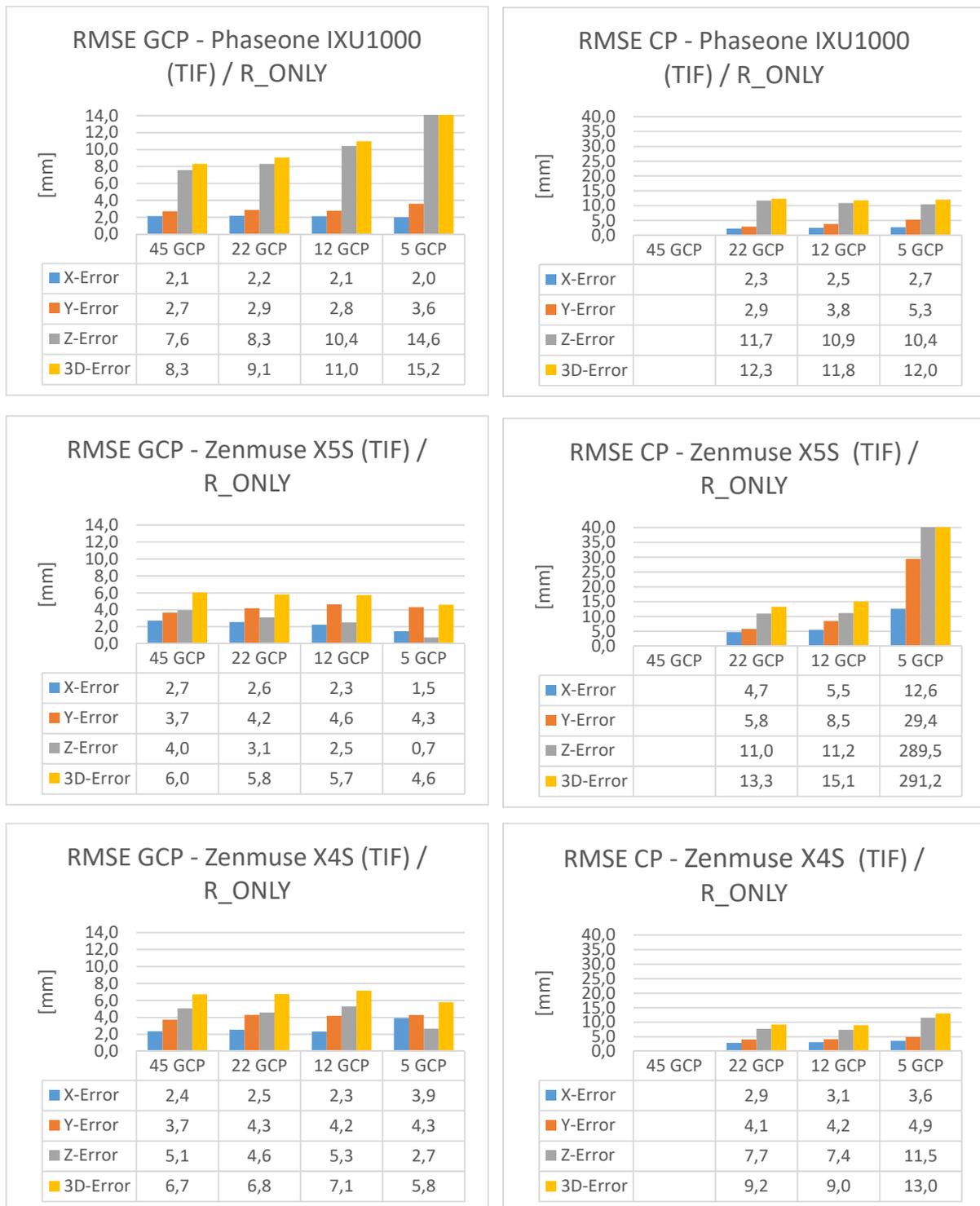


Abb. 9: RMSE-Werte an Passpunkten (GCP, links) und Kontrollpunkten (CP, rechts). Fluganordnung: R. Berechnung: Agisoft PhotoScan. HINWEIS: die Skalierung der RMSE-Werte variiert zwischen GCP und CP.

Die Auswirkungen einer Einfach-Befliegung (hier: Regular – R) auf die untersuchten UAV-Kameras sind sehr deutlich (Abb. 9). Während die mechanisch stabileren Systeme – Phase One und Zenmuse X4S – zwar mit tendenziell schlechteren Ergebnissen aufwarten, sind mit der Zenmuse X5S deutliche Genauigkeitsverluste erkennbar. Besonders betroffen ist die Höhengenaugigkeit in Verbindung mit einer reduzierten Passpunktanzahl zur Lagerung des Blocks. Die größeren RMSE-Werte (in Z-Richtung) sind im Wesentlichen auf Probleme der numerischen Bestimmung des Parameters „Kamerakonstante“ zurückzuführen, für den der vorliegende R-Block offensichtlich zu wenig Tiefeninformation bietet.

Die positive Wirkung einer sehr dichten Anordnung von Passpunkten ist in diesem Block für die instabile X5S deutlich erkennbar. Die Ergebnisse der großformatigen Phase One sind dagegen nahezu unabhängig von der Passpunktverteilung, wie an den RMSE-Werten der Kontrollpunkte erkennbar ist. Prinzipiell gilt diese Aussage auch für die Zenmuse X4S.

4.4 Vergleich der eingesetzten Software-Produkte

Die Menge der Software-Produkte zur Generierung bildbasierter Punktwolken steigt stetig. Zwar kann davon ausgegangen werden, dass im Rahmen von Arbeitsprozessen vielfach auf die gleiche Software zurückgegriffen wird, jedoch sind die Ergebnisse unterschiedlichen Software-Einsatzes häufig nicht identisch.

Auf der Grundlage der Zollern-Testdatensätze wurden daher identische Projekte mit der Software Agisoft PhotoScan (AGISOFT 2018) und Pix4Dmapper (PIX4D 2018) aufgesetzt. Beide Softwares sind kommerzielle Produkte und verfügen über eine nicht unerhebliche Marktpräsenz.

Die erstellten Projekte entsprechen in ihrer Konfiguration den Vorgaben für die jeweilige Software. Soweit verfügbar wurde auf implementierte „Vorlagen“ (Standardparameter) zurückgegriffen. Die Messung der signalisierten Bodenpunkte erfolgte auf der Grundlage der in den Programmen installierten Messroutinen manuell durch denselben Auswerter.

Die eingeschlagene Vorgehensweise kann aus diesem Grunde als typisch für eine Projektbearbeitung betrachtet werden. Die resultierenden Ergebnisse sind somit weitestgehend unbeeinflusst von „erweitertem Expertenwissen“.

Abb. 10 zeigt die dreidimensionalen RMSE-Werte nach der Bündelblockausgleichung, wobei hier auf eine getrennte Darstellung von Lage- und Höhenabweichungen verzichtet wird. Die Unterschiede der RMSE-Werte sind für alle untersuchten Kameras und den jeweiligen Blocklagerungen deutlich erkennbar. Dabei resultieren aus den Berechnungen mit Pix4Dmapper in der Regel deutlich geringere RMSE-Werte als aus den Vergleichsprojekten mit Agisoft PhotoScan. Diese Feststellung trifft sowohl auf die Passpunkte, als auch auf die Kontrollpunkte zu. Grundsätzlich fällt es schwer, hierfür Gründe zu finden, da Verfahrens-technisch gleiche Methoden vorliegen sollten. Software-intern sind jedoch unterschiedliche Vorgehensweisen zu vermuten, die aber von Anwendern eher weniger evaluiert werden können.

Davon unabhängig sind die in Abb. 10 dargestellten Ergebnisse von gewisser Relevanz, da sie eine der wesentlichen Bewertungsgrundlagen für die Bildorientierung darstellen. Insbesondere im Rahmen von Ingenieurprojekten, die im Genauigkeitsniveau weniger Millimeter anzusiedeln sind, fällt eine Qualitätsbewertung der erzielten Ergebnisse eher schwer.

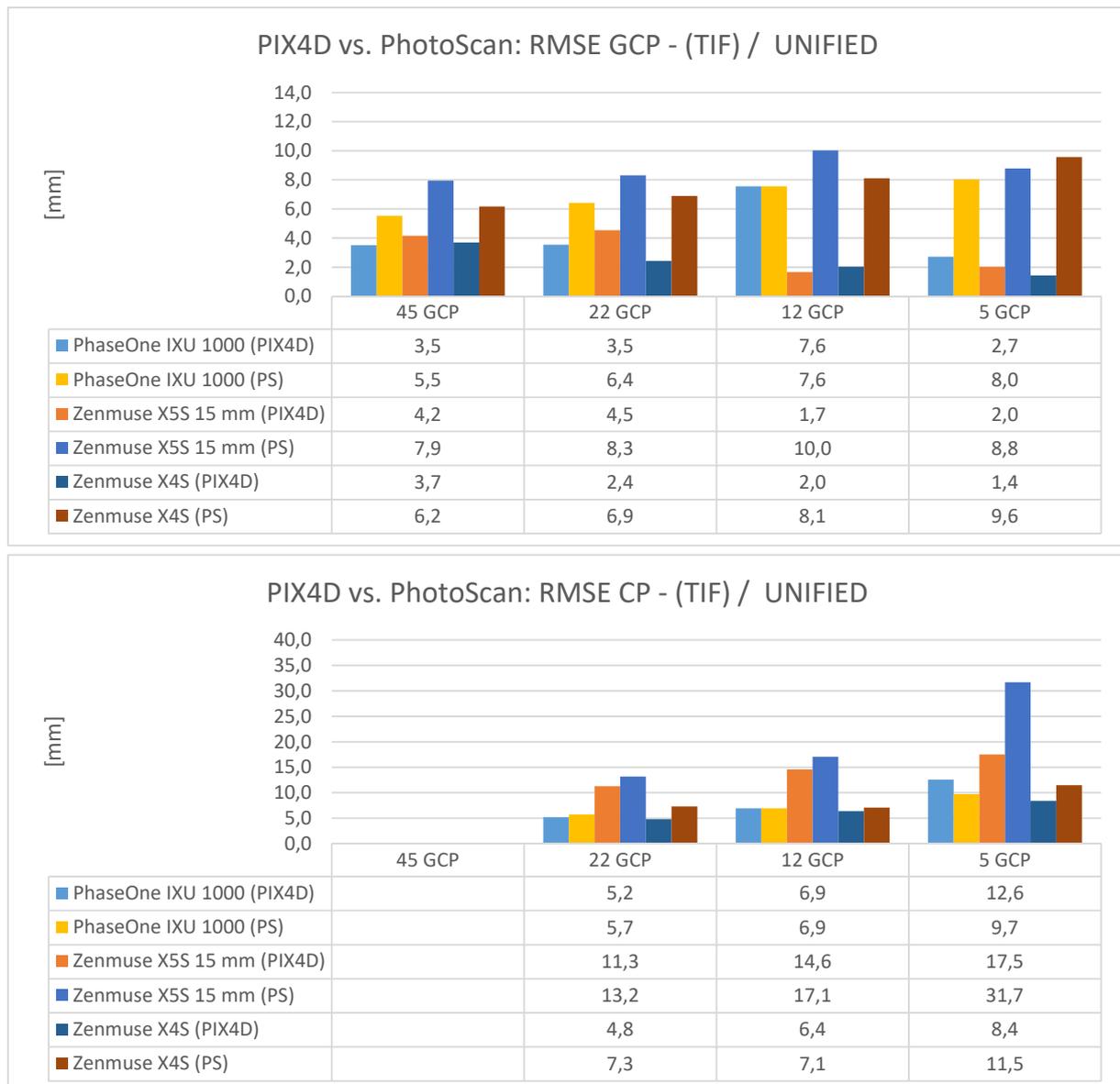


Abb. 10 Vergleich der 3D RMSE-Werte an Passpunkten (GCP, oben) und Kontrollpunkten (CP, unten) als Ergebnisse der Bündelblockausgleichungen mit PIX4Dmapper und Agisoft PhotoScan. HINWEIS: die Skalierung der RMSE-Werte variiert zwischen GCP und CP.

5 Fazit & Ausblick

Die auf der Grundlage von vergleichbaren Datensätzen des UAV-Testfelds Zeche Zollern durchgeführten in-situ Prüfungen verschiedener UAV-Systeme zeigen erkennbare Unterschiede in der Leistungsfähigkeit der eingesetzten Kameras. Bemerkenswert sind dabei die sehr guten Ergebnisse der preiswertesten Kamera im Test.

Die positiven Auswirkungen der Kreuzbefliegung (mit Unterschieden in der Flughöhe von ca. 20%) konnten bestätigt werden. Leider bieten die Bildflug-Planungstools diese Variante in der Regel nicht als Standardkonzept an, so dass hier ein gewisser Handlungsbedarf seitens der Anbieter bestehen sollte. Damit einher geht die Notwendigkeit der Selbstkalibrierung für die eingesetzten Kameras. Keine der untersuchten Kameras kann – unter den spezifischen Anforderungen eines hochpräzisen UAV-Bildflugs – als metrische Kamera bezeichnet werden. Unter Berücksichtigung des individuellen Kamerakonzepts kann es daher auch sinnvoll sein, Teilflüge mit eigenen Parametern der Inneren Orientierung in die Bündelblockausgleichung einzuführen.

Der abschließende Vergleich von Berechnungsergebnissen mit unterschiedlichen Softwares ist in gewisser Weise erstaunlich, da er mit den vorliegenden Datensätzen deutliche Qualitätsunterschiede zeigt. Hier sollten weitere Untersuchungen (auch der Software-Anbieter) ansetzen.

Dank

Der Autor dankt allen Teilnehmern der Zollern Herbstkampagne für ihre tatkräftige Unterstützung. Neben den Partnern von PhaseOne und Coptersystems gilt ein besonderer Dank den Studierenden der Wahlpflichtveranstaltung „Ingenieurvermessung“ 2017 des Studiengangs Vermessung an der HSBO (Leitung: Prof. Dr. Manfred Bäumker) für ihre motivierte Mitwirkung bei der geodätischen Netzmessung!

6 Literaturverzeichnis

- AGISOFT, 2018: Webseite <http://www.agisoft.com/>, letzter Zugriff 28.12.2018.
- COPTERSYSTEMS, 2017: Webseite <https://coptersystems.com/>, letzter Zugriff 28.12.2018.
- CRAMER, M., 2016: Welche ist am besten? – Ein paar Anmerkungen zur Auswahl von Kamerasystemen in der UAS-Luftbildphotogrammetrie. UAV2016 – Vermessung mit unbemannten System, Schriftenreihe des DVW, **82**, 97-118, Wißner-Verlag, Augsburg.
- CRAMER, M.; PRZYBILLA, H.-J., MEIßNER, H. & STEBNER, K., 2017: Kalibrierung und Qualitätsuntersuchungen UAV-basierter Kamerasysteme. Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017), Schriftenreihe des DVW, **86**, 67-84, Wißner-Verlag, Augsburg.
- GERKE, M. & PRZYBILLA, H.-J., 2016: Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: influence of onboard RTK-GNSS and cross flight patterns. Zeitschrift für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (PFG), **2016**(1), 17-30.
- KRAUS, K., 1994: Photogrammetrie, Band 1. Grundlagen und Standardverfahren. Ferdinand Dummlers Verlag, Bonn, 263 S.
- LINDSTAEDT, M. & KERSTEN, T., 2018: Zur Bedeutung von Passpunkten bei der Aerotriangulation UAV-basierter Bildflüge. UAV 2018 - Vermessung mit unbemannten Flugsystemen, Schriftenreihe des DVW, **89**, 81-101, Wißner-Verlag, Augsburg.
- LWL 2018: Homepage des Industriemuseums Zeche Zollern, <https://www.lwl.org/industriemuseum/standorte/zeche-zollern>, letzter Zugriff: 28.12.2018.
- MUELLER, C. & NEUMANN, K., 2016: LEICA DMC III Calibration and Geometric Sensor Accuracy. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **40**(3/W4), 1-9.

- PHASEONE, 2018: Webseite https://industrial.phaseone.com/Mapping_Surveying_Applications.aspx, letzter Zugriff 28.12.2018.
- PIX4D, 2018: Webseite <https://www.pix4d.com/>, letzter Zugriff 28.12.2018.
- PRZYBILLA, H.-J., REUBER, C., BÄUMKER, M. & GERKE, M., 2015: Untersuchungen zur Genauigkeitssteigerung von UAV-Bildflügen. Publikationen der Deut. Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung u. Geoinformation e.V., 35. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, **24**, 45-54.
- PRZYBILLA, H.-J., 2017: Kameras für UAS - Eine Marktübersicht. In: Unmanned Aerial Vehicles 2017 (UAV 2017), Schriftenreihe des DVW, **86**, 51-66, Wißner-Verlag, Augsburg.
- PRZYBILLA, H.-J., BÄUMKER, M. & VIETEN, J., 2018: Das UAV-Testfeld Zeche Zollern in Dortmund. UAV 2018 - Vermessung mit unbemannten Flugsystemen, Schriftenreihe des DVW, **89**, 61-80, Wißner-Verlag, Augsburg.
- WIKIPEDIA, 2018: Industriemuseum Zeche Zollern, Dortmund-Bövinghausen. https://de.wikipedia.org/wiki/Zeche_Zollern, letzter Zugriff: 28.12.2018.