

UAV-gestützte Vermessung im Bergbau – Abschätzung der Genauigkeit bei Verwendung von Structure from Motion

**Alexander Tscharf¹, Gerhard Mayer¹, Friedrich Fraundorfer²,
Horst Bischof²**

¹Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft,
²Technische Universität Graz, Institut für Maschinelles Sehen und Darstellen,

ZUSAMMENFASSUNG:

Kaum eine technologische Neuentwicklung der letzten Jahrzehnte hatte auf Antrieb einen derart starken Einfluss auf die markscheiderische und geodätische Praxis wie das Aufkommen unbemannter Flugsysteme (unmanned aerial system, UAS). Bedingt durch Größe und Tragfähigkeit dieser Systeme, beschränkt durch die vorherrschenden rechtlichen Rahmenbedingungen, sowie aufgrund der stetigen Miniaturisierung und Weiterentwicklung moderner Digitalkameras sind ein Großteil der am Markt befindlichen Systeme heutzutage mit Kameras als „eigentliches Vermessungsinstrument“ ausgestattet. Aufgrund der bei Drohnenbefliegungen üblicherweise unregelmäßigen und ungeordneten Bildverbände erfolgt die Auswertung in der Regel mittels automatisierter Mehrbildauswertung aus dem Bereich Computer Vision (Structure from Motion, SfM), wobei trotz zahlreicher erfolgreicher Anwendungen grundlegende Untersuchungen und belastbare Aussagen zur erreichbaren Genauigkeit nach wie vor fehlen.

Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich die markscheiderische Forschung an der Montanuniversität nun schon seit mehreren Jahren mit der Anwendung von UAS im Bergbau, wobei insbesondere hinsichtlich der Ergebnisverantwortlichkeit die Identifikation und Wechselwirkung genauigkeitsrelevanter Einflussparameter den Kern der Arbeiten bildet. Neben Befliegungen im Realmaßstab, nehmen vor allem auch modellhafte Untersuchungen einen hohen Stellenwert in der Erforschung der gesuchten Zusammenhänge ein, welche im vorliegenden Beitrag präsentiert werden.

ABSTRACT:

Hardly any new technological development in recent decades has had such a strong influence on geodetic practice as the emergence of unmanned aerial systems (UAS). Due to the size and carrying capacity of these systems, limited by the current legal framework, as well as due to the constant miniaturization and further development of modern digital cameras, the majority of systems on the market today are equipped with cameras as "actual

surveying instrument". Due to the usually irregular and disordered image blocks in drone surveys, the evaluation is usually carried out by means of automated multi image evaluation from Computer Vision (Structure from Motion, SfM), whereby despite numerous successful applications fundamental investigations and reliable statements on the achievable accuracy are still missing.

Against this background, research at Montanuniversitaet Leoben has been dealing with the application of UAS in mining for several years, whereby the identification and interaction of influencing parameters relevant to accuracy forms the core of the work. In addition to real-scale aerial surveys, model-based investigations also play an important role in the research of the desired interrelationships, which are presented in this article.

1 Einleitung

Obwohl unbemannte Flugsysteme und die Auswertung mittels Structure from Motion (SfM) heutzutage bereits zur gängigen geodätischen und markscheiderischen Praxis zählen ist die Frage nach der erreichbaren Genauigkeit bzw. insbesondere nach den dahinterstehenden Mechanismen nach wie vor nicht abschließend behandelt. Durch die hohe Verbreitung vergleichbarer Systeme und zu meist wenig dokumentierte Algorithmik der Auswertesoftware bleibt die Frage nach der messtechnischen Qualität der abgeleiteten Ergebnisse oft unbeantwortet. Vielen Anwendern ist nicht bewusst, welchen Einfluss die Aufnahmesituation auf die Güte der Ergebnisse und vor allem auf die Simultankalibrierung der Kamera hat. Insbesondere da die Grundsätze der hochgenauen Industriephotogrammetrie bei UAV-Anwendungen in der Regel nicht oder nur sehr schwer eingehalten werden können, kommt der Planung des Bildverbands sowie dem Einsatz einer geeigneten Kamera besondere Bedeutung zu. (Luhmann (2018))

Die Schaffung wissenschaftlicher Grundlagen für eine genauigkeitsoptimierte Flugplanung nimmt nun schon seit mehreren Jahren einen wichtigen Stellenwert in der markscheiderischen Forschung an der Montanuniversität ein. Auf Basis verschiedener praktischer Untersuchungen im Real-, sowie im Modellmaßstab wird versucht genauigkeitsrelevante Einflussparameter zu identifizieren, deren Einfluss zu quantifizieren und vor allem auch einen Zusammenhang mit im Feld steuerbaren Parametern der Bildaufnahme herzustellen. Dabei wird vordergründig versucht Antwort auf die folgenden Fragen zu finden:

- Welche Parameter der Bildaufnahme zeichnen für die Genauigkeit der 3D-Rekonstruktion verantwortlich?
- Bestehen Wechselwirkungen bzw. Korrelationen zwischen den Einflussparametern?
- Inwieweit können die Einflüsse in Form systematischer Effekte an den Ergebnissen erkannt werden?
- Wo liegen Gemeinsamkeiten, wo Unterschiede zu klassisch photogrammetrischen Zugängen?
- Welche Aufnahmekonfigurationen führen zu genauen und vor allem reproduzierbaren Ergebnissen?

Im vorliegenden Beitrag werden Untersuchungen und Ergebnisse zu den aufgeworfenen Fragen präsentiert und in besonderer Weise auch versucht die Bedeutung der neugewonnenen Erkenntnisse für die markscheiderische Vermessung im Bergbau zu bewerten. Inwieweit ist die UAV-gestützte photogrammetrische Vermessung zur Erfüllung der markscheiderischen Aufgaben im Tagebau geeignet und worauf muss bei der Flugplanung besonders geachtet werden, um eine definierte Ergebnisgüte mit hoher Wahrscheinlichkeit sicherzustellen?

2 Genauigkeit der UAV-Photogrammetrie

Wie bereits erwähnt hat gemeinsam mit der neuen Trägerplattform des unbemannten Fluggeräts auch eine alternative Form der Auswertung Einzug in die photogrammetrische Anwendung genommen. Aufgrund der weitestgehend automatisierten Auswertung mittels Structure from Motion und der Vielzahl an entsprechenden kommerziellen und Open-Source Lösungen sind photogrammetrische Methoden nun für jedermann zugänglich geworden.

Kurz umrissen ist Structure from Motion in der Lage aus einer Vielzahl an zunächst ungeordneten Bildern vollautomatisch die Orientierung und eine punktbasierte Szenenrekonstruktion zu ermitteln, wobei die wesentlichsten Prozessschritte wie folgt zusammengefasst werden können:

7. **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))
8. **Merkmalsextraktion und Korrespondenzanalyse:** Finden von „Natural Features“ (SIFT, Lowe, D. (2004)) und Berechnung der Korrespondenzen beziehungsweise der „matches“ auf Basis der euklidischen Distanz zwischen den Deskriptoren
9. **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))

Aufgrund der Abkehr vom Prinzip mit möglichst wenigen Aufnahmen ein bestmögliches photogrammetrisches Ergebnis zu erzielen, und der Hinwendung zu „Qualität durch Masse“ bzw. Überbestimmung, sind auch die bekannten Grundsätze der Genauigkeit nur mehr bedingt gültig, bzw. bedürfen sie einer gesonderten wissenschaftlichen Untersuchung.

2.1 Erreichte Genauigkeit der UAV-Photogrammetrie

Wie bei allen photogrammetrischen Verfahren steht die erreichte Genauigkeit in unmittelbarem Zusammenhang mit der Bodenauflösung (Ground Sampling Distance, GSD) bzw. dem Aufnahmeabstand. Objekte die kleiner sind, als die Bildauflösung können nicht erfasst werden und entsprechend ist die erreichbare Genauigkeit in dieser Hinsicht klar begrenzt.

Erfahrungswerte, wie auch verschiedene wissenschaftliche Untersuchungen (z.B.: Luhmann (2018), Greiwe et al. (2014), Rumpler et al. (2016)) zeigen, dass die erreichbaren 3D-Genauigkeiten bei der

üblichen Anwendung in der Größenordnung von rund 1,5 GSD liegen, wobei unter üblichen im Bergbau herrschenden Bedingungen von einer Grenze von rund 2,5 bis 3 cm gesprochen werden muss.

Hierbei ist anzumerken, dass in der Lage durchaus Werte bis zu 1 GSD möglich sind, wobei in der Höhe mit Werten von 2 bis 3 GSD gerechnet werden muss. Natürlich gilt dies nur für den üblichsten Fall des mehr oder weniger flachen Objekts und vertikaler Aufnahmerichtung und muss z.B.: beim Einsatz von UAVs zur Bruchwandvermessung umgedacht werden. Allgemeiner formuliert würde das heißen, dass in Line of Sight geringere Genauigkeiten zu erwarten sind, und quer zur Aufnahmerichtung Ergebnisse in der Größenordnung der Bildauflösung möglich sind.

Ein Aspekt, der vor allem bei stark konvergenten, in der Aufnahmetiefe gestaffelten und stark überlappenden Bildverbänden positiv zur Güte der Ergebnisse beiträgt ist die Integration von äußeren Bedingungen (z.B.: Passpunkte oder hochgenaue Kamerapositionen) in den Bündelblockausgleich, wie auch anhand des Beispiels einer Bruchwand am Steirischen Erzberg in Abb. deutlich erkannt werden kann (Rumpler et al. (2014)). Die blaue Linie stellt dabei die Ergebnisse nach starrer Ähnlichkeitstransformation, und die rote nach Integration von Passpunkten in den Bündelblockausgleich dar. Jeder Punkt auf den Linien repräsentiert dabei einen am Objekt angebrachten Kontrollpunkt. Es zeigt sich deutlich, dass die Genauigkeit an allen Objektpunkten erhöht werden kann, und überdies werden Ausreißer geglättet was gleichbedeutend mit der Korrektur systematischer Deformationen der Rekonstruktion ist.

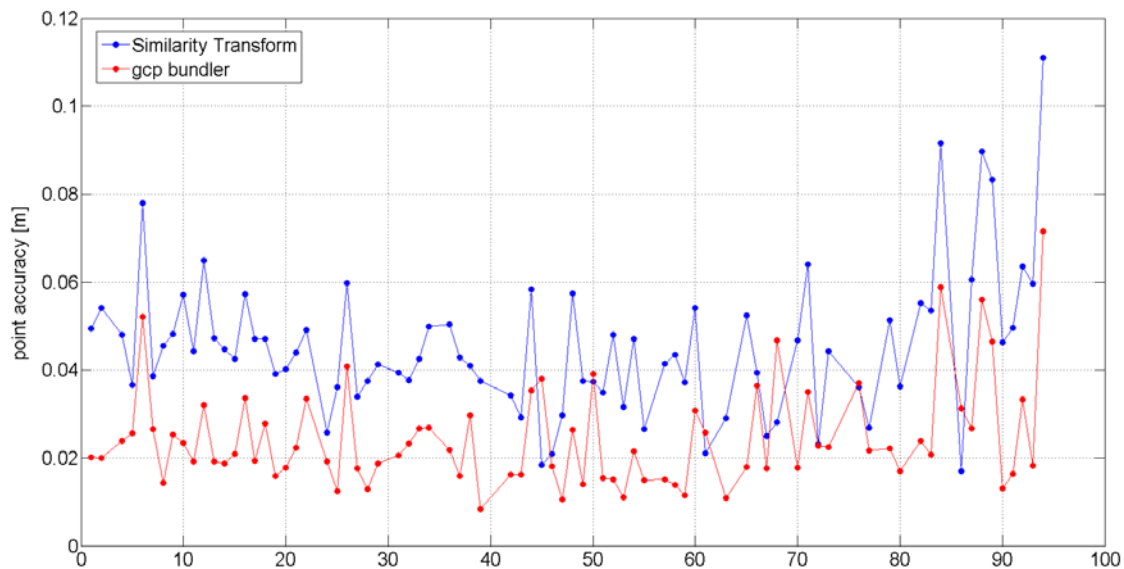


Abb. 1: Durch die Integration externer Constraints in den Bündelblockausgleich ist eine deutliche Genauigkeitssteigerung möglich (Rumpler et al. (2014))

Am Beispiel des „bedingten“ Bündelblockausgleichs zeigt sich jedoch auch sehr deutlich eine „Gefahr“ der automatischen Auswertung mittels Structure from Motion. Nicht jeder Bildverband und natürlich auch nicht jede Passpunktconfiguration und Gewichtung innerhalb der Optimierung führt auch zu einer Verbesserung der Ergebnisse. So führt eine zu starke Gewichtung der Passpunkte bekanntermaßen zu einer Deformation des Bildverbands hin zu den angesprochenen Passpunkten, die oft mit sehr großen Fehlern in den Zwischenbereichen einhergeht. Wesentlich schlimmer – weil von den meisten Anwendern nicht berücksichtigt – ist der Einfluss des Bildverbands an sich. Die

bei photogrammetrischen Aufnahmen in der Fläche oft durchgeführten regelmäßigen Streifenflüge in einer zuvor definierten Flughöhe sind grundsätzlich nicht wirklich gut für die beschriebene Optimierung geeignet. Die „schwache Verknüpfung“ der Bilder untereinander, die überdies alle in einer Ebene liegen, führt - vor allem wenn die Kamerakalibrierung in diesem Schritt mitoptimiert werden soll – oftmals zu einer Verschlechterung der Ergebnisse. Durch falsch geschätzte Parameter der inneren Orientierung und Verzeichnung wird die Qualität der Bildmessungen verschlechtert und auf diesem Weg fehlerhafte Rückprojektionen in den Bündelblock eingebracht, die im Endergebnis zu einer Verschlechterung der Genauigkeit führen können.

2.2 Einflussfaktoren auf die Genauigkeit

Grundsätzlich verhält sich die photogrammetrische Objektgenauigkeit auch bei den neuen Verfahren wie seit Jahrzehnten bereits bekannt. Wesentliche Einflussgrößen wie Bildmaßstab, Bildmess- und Matching-Genauigkeit und Konfigurationen von Strahlenschnitten sind nach wie vor gültig (Luhmann (2018)), allerdings kommt den angesprochenen Größen vor dem Hintergrund der automatischen Bildzuordnung besondere Bedeutung zu, und nicht alle aus der Photogrammetrie bekannten Zusammenhänge können direkt auf die Auswertung mittels SfM übertragen werden.

Die Verknüpfung der einzelnen Bilder zu einem Bildverband erfolgt automatisch und weitestgehend ohne menschliches Zutun bzw. Qualitätsüberprüfung. Naturgemäß passieren bei diesen automatisch durchgeführten und unkontrollierten Prozessschritten auch Fehler, die immer wieder Ausreißerelimination und nichtlineare Optimierungsschritte notwendig machen. Entsprechend ist es unmöglich die Auswirkungen bzw. Wirkmechanismen der oben angesprochenen Einflussgrößen direkt nachzuvollziehen und zu beschreiben.

Wissenschaftliche Einigkeit besteht derzeit lediglich hinsichtlich der relevanten Parameter. Deren konkrete Auswirkung auf die Güte der Ergebnisse ist nicht immer eindeutig und klar bzw. zumindest nicht abschließend quantitativ untersucht worden.

- **Kamera:** Neben der Optik und Abbildungsgeometrie der Objektive kommt insbesondere auch dem verbauten Sensor eine große Bedeutung zu. Neben der Auflösung ist vor allem auch die physische Sensorgröße (Größe des Einzelpixels) von Bedeutung und überdies propagieren z.B.: Spreckels et al. (2015) den Einsatz von Foveon Sensoren anstatt der üblichen CCD-CMOS.
- **Aufnahmeabstand:** Wie erwähnt ist die erreichbare Genauigkeit unmittelbar von der GSD abhängig, die zumindest im Falle der Nadiraufnahme eine Funktion von Aufnahmeabstand, Brennweite und Bildauflösung ist.
- **Aufnahmerichtung:** Es ist bekannt, dass die Tiefengenauigkeit bei photogrammetrischen Verfahren in der Regel geringer ist als quer zur Aufnahmerichtung. Bei geometrisch komplexen Objekten wie im Tagebau üblich kommt der Ausrichtung der Blickrichtung relativ zur Objektoberfläche besondere Bedeutung zu.
- **Konfiguration von Strahlenschnitten (Aufnahmegeometrie):** Ein zentraler Schritt bei Structure from Motion ist der Bündelblockausgleich (bundle adjustment), wobei die Bündel hier im Gegensatz zur klassischen Aerotriangulation wesentlich mehr Strahlen umfassen.

Durch möglichst konvergente Strahlenschnitte und die Kombination verschiedener Aufnahmeentfernungen und -Richtungen wird der Bildverband als Ganzes stabilisiert und systematische Deformationen vermieden.

- **Bildmess- und Matching-Genauigkeit:** Die Genauigkeit der Bildmessung bildet die Grundlage für die dreidimensionalen Bildstrahlen und somit auch für die 3D-Rekonstruktion. Besondere Bedeutung kommt der Bildmessgenauigkeit bei der Optimierung im bundle adjustment zu, wo fehlerhafte Bildmessungen auf Kosten der inneren und äußeren Orientierung optimiert werden.
- **Art und Güte der Georeferenzierung bzw. Skalierung:** Eine rein bildbasierte Objektrekonstruktion ist zunächst maßstabsfrei und bedarf immer zumindest einer metrischen Länge zur Skalierung oder mehrere Passpunkte zur starren Ähnlichkeitstransformation in ein übergeordnetes Koordinatensystem. Die Fehler bei der Bestimmung der Passpunkte oder Referenzlängen müssen hierbei natürlich zu den Fehlern der Bildauswertung addiert werden.

Durch die „neue Form“ der Bildaufnahme bedarf es auch besonderer Sorgfalt die gewählten Parameter auch tatsächlich einzuhalten und insbesondere das automatische Aufsuchen der Punktkorrespondenzen schränkt die Aufnahmegeometrie stark ein. „Optimale“ Strahlenschnitte unter einem Winkel von 90° sind in der Regel nicht realisierbar, da die Genauigkeit des Feature Matching ab einem Winkel von rund 30° signifikant abnimmt, wie Zeisl et al. (2009) am Beispiel des SIFT-Deskriptors (Lowe (2004)) zeigen.

3 Untersuchungen

Wie erwähnt bilden Untersuchungen zur robusten Identifizierung und Quantifizierung sowie zur Erforschung der zugrunde liegenden Wirkungsmechanismen seit mehreren Jahren einen Forschungsschwerpunkt an der Montanuniversität. Im Wesentlichen werden hierzu bekannte Referenzobjekte bzw. -Gebiete auf verschiedene Weisen photogrammetrisch erfasst, auf Basis von Vergleichen zur bekannten Referenz die Genauigkeit bewertet und versucht Zusammenhänge zwischen der Bildaufnahme und der erreichten Genauigkeit herzustellen.

Neben realen Befliegungen (Tscharf et al. (2016)) werden - insbesondere aufgrund der Möglichkeit verschiedene Bildverbände zu studieren, ohne dabei mit den gesetzlichen Vorgaben in Konflikt zu treten und vor allem auch ohne sehr große Testgebiete messtechnisch vorzubereiten und über längere Versuchszeiträume instand zu halten – auch modellhafte Untersuchungen angestellt.

Aufgrund der Komplexität der 3D-Rekonstruktion mittels SfM ist eine deterministische Beschreibung der jeweiligen Einflüsse im Sinne der Fehlerfortpflanzung unmöglich, weshalb nur numerische oder auch empirische Verfahren zur mathematischen Beschreibung der gesuchten Zusammenhänge in Frage kommen. Die statistische Versuchsplanung (Siebertz et al. (2010)) als Methodik zur systematischen Planung und statistischen Auswertung von Versuchen stellt dementsprechend ein wichtiges Werkzeug dar. Mit verhältnismäßig geringem Aufwand kann durch strukturierte Planung der funktionale Zusammenhang von Einflussparametern und Ergebnissen ermittelt und mathematisch beschrieben werden. Dabei werden verschiedene Faktoren auf mehreren Stufen getestet und abhängig von der geplanten Feldkonstruktion miteinander kombiniert.

Bei den präsentierten Analysen wurde das Hauptaugenmerk auf jene Parameter gelegt, die vom Anwender im Feld auch tatsächlich gesteuert werden können bzw. auch gesteuert werden, und die überdies auch in den meisten verfügbaren Flugplanungswerkzeugen (z.B.: Pix4Dcapture oder UgCS) implementiert sind:

- Flughöhe (A): Getestet auf 2 bzw. 3 Stufen, 25 und 150 m im Realmaßstab, 32, 128 und 160 cm im Modellmaßstab 1:100
- Überlapp longitudinal (B): Getestet auf 2 Stufen, 70 und 90 %
- Überlapp lateral (C): Getestet auf 2 Stufen, 70 und 90 %
- Blickwinkel relativ zum Objekt (D): Getestet auf 2 Stufen, 45 und 90°
- Passpunktkonfiguration zur Georegistrierung (E): 2 verschiedene räumliche Konfigurationen mit je 6 Passpunkten getestet

Die Bildaufnahme erfolgte wie bei den meisten UAV-Einsätzen üblich, in regelmäßigem Raster und parallelen Bahnen über dem Gebiet und außerdem wurde jeder Bildverband zweimal unter den exakt selben Bedingungen getestet um die statistische Aussagekraft der Ergebnisse zu erhöhen und auch Aussagen zur Reproduzierbarkeit und Belastbarkeit der Ergebnisse treffen zu können.

Besonders darauf hingewiesen werden muss an dieser Stelle auch auf den Umstand, dass eine kombinierte Auswertung verschiedener Aufnahmekonfigurationen nicht Gegenstand der hier präsentierten Arbeiten ist. Das Ziel der Untersuchungen ist nicht das Finden einer „optimalen“ Aufnahmekonfiguration, sondern vielmehr das Erkennen von Zusammenhängen zwischen den Einflussfaktoren und der Ergebnisgröße in Form der erreichten Genauigkeit.

3.1 Realmaßstab

Die Realmaßstäblichen Untersuchungen fanden in einem Hartgesteinssteinbruch nahe Leoben statt, wo ein rund 100x120 m großes Versuchsfeld mit 28 automatisch detektier- und identifizierbaren Pass- und Kontrollpunkten ausgestattet wurde, die mittels tachymetrischer Netzmessung hochgenau eingemessen wurden. Die Befliegungen erfolgten mit der am Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft vorhandenen UAV-Ausrüstung, die mit einer Sony Alpha 6000 Systemkamera mit 24Mp und einem 16 mm Festbrennweitenobjektiv ausgestattet ist. (Tscharf et al. (2016))

Aus der Kombination der zuvor genannten Parameter ergeben sich in Summe 64 Datensätze, wobei im vorliegenden Fall nur 52 durchgeführt und ausgewertet werden konnten. Aufgrund der Größe des gewählten Gebiets in Kombination mit den gewählten Faktorstufen war es nicht möglich die hohen Flüge mit geringem Überlapp auszuwerten. Das gewählte Gebiet wurde zu klein dimensioniert.

Dieser Umstand gemeinsam mit der Tatsache, dass die gewählten Faktorstufen unter Laborbedingungen exakter eingehalten werden können, führten – verstärkt durch die positiven Erfahrungen in anderen Bereichen der photogrammetrischen Forschung (Tscharf et al. (2018) - zur ergänzenden Durchführung einer vergleichbaren Kampagne im Maßstab 1:100, die nachfolgend kurz dargestellt wird.

3.2 Modellmaßstab

Die Versuche wurden im Maßstab 1:100 durchgeführt und das rund 2x3 m große Versuchsfeld wurde mit insgesamt 33 Pass- bzw. Kontrollpunkten versehen, die wiederum als kreisrunde und automatisch detektierbare „Fiducial Marker“ ausgeführt wurden. Die Bildaufnahme erfolgte wieder mit der zuvor beschriebenen Sony Alpha 6000, allerdings manuell und zur Gewährleistung der Bahnhaltigkeit wurde die Kamera händisch an eine Führungsschiene angelegt wo zusätzlich die geplanten Bildpositionen markiert waren. Aufgrund des geringeren Objektabstands waren Anpassungen in der Fokussierung der Optik notwendig, da die im Realmaßstab gewählte Fokuseinstellung „unendlich“ bei Objektabständen im Bereich weniger Dezimeter natürlich nicht verwendet werden kann.

Unter den beschriebenen Bedingungen war es schlussendlich auch möglich alle 96 Bildverbände (durch die dritte Stufe des Faktors Flughöhe ergaben sich 32 weitere Datensätze) erfolgreich zu prozessieren und zu analysieren, und somit den Einfluss der ausgewählten Parameter auf die erreichte Genauigkeit zu studieren.

4 Ergebnisse

Die Beurteilung der Genauigkeit erfolgt auf Basis der beschriebenen Pass- und Kontrollpunkte. Für jeden Versuchsdurchlauf bzw. Bildverband werden die Koordinaten der Kontrollpunkte bestimmt und diese mit den bekannten Referenzkoordinaten aus der herkömmlichen Vermessung gegenübergestellt und verglichen. Als Fehlermaß wird die Länge der 3D-Vektoren zwischen den Koordinaten aus der Bildauswertung und den Referenzkoordinaten herangezogen. Um jedem Datensatz genau einen „Qualitätswert“ zuzuweisen, wird in weiterer Folge das arithmetische Mittel über die einzelnen Vektoren gebildet, wodurch Aussagen über die mittlere Genauigkeit je Datensatz möglich werden.

Da in vielen Fällen üblich, und zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse im Real- und Modellmaßstab wurden die mittleren Fehler für die folgenden Darstellungen auch durch die mittlere GSD dividiert, und die Fehler somit als Vielfaches der Bodenauflösung dargestellt.

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse aus Real- und Modellmaßstab getrennt präsentiert und anschließend eine Gegenüberstellung vorgenommen. Abschließend wird noch kurz auf die statistische Analyse der Daten zur Parameteridentifikation eingegangen, woraus statistisch signifikante Einflussgrößen abgeleitet werden können.

4.1 Realmaßstab

Betrachtet man alle 52 vorhandenen Datensätze in Abb. 2 so zeigt sich zunächst einmal, dass sich die erreichte mittlere Genauigkeit zwischen 1,9 und 27,5 GSD bewegt, wobei eine markante Sprungstelle mit der Flughöhe erkennbar ist. Entgegen der ursprünglichen Erwartung, dass eine höhere Auflösung bzw. geringere Flughöhe zu einer höheren Genauigkeit führt zeigt sich anhand der durchgeführten Flüge genau das Gegenteil. Die „150 m Flüge“ sind auffallend genauer als jene, die in 25 m Flughöhe aufgenommen wurden, was auch in Abb. 2 wo die Datensätze nach aufstei-

gender Flughöhe geordnet dargestellt sind, deutlich erkannt werden kann. Dieser Effekt zeigt sich zusätzlich nicht nur anhand der Vielfachen der Ground Sampling Distance, sondern auch absolut in metrischen Fehlern.

Dieser Umstand liegt wohl darin begründet, dass zur Erfassung eines abgegrenzten Gebiets bei einer geringeren Flughöhe wesentlich mehr Bilder aufgenommen werden müssen, als bei höheren Flügen gleichen Überlapps. Der Bildverband verfügt somit über eine wesentlich größere Anzahl an „instabilen Gelenken“ was sich auch in der 3D-Rekonstruktion widerspiegelt. Je weniger Bilder, desto stabiler wird der gesamte Bildverband und die Unsicherheit in der Bildzuordnung nimmt ab. Die 3D-Rekonstruktion wird demnach genauer, wenn es gelingt das Objekt mit möglichst wenigen, stark überlappenden Bildern aufzunehmen.

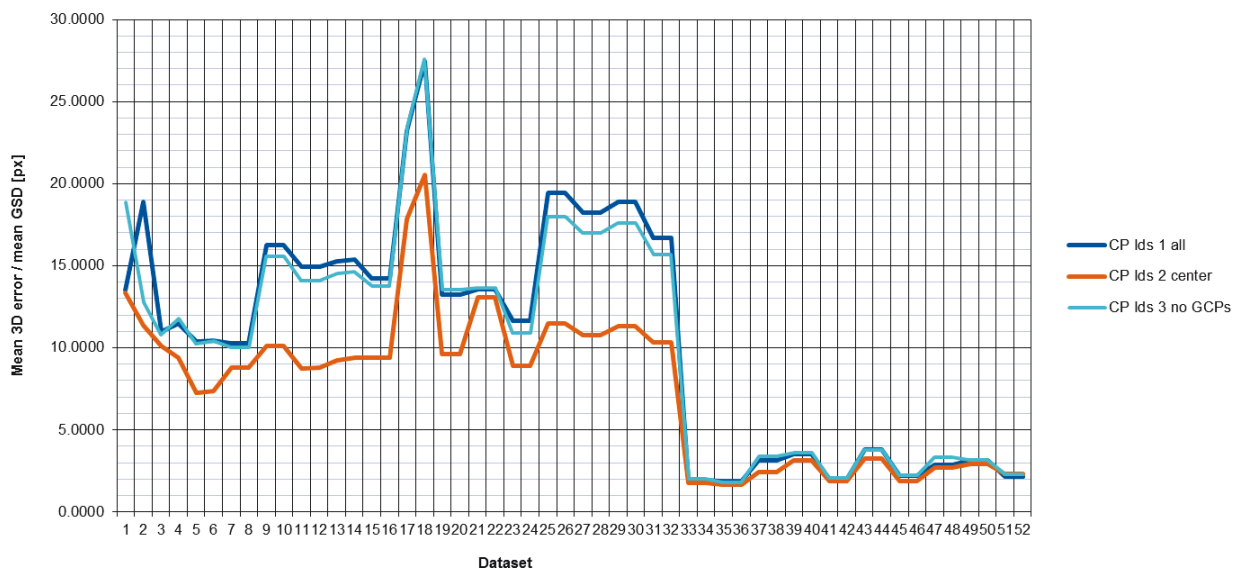


Abb. 2: Anhand der Ergebnisse im Realmaßstab kann deutlich der Einfluss der Flughöhe erkannt werden.

Um trotz der angesprochenen Mittelwertbildung über die 3D-Vektoren eine Aussage zur Variabilität der Fehler innerhalb des Untersuchungsgebiets ableiten zu können, wurden verschiedene „Zonen“ untersucht, bzw. unterschiedliche Kontrollpunktmengen analysiert. Jede der 3 in Abb. 2 dargestellten Linien steht hierbei für eine Analyse. Während bei „CP ids 1 all“ über alle Punkte, sowohl Pass- als auch Kontrollpunkte, gemittelt wurde, wurden bei „CP ids 2 center“ lediglich jene Punkte verwendet, die im Zentrum des betrachteten Gebiets liegen, um so etwaige bei SfM-Auswertungen übliche Randeffekte studieren zu können. Bei „CP ids 3 no GCPs“ wurden wiederum nur die Kontrollpunkte zur Mittelwertbildung herangezogen. Zeigen also die dunkelblaue und die hellblaue Linie starke Differenzen so deutet dies darauf hin, dass die Ergebnisse im Zuge der Transformation zu stark auf die Passpunkt „hin gespannt“ wurden.

Es kann also klar erkannt werden, dass der Zentrumsbereich bei nahezu allen Datensätzen genauer ist, was allerdings bei der beschriebenen Versuchsanordnung zu erwarten war und sich auch mit der herrschenden Lehrmeinung deckt. Auch dieser Effekt ist bei größeren Flughöhen schwächer ausgeprägt, was aber wohl in der Tatsache begründet liegt, dass bei den höheren Flügen weiter über die

Ränder geblickt, ein größeres Gebiet erfasst wird, wodurch auch die angesprochenen Randeffekte außerhalb des Untersuchungsraums liegen und hier nicht erkannt werden können.

Außerdem kann den Ergebnissen entnommen werden, dass Schrägsicht zu tendenziell höheren Genauigkeiten führt als Nadiraufnahmen, und dass ein höherer Überlapp naturgemäß die Genauigkeit erhöht, wobei kein augenscheinlicher Unterschied zwischen lateralem und longitudinalem Überlapp erkannt werden kann.

4.2 Modellmaßstab

Bei Betrachtung der 96 Ergebnisse im Modellmaßstab zeigt sich zunächst einmal eine ähnliche Tendenz wie bei den zuvor beschriebenen Realmaßstabsdaten. Es kann wieder der markante Sprung beim Übergang von den niedrigen zu den hohen Flügen erkannt werden, und beim Wissen über die Sortierung der Datensätze zeigen sich überdies auch Pakete wo der Einfluss des Blickwinkels erkannt werden kann. Bei getrennter Betrachtung der Fehler in Lage und Höhe zeigt sich, dass Schrägsicht den Fehler von der Höhe zur Lage verschiebt, was sich auch mit den zuvor beschriebenen Erfahrungswerten bzw. dem theoretische zu erwartenden Phänomen deckt.

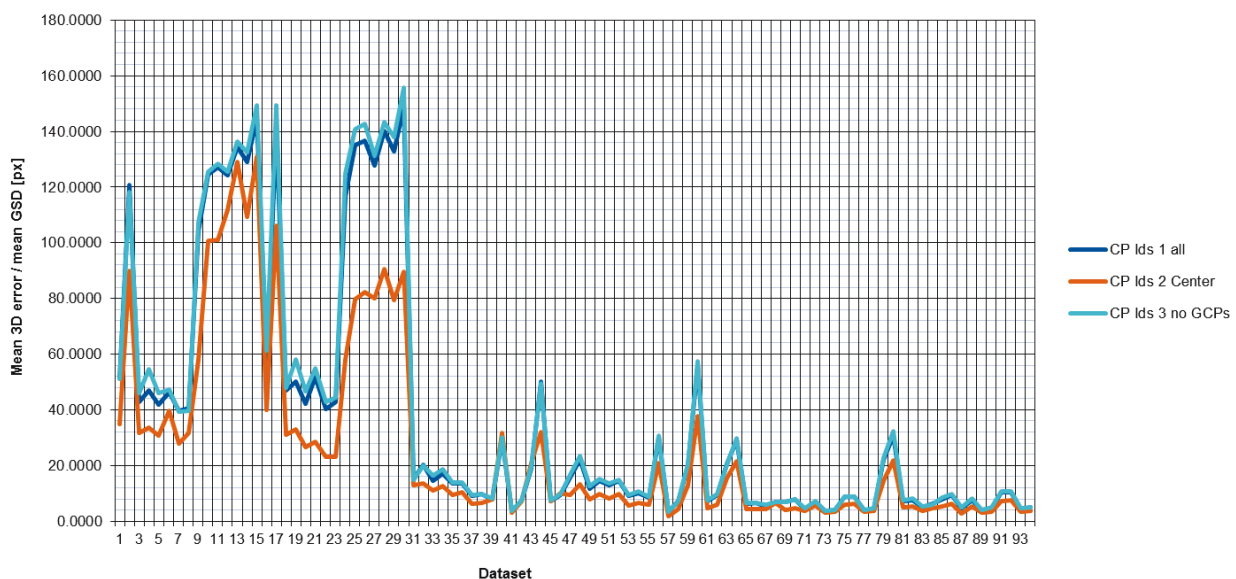


Abb. 3: Auch im Modellmaßstab zeigt sich deutlich der Einfluss der Flughöhe.

Auffallend ist die höhere Variabilität innerhalb der Daten, sowie die Tatsache, dass die Genauigkeiten im Modell zwischen 3,0 und 149 GSD liegen. Die schlechtesten Ergebnisse zeigen sich bei jenen Datensätzen die aus geringer Höhe und mit hohem Überlapp aufgenommen wurden, wobei hierbei auch auf das Vorhandensein von zwei markanten Ausreißern hingewiesen werden muss. Obwohl der hohe Überlapp zwischen den Bildern deren Verknüpfung stabilisieren sollte, leidet der gesamte Bildverband wohl doch unter der insgesamt sehr großen Anzahl an Bildern und Verknüpfungen, die die Rekonstruktion „weich“ machen und die Genauigkeit mindern.

Hinsichtlich der Variabilität innerhalb des Untersuchungsgebiets gleichen sich modell- und realmaßstäbliche Daten wieder sehr stark. Je höher die Flughöhe, desto mehr liegen Randeffekte außerhalb des Untersuchungsraums und sind entsprechend schwächer ausgeprägt.

4.3 Gegenüberstellung von Real- und Modellmaßstab

Wie bereits erwähnt können anhand der modell- und realmaßstäblichen Datensätze ähnliche Zusammenhänge erkannt werden, wobei insbesondere der Einfluss der Flughöhe bzw. indirekt der Bildanzahl deutlich wird. Auch hinsichtlich Blickwinkel relativ zum Objekt können Gemeinsamkeiten erkannt werden, was an dem ähnlichen Verlauf der beiden Kurven in Abb. 4 noch einmal deutlich wird.

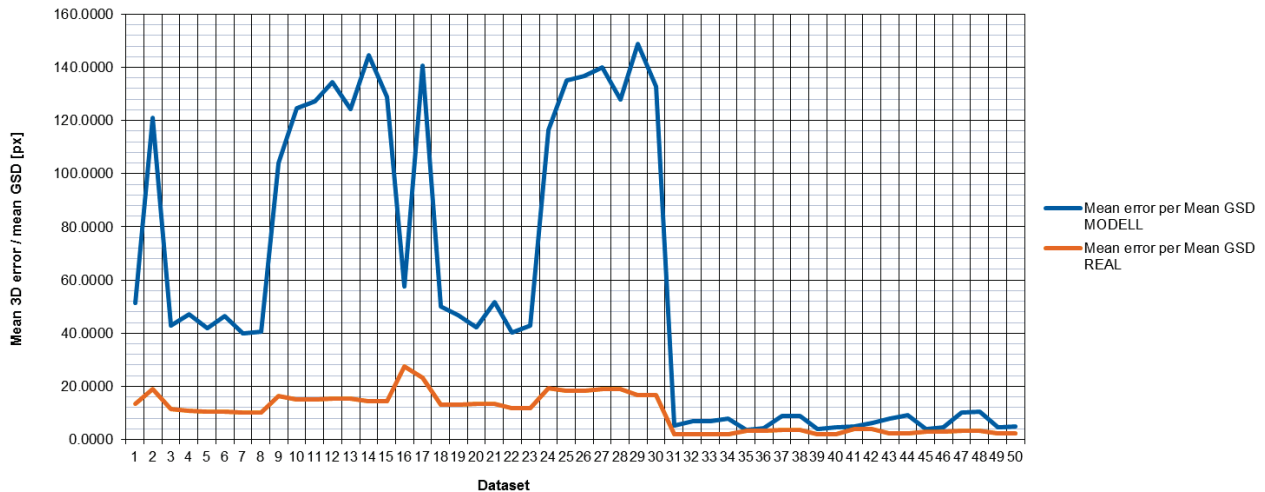


Abb. 4: In der Gegenüberstellung von Real- und Modellmaßstab können ähnliche Tendenzen erkannt werden, obwohl die Genauigkeit der Modellversuche um eine Größenordnung schlechter ist.

Noch deutlicher auffallend ist jedoch, dass die Genauigkeit der Modellergebnisse insgesamt deutlich schlechter ist als jene der realen Befliegungen. Dieser Umstand ist mit hoher Wahrscheinlichkeit darauf zurückzuführen, dass bei den Modellversuchen mangels Alternativen die selbe Kamera und auch das selbe Objektiv zum Einsatz kam, wie bei den Befliegungen im Steinbruch. Für die Modellanordnung wurden alle relevanten Größen mit Ausnahme der Kamera im Maßstab 1:100 skaliert. Die als Verhältnis von Aufnahmeentfernung zu Brennweite definierte Bildmaßstabszahl ist somit im Modell deutlich unterschiedlich zur realen Befliegung, wobei dieser Umstand nur durch die Verwendung einer skalierten Kamera mit einer Brennweite von 0,16 mm und einem sehr kleinen Bildsensor vermieden hätte werden können.

Zur näheren Untersuchung dieser Effekte und zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurden neben den Maßen der äußeren Genauigkeit auch die mittleren Rückprojektionsfehler als Maß der inneren Genauigkeit analysiert. Die beiden in Abb. 5 dargestellten Kurven zeigen einen ähnlichen Verlauf. Die in den absoluten Werten erkannten Differenzen können anhand der mittleren Rückprojektionsfehler nicht erkannt werden, und die Werte liegen sowohl im Modell als auch in der Realität zwischen 0,5 und 1,4 Pixel. Da sowohl die modell- als auch die realmaßstäbliche Kurve einen sehr ähnlichen Verlauf zeigen, dürfte zwar schon ein Einfluss der Bildaufnahme sichtbar sein, aber auf keinen Fall treten die Effekte in ähnlicher Deutlichkeit wie in den zuvor gezeigten Abbildungen zu Tage. Aufgrund der Vielzahl Bildmessungen, die hier zur Mittelwertbildung herangezogen werden, werden die auftretenden Phänomene verschleiert und sind in den Ergebnissen nur mehr bedingt sichtbar.

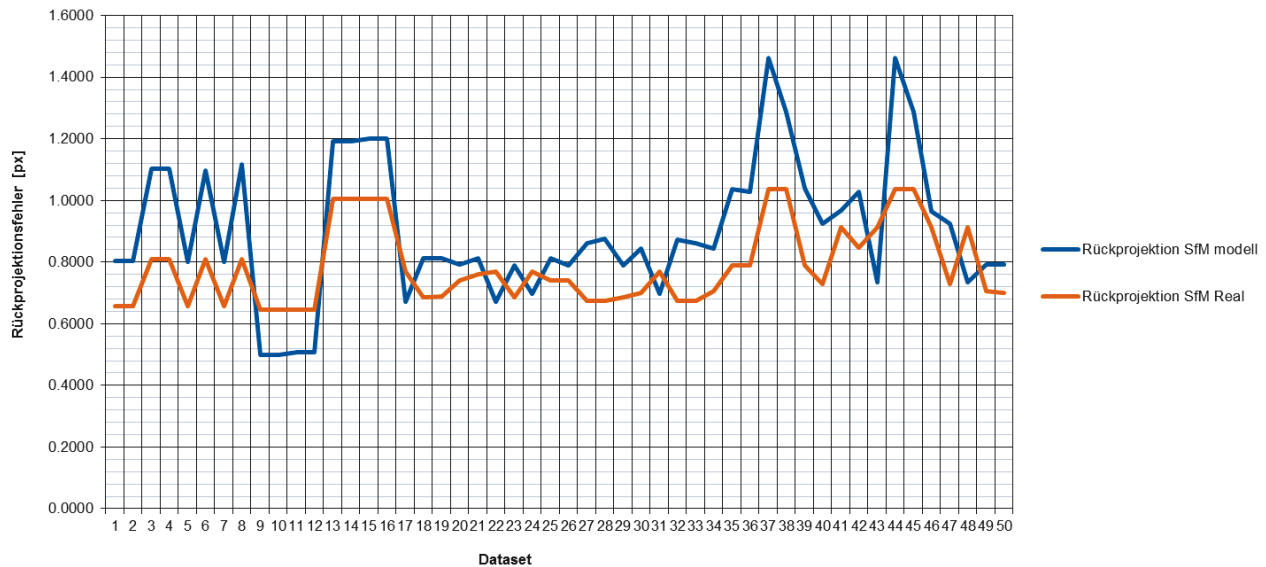


Abb. 5: Die mittleren Rückprojektionsfehler im Real- und Modellmaßstab zeigen einen ähnlichen Verlauf, wobei allerdings nur schwer ein Zusammenhang mit der Bildaufnahme hergestellt werden kann.

4.4 Parameteridentifikation

Wie angedeutet ermöglicht die systematische Herangehensweise bei der Versuchsplanung und Durchführung insbesondere auch eine statistische Analyse der Ergebnisse mit dem Ziel signifikante Einflussparameter zu identifizieren und zumindest ein stochastisches Beschreibungsmodell zu formulieren.

Die statistische Grundlage hierzu bildet die Varianzanalyse (analysis of variance, kurz ANOVA). Die Varianz einer oder mehrerer Zielvariablen wird dabei durch den Einfluss einer oder mehrerer Einflussvariablen (Faktoren) erklärt. Ohne an dieser Stelle näher auf die theoretischen Grundlagen einzugehen soll anhand der nachfolgend exemplarisch dargestellten ANOVA Tabelle (Abb. 6) die Vorgehensweise bei der schrittweisen Faktorelimination bzw. Identifikation beschreiben werden:

In der ersten Spalte stehen die untersuchten Faktoren bzw. deren Wechselwirkungen. Auf Basis der Mittelwerte bei verschiedenen Faktorstufen und der vorhandenen Freiheitsgrade (Anzahl der Faktorstufen minus 1) können dann die sogenannten „Sum of Mean Squares Between Groups“ (SSB) bzw. die „Mean Squares“ (MS) berechnet werden, die in weiterer Folge zur Ermittlung der Testvariable F herangezogen werden. Die Faktorenauswahl erfolgt auf Basis der Wahrscheinlichkeit p einen Fehler erster Art zu begehen. D.h.: Die Nullhypothese H_0 wird abgelehnt, obwohl das Gegenteil der Fall ist. Im vorliegenden Fall besagt H_0 , dass der Faktor keinen Einfluss auf das untersuchte Ergebnis hat, und p repräsentiert somit die Wahrscheinlichkeit einem Faktor einen Einfluss zuzuschreiben obwohl dieser keinen hat. Abhängig vom festgesetzten α -Risiko werden anschließend nacheinander die Faktoren eliminiert, wobei das gewählte Risiko Niveau sich natürlich stark auf die Ergebnisse auswirkt, wie aus den unterschiedlichen Blöcken in Abbildung 6 deutlich hervorgeht.

Ebenfalls wichtig für die Beurteilung der Ergebnisse ist der Anteil des Fehlers an der Gesamtvarianz bzw. die „Sum of Squares Within Groups“. Aufgrund der Tatsache, dass alle Versuche zumindest zweimal durchgeführt wurden, kann diese Größe bestimmt werden und es kann deutlich der

Anstieg nach der Elimination des Faktors „BLOCK“, der indirekt die Versuchswiederholung widerspiegelt, erkannt werden.

Faktor	DF	SSB	MS	F	p	SSB	MS	F	p	SSB	MS	F	p	SSB	MS	F	p	SSB	MS	F	p
Spalte	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
BLOCK	1	53.34	53.34	1.57278	0.14295	53.34	53.34	2.42781	0.07604												
A	1	408.706	408.706	12.0511	0.0006	408.706	408.706	18.6025	2.7E-05	408.706	408.706	17.6946	3.8E-05	408.706	408.706	13.5347	0.00022	408.706	408.706	12.0511	0.0006
B	1	182.447	182.447	5.37962	0.01319	182.447	182.447	8.30421	0.00271	182.447	182.447	7.89891	0.0033	182.447	182.447	6.0419	0.00867	182.447	182.447	5.37962	0.01319
C	1	139.935	139.935	4.1261	0.02638	139.935	139.935	6.36922	0.00735	139.935	139.935	6.05837	0.00865					139.935	139.935	4.1261	0.02638
D	1	190.688	190.688	5.62262	0.01159	190.688	190.688	8.6793	0.00225	190.688	190.688	8.2557	0.00275	190.688	190.688	6.3148	0.00748	190.688	190.688	5.62262	0.01159
E	1	3.73698	3.73698	0.11019	1.12638																
AB	1	18.9367	18.9367	0.55837	0.39802																
AC	1	37.0529	37.0529	1.09254	0.21753																
AD	1	504.48	504.48	14.8751	0.00019	504.48	504.48	22.9617	5E-06	504.48	504.48	21.8411	7.3E-06	504.48	504.48	16.7063	5.5E-05	504.48	504.48	14.8751	0.00019
AE	1	0.57971	0.57971	0.01709	3.0003																
BC	1	157.222	157.222	4.63583	0.01977	157.222	157.222	7.15606	0.00486	157.222	157.222	6.8068	0.0058					157.222	157.222	4.63583	0.01977
BD	1	12.4875	12.4875	0.36821	0.5399																
BE	1	0.46037	0.46037	0.01357	3.37293																
CD	1	0.69925	0.69925	0.02062	2.72688																
CE	1	0.92844	0.92844	0.02738	2.35826																
DE	1	0.36404	0.36404	0.01073	3.79856																
ABC	1	32.0606	32.0606	0.94534	0.2517																
ABD	1	52.6028	52.6028	1.55104	0.14549	52.6028	52.6028	2.39425	0.07784												
ABE	1	0.47072	0.47072	0.01388	3.33511																
ACD	1	93.5694	93.5694	2.75898	0.0609	93.5694	93.5694	4.25887	0.02387	93.5694	93.5694	4.05102	0.02697								
ACE	1	0.66	0.66	0.01946	2.80845																
ADE	1	0.41253	0.41253	0.01216	3.56572																
BCD	1	2.16353	2.16353	0.06379	1.51612																
BCE	1	0.54152	0.54152	0.01597	3.10609																
BDE	1	0.27468	0.27468	0.0081	4.379																
CDE	1	0.03798	0.03798	0.00112	11.8183																
ABCD	1	120.521	120.521	3.55367	0.03698	120.521	120.521	5.48558	0.01187	120.521	120.521	5.21786	0.01374					120.521	120.521	3.55367	0.03698
ABCE	1	0.24071	0.24071	0.0071	4.68022																
ABDE	1	0.0062	0.0062	0.00018	29.2652																
ACDE	1	0.544	0.544	0.01604	3.09891																
BCDE	1	0.00025	0.00025	7.2E-06	147.156																
ABCDE	1	0.42617	0.42617	0.01257	3.50745																
ERROR	31	1051.35	33.9145			1164.43	21.9705			1270.38	23.0978			1781.62	30.197			1363.95	24.3562		
TOTAL	63	3067.94				3067.94				3067.94				3067.94				3067.94			
ERROR (% Total)		34.27%				37.95%				41.41%				58.07%				44.46%			
						Alpha = 0,1			Alpha = 0,05			Alpha = 0,01			Alpha = 0,04, reasonable						

Abb. 6: Mittels Varianzanalyse ist eine statistische fundierte Faktorelimination bzw. Identifikation möglich. Abhängig vom gewählten α -Risiko ($\alpha=10\%$, $\alpha=5\%$, $\alpha=1\%$ und $\alpha=4\%$) ergeben sich unterschiedliche Faktorkombinationen.

Wird die beschriebene Analyse mit den vorliegenden Daten durchgeführt so zeigen sich erwartbare Zusammenhänge, besonders wenn die Ergebnisse einer zusätzlichen Plausibilitätsprüfung unterzogen werden. Bei einem gewählten α -Risiko von 4% verbleiben als relevante Faktoren die Flughöhe, der Überlapp in beiden Richtungen sowie die Blickrichtung relativ zum Objekt im Modell. Zusätzlich werden die Wechselwirkung zwischen Flughöhe und lateralem Überlapp, zwischen longitudinalem und lateralem Überlapp und zwischen allen vier signifikanten Haupteffekten als relevant erachtet. Zumindest in der untersuchten Form kann die Passpunktconfiguration als nicht ausreichend genauigkeitswirksam nachgewiesen werden, wobei hier angemerkt werden muss, dass beide untersuchten Konfigurationen mit Sachverstand gewählt wurden (Tscharf et al. (2018)) und somit lediglich eine geringfügige Variation innerhalb der Georegistrierung studiert wurde. Dies ist durchaus in Einklang mit der herrschenden Lehrmeinung, obwohl an dieser Stelle noch keine Aussage über die Art die Weise bzw. Wirkrichtung (z.B positiver Einfluss steigender Flughöhe) des Einflusses ge-

troffen werden kann, sondern lediglich die Relevanz der genannten Parameter statistisch nachgewiesen, und somit die Basis für eine weitere Modellbildung gelegt werden konnte.

5 Schlussfolgerungen

Neben dem grundsätzlichen Wert von Modellversuchen für die wissenschaftliche Praxis konnte im Rahmen der präsentierten Untersuchungen gezeigt werden, dass die statistische Versuchsplanung und die Auswertung mittels Varianzanalyse in der Lage ist den Einfluss untersuchter Parameter statistisch nachzuweisen bzw. zu widerlegen. Die vorgestellte Parameterauswahl kann die Basis für eine mögliche Vorausberechnung darstellen, wobei dem gewählten Beschreibungsmodell (linear, quadratisch, ...) dabei große Bedeutung zukommt, und auch eine etwaige Modellierung räumlicher Effekte innerhalb des vermessenen Gebiets in Betracht gezogen werden sollte.

Aus der Analyse der Daten zeigt sich aber auch deutlich, dass die Auswertung mittels SfM nicht in jeglicher Hinsicht den bekannten photogrammetrischen Gesetzmäßigkeiten gehorcht und der oft zur Beurteilung der Genauigkeit herangezogene Rückprojektionsfehler nicht als alleiniges Qualitätskriterium verwendet werden darf.

So kann sowohl im Modell- als auch im Realmaßstab ein deutlicher Einfluss der Flughöhe erkannt werden, der nicht direkt dem Grundsatz „höhere Auflösung führt zu höherer Genauigkeit“ folgt: Bei gleich bleibendem prozentuellem Überlapp konnten die Referenzobjekte aus größeren Höhen mit deutlich höherer Genauigkeit rekonstruiert werden. Dieser Umstand ist wohl auf die unterschiedliche Anzahl an Bildern zur Erfassung eines Gebiets aus verschiedenen Höhen zurückzuführen. Der Bildverband scheint durch die größere Anzahl an Bildern und Verknüpfungen instabil zu werden bzw. ist auch die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von nicht detektierten Missmatches bei größerer Bildanzahl naturgemäß höher. Die Tatsache, dass alle Bildmessungen und Triangulationen weitestgehend ohne Interaktion des Anwenders erfolgen und auf Qualität und Richtigkeit überprüft werden birgt Gefahren, die bei unüberlegter Anwendung unmittelbare Auswirkungen auf die Ergebnisse entfalten können.

Die präsentierten Ergebnisse illustrieren somit einmal mehr, dass obwohl die UAV-Vermessung mittlerweile gelebte Praxis und auch in der marktscheiderischen Anwendung immer stärker verankert ist, eine fundierte wissenschaftliche Auseinandersetzung mit dem Thema Genauigkeit und den dahinter stehenden Mechanismen von immanenter Bedeutung für die praktische Verwertung dieser Technologie ist. Auch wenn dies von manchen Seiten als gelöst betrachtet wird, besitzt entsprechende Forschung auf jeden Fall auch praktische Relevanz.

6 Danksagung

Die präsentierten Arbeiten werden durch die EU Horizon 2020 Forschungs- und Innovationsprogramme unter Grant agreement No 730294 („Sustainable Low Impact Mining solution for exploitation of small mineral deposits based on advanced rock blasting and environmental technologies“, SLIM) gefördert.

LITERATURVERZEICHNIS

- 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
- Greiwe, A.; Gehrke, R.; Spreckels V; Schlienkamp, A. (2014): Ableitung eines Geländemodells (Haldenkörper) aus multispektralen AUS-Bilddaten. In: 34. Wissenschaftlich-Technischen Jahrestagung der DGPF, HCU Hamburg, 26.- 28.03.2014
- Lowe, D. (2004): Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. In: International Journal of Computer Vision 60 (2), S. 91–110
- Luhmann, Thomas (2018): Bildbasierte 3D-Oberflächenrekonstruktion - Möglichkeiten und Grenzen, In: DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e.V. (Hg.): UAV 2018 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen. Beiträge zum 169. DVW-Seminar am 19. Und 20. Februar 2018 in Hamburg. 89/2018. 1. Aufl. Augsburg: Wißner-Verlag, S31-46.
- Rumpler, M.; Daftry, S.; Tscharf, A.; Pretenthaler, 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
- Rumpler, M.; Tscharf, A.; Mostegel, C.; Daftry, S.; Hoppe, C.; Pretenthaler, R.; Fraundorfer, F.; Mayer, G.; Bischof, H. (2016). Evaluations on multi-scale camera networks for precise and geo-accurate reconstructions from aerial and terrestrial images with user guidance. In Computer Vision and Image Understanding, 2016.
- Siebertz K.; van Bebber D.; Hochkirchen T. (2010): Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch).
- Spreckels, V.; Schlienkamp, A.; Vosen, P. (2015): Erfahrungen mit dem Mehrstufigem Konzept der RAG zur Arbeit mit 3D Punktwolken. - in: Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie der TU Freiberg, Heft 2015-1. (2015), S. 54 – 71
- 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., Mayer, G., Rumpler, M., Fraundorfer, F., & Bischof, H. (2016). Potentiale und Herausforderungen der UAV-Vermessung im Bergbau – Stand der Forschung und Ausblick. Markscheidewesen, Das, 123(2-3/2016), 33-40.
- Tscharf, A.; Schenk F.; Mayer G.; Fraundorfer F.; Bischof H. (2018): UAV-Anwendungen im Bergbau - Modellversuche als Beitrag zur photogrammetrischen Forschung und Entwicklung. - in: Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie der TU Freiberg, Heft 2018-1. (2018), S. 30 – 43
- Zeisl, B., Georgel, P. F., Schweiger, F., Steinbach, E. and Navab, N., (2009). Estimation of Location Uncertainty for Scale Invariant Feature Points. In: British Machine Vision Conference (BMVC).