

Aktueller Forschungsstand zur Genauigkeit UAV-gestützter Ta- gebauvermessung

**Alexander Tscharf¹, Markus Rumpler², Gerhard Mayer¹,
Horst Bischof²**

¹Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft

²Technische Universität Graz, Institut für Maschinelles Sehen und Darstellen

ZUSAMMENFASSUNG:

Bedingt durch den immer häufigeren Einsatz unbemannter Flugsysteme in den verschiedensten Bereichen der Vermessung gewinnt auch die Frage nach der tatsächlich erreichten Genauigkeit, vor allem vor dem Hintergrund der Ergebnisverantwortlichkeit zusehends an Bedeutung. Erste Ergebnisse haben gezeigt, dass ein unkontrolliertes und völlig freies Fotografieren trotz hoher Redundanz in den Aufnahmen nicht zwingend zu der gewünschten Genauigkeit führt und eine sorgfältige, idealerweise autonome Flugplanung zur Gewährleistung einer definierten Qualität unerlässlich ist.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen, werden im vorliegenden Beitrag einerseits die bisherigen Ergebnisse anhand weiterer Datensätze verifiziert, und andererseits weitere zum Teil modellhafte Untersuchungen zur Identifizierung und Quantifizierung der genauigkeitsrelevanten Einflussparameter angestellt, sowie die aktuellen Ergebnisse präsentiert.

ABSTRACT:

Due to the increasing use of unmanned aerial systems in various fields of surveying the issue of accuracy, especially in light of accountability is growing in importance. First results have shown that uncontrolled and completely free photography does not necessarily lead to the desired accuracy, and careful, ideally autonomous flight planning is essential for ensuring a defined accuracy.

Based on these findings, this article first verifies the results so far using other data sets, as well as further studies and results concerning the accuracy-relevant parameters are presented.

1 Einleitung

Die rasanten technologischen Entwicklungen im Bereich der unbemannten Luftfahrzeuge (unmanned aerial vehicle, UAV), verstärkt durch die stetigen Verbesserungen automatisierter Bildauswertungen, führen zu einem vermehrten Einsatz dieser Technologien für vermessungstechnischen Anwendungen (BRIESE ET AL. (2013)). Auch in der bergmännischen Vermessung kommen vergleichbare Systeme, vor allem zu Nachtragung des Bergbaukartenwerks (§42 MARKSCHEIDEVERORDNUNG 2013), zur Massenermittlung, sowie zur Erhebung des Ist-Zustandes als Planungsgrundlage immer häufiger zum Einsatz. Diese Systeme vereinen die Vorteile der luftgebundenen und der terrestrischen Photogrammetrie, sind in der Lage nahezu jeden Aufnahmepunkt im Raum einzunehmen und können so typische geometrische Einschränkungen im Tagebau umgehen. (RUMPLER ET AL. (2013), MAYER UND PILGRAM (2013))

Vor allem vor dem Hintergrund der Ergebnisverantwortlichkeit gewinnt auch die Frage nach der tatsächlich erreichten Genauigkeit zusehends an Bedeutung. Während die Genauigkeit der klassischen Photogrammetrie hinlänglich untersucht ist, und auch die Frage der optimalen Planung von Kameranetzwerken im Nahbereich bereits oft Gegenstand von Forschungsarbeiten war (FRASER (1996)), so zeigen die bisherigen Ergebnisse, dass zur Gewährleistung definierter Genauigkeiten aufgrund der Vielzahl an genauigkeitsrelevanten Einflussparametern eine sorgfältige Flugplanung unerlässlich ist (TSCHARF ET AL. (2014)). Ein völlig freies und unkontrolliertes Fotografieren führt somit trotz hoher Redundanz nicht zwingendermaßen zur gewünschten Genauigkeit.

Bekannte Ansätze zur optimierten Planung terrestrischer Kameranetze basieren im Wesentlichen auf der Minimierung der Fehler der 3D Punkte unter Anwendung des Varianzfortpflanzungsgesetzes (ALSADIK ET AL. (2012)). ALSADIK ET AL. (2012) gehen dabei jedoch von gleichgewichteten Beobachtungen aus, und berücksichtigen den tatsächlichen Einfluss der unterschiedlichen Parameter, sowie etwaig bekannte a priori Genauigkeiten nicht.

Das Ziel der gegenständlichen Forschung ist jedoch die reproduzierbare Identifizierung und vor allem auch Quantifizierung der genauigkeitsrelevanten Einflussparameter, wobei der vorliegende Beitrag als auf den Ergebnissen von TSCHARF ET AL. (2014) aufbauend zu betrachten ist. Zunächst werden noch einmal kurz die notwendigen Schritte zur Erzeugung einer bildgestützten 3D Rekonstruktion beschrieben, obgleich das Hauptaugenmerk dabei auf der Weiterentwicklung der automatischen Georeferenzierung in Form des GPS-Alignments zur näherungsweise Georegistrierung liegt. In weiterer Folge werden die zuletzt präsentierten Ergebnisse anhand neuer Datensätze verifiziert und außerdem neue Erkenntnisse hinsichtlich der Rekonstruktionsgenauigkeit präsentiert.

2 Automatisierte Mehrbildauswertung

Vollautomatische, bildgestützte 3D Rekonstruktionen wurden zunächst in der Bildverarbeitung (HARTLEY UND ZISSERMANN (2000)) entwickelt, werden jedoch zunehmend auch für photogrammetrische Anwendungen eingesetzt. Sie sind in der Lage aus einer Vielzahl an (ungeordneten) Bildern die äußere Orientierung der Kamera und eine punktbasierte Szenenrekonstruktion zu errechnen. Je nach Anwendung können die erhaltenen 3D Rekonstruktionen in weitere Folge noch verdichtet beziehungsweise zu digitalen Oberflächenmodellen vermascht werden.

Abbildung 1 stellt schematisch den Ablauf bei der bildbasierten 3D Rekonstruktion dar, der auch im nächsten Abschnitt noch einmal kurz beschrieben wird. Für detailliertere Informationen zur verwendeten Pipeline und den einzelnen Bearbeitungsschritten, wird an dieser Stelle jedoch auf TSCHARF ET AL. (2014) beziehungsweise RUMPLER ET AL. (2013, 2014) verwiesen.

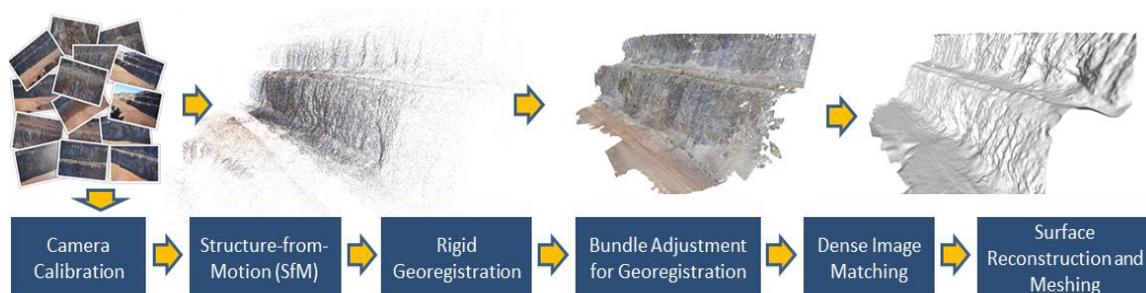


Abb. 1: Vollautomatische Mehrbildauswertungen sind in der Lage aus einer Vielzahl an ungeordneten Bildern die äußere Orientierung und eine punktbasierte Szenenrekonstruktion zu errechnen.

2.1 Structure from Motion

Hervorgerufen durch die Flexibilität müssen bei der Aufnahme mittels UAV ähnlich der terrestrischen Nahbereichsphotogrammetrie zumeist beliebige Bildkonfigurationen ausgewertet werden. Einer der wesentlichsten Schritte dabei, ist die Bestimmung der äußeren Orientierung (Lage der Bilder zum Zeitpunkt der Aufnahme), die in den folgenden bei TSCHARF ET AL. (2014) näher beschriebenen Schritten verwirklicht wird:

1. **Kamerakalibrierung:** Bestimmung der inneren Orientierung (Lage des Bildhauptpunkts, fokale Länge und Parameter der Linsenverzeichnung) unter Verwendung von individuell identifizierbaren „fiducial markers“ (DAFTRY ET AL. (2013))
2. **Merkmalsextraktion und Korrespondenzanalyse:** Finden von „Natural Features“ (SIFT, LOWE, D. (2004)) und Berechnung der Korrespondenzen bezie-

ungsweise der „matches“ auf Basis der euklidischen Distanz zwischen den Deskriptoren

3. **Relative Orientierung und Bündelblockausgleich:** Schätzung der relativen Lage der Bilder zueinander auf Basis der gefundenen Korrespondenzen und anschließende simultane Optimierung der intrinsischen und extrinsischen Parameter, sowie der 3D Objektpunkte (TRIGGS ET AL. (2000))

2.2 *Automatische Georeferenzierung*

Die dreidimensionalen Rekonstruktionen, die durch das bis hierhin beschriebene Mehrbildverfahren erstellt wurden, befinden sich zunächst aufgrund der fehlenden Längenmessung, nicht in einer metrischen Skalierung. Das lokale Koordinatensystem, der rekonstruierten Kameras und Objektpunkte wird anfänglich durch eines der gefundenen Kamerapaare festgelegt.

Eine metrische Skalierung der rekonstruierten Punktwolke kann erreicht werden, indem zumindest eine bekannte Distanz in die Auswertung integriert wird. Dies kann wiederum durch einen in der Szene und in der Rekonstruktion eindeutig zuzuordnenden Maßstab, beispielsweise einem bekannten Abstand zwischen zwei Kamerapositionen oder der Distanz zwischen zwei markanten Punkten erfolgen. In vermessungstechnischen Anwendungen ist jedoch in der Regel die absolute Position der Objektpunkte von Bedeutung, wozu das Modell mittels räumlicher Ähnlichkeitstransformation (3D-Helmert Transformation, 7-Parameter Transformation, beziehungsweise „Similarity Transform“) unter der Verwendung von zumindest 3 Vollpasspunkten vom Modellsystem in das übergeordnete Referenzsystem transformiert wird. Eine größere Anzahl an Punkten und eine robuste Schätzung der zur Registrierung nötigen Transformationsparameter (Rotation, Translation und Skalierung) mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate erhöhen die Genauigkeit der Ausrichtung des Modells jedoch deutlich.

2.2.1 *GPS-Alignment*

Die Verwendung und Zahl von unbemannten Flugplattformen zur Datenaufnahme aus der Luft hat sich in den letzten Jahren enorm gesteigert. Neben einer Vielzahl an kommerziell vertriebenen Multirotor- und kleinen Flächenflugzeug-Modellen etablierter Drohnenhersteller existiert mittlerweile eine nicht weniger engagierte Community, die eine beachtenswerte Anzahl unterschiedlichster in Eigenbau hergestellter Fluggeräte hervorgebracht hat, die in unterschiedlichsten Bereichen Einsatz finden. Als Hauptanwendungsfelder sind etwa Landwirtschaft und Umweltmonitoring, Vermessungsaufgaben in Bergbau oder Architektur, ebenso wie im Bereich Begutachtung und Inspektion von schwer zugänglichen Objekten zu nennen.

Die meisten, professionell eingesetzten Plattformen zur luftgestützten Datenaufnahme verfügen über einen GPS-Empfänger, der eine Positionsbestimmung des Fluggeräts, Stabilisierung im Flug und, je nach Einsatz, eine autonome Navigation zwischen Wegpunkten ermöglicht. Durch Aufzeichnung der GPS-Daten während des Fluges lassen sich die zurückgelegten Wege und Positionen auch im Nachhinein genau verfolgen und dokumentieren.

Für die Verwendung der GPS-Positionen zur Georeferenzierung ist es nun notwendig, die aufgenommenen Luftbilder mit den Positionsdaten zu verknüpfen. Dies geschieht in vielen Fällen nachträglich über einen gemeinsamen, synchronisierten Zeitstempel. Oft aber besteht bei kommerziellen Produkten auch eine direkte Hardware-Schnittstelle zwischen Onboard-GPS-Empfänger und Kamera, um den aufgenommenen Fotos bereits bei der Bildauslösung selbst eine GPS-Position zuzuordnen und in den Metadaten der Bilddatei zu speichern. Vielfach stehen neben Positionsdaten auch Aufzeichnungen der Inertialsensoren zur Verfügung, die zusätzlich Aufschluss über die Rotations- und Neigungswinkel des Fluggeräts Aufschluss geben.

Diese gespeicherten Positionsdaten für jedes Bild können nun benutzt werden, um die zuvor berechnete Rekonstruktion metrisch zu skalieren und in ein übergeordnetes Referenzsystem überzuführen. Die Qualität und Genauigkeit der Positionsdaten ist in den meisten Fällen jedoch nicht ausreichend, um eine genaue dreidimensionale Rekonstruktion und Vermessung der Szene zu ermöglichen. Aufgrund von Gewichtsbeschränkungen und einer maximalen Tragfähigkeit, abhängig vom verwendeten Fluggerät, werden meist sehr kleine Empfänger verwendet, welche dann nur eine beschränkte Genauigkeit erlauben, die im Bereich von 1-2 Metern liegen kann (PFEIFER ET AL. (2012)). Für eine grobe Positionierung und metrische Skalierung reicht das alleine aber schon aus, da je nach Anzahl an aufgenommenen Bildern eine große Anzahl an Positionsmessungen vorliegt, die für eine robuste Schätzung der Transformationsparameter verwendet werden kann.

2.2.2 Bündelblockausgleich mit GPS-Positionen und Passpunkten

Bei rein bildbasierter Rekonstruktion ohne Verwendung von Pass- bzw. Kontrollpunkten oder GPS-Daten ist zu beobachten, dass der Fehler zu den Rändern hin zunimmt. Es kommt im Bündelblockausgleich zu einer Verformung des Bildblocks. Eine schematische Darstellung ist in Abbildung 3 gezeigt. Erklärbar ist dieser Effekt dadurch, dass die Szene zum Rand hin von weniger Bildern abgedeckt wird. Weniger Bildüberlappung führt zu weniger Bildmessungen pro Objektpunkt und das hat zur Folge, dass sich das Ergebnis der Optimierung der Kamerapositionen und 3D-Objektpunkte im Bündelblockausgleich dadurch stärker verändern darf, und sich die 3D Positionen der Punkte und Kameras damit stärker verändern können.

Eine Möglichkeit, die durch Verformung des Bildblocks entstehenden systematischen Fehler zu vermeiden, ist die Einbringung bekannter Pass- und Kontrollpunkte sowie der grob per Onboard-GPS ermittelten Bildaufnahmepositionen in den Bündelblockausgleich (engl. bundle adjustment). Dies führt einerseits zu kleineren Residuen, andererseits lässt sich ein gleichzeitiger Übergang in ein entsprechendes Referenzkoordinatensystem bewerkstelligen.

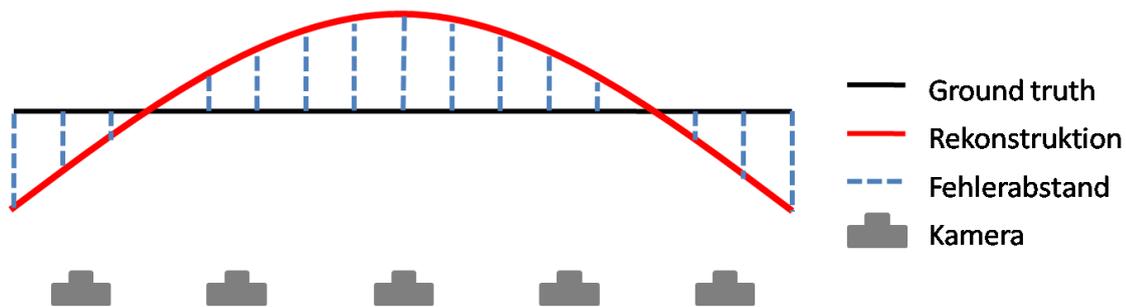


Abb. 2: Schematische Darstellung der Rekonstruktion und Fehlerverteilung

Nach grober, formerhaltender Transformation der bildbasierten 3D Rekonstruktion mittels bekannter GPS-Positionen in ein gewünschtes Referenzkoordinatensystem, kann diese Information nun auch im Bündelblockausgleich genutzt werden, um eine anfängliche Verzerrung des Bildblocks wie oben beschrieben zu reduzieren. Dazu werden im Ausgleichsverfahren während der Optimierung der Kamerapositionen die Abweichungen der bildbasierten Rekonstruktion von jenen der gemessenen GPS-Koordinaten ermittelt. Über eine robuste Huber-Fehlerfunktion (HUBER (1964)) wird der Einfluss der Abweichung zur gemessenen Position gewichtet, beziehungsweise bestraft. Dieses Vorgehen führt dazu, dass die Positionen der Bildaufnahmepunkte sich nur eingeschränkt bewegen dürfen und somit an die gemessenen GPS-Positionen gekoppelt werden.

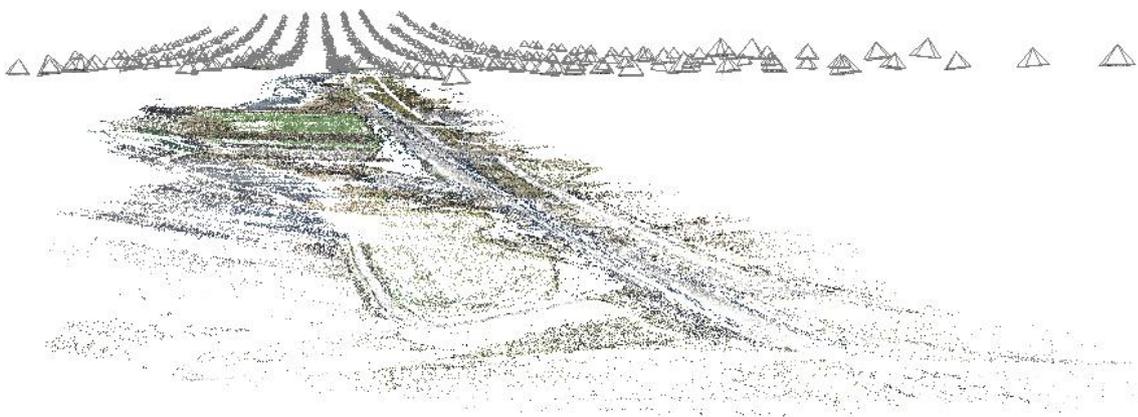


Abb. 3: Ergebnisse der photogrammetrischen Rekonstruktion ohne zusätzliche GPS Positionen im Bündelblockausgleich

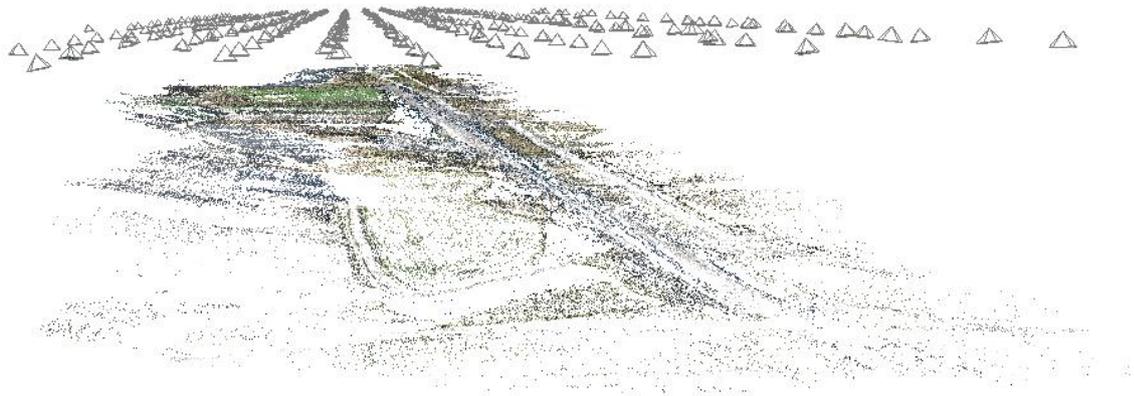


Abb. 4: Ergebnisse der photogrammetrischen Rekonstruktion mit zusätzlichen GPS Positionen im Bündelblockausgleich. Der direkte Vergleich mit Abbildung 3 zeigt die vollständige Reduzierung der anfänglich deutlich auftretenden Verzerrung von Bildblock und Objektpunkten.

Zusätzlich können Kontrollpunkte für die Korrektur der auftretenden Verzerrungen eingesetzt werden. Kontrollpunkte (engl. ground control points, GCP) bezeichnen bekannte, wiedererkennbare Punkte in der Szene, deren Position beispielsweise mittels konventioneller Vermessungsmethoden oder DGPS (Globales Positionssystem mit Differentialsignal) mit hoher Genauigkeit bestimmt wurde. Zur Signalisierung können die bei TSCHARF ET AL (2014) näher beschriebenen binär codierten „fiducial markers“ empfohlen werden, die eine eindeutige Zuordnung zwischen Kontrollpunkten und Bildmessungen der Kontrollpunkte im Bilddatenmaterial erleichtern. Die zusätzliche Information durch Kontrollpunkte und deren korrespondierenden Bildmessungen kann nahtlos in den Rekonstruktionsprozess integriert werden. Dazu wird der Bündelblockausgleich um die Verwendung von Pass- beziehungsweise Kontrollpunkten und deren Bildmessungen erweitert. Hierbei wird ähnlich den „natural features“ der Rückprojektionsfehler zwischen den Bildmessungen und projizierten Kontrollpunkten im Bündelblockausgleich zusätzlich gewichtet und bestraft.

Die Integration beider Mechanismen (Verwendung von Kontrollpunkten und GPS-Positionen der Kameras) erlaubt, dass selbst bei Objekten mit großer Ausdehnung, wie in Abbildung 4 dargestellt, nur geringe geometrischen Verzerrungen auftreten und somit die absolute Positionsgenauigkeit am rekonstruierten Objekt weiter gesteigert werden kann.

3 Genauigkeitsevaluierung

In der Bildverarbeitung wird häufig der Rückprojektionsfehler der Objekt- beziehungsweise Merkmalspunkte als Maß der Genauigkeit der äußeren Orientierung herangezogen. Für praktische Anwendungen ist jedoch die Genauigkeit der rekonstruierten Ob-

jektpunkte von wesentlich höherer Bedeutung. Zur Identifizierung und Quantifizierung der relevanten Parameter auf Basis der rekonstruierten Objektpunkte ist zunächst ein, mit probaten Mitteln erzeugtes, Referenzmodell notwendig, was über ein dichtes Netz an, sowohl in den Bildern, als auch in der Örtlichkeit eindeutig identifizierbaren Referenzpunkten realisiert wird. Zumeist wurden hierzu „fiducial markers“ eingesetzt und nur teilweise kamen rote, nichtcodierte Kreistargets zum Einsatz.

3.1 Beschreibung der Daten

Für die hier beschriebenen Genauigkeitsuntersuchungen wurden 2 unterschiedliche Plattformen verwendet. Einerseits der Oktorotorkopter „Falcon“ von Asctec, der mit einer frei dreh- und schwenkbaren Sony NEX 5 Systemkamera mit einer Brennweite von 16 mm und einer Auflösung von 16Mp ausgestattet ist. Und andererseits das Flächenflugzeug senseFly eBee mit einer Canon IXUS 127HS Kompaktkamera mit ebenfalls 16Mp, jedoch einer deutlich geringeren physischen Sensorgröße. Die wesentlichsten Kennwerte der verwendeten Kameras können auch der nachstehenden Tabelle 1 nochmals entnommen werden.

Tab. 1: Zusammenstellung der Kamera beziehungsweise Sensorspezifikationen

Kamera	Sensor-dimension	Auflösung	Brennweite (Kleinbild)	Pixelgröße
Sony NEX-5N	23.4 x 15.6 mm	4912 x 3246	24 mm	4.76 μm
Canon IXUS 127HS	6.16 x 4.62 mm	4608 x 3456	24 mm	1.34 μm

Der Oktorotorkopter wurde am Steirischen Erzberg und das Flächenflugzeug zur Vermessung eines Kiesgewinnungsbetriebes eingesetzt. In beiden Fällen wurde das Objekt deutlich überabgetastet, um im Anschluss im Zuge der Evaluierung virtuell unterschiedliche Kameranetzwerke simulieren zu können und somit den Einfluss einzelner Einflussparameter systematisch analysieren zu können. Der Rotorkopterdatensatz umfasst insgesamt 850 Bilder aus unterschiedlichsten Höhen, Distanzen und Richtungen zum Objekt. Mit dem Flächenflugzeug wurden 533 weitestgehend vertikale Aufnahmen in drei unterschiedlichen Höhenschichten (75, 100 und 140 m über Grund) aufgenommen. Der Vorteil der größeren Flughöhen liegt in der schnelleren Erfassung größerer Areale mit weniger Aufnahmen und in der damit einhergehenden Verringerung der anfallenden Datenmenge. Allerdings ist mit der größeren Flughöhe auch unmittelbar eine Verringerung der Bodenauflösung (Ground Sample Distance, GSD, vgl. Formel 1) und damit auch der erreichbaren Genauigkeit verbunden. Zusätzlich können aus zu großen Höhen die signalisierten Punkte nicht mehr robust trianguliert werden, was sich in weiterer Folge natürlich ebenfalls ungünstig auf die Genauigkeit auswirkt, und bis zu einem Scheitern der vollautomatischen Auswertung führen kann.

$$GSD [m] = \frac{\text{Pixelgröße [mm]} * \text{Flughöhe [m]}}{\text{Brennweite [mm]}} \quad 1$$

Einerseits zur Quantifizierung der erreichten Genauigkeit, und andererseits als Passpunkte für die Georegistrierung und Skalierung, wurden am Erzberg in Summe 129 und in der Kiesgrube 46 Punkte signalisiert und mittels Trimble S6 Totalstation mit einer mittleren Positionsgenauigkeit von 10 mm im System der Landesvermessung erfasst.

3.2 Methodik

Um die Einflussparameter zu identifizieren beziehungsweise um deren Einfluss zu quantifizieren, werden qualifizierte Subsets an Bildern aus den beschriebenen Datensätzen gebildet. Dabei wird vor allem der Einfluss der Redundanz (Überlapp) beziehungsweise Bildanzahl und der Bodenauflösung, sowie jener der Triangulationsgeometrie und der Art und Güte der Skalierung beziehungsweise Georegistrierung untersucht. Damit einhergehend werden auch die einzelnen Schritte der Mehrbildauswertung evaluiert, wobei sich die Untersuchungen zum jetzigen Stand hauptsächlich auf die unterschiedlichen Varianten der Georegistrierung beschränken, und Fragen der Feature Lokalisierung sowie der Vorab-Kamerakalibrierung beziehungsweise Simultankalibrierung derzeit ausgeklammert werden.

Die Genauigkeitsevaluierung erfolgt auf Basis des Vergleichs der aus den Bildern triangulierten 3D Koordinaten mit den konventionell vermessenen Referenzpunkten. Die 3D Objektkoordinaten werden aus den Bildmessungen und den absoluten Orientierungen der Kameras (nach der Georegistrierung) über räumlichen Vorwärtsschnitt berechnet. Der Nachteil, dass ein flächiges Verfahren über einen „Punkt-zu-Punkt-Vergleich“ evaluiert wird, wird nach Ansicht der Autoren durch die Gewissheit nur eindeutig identifizier- und vergleichbare Punkte zu betrachten, und damit Unschärfen, wie sie beim Vergleich zweier unterschiedlich aufgelöster Punktwolken entstehen, auszuschließen mit Sicherheit, aufgehoben.

4 Ergebnisse

Wie schon von TSCHARF ET AL. (2014) gezeigt ist es, mit einem mit einer Kamera ausgerüsteten UAV möglich, Tagebauvermessungen mit ausreichender Genauigkeit durchzuführen. Schon die ersten Ergebnisse haben jedoch gezeigt, dass die erreichbare Genauigkeit von einer Vielzahl an Parametern abhängig ist, die vom Piloten während der Aufnahme nur sehr schwer überblickt werden können und eine sorgfältige Planung des Flugpfades zur Gewährleistung einer definierten Qualität unerlässlich machen.

Im folgenden Abschnitt wird nun versucht die Ergebnisse der verschiedenen Kamerasubsets mit den untersuchten Einflussparametern in Beziehung zu setzen. Mit Sicherheit vorhandene Korrelationen werden dabei zunächst jedoch ausgeklammert.

4.1 Georegistrierung

Die Georeferenzierung stellt einen der wichtigsten Einflussparameter auf die absolute Rekonstruktionsgenauigkeit bei der photogrammetrischen Objektrekonstruktion dar. Wie bereits erwähnt, liefern rein bildbasierte photogrammetrische Rekonstruktionsverfahren zunächst keine metrisch korrekten Ergebnisse. Das Ergebnis unterscheidet sich zumindest durch eine 7-Parameter Ähnlichkeitstransformation von der Realität, wobei wie schon in Abschnitt 2.2 beschrieben besonders bei größeren Gebieten sehr deutliche systematische Verzerrungen zu den Rändern hin auftreten. Die Parameter dieser Transformation können aus zumindest 3 korrespondierenden 3D Punkten (Passpunkte) bzw. Kamerapositionen in beiden Systemen berechnet werden.

In Abschnitt 2.2.2 wurde gezeigt, dass die Integration der GPS-Informationen aus dem Flugkörper in die Auswertung, zwar zu einer signifikanten Verbesserung der Ergebnisse hinsichtlich auftretender Verzerrungen führt, für vermessungstechnische Anwendungen ist jedoch die Georegistrierung nur über GNSS nicht ausreichend. Trotz der großen Anzahl an Beobachtungen durch die verhältnismäßig große Anzahl an aufgenommenen Bildern, ist es aufgrund der geringen Genauigkeit der GPS-Information nahezu nicht möglich 3D Objektpunkte mit einer Genauigkeit unterhalb des Meterbereichs zu generieren. Mangels vorhandener Ausrüstung konnten im Rahmen der Forschungsarbeit ebenfalls auf dem Markt befindliche, mit Real Time Kinematic GNSS ausgestattete, RTK-UAVs noch nicht näher analysiert werden. Es ist somit nach derzeitigem Stand davon auszugehen, dass ausreichende Genauigkeiten im einstelligen Zentimeterbereich (vgl. MARKSCHEIDEVERORDNUNG (2013)) nur unter Verwendung von am Boden befindlichen Passpunkten erreicht werden können.

Aus zum Teil modellhaften Untersuchungen zum Einfluss von Anzahl und räumlicher Verteilung der 3D Passpunkte im zu vermessenden Gebiet, kann abgeleitet werden, dass die höchsten Genauigkeiten mit sieben beziehungsweise acht konventionell vermessenen Punkten erreicht werden konnten. Dadurch ist auch gewährleistet, dass verwertbare Ergebnisse produziert werden können, wenn aus unvorhersehbaren Gründen einzelne Punkte nicht zur Transformation verwendet werden können. Hinsichtlich der räumlichen Konfiguration ist darauf zu achten, dass die Passpunkte gleichmäßig im gesamten Gebiet verteilt werden, wobei vor allem auch die Höhenkomponente berücksichtigt werden muss. Außerdem sollten die Punkte nicht zu sehr am Rand des Bildblocks platziert werden, weil sich dadurch systematisch die Anzahl an Bildmessungen je Passpunkt dramatisch reduziert. Dies führt zu einer schlechteren Qualität der triangulierten Modellkoordinaten und in weitere Folge dann auch zu „falsch“ geschätzten Transformati-

onsparametern und ungenauen Objektpunkten. Wie jedoch auch aus Abbildung 5 deutlich erkannt werden kann, schwächt eine Integration der Passpunkte in den Bündelblockausgleich den zum Teil negativen Einfluss der Punktconfiguration signifikant ab. Der mittlere Fehler der Objektpunkte kann von 4,54 cm auf 2,45 cm reduziert werden.

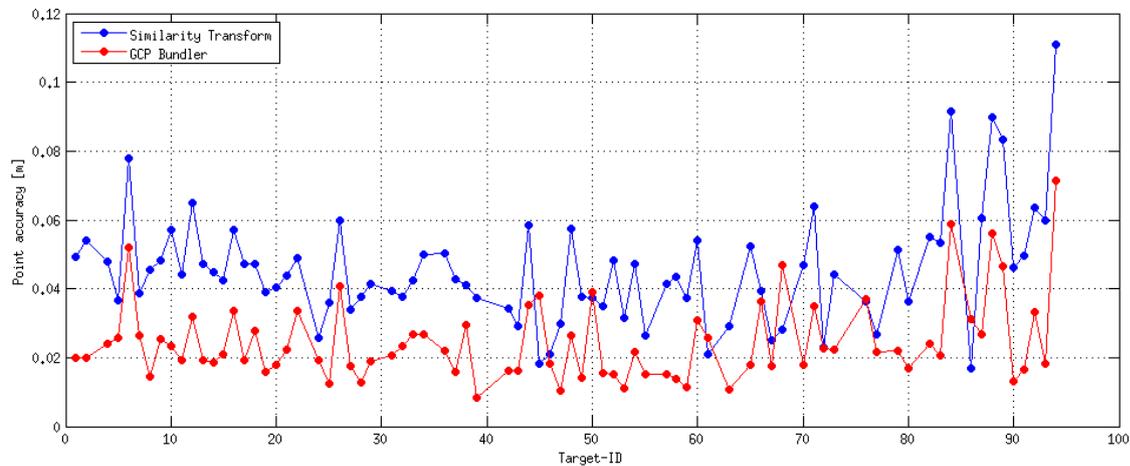


Abb. 5: Durch die Integration der Passpunkte in den Bündelblockausgleich, kann der Fehler an den zur Evaluierung signalisierten Punkten signifikant verringert werden.

4.2 Kameranetzwerk und Bildauflösung

RUMPLER ET AL. (2011) haben anhand synthetischer Aufnahmen in einem regelmäßigen Bildverband gezeigt, dass die Genauigkeit mit steigender Anzahl an Bildmessungen und mit der Größe des Triangulationswinkels zunimmt. Die von TSCHARF ET AL. (2014) präsentierten Ergebnisse anhand realer Daten weisen jedoch keinen signifikanten Zusammenhang zwischen der Anzahl an Beobachtungen und der erreichten Genauigkeit einzelner, über Vorwärtsschnitt berechneter Objektpunkte aus. Es wurde abgeleitet, dass nicht jede zusätzliche Beobachtung zwangsläufig zu einer Verbesserung der Genauigkeit führt. Der Einfluss des Kameranetzwerks innerhalb eines Multi-View Netzes ist somit wesentlich stärker als jener der Redundanz in der Bildaufnahme.

Um den Einfluss des Abstands zum Objekt und der Ground Sampling Distance (GSD), beziehungsweise der Bildauflösung zu analysieren, wurden unterschiedliche Bildsubsets sowohl für den Datensatz vom Erzberg, als auch für jenen der Kiesgrube, gebildet. Die Blickrichtung der Kameras wurde innerhalb enger Schranken konstant gehalten, so dass die optischen Achsen nahezu senkrecht auf die Objektoberfläche stehen. Der Objektstand variiert in drei Reihen, respektive Höhenschichten (15 m, 35 m und 50 m beziehungsweise 75 m, 100 m und 140 m), wobei in jeder Reihe die Bilder so ausgewählt wurden, dass der Überlapp mit 70% konstant bleibt. Zunächst wurde jede Reihe für sich, und anschließend Kombinationen betrachtet. Es zeigt sich sehr deutlich, dass mit zunehmender Entfernung, beziehungsweise abnehmender Auflösung, die Genauigkeit

abnimmt, wobei die höchste Genauigkeit durch die gemeinsame Auswertung mehrerer Reihen erreicht werden konnte. Abbildung 6 setzt die mittleren Fehler je Subset in Bezug zum Objektstand. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch aus der Gegenüberstellung der unterschiedlichen Flughöhen anhand des Datensatzes, der mit Flächenflugzeug aufgenommen wurde und Abbildung 7 entnommen werden kann.

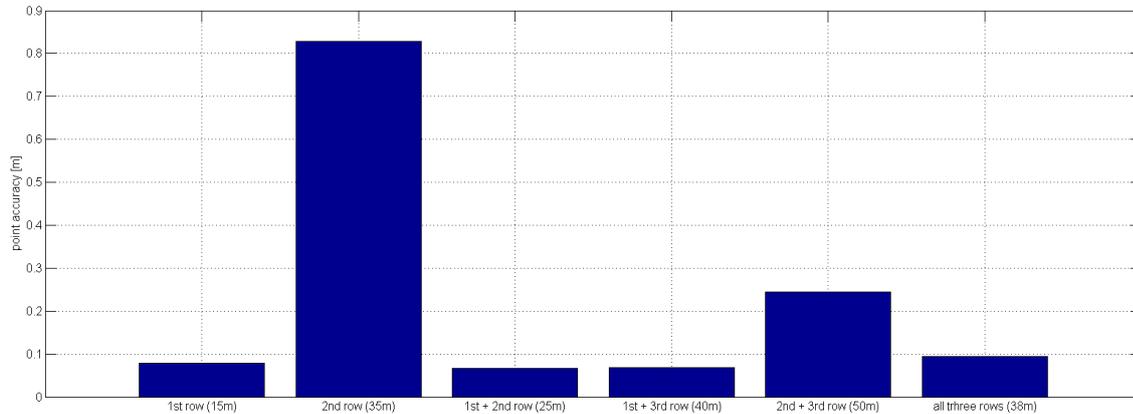


Abb. 6: Durch die Kombination unterschiedlicher Bildauflösungen können die höchsten Genauigkeiten erreicht werden.

Die aus größerer Entfernung aufgenommenen Subsets weisen deutlich größere Fehler aus. Das ist einerseits auf die geringere GSD und den damit verbundenen geringeren Detailgrad der Bilder zurückzuführen, andererseits nimmt der Einfluss des über alle Bilder weitestgehend konstanten Bildrauschens mit zunehmendem Objektstand zu. Dennoch führt eine Kombination der unterschiedlichen Entfernungen beziehungsweise Flughöhen zu einer Verbesserung der Ergebnisqualität.

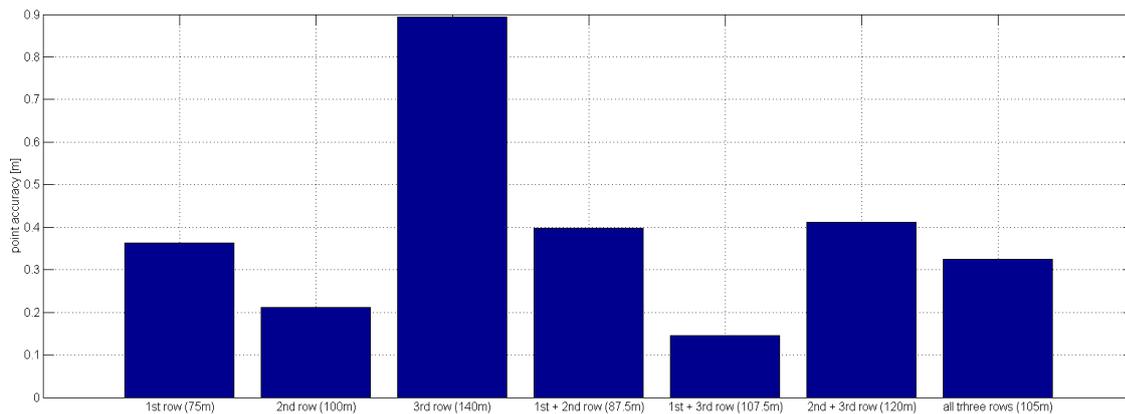


Abb. 7: Aufnahmen aus größerer Höhe schwächen die Fehlerfortpflanzung in den "unteren" Höhenschichten ab.

Das Fliegen in unterschiedlichen Höhen zur Verbesserung der Qualität ist eine gängige Vorgehensweise in der Luftbildvermessung, dementsprechend führt die Kombination unterschiedlicher Objektabstände auch in der UAV-Vermessung, die wesentlich näher

verwandt mit der terrestrischen Photogrammetrie ist, zu besseren Ergebnissen. Dieser Umstand ist vor allem auf eine Abschwächung der Fehlerfortpflanzung innerhalb der einzelnen Reihen zurückzuführen, und zusätzlich können Überblicksaufnahmen das Verknüpfen des Kameranetzwerks über größere Distanzen positiv beeinflussen, und systematische Verzerrungen vermeiden.

5 Schlussfolgerungen

Im vorliegenden Beitrag konnte gezeigt werden, dass es, unter Anwendung von Structure from Motion Verfahren besonders bei Objekten mit großer Ausdehnung zu deutlichen Verzerrungen der Rekonstruktion kommen kann. Eine Möglichkeit, diese Verzerrungen abzuschwächen beziehungsweise zu korrigieren ist die Integration der während des Fluges registrierten GNSS-Trajektorie.

Es zeigt sich allerdings auch deutlich, dass die so optimierten Ergebnisse in keiner Weise den vermessungstechnischen Anforderungen hinsichtlich der erreichten Genauigkeit entsprechen. Genauigkeiten die den gesetzlichen Ansprüchen (vgl. MARKSCHEIDEVERORDNUNG (2013)) genügen, können nach dem derzeitigen Stand der Forschung nur durch den Einsatz von speziell am Boden signalisierten und mit konventionellen Methoden vermessenen Passpunkten erzielt werden. Aus Gründen der Genauigkeit und auch um eine robuste Georegistrierung zu ermöglichen wird die Verwendung von sieben beziehungsweise acht gleichmäßig, und nicht nur an den Rändern des Bildblocks, im gesamten Gebiet verteilten Passpunkten empfohlen. Dabei ist vor allem auch auf eine höhenmäßige Verteilung der Punkte zu achten.

Zusätzlich zur Optimierung der Ergebnisse hinsichtlich auftretender Verzerrungen, kann die grobe Georeferenzierung über die GNSS Information auch unterstützend in der etwaig automatisierten Passpunktdetektion genutzt werden. Besonders bei größeren Flughöhen oder flacheren Blickwinkeln können die empfohlenen „fiducial marker“ unter Umständen nicht robust decodiert werden, was eine Zuordnung unter Nutzung der bekannten Position, gemeinsam mit der genäherten Georeferenzierung notwendig machen würde.

Außerdem konnten die bereits von TSCHARF ET AL. (2014) präsentierten Aussagen hinsichtlich des Einflusses des Kameranetzwerkes und der Redundanz der Beobachtungen verifiziert und näher analysiert werden. Die Kombination unterschiedlicher Bildauflösungen wirkt sich somit stark positiv auf die Güte der Ergebnisse aus, was vor allem auf eine Stabilisierung des gesamten Bildblocks und eine Optimierung der intrinsischen Parameter zurückzuführen ist. Abgesehen von den geometrischen Größen wie Auflösung, Redundanz und Triangulationswinkel, beeinflussen jedoch vor allem die Güte der Merkmalslokalisierung und der Bildmessung, hervorgerufen durch die stark unterschiedlichen Aufnahmepunkte, die veränderliche Belichtung und das Bildrauschen, die

Ergebnisse sehr stark. Aus diesem Grund wird eine systematische Analyse der angesprochenen Parameter auch Gegenstand weiterer Forschungen sein.

Literatur

ALSADIK B., GERKE, M., VOSSELMAN, G. (2012): Optimal Camera Network Design for 3D Modeling of Cultural Heritage, in: The Proceedings of the XXII ISPRS Congress, Melbourne, Australia, pp 7-12

BRIESE, C., FORTNER, R., SAGER, P., PFEIFER, N. (2013): Vom Modellflughobby zu unbemannten Flugsystemen für die Geodatenerfassung. In: VGI Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation 101 (2+3/2013), S. 64-74

DAFTRY, S.; MAURER, M.; WENDEL, A.; BISCHOF H. (2013): Flexible and User-Centric Camera Calibration using Planar Fiducial Markers, Institute for Computer Graphics and Vision, Graz University of Technology, Austria

FRASER, C.S. (1996): Network Design, in: Atkinson, Close-range Photogrammetry and Machine Vision. Whittles Publishing UK, pp. 256-282

HARTLEY, R.; ZISSERMANN, A. (2000): Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press

HUBER, P. J. (1964): Robust Estimation of a Location Parameter. In: The Annals of Mathematical Statistics 35(1), pp. 73–101

LOWE, D. (2004): Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. In: International Journal of Computer Vision 60 (2), S. 91–110

MARKSCHEIDEVERORDNUNG (2013), Verordnung des Bundesministers für Wirtschaft Familie und Jugend über Vermessungen beim Bergbau, das Bergbauartenwerk und die Erfassung von Bodenbewegungen 2013 (Markscheideverordnung 2013), BGBl. II Nr. 437/2012

MAYER, G.; PILGRAM, R. (2013): Neue Entwicklungen in der Tagebauvermessung. In: Schriftenreihe des Instituts für Markscheidewesen und Geodäsie (2013-1), S. 36–48.

PFEIFER N.; GLIRA P.; BRIESE C. (2012): Direct georeferencing with on board navigation components of light weight UAV platforms. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences

RUMPLER, M., IRSCHARA, A. AND BISCHOF, H., (2011): Multi-View Stereo: Redundancy Benefits for 3D Reconstruction. In: 35th Workshop of the Austrian Association for Pattern Recognition.

RUMPLER, M.; HOPPE, C.; WENDEL, A.; MAYER, G.; BISCHOF, H. (2013): Echtzeit-Qualitätsüberprüfung für zuverlässige UAV-gestützte Bilddatenerfassung und exakte,

automatisierte Mehrbildauswertung. In: VGI Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation 101 (2+3/2013), S. 88–100

RUMPLER, M.; DAFTRY, S.; TSCHARF, A.; PRETTENTHALER, R.; HOPPE, C.; MAYER, G.; BISCHOF, H. (2014): Automated End-to-End Workflow for Precise and Geo-accurate Reconstructions using Fiducial Markers. - in: Proceedings of PCV 2014, S. 135 – 142

TRIGGS, B., McLAUCHLAN, P., HARTLEY, R. AND FITZGIBBON, A. (2000): Bundle adjustment – A modern synthesis. In: Vision Algorithms: Theory and Practice, pp. 298–375

TSCHARF, A., RUMPLER, M., MAYER, G., BISCHOF, H. (2014): Zur Frage der Genauigkeit UAV-gestützter Tagebauvermessung. In: Schriftenreihe des Instituts für Markscheidewesen und Geodäsie (2014-1), S. 178–189