

# Genauigkeitspotential direkt georeferenzierter UAS-Messungen am Beispiel eines Bahnhalt punktes

ROBIN GILBERT SCHULZE<sup>1</sup>, DAVID MADER<sup>1</sup> & ANETTE ELTNER<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: In diesem Beitrag wird das Genauigkeitspotential direkt georeferenzierter UAS-Messungen mit einer DJI Phantom 4 RTK analysiert. Es wird der Einfluss unterschiedlicher Befliegungsmuster, Passpunktverteilungen und Kamerakalibrierungen untersucht. Die erreichte Genauigkeit wird anhand von RMS-Abweichungen an den Kontrollpunkten und durch einen Vergleich der bildbasierten Punktwolken mit einer TLS-Punktwolke bewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass durch geeignete Aufnahmekonfigurationen Lage- und Höhengengenauigkeiten von bis zu 1 cm bei einer Flughöhe von 50 – 70 m über Grund möglich sind. Durch die Kombination von Nadir- und Schrägaufnahmen oder durch das Hinzufügen von zusätzlichen Parametern (Fourier-Reihen) in den Simultankalibrierungsprozess der Kamera besteht die Möglichkeit, gänzlich auf Passpunkte zu verzichten.*

## 1 Einleitung

Unbemannte Luftfahrzeuge (Unoccupied Aerial Vehicle; UAV) bzw. Luftfahrtsysteme (Unoccupied Aircraft System; UAS) haben sich in den letzten Jahren aufgrund der flexiblen Einsatzmöglichkeiten zu einem etablierten Aufnahmesystem für vermessungstechnische Anwendungen entwickelt (LINDSTAEDT & KERSTEN 2018). Viele 3D-Modelle, basierend auf UAS-Bilddatensätzen, sind jedoch mit systematischen Blockverformungen behaftet. Diese Fehler betreffen dabei vor allem die Höhenkomponente des Modells und sind auch als „Dome“ oder „Bowl“ Effekt (Kuppel- oder Schalenfehler) bekannt (SANZ-ABLANEDO et al. 2021). Die Korrektur oder Kompensation der Blockverformungen erfolgt in der Regel über eine indirekte Georeferenzierung mit einer hohen Anzahl an Passpunkten (PP). Die Markierung und Einmessung der PP bedeutet jedoch einen hohen Feldarbeitsaufwand und kann außerdem in schwer oder nicht zugänglichen Geländen nicht umgesetzt werden. Um diesen zeitlichen sowie arbeitsintensiven Mehraufwand zu minimieren und mögliche Blockverformungen zu vermeiden, kann auf RTK (Real-Time Kinematic) oder PPK- (Post-Processed Kinematic) GNSS-fähige UASs zurückgegriffen werden, die die Bestimmung der Bildaufnahme positionen mit einer hohen Genauigkeit erlauben. Dies ermöglicht die direkte Georeferenzierung der Bildverbände und es kann die notwendige Passpunktanzahl erheblich reduziert werden (z.B. GERKE & PRZYBILLA 2016; TADDIA et al. 2019; PRZYBILLA & BÄUMKER 2020). PRZYBILLA & BÄUMKER (2020) konnten zeigen, dass bei der Verwendung von nur vier PP eine Höhengengenauigkeit von 1.2 cm möglich ist und wenn kein PP verwendet wird, eine Höhengengenauigkeit von 15 cm erreicht wird. Die UAS-Aufnahmen wurden in Flughöhen von 50 bis 60 m gemacht. TADDIA et al. (2019) nutzten ebenfalls direkte Georeferenzierung und nur einen PP und

---

<sup>1</sup> Technische Universität Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Helmholtzstraße 10, D-01069 Dresden, E-Mail: [robin\_gilbert.schulze, david.mader, anette.eltner]@tu-dresden.de

erreichten eine Höhengenaugigkeit von 5 cm bei einer Flughöhe von 80 m. Das Einbinden von bestimmten Flugmustern, wie z.B. Querflüge, unterschiedliche Flughöhen und Schrägaufnahmen, ermöglicht eine bessere Kamerakalibrierung (PRZYBILLA & BÄUMKER 2020). Den Vorteil der Einbindung von Schrägaufnahmen für die Bestimmung der Parameter der inneren Orientierung wurde durch SANZ-ABLANEDO et al. (2021) bestätigt. Neben der Beeinflussung der äußeren Orientierung mittels des Flugmusters muss die innere Orientierung der Kamera hinsichtlich der Auswirkung auf das zu berechnende 3D-Modell beachtet werden. UASs, insbesondere im low-cost Bereich, besitzen Kameras, die starke Verzerrungen aufweisen können. Diese können nicht ausreichend mit dem Brown-Modell (BROWN 1971) beschrieben werden und erfordern während der Simultankalibrierung (HASTED et al. 2021) die Schätzung zusätzlicher Parameter (Fourier-Reihen; TANG et al. 2012).

In dieser Arbeit wird das Genauigkeitspotential direkt georeferenzierter UAS-Messungen analysiert. Es wird untersucht, welchen Einfluss verschiedene Aufnahmekonfigurationen, Anzahl an PP und Kamerakalibrieransätze auf die Genauigkeit der Ergebnisse haben. In Kapitel 2 werden Testgebiet, Fluggerät, Befliegungsmuster, Datenverarbeitung und die für die Validierung notwendigen Referenzdaten vorgestellt. Kapitel 3 zeigt die Auswirkung der verschiedenen Aufnahme- und Passpunktkonfigurationen sowie Kameramodelle und den Vergleich mit den Referenzdaten. Kapitel 3 beschreibt das Fazit und gibt einen kurzen Ausblick.



Abb. 1: Oben: Übersicht der Passpunktverteilung (gelb), Höhenprofil (rot) und TLS-Positionen (grün). Unten v.l.n.r.: Passpunktmarkierungen (schwarz-weiß Targets, aufgesprühte Farbmarkierungen, markante Punkte in der Örtlichkeit), DJI Phantom 4 RTK.

## 2 Methodik

### 2.1 Untersuchungsgebiet

Die UAS-basierten Bilddatensätze wurden über einem Haltepunkt der Deutschen Bahn aufgenommen (Abb. 1). Das Testgebiet erstreckt sich über eine Fläche von  $200 \times 50 \text{ m}^2$ . Der Bahnsteig liegt auf einem ca. 5 m erhöhten Bahndamm.

### 2.2 Flugplanung und -durchführung

Die Aufnahme der Bilddatensätze erfolgte mit der DJI Phantom 4 RTK. Dieses UAS-Modell ist mit einem integrierten Zweifrequenzempfänger (RTK-GNSS-Modul) ausgestattet. Durch das Empfangen von Korrekturdaten über eine Echtzeitverbindung zum SAPOS-Dienst (SAPOS 2021), ist eine zentimetergenaue Positionierung realisierbar. Zusätzlich speichert die Phantom 4 RTK die Satellitenbeobachtungs- und Ephemeridendaten während des Fluges in einem speziellen Dateiformat (RINEX.obs) ab. Mit geeigneter Software ist somit auch eine PPK-Auswertung möglich. Die an einem Gimbal fixierte Kamera verfügt über einen 1“ CMOS-Sensor mit 20 Megapixel und einer Brennweite von 8,8 mm. Die erreichbare Bodenauflösung (GSD) beträgt ca. 1,3 cm bei einer Flughöhe von 50 m über Grund.

Die Flugplanung erfolgte mit der DJI GS Pro App. Es wurden vier Teilflüge durchgeführt, die sich aus verschiedenen Flugmustern zusammensetzten:

- Konventionelle Befliegung
- Kreuzbefliegungen
- Befliegungen in unterschiedlichen Höhen (50 – 70 m)
- Nadir- und Schrägaufnahmen ( $30^\circ$  Offset zu Nadir)
- Längs- und Querüberlappung mind. 80/60

Anschließend wurden aus den Teilflügen fünf verschiedene Aufnahmekonfigurationen bzw. Testszenarien (TS) festgelegt (Tab. 1 und Abb. 2). Die Konfiguration TS1 *Regular 50* beinhaltet Bilder, die mit dem konventionellen Flugmuster (Nadiraufnahmen) von einer Flughöhe von 50 m aufgenommen wurden. TS2 *Kreuz 50* beinhaltet eine Kreuzbefliegung (Nadiraufnahmen), die ebenfalls auf einer Höhe von 50 m durchgeführt wurde. TS3 *Regular 50/60* entspricht einem konventionellen Befliegungsmuster auf zwei Flughöhen (50 und 60 m). TS4 *Regular 50/ Kreuz Oblique 70* umfasst eine konventionelle Befliegung auf 50 m Flughöhe und eine Kreuzbefliegung mit Nadiraufnahmen, die von 70 m Flughöhe aufgezeichnet wurden. Die letzte Aufnahmekonfiguration TS5 *Multi-Oriented* berücksichtigt verschiedene Flughöhen, Schrägaufnahmen sowie Kreuzbefliegung und besteht nur aus Bildern, die während des vierten Teilfluges aufgenommen wurden.

Tab. 1: Zusammenfassung der zusammengestellten Testszenarien (TS). R = Regular/ Standardbefliegung, R\* = Flugstreifen, R\*\* = 2 Flugstreifen in entgegengesetzter Flugrichtung, K = Kreuzbefliegung, N = Nadiraufnahmen, O = Obliqueaufnahmen, GSD = Ground Sampling Distance.

Testszenarien	Aufnahmekonfiguration	~ GSD	Flugzeit	Fotos
1 – <i>Regular 50</i>	R/ N/ 50	1,23 cm	6 min	94
2 – <i>Kreuz 50</i>	R/ N/ 50    K/ N/ 50	1,23 cm	9 min	122
3 – <i>Regular 50/60</i>	R/ N/ 50    R*/ N/ 60	1,28 cm	8 min	108
4 – <i>Regular 50/ Oblique 70</i>	R/ N/ 50    K/ O/ 70	1,59 cm	11 min	170
5 – <i>Multi-Oriented</i>	R*/ N/ 50    R**/ O/ 70    K/ O/ 70	1,86 cm	8 min	120

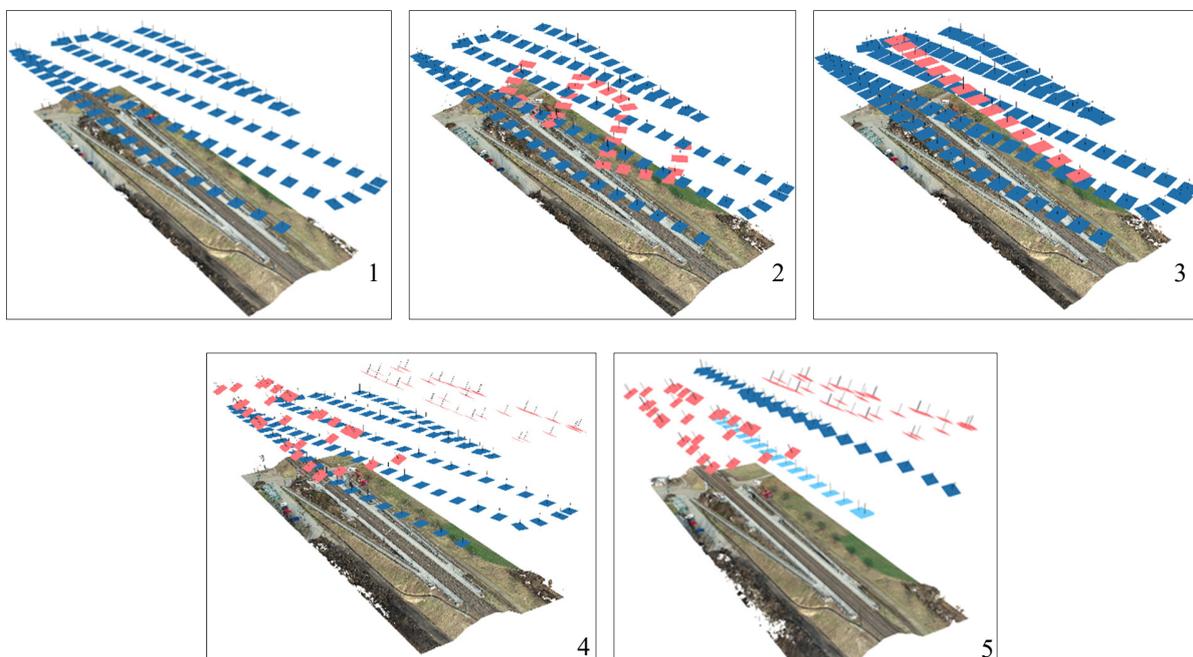


Abb. 2: Kombinationen der vier Teilflüge zu fünf Aufnahmekonfigurationen: 1) TS1 *Regular 50*, 2) TS2 *Kreuz 50*, 3) TS3 *Regular 50/60*, 4) TS4 *Regular 50/ Kreuz Oblique 70*, 5) TS5 *Multi-Oriented*

### 2.3 Direkte Georeferenzierung

Da während der Flüge keine Echtzeitverbindung zum SAPOS-Dienst möglich war, wurden die UAS-Positionen in einer PPK-Auswertung mit der Software RTKLIB (TAKASU 2021) bestimmt. Die für den Beobachtungszeitraum notwendigen Satellitenkorrekturdaten wurden über den SAPOS-GPPS-Dienst bezogen (SAPOS 2021). Bei 94 % der Bilder konnte das Problem der Mehrdeutigkeiten gelöst und eine zentimetergenaue Positionierung erreicht werden. Die Standardabweichungen betragen 1 cm bei den ersten drei Teilflügen und 2 cm beim vierten Teilflug. Da sich die PPK-bestimmten Positionen zunächst auf das Antennenphasenzentrum beziehen, musste noch der Versatz (leverarm) zwischen diesem und dem Kameraprojektionszentrum berücksichtigt werden (TADDIA et al. 2019).

## 2.4 Verarbeitung der Bilddaten

Die photogrammetrische Verarbeitung der Bilddatensätze und Erstellung der 3D-Modelle erfolgte in Agisoft Metashape (Version 1.7.4) mit den Standardeinstellungen. Die Bildverbände aller Aufnahmekonfigurationen wurden einerseits ausschließlich auf den mittels PPK-GNSS berechneten Bildpositionen gelagert. Andererseits wurden unterschiedliche Passpunktkonfigurationen in der Bündelblockausgleichung (BBA) berücksichtigt:

- ein PP in der Blockmitte
- vier PP an den Blockecken
- fünf PP in der Blockmitte und an den -ecken
- elf gleichmäßig verteilte PP

Neben den verschiedenen Aufnahme- und Passpunktkonfigurationen wurden zwei verschiedene Modelle der inneren Kamerageometrie für alle Flugmuster- und Passpunktkombinationen berücksichtigt; einerseits das Standard Brown-Modell (BROWN 1971) und andererseits die zusätzliche Einbeziehung von weiteren Parametern eines Fourier-Reihen basierten Modells (TANG et al. 2012).

In einer weiteren Auswertungsvariante wurden die Bildverbände aller Aufnahmekonfigurationen auf metergenauen GNSS-Positionen gelagert und mit vier, fünf bzw. elf PP indirekt georeferenziert, um einen Vergleich aller Kombinationen zur typischerweise durchgeführten UAV-Photogrammetrie zu erhalten.

## 2.5 Referenzdatensätze

Um das Genauigkeitspotential beurteilen zu können, wurden verschiedene Referenzdatensätze aufgezeichnet (Abb. 1). Unter anderem wurden 27 Kontrollpunkte (KP) gleichmäßig im Feld verteilt und mittels PPK-GNSS eingemessen. Die dabei erreichte Standardabweichung betrug 1 cm (in Lage und Höhe). Ein Teil der KP wurde zusätzlich als PP für die Lagerung der Bildverbände genutzt.

Bei der Nutzung von KP für die Genauigkeitsbetrachtung können systematische Blockverformungen unter Umständen unerkant bleiben. Höhenprofile dienen dazu, die Erkennung solcher Systematiken zu unterstützen. Es wurde ein Höhenprofil (22 Höhenpasspunkten – HP) mittels PPK-GNSS mit der gleichen Genauigkeit wie die KP gemessen, um mögliche systematische Blockverformungen detektieren zu können.

Der dritte Referenzdatensatz ist eine terrestrisch aufgenommene Laserscannerpunkt wolke. Das Testgelände wurde mit dem Laserscanner RIEGL VZ 400i von 14 Standpunkten aus erfasst. Der Laserscandatensatz wurde mit RiScan Pro (Version 2.8) aufbereitet. Die einzelnen Laserscannerstandpunkte wurden mittels eines Iterative-Closest-Point (ICP) –Ansatzes (HORN 1987) in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert. Anschließend wurden retroreflektierende Zylinderzielmarken genutzt, welche auf den eingemessenen PP aufgestellt wurden, um die fusionierte Laserscannerpunkt wolke (TLS) zu georeferenzieren. Die Punkt wolke wurde in CloudCompare (CLOUDCOMPARE 2021) manuell von umliegender Vegetation bereinigt, um den Vergleich auf bebaute Flächen zu konzentrieren. Für den Vergleich der UAV-basierten Punkt wolken mit den TLS-Daten wurde die Funktion Cloud-to-Cloud-Distanz verwendet.

### 3 Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1 Einfluss der Aufnahmekonfiguration

In Abb. 3 sind die RMS-Abweichungen an den im Testfeld installierten KP (Abb. 1) dargestellt. Die Resultate zeigen, dass bei einer direkten Georeferenzierung der Bildverbände Lagegenauigkeiten von bis zu 1,2 cm erreichbar sind – unabhängig vom Befliegungsmuster und bei Verwendung des Brown-Modells ohne zusätzliche Fourier-Reihen-Parameter bei der Simultankalibrierung. Lediglich die Lage-RMS-Werte der TS5 *Multi-Oriented* Variante sind mit 2,2 cm etwa doppelt so groß. Dabei muss beachtet werden, dass TS5 die Aufnahmekonfiguration ist, welche nur aus Bildern des vierten Teilfluges bestand, dessen Positionierungsgenauigkeit 2 cm (versus 1 cm für die ersten drei Teilflüge) betrug. Die Lagegenauigkeiten liegen im Bereich der GSD und im Genauigkeitsniveau der PPK-Bildpositionen.

Die Betrachtung der Höhengenaugigkeit zeigt größere Unterschiede zwischen den Aufnahme- und Passpunktkonfigurationen auf. Das ausschließlich aus Nadiraufnahmen bestehende TS1 *Regular 50* besitzt mit 19,0 cm eine hohe Abweichung der Kontrollpunkte in der vertikalen Komponente. Durch das Hinzufügen von Bildern aus einer Kreuzbefliegung (TS2 *Kreuz 50*) oder durch Aufnahmen in unterschiedlichen Flughöhen (TS3 *Regular 50/60*) kann der Höhenfehler auf bis zu 4,1 cm reduziert werden. Den größten Einfluss auf die Höhengenaugigkeit zeigen die Kombinationen von Nadir- und Schrägaufnahmen aus Kreuzbefliegungen in unterschiedlichen Höhen. Diese beträgt auch ohne Passpunkte 1,0 cm (TS4 *Nadir 50/ Kreuz Oblique 70*) bzw. 1,7 cm (TS5 *Multi-Oriented*). Bei diesen Szenarien zeigt auch der Vergleich mit dem Höhenprofil die niedrigsten Abstände zwischen den HP und UAV-basierten Punktwolken (zwischen -1,2 und 3,0 cm; Abb. 4).

#### 3.2 Einfluss der Passpunktconfiguration

Die Betrachtung der HP zeigt, dass der Höhenfehler für TS1 (~20 cm) bis TS3 (~4 cm) gleichmäßig im 3D-Modell gegeben ist, wenn keine PP genutzt werden (Abb. 4). Bei einer Lagerung der Bildverbände auf einen in der Blockmitte befindlichen PP kann der vertikale Offset bei TS1 bis TS3 deutlich minimiert werden. Die RMS-Abweichungen der Höhenkomponente der KP betragen dann noch 2,0 bis 2,6 cm. Bei den Konfigurationen mit konvergenten Bildaufnahmen kann kein zusätzlicher Genauigkeitsgewinn durch einen PP in der Blockmitte beobachtet werden. Werden vier PP in den Blockecken des Aufnahmegebiets in die BBA integriert, wird die Höhengenaugigkeit bei TS1 *Regular 50* weiter verbessert (1,4 cm). Weitere Verbesserungen durch fünf bzw. elf PP sind im Vergleich zu vier PP kaum messbar. Der Mehraufwand bei der Einmessung weiterer PP ist somit kritisch zu beurteilen.

#### 3.3 Einfluss des Verzeichnungsmodells

Werden neben den Parametern des Brown-Modells zusätzliche Parameter (Fourier-Reihen) in der Simultankalibrierung berücksichtigt, werden die Genauigkeiten stark verbessert. Die Lage- und Höhengenaugigkeit liegt bereits bei einer Standardbefliegung (TS1 *Regular 50*) ohne PP bei etwa 1,3 bzw. 1,1 cm. Zusätzliche Nadiraufnahmen in einer Kreuzbefliegung oder von einer anderen Flughöhe führen zu einer Verschlechterung der Ergebnisse um wenige Millimeter. Die Kombination von Nadir- und Schrägaufnahmen (TS4 *Nadir 50/ Kreuz Oblique 70*) verbessert die Höhengenaugigkeit auf 0,9 cm.

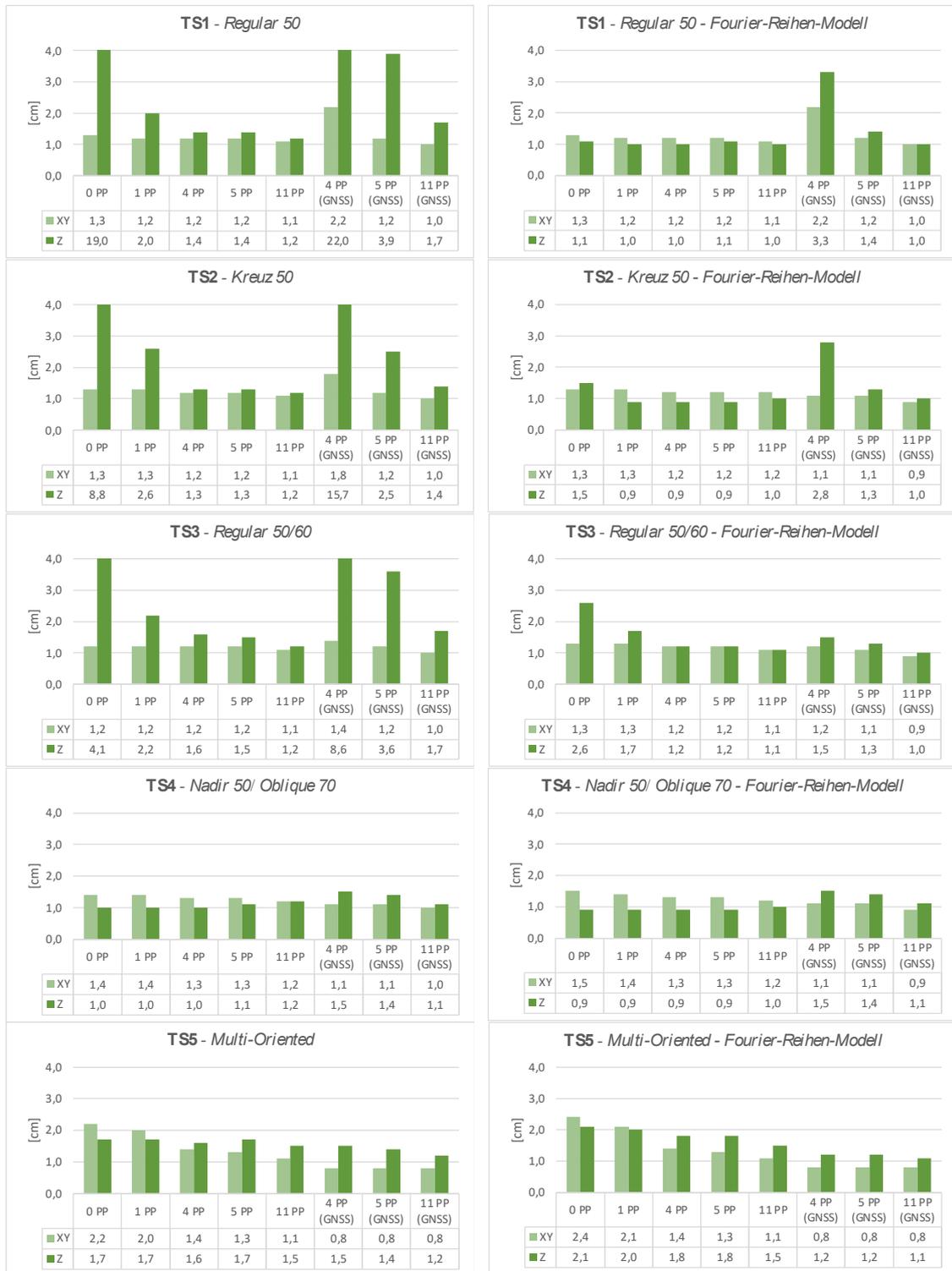


Abb. 3: Dargestellt sind die RMS-Abweichungen [cm] an den Kontrollpunkten. Um die Ergebnisse visuell besser darzustellen, wurde die Y-Achse auf 4,0 cm begrenzt – einige RMS-Werte der Z-Koordinate übersteigen diese deutlich.

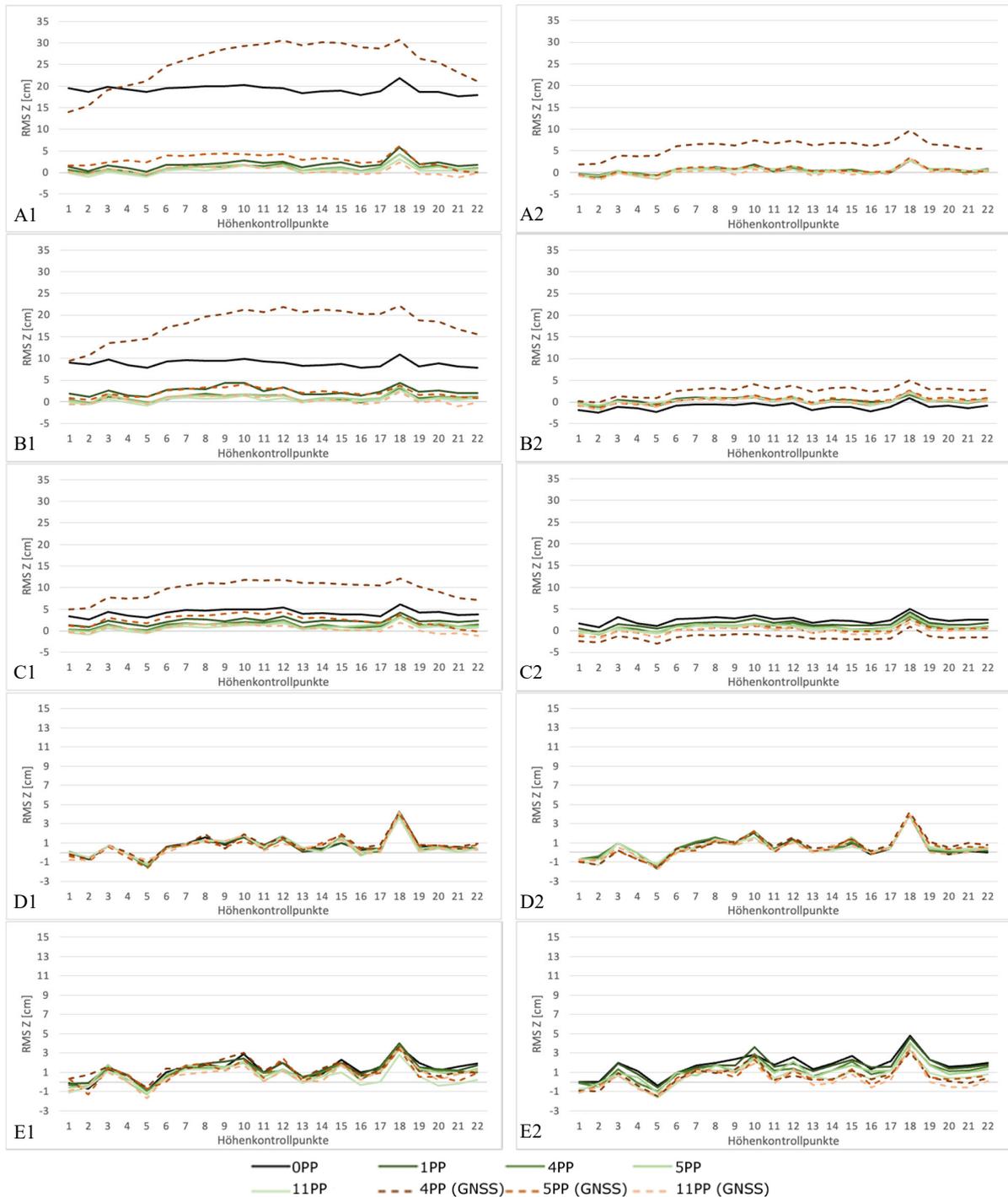


Abb. 4: Dargestellt sind die RMS-Werte der Z-Koordinaten an den Höhenkontrollpunkten des Höhenprofils für jede Aufnahmekonfiguration. A) *Regular 50*, B) *Kreuz 50*, C) *Regular 50/60*, D) *Regular 50/ Oblique 70*, E) *Multi-Oriented*; Simultankalibrierung 1) ohne zusätzliche Parameter, 2) mit zusätzlichen Parametern. Zur besseren Visualisierung unterscheidet sich die Skalierung der Y-Achse für D und E. Anmerkung: KP 18 ist ein im Schatten einer Laterne befindlicher Ausreißer.

### 3.4 Einfluss der Kamerapositionsgenauigkeit

Die Untersuchungsergebnisse der indirekten Georeferenzierung der Bildverbände lassen für diese Studie zwei Schlussfolgerungen zu:

- i) Bestehen die Flugmuster ausschließlich aus Nadiraufnahmen (TS1-TS3), sind elf PP notwendig, um ähnliche Genauigkeiten zu erreichen, wie bei der direkten Georeferenzierung und der zusätzlichen Nutzung eines PP. Wenn zusätzlich das Fourier-Reihen-Modell berücksichtigt wird, sind fünf PP ausreichend.
- ii) Werden die Aufnahmekonfigurationen um Schrägaufnahmen aus einer Kreuzbefliegung in unterschiedlichen Flughöhen ergänzt (TS4), müssen vier PP in die BBA integriert werden, um ähnliche Genauigkeiten zu erreichen, wie bei der direkten Georeferenzierung.

Bei der indirekten Georeferenzierung und einer Lagerung des Bildverbandes auf nur vier PP in den Blockecken sind typische Kuppelfehler erkennbar (Abb. 4). Erst durch die Einführung weiterer PP oder Schrägaufnahmen kann die Wölbung im 3D-Modell minimiert werden.

### 3.5 Auswirkung auf die Bestimmung der Parameter der inneren Orientierung

In diesem Abschnitt werden die in der Simultankalibrierung bestimmten Parameter der inneren Orientierung (Brennweite, Hauptpunktversatz) diskutiert. Während die Lage des Hauptpunktes bei allen Aufnahmekonfigurationen zufällige Variationen unter 1 Pixel aufweisen, zeigen die Brennweiten größere Abweichungen (Abb. 5). Wenn die Kamerapositionen mit schlechteren Genauigkeiten (indirekte Georeferenzierung) in die BBA eingehen, weist die Brennweite Unterschiede von bis zu 45 Pixel zwischen den Aufnahme- und Passpunktkonfigurationen auf. Des Weiteren ist ein Zusammenhang zwischen der berechneten Brennweite und der berechneten Höhe des Projektionszentrums gegeben; mit zunehmender Brennweit nimmt die Höhe zu und vice versa.

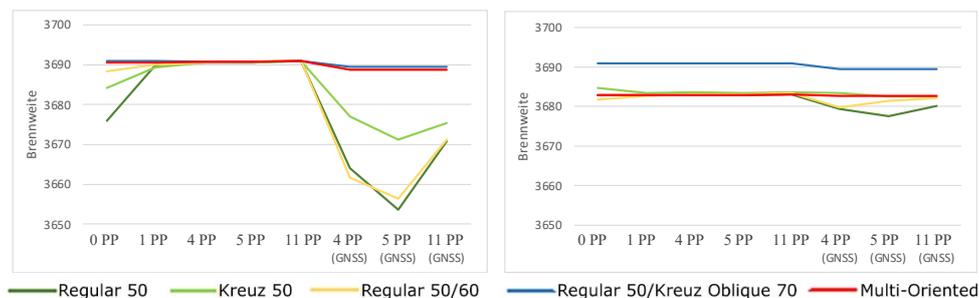


Abb. 5: Brennweiten nach Simultankalibrierung basierend auf Brown-Modell (links) und Brown-Modell + Fourier-Reihen-Modell (rechts)

Bei der direkten Georeferenzierung zeigen die Aufnahmekonfigurationen ohne PP ebenfalls größere Schwankungen in der Brennweitenbestimmungen. Wird jedoch mindestens ein PP bei der direkten Georeferenzierung verwendet, besitzt die Brennweite von TS2 bis TS5 geringe Unterschiede. Wenn zusätzlich die Parameter des Fourier-Reihen-Modells gebraucht werden, variiert die Brennweite nur noch sehr wenig zwischen den verschiedenen Passpunktkonfigurationen.

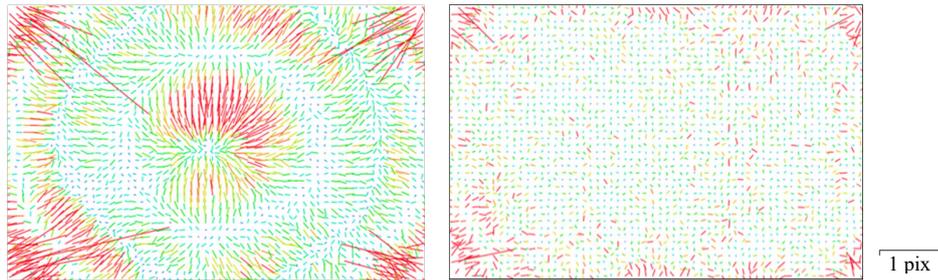


Abb. 6: Residuen der Verzeichnungen nach Simultankalibrierung basierend auf Brown-Modell (links) und Brown-Modell + Fourier-Reihen-Modell (rechts) für das TS1 *Regular 50*. Skalierungsfaktor 1000.

In Abb. 6 sind die Residuenmuster nach der Bestimmung der Verzeichnungsparameter des DJI Kameramodells der P4RTK dargestellt. Durch die zusätzlichen Korrekturparameter des Fourier-Reihen-Modells können systematische Abweichungen im Bildraum stark minimiert werden. Die Verbesserung im Bildraum führt auch zu einer höheren Genauigkeit der 3D-Modelle, das anhand der Abweichungen der KP sowie der HP erkennbar ist.

### 3.6 Betrachtung der räumlichen Fehlerverteilung

Der Cloud-to-Cloud-Distanz Vergleich zwischen den bildbasierten und TLS -Punktwolken bestätigt die Beobachtung dieser Studie, dass bei einer direkten Georeferenzierung der Bilddatensätze keine globalen systematischen Blockdeformationen in Form von Kuppel- oder Schalenfehlern auftreten (Abb. 7A). Dies wird insbesondere an den befestigten Flächen (Bahnsteig, Asphaltstraße, Fußgängerrampe) deutlich. Die Aufnahmeconfiguration mit dem geringsten Aufwand in der Datenakquise (TS1 *Regular 50* ohne PP) erzielt einen RMS Punktabstand von 1,7 cm, wenn die zusätzlichen Parameter des Fourier-Reihen-Modells berücksichtigt werden. Bei der komplexeren Aufnahmeconfiguration TS4 *Regular 50/ Oblique 70* (keine PP) unter Berücksichtigung nur des Brown-Modells ist der RMS Punktabstand ähnlich (1,8 cm). Die indirekt georeferenzierten UAV-Daten besitzen einen großen systematischen Fehler von stellenweise mehr als 30 cm für TS1 *Regular 50* und bei Verwendung von lediglich vier PP (Abb. 7B). Der RMS Wert der Punktabstände zwischen TLS- und UAV-basierter Punktwolke beträgt in diesem Fall 18,1 cm. Wird eine komplexere Aufnahmeconfiguration (z.B. TS4 *Regular 50/ Oblique 70*) geflogen, verbessert sich die Höhengenaugigkeit deutlich und der RMS Wert beträgt nur noch 1,9 cm.

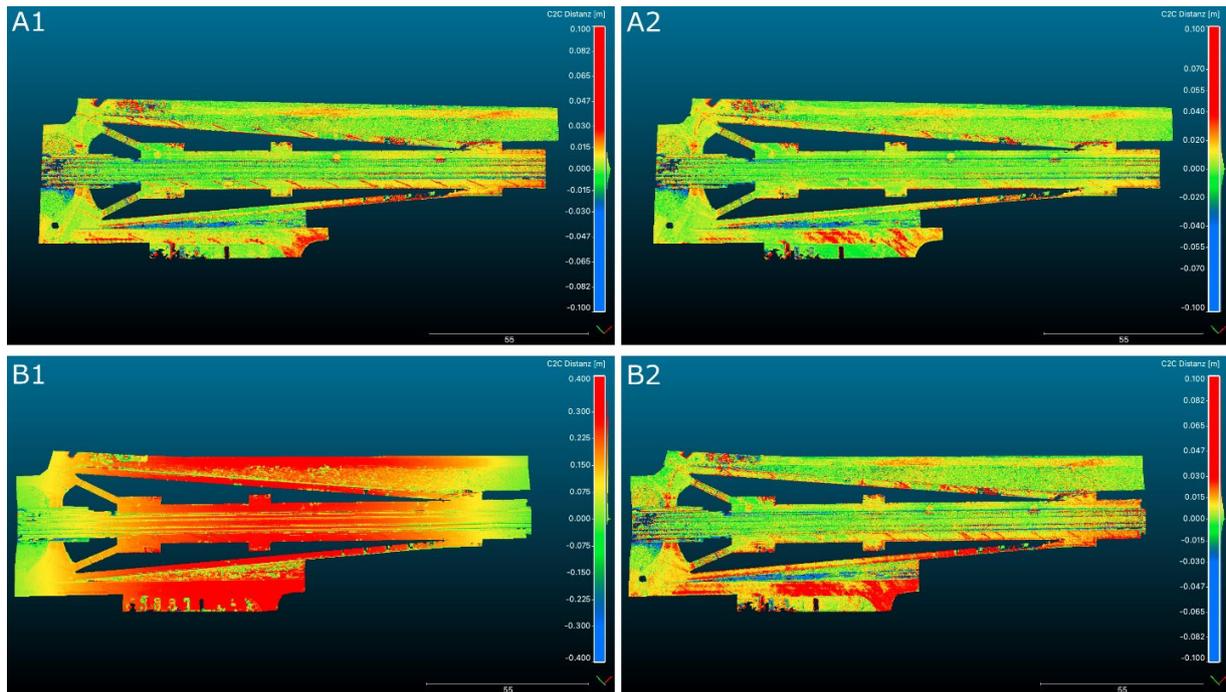


Abb. 7: PW-Vergleich (C2C Distanz) direkt (A) und indirekt (B) georeferenzierter UAV-basierter Punktwolken mit dem TLS-Datensatz. Vergleich TLS mit TS1 *Regular 50 – Fourier-Reihen-Modell* (A1) und TS4 *Regular 50/ Oblique 70* (A2), TS1 und TS4 ohne PP; PW-Vergleich TLS mit TS1 *Regular 50 GNSS* (B1) und TS4 *Regular 50/ Oblique 70 GNSS* (B2), TS1 und TS4 GNSS mit 4 PP

Der Vergleich mit den TLS-Daten erlaubt die Betrachtung lokaler Einflüsse auf die Genauigkeiten. Es wird erkennbar, dass sich Schattenformationen negativ auf die bildbasierten Punktwolken auswirken. Die Schatten von Bäumen, Masten oder Geländern sorgen für lokale Artefakte mit Abweichungen von bis zu 5 cm (Abb. 8). Diese Fehler treten unabhängig vom Befliegungsmuster und der Passpunktverteilung auf.

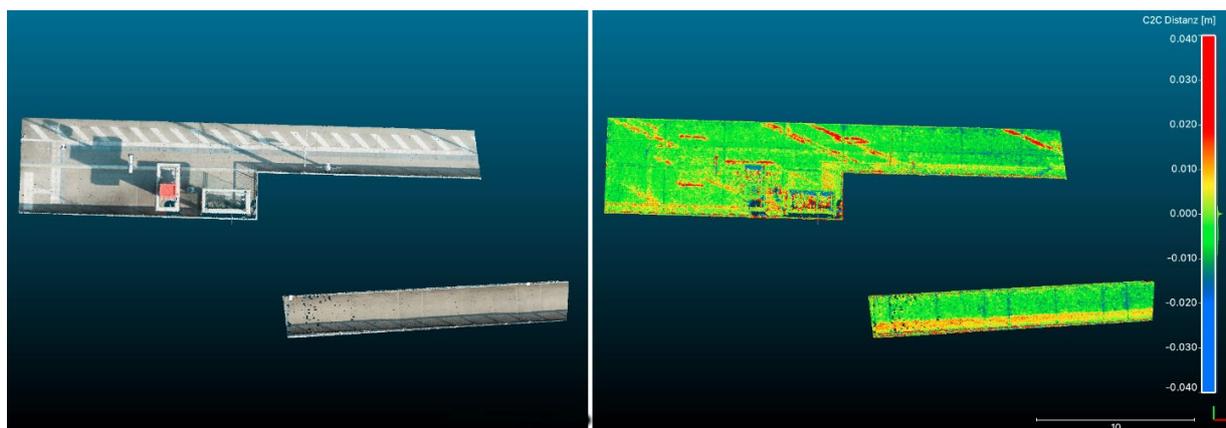


Abb. 8: Artefakte in den UAV-Punktwolken durch Schatten (Vergleich TLS – TS1 *Regular 50* - 0 PP)

## 4 Fazit und Ausblick

In dieser Studie wurde die Auswirkung fünf verschiedener Bildaufnahmekonfigurationen, fünf verschiedener Passpunktconfigurationen, unterschiedlicher Genauigkeiten der Kameraposition (direkte und indirekte Georeferenzierung) und zwei verschiedener Verzeichnungsmodelle auf die Genauigkeit eines mittels UAV-Photogrammetrie berechneten 3D Modells untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass durch eine direkte Georeferenzierung der Bildverbände Lage- und Höhen-genauigkeiten von bis zu 1 cm möglich sind. Setzt sich der Bilddatensatz ausschließlich aus Nadiraufnahmen in einer festen Flughöhe zusammen und es wird kein PP verwendet, entsteht ein konstanter Höhenoffset. Dieser kann durch das Hinzufügen eines einzigen PP, durch Schrägaufnahmen in einer anderen Flughöhe oder durch das Anwenden eines Fourier-Reihen-Modells der Verzeichnung in der BBA minimiert bzw. eliminiert werden. Dadurch kann auf eine umfangreiche und aufwendige Passpunktvermessung verzichtet werden. Dennoch ist es unabhängig von der Aufnahmeconfiguration empfehlenswert, eine kleine Anzahl an PP aufzunehmen, um sie als KP zur unabhängigen Beurteilung der erreichten Genauigkeit nutzen zu können. Die Erkenntnisse dieser Studie sind bedeutend für UAV-Einsätze mit einer hohen Wiederkehrzeit (z.B. Baustellenüberwachung oder Flächenmonitoring) oder in unwegsamem Gelände (z.B. Hangrutschung oder Bergbau).

## 5 Literaturverzeichnis

- BROWN, D.C., 1971: Close-Range camera calibration. *Photogrammetric Engineering*, **37**, 855-866.
- 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*, Heft 1, Stuttgart, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 17-30.
- CLOUDCOMPARE, 2021: GPL software, version 2.6.2, retrieved from <http://www.cloudcompare.org/>.
- HASTED, H., LUHMANN, T., PRZYBILLA, H.-J. & ROFALLSKI, R., 2021: Evaluation of the interior orientation modelling for cameras with aspheric lenses and image pre-processing with special emphasis to SFM reconstruction. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, **XLIII-B2-2021**, 17-24, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-17-2021>.
- HORN, B., 1987: Closed-Form Solution of Absolute Orientation Using Unit Quaternions. *JOSA A*, **4**(4), 629-642.
- LINDSTAEDT, M. & KERSTEN, T., 2018: Zur Bedeutung von Passpunkten bei der Aerotriangulation UAV-basierter Bildflüge. *UAV 2018 - Vermessung mit unbemannten Flugsystemen*, Schriftenreihe des DVW, Band **89**, Beiträge zum 169. DVW-Seminar am 19. und 20. Februar 2018 in Hamburg, Wißner-Verlag, Augsburg, pp. 81-101.
- PRZYBILLA, H.-J. & BÄUMKER, M., 2020: Untersuchungen zur Qualität des Realtime Kinematic GNSS Systems der DJI Phantom 4 RTK. *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V.*, Band **29**, 47-61.

- PRZYBILLA, H.-J., LINDSTAEDT, M. & KERSTEN, T., 2019: Untersuchungen zur Qualität bildbasierter Punktwolken aus UAV-Bildflügen. In: Luhmann, T., Schumacher C. (Hrsg.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2020, Berlin, Wichmann Verlag, 236-248.
- PRZYBILLA, H.-J., BÄUMKER, M., LUHMANN, T., HASTEDT, H. & EILERS, M., 2020: Interaction between direct georeferencing, control point configuration and camera self-calibration for RTK-based UAV photogrammetry. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, **XLIII-B2-2021**, 485-492, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2020-485-20>.
- SANZ-ABLANEDO, E., CHANDLER, J.-H., BALLESTEROS-PÉREZ, P. & RODRÍGUEZ-PÉREZ, J.-R., 2020: Reducing systematic dome errors in digital elevation models through better UAV flight design. *Earth Surface Processes and Landforms*, **45**, 2134-2147, <https://doi.org/10.1002/esp.4871>.
- SAPOS, 2021: Satellitenpositionierungsdienst SAPOS der sächsischen Vermessungsverwaltung. <http://www.landesvermessung.sachsen.de/sapos/>, letzter Zugriff am 09.04.2021.
- TADDIA, Y., STECCHI, F. & PELLEGRINELLI, A. 2019: Using DJI Phantom 4 RTK drone for topographic mapping of coastal areas. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, **XLII-2/W13**, 625-630, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-625-201>.
- TAKASU, T., 2021: RTKLIB: An Open Source Program Package for RTK-GPS. <http://gpspp.sakura.ne.jp/rtklib/rtklib.htm>, letzter Zugriff: 09.05.2021.
- TANG, R., FRITSCH, D. & CRAMER, M., 2012: New rigorous and flexible Fourier self-calibration models for airborne camera calibration. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **71**, 76-85, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.05.004>.