

UAV-Anwendungen im Bergbau - Modellversuche als Beitrag zur photogrammetrischen Forschung und Entwicklung

**Alexander Tscharf¹, Fabian Schenk², Gerhard Mayer¹,
Friedrich Fraundorfer², Horst Bischof²**

¹Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft,

²Technische Universität Graz, Institut für Maschinelles Sehen und Darstellen

ZUSAMMENFASSUNG:

Als Grundlage für die fortschreitende Digitalisierung und Automatisierung im Bergbau, kommt der Herstellung von optisch realistischen und hochgenauen 3D Modellen, sowie deren automatischer Interpretation und Weiterverarbeitung, eine besondere Bedeutung zu. Insbesondere für Vermessungs- und Inspektionsanwendungen sind mit Kameras ausgestattete unbemannte Flugsysteme mittlerweile weit verbreitet und zählen zum aktuellen Stand der Technik. Der größte zukünftige Forschungsbedarf besteht mit Sicherheit in der Datenverarbeitung, wobei einerseits die erreichbare Modellqualität, und andererseits die automatisierte Dateninterpretation für spezielle bergtechnische Fragestellungen wie zum Beispiel die Haufwerkscharakterisierung oder geologische Charakterisierung im Zentrum der Arbeiten steht.

Insbesondere aufgrund der möglichen Reproduzierbarkeit, aber auch aufgrund der oft einfacheren Durchführbarkeit nehmen - neben klassischen realmaßstäblichen Untersuchungen im Feld - auch Modellversuche derzeit einen gewichtigen Stellenwert in der photogrammetrischen Forschung an der Montanuniversität ein. Im vorliegenden Beitrag werden Beispiele aus der angewandten und grundlagenorientierten Forschung gegeben, wobei der Mehrwert von Laborversuchen, bei gleichzeitiger kritischer Gegenüberstellung mit der Realität, hervorgehoben wird.

ABSTRACT:

As basis for the ongoing digitization and automation in mining, the creation of visually appealing and highly accurate 3D models, as well as their automatic interpretation and processing, is of particular importance. Especially for surveying and inspection applications unmanned aerial systems equipped with cameras are now widely used and are state of the art. However the greatest future need for research certainly lies in data processing, where on the one hand the achievable model quality, and on the other hand the automated

data interpretation for special mining related issues such as the characterization of muck-piles or geological characterization is at the center of the work.

In particular, due to the possibility of reproducibility, but also due to higher operability, model experiments are currently playing an important role in photogrammetric research at the Montanuniversität in addition to classical real-scale investigations in the field. In the present paper, examples from applied and fundamental research are given, highlighting the added value of laboratory experiments while critically contrasting them with reality.

1 Einleitung

Als Ergebnis der stetig zunehmenden Verbreitung und Anwendung, sowie der permanenten technologischen Fortentwicklung unbemannter Flugsysteme für verschiedenste Anwendungen im Bergbau und der Vermessung haben sich vergleichbare Systeme mittlerweile als wertvolle Ergänzung zu herkömmlichen Methoden etabliert und zählen somit auch zum aktuellen Stand der Technik. Neben den Entwicklungen im Bereich der autonomen Navigation – vor allem auch in geschlossenen Räumen und ohne Unterstützung von GNSS – hat vor allem die Verarbeitung und (automatische) Interpretation der Daten verschiedenster Quellen (Kameras, Laserscanner, Lagesensorik,...) einen hohen Stellenwert in der gegenwärtigen Forschung und Entwicklung. (Tscharf et al. (2016))

Auch am Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft an der Montanuniversität Leoben (MUL) besteht nun seit einigen Jahren ein entsprechender Forschungsschwerpunkt, der sich in der Kooperation mit verschiedenen nationalen und internationalen Partnern in unterschiedlichen Projekten widerspiegelt. Das Hauptaugenmerk dieser Forschung an der MUL ist im Bereich der Photogrammetrie bzw. Bildverarbeitung angesiedelt, weshalb die Anwendung von Laserscannern oder anderer alternativer Sensorik nicht im Fokus der Arbeiten steht. Im Zuge dieser Arbeiten hat sich in letzter Zeit insbesondere auch ein Schwerpunkt zu Untersuchungen im Modellmaßstab entwickelt, wobei sowohl Untersuchungen im Bereich der Angewandten wie auch Grundlagenforschung durchgeführt werden, die im folgenden Beitrag näher beschrieben werden.

2 Modellversuche in der bergtechnischen und photogrammetrischen Forschung

Aufgrund der Tatsache, dass realmaßstäbliche Versuche oft mit großem Aufwand und hohen Kosten verbunden sind, kann es durchaus als gängige wissenschaftliche Praxis bezeichnet werden, theoretische Grundlagen zuerst im „Kleinen“ zu erarbeiten und anschließend in den realen Anwendungsfall zu übertragen. So hat zum Beispiel die sprengtechnische Forschung im Labormaßstab am Lehrstuhl für Bergbaukunde der Montanuniversität bereits eine lange Tradition und das Beschreiten dieses Weges hat in den letzten Jahren auch einen bedeutenden Einfluss auf die Sprengarbeit im Bergbau genommen (Schimek (2015), Ivanova et al. (2015), Moser et al. (2008)). Auch bei der Entwicklung, Prüfung und Beurteilung flexibler Steinschlagschutzsysteme konnte in der jüngeren Vergangenheit gezeigt werden, dass modellhafte Untersuchungen nicht nur eine wertvolle Ergänzung darstellen, sondern insbesondere zur Analyse des Systemverhaltens bei nicht genormten Lastfällen eine wichtige Möglichkeit sind die notwendigen Daten mit vertretbarem Aufwand zu sam-

meln. (Heiss (2017)). Außerdem bieten modellhafte Rahmenbedingungen auch eine wesentlich einfachere Möglichkeit zur Verifikation, Reproduktion und Evaluierung der durchgeführten Versuche. So ist es zumeist mit geringem Aufwand möglich „ground-truth“ und Referenzdaten zu generieren und unter kontrollierten Rahmenbedingungen können insbesondere auch externe - wie z.B.: atmosphärische – Einflüsse weitestgehend ausgeschaltet werden. Ein Umstand, der zur Erforschung grundlegend theoretischer und vor allem quantitativ belastbarer Zusammenhänge ein unbedingtes Erfordernis darstellt.

Auch in der vermessungstechnischen und speziell anwendungsorientierten photogrammetrischen Forschung sind Modellversuche seit jeher von Bedeutung. Aufgrund der Tatsache, dass bildbasierte Verfahren zunächst vollständig maßstabsfrei sind, können nahezu alle Überlegungen direkt in einen kleineren Rahmen übertragen werden, sofern die angebrachte Skalierung auf allen Ebenen berücksichtigt wird.

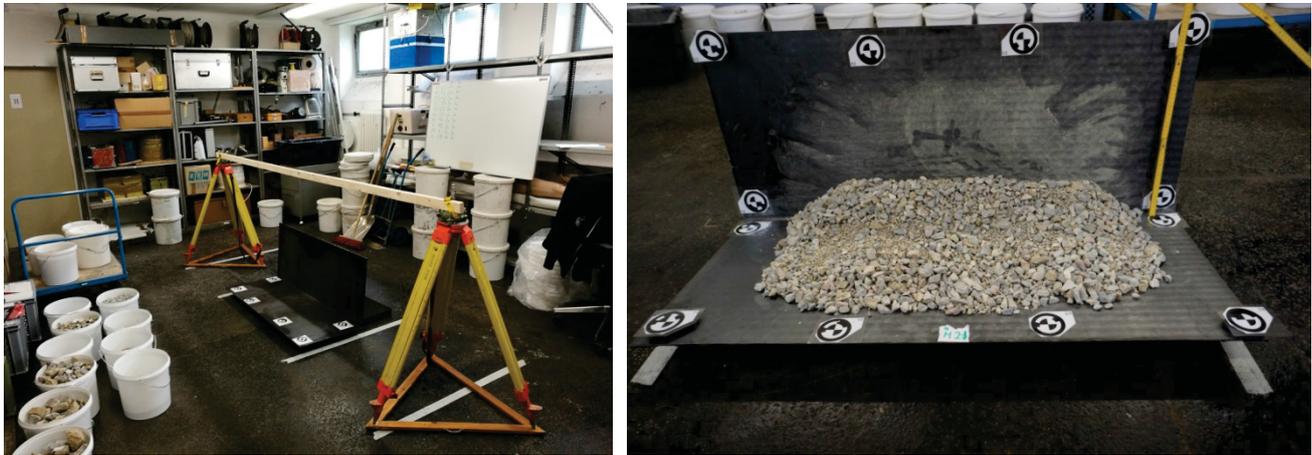
Im Bereich der bergtechnischen bzw. markscheiderischen Anwendungen haben modellhafte Untersuchungen vor allem zur Haufwerkscharakterisierung bereits eine lange Tradition. So arbeiteten Van Aswegen und Cunningham bereits 1986 mit Modellhaufwerken bekannter Korngröße und zusätzlichen Skalierungsobjekten, die dann als Standardbilder zum Vergleich mit realen Sprengergebnissen herangezogen wurden (Van Aswegen und Cunningham(1986)). Aber auch in der aktuellen Forschung leisten Modelle einen wertvollen Beitrag. So beleuchten z.B.: Bamford et al. (2017) die Vorteile der UAV gestützten Datenerfassung zur Charakterisierung von gesprengtem Haufwerk im Modellmaßstab, indem sie die Ergebnisse und den Aufwand herkömmlicher und manueller Datenerfassung gegenüberstellen (Bamford et al. (2017)). Auch zur Erarbeitung von Routinen zum Vergleich verschiedener Messepochen mit dem Ziel der Veränderungsmessung können Modellversuche einen wichtigen Beitrag leisten. Im abgegrenzten Modellrahmen konnten Berger et al. (2016) die grundsätzliche Eignung photogrammetrischer Systeme zur Erfassung geometrischer Veränderungen nachweisen und überdies wird der Mehrwert der modellhaften Versuchsanordnung zur Entwicklung von Inspektionswerkzeugen mehr als deutlich. (Berger et al. (2016))

Neben den genannten und kurz beschriebenen Beispielen existiert natürlich noch eine Vielzahl weiterer Modelluntersuchungen, die hier nicht näher präsentiert wurden. Nahezu alle Arbeiten im Bereich der Testfeldkalibrierung können hier ebenso hinzu gezählt werden, wie auch Analysen zur Genauigkeit anhand klar geometrisch definierter Testobjekte (Daftry et al. (2013)). In den folgenden Abschnitten soll näher auf die an der Montanuniversität durchgeführten Forschungsarbeiten eingegangen werden, wobei einerseits die Fortschritte im Bereich der bildbasierten Haufwerkscharakterisierung präsentiert werden, und andererseits im Detail auf Analysen zur Quantifizierung der Genauigkeit eingegangen wird.

3 Bildbasierte Haufwerkscharakterisierung

Wie bereits bei Tscharf et al. (2017) beschrieben wurden im Rahmen der Arbeiten verschiedene Sprengungen im Maßstab von 1:25 simuliert, wobei der nachstehenden Abb. 1 eine Übersicht des Versuchsaufbaus entnommen werden kann. Die verschiedenen – und durch Siebanalyse definierten - Körnungen wurden jeweils mehrmals geworfen und anschließend aus verschiedenen Höhen im regelmäßigen Raster mit einem Bildüberlapp von 90% fotografiert. Das Ziel dieser Versuchsanord-

nung ist zu überprüfen, ob ein und dasselbe Haufwerk in unterschiedlichen Konfigurationen „wiedererkannt“ werden kann, bzw. ob das System in der Lage ist eine bekannte Korngrößenverteilung aus verschiedenen Bilddatensätzen robust zu reproduzieren. Außerdem sollen die Modelldaten auch als Trainingsdaten für die Algorithmen des Maschinellen Lernens herangezogen werden, wofür vor allem auch verschiedene Anordnungen des Materials notwendig sind.



(a)

(b)

Abb. 1: Übersicht der Versuchsanordnung zur Haufwerkscharakterisierung, (a) Gesamtübersicht, (b) "feine" Versuchskörnung auf der simulierten und kippbaren "Etage"

Um das Haufwerk im Detail zu charakterisieren ist es nun notwendig die Begrenzungen sowie die Größe der einzelnen Fragmente zu erfassen. Im folgenden Abschnitt soll nun auf die ersten Ergebnisse bei der Analyse der Versuche eingegangen werden. Wir vergleichen zwei konventionelle Methoden (Kantendetektion und Superpixelsegmentierung) mit einer auf maschinellem Lernen basierenden Methode (Mask R-CNN).

3.1 Konventionelle Methoden

3.1.1 Kantendetektion

Wir setzen den weitverbreiteten Canny Kantendetektor (Canny (1986)) ein, der mit Grauwertbildern arbeitet und Kanten anhand von Grauwertunterschieden bestimmt. Doppelte Kanten werden mittels Unterdrückung lokaler Maxima und anhand von zwei Grenzwerten bestimmt. Canny nutzt die vorhandene Farbinformation nicht und da nur Grauwertunterschiede von Bedeutung sind, kommt es zu Detektionen auch an Schattenübergängen bzw. zu keiner Detektion, wenn ähnliche Steine nebeneinander liegen. Zusätzlich liefert Canny auch keine Garantie, dass die detektierten Kanten eine geschlossene Begrenzung bilden und oft werden nur Teile der Begrenzungen detektiert (siehe Abb. 2b).

3.1.2 Superpixelsegmentierung

Superpixelsegmentierung ist ein bekannter Algorithmus der einzelne Pixel zu größeren Regionen (Superpixel) gruppiert. Wir verwenden den aktuellen SEEDS Algorithmus (Van den Bergh et al.

(2014)), der versucht Superpixel ähnlicher Farbe mit einer möglichst glatten Begrenzung und ähnlicher Form zu finden. Ein großer Vorteil von Superpixeln ist, dass die Konturen immer geschlossen sind und dass die gesamte Farbinformation genutzt wird. Abbildung 2c zeigt, dass auch die Superpixelsegmentierung ähnlich wie Canny sehr stark von den eingestellten Parametern abhängt und größere Steine oftmals in kleinere Regionen zerlegt, wodurch ein aufwändiger und nicht-trivialer Korrekturschritt nötig wird.

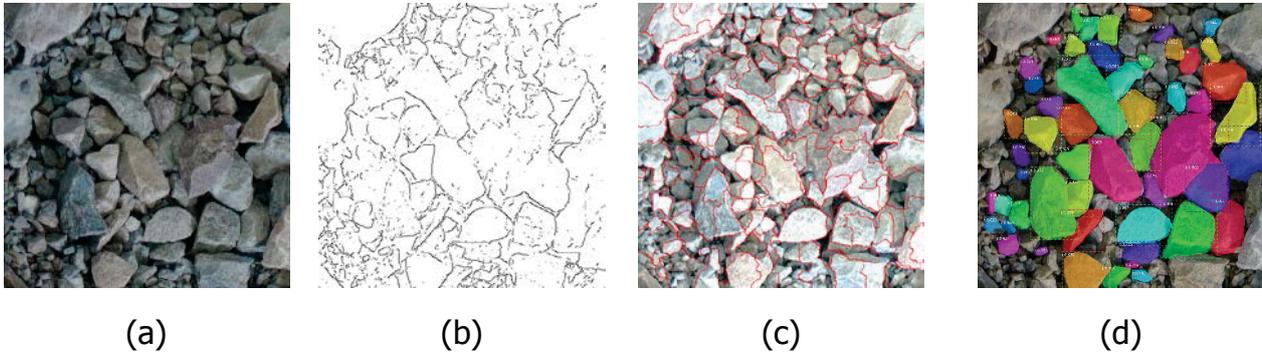


Abb. 2: Vergleich zwischen konventionellen und maschinell gelernten Methoden. (a) Ausgangsbild, (b) Canny Kantendetektor, (c) Superpixelsegmentierung, (d) maschinell gelernte Segmentierung mittels Mask R-CNN.

3.2 Methode basierend auf Maschinellern Lernen

Konventionelle Methoden erfordern die sorgsame Einstellung von Parametern und Grenzwerten für jedes Bild und oftmals auch für einzelne Bildbereiche. Für die Haufwerkscharakterisierung sind Methoden basierend auf maschinellern Lernen, die ohne aufwändige Parametereinstellungen funktionieren, besonders interessant, da sie mit Schattengrenzen, unterschiedlichen Steingrößen und Färbungen besser umgehen können (siehe Abb. 2d). In den letzten Jahren hat der Bereich der Bildverarbeitung durch maschinelles Lernen eine Revolution in fast allen Bereichen erfahren und gerade Convolutional Neural Networks (CNNs) (Krizhevsky et al. (2012)) haben sehr gute Resultate in verschiedensten Benchmarks erzielt. Im Gegensatz zu konventionellen Methoden, werden bei maschinellem Lernen jedoch große Mengen an Trainingsdaten benötigt, die aufwändig manuell annotiert werden müssen.

Für die Haufwerkscharakterisierung ist die Segmentierung einzelner Steine essentiell und daher kommen für uns gängige Segmentierungsalgorithmen nicht infrage, da sie jedem Pixel eine Klasse zuweisen, aber keine Aussage über Anzahl bzw. Größe von Objekten treffen. In dieser Arbeit, fokussieren wir uns daher auf den modernen Mask R-CNN Algorithmus (He et al. (2017)), der eine Objektinstanzsegmentierung durchführt und somit alle wichtigen Eigenschaften wie Fläche, Begrenzungen, Begrenzungsboxen sowie Konfidenzwerte bestimmt. Mask R-CNN ist ein komplexer, mehrstufiger Algorithmus, der zuerst mittels CNN Kandidaten für Begrenzungsboxen vorschlägt. Danach werden innerhalb jeder dieser Boxen interessante Merkmale von Bildern ebenfalls mittels CNN detektiert. Basierend auf diesen interessanten Merkmalen, bestimmt der Algorithmus abschließend Segmentierungsmasken, verbesserte Begrenzungsboxen und Objektklassen. Für die Haufwerkscharakterisierung modifizieren wir Mask R-CNN so, dass es zwei Klassen unterscheidet, nämlich Stein und Hintergrund.

3.2.1 Generierung von Trainingsdaten

Wie für alle Methoden basierend auf maschinellem Lernen, benötigen wir auch hier eine große Anzahl an Trainingsdaten. Wir initialisieren das CNN mit bereits vortrainierten Werten auf Basis von zehntausenden Trainingsbeispielen. Für die Haufwerkscharakterisierung ist aber eine spezielle Segmentierung notwendig, für die wir manuell Tausende von Steinen annotieren (siehe Abb. 3). Wie in Abbildung 3 dargestellt, werden aus dem annotierten Bild einzelne Bildausschnitte extrahiert und dann für jeden vorkommenden Stein Segmentierungsmasken erzeugt. Das CNN wird dann mit einem Bildausschnitt und den zugehörigen Segmentierungsmasken trainiert.



Abb. 3: Generierung der Trainingsdaten für das CNN. Manuelle Annotation von individuellen Steinen in einem Bild. Der daraus extrahierter Bildausschnitt und die zugehörigen Segmentierungsmasken werden für das Training des CNNs genutzt.

3.2.2 Experimente mit Mask R-CNN

Nach der aufwändigen Annotation, müssen wir das initialisierte CNN noch mit unseren Trainingsdaten trainieren (auch Finetuning genannt). Die Trainingszeit kann je nach Datenumfang mehrere Stunden oder sogar Tage dauern. Zu Beginn trainieren wir auf einer kleineren Datenmenge, um möglichst schnell Ergebnisse zu erzielen. Abbildung 4 zeigt erste Segmentierungen auf einem kleinen Bildausschnitt. Das CNN erkennt die Fläche, Begrenzungen sowie eine Begrenzungsbox für jeden Stein. Zusätzlich erhält jedes Objekt noch einen Konfidenzwert, der die Sicherheit der Segmentierung angibt.



Abb. 4: Erste Segmentierungsversuche mit wenigen Trainingsdaten. Steine in Farbe mit Begrenzungsboxen und Konfidenzwerten.

Aufbauend auf diesen vielversprechenden Ergebnissen, haben wir unseren Algorithmus auf einem weitaus umfangreicheren Datensatz trainiert. Abbildung 5a zeigt ein Segmentierungsergebnis auf einem Laborbild, auf dem nicht trainiert wurde. Der Algorithmus funktioniert bereits sehr gut auf Laborbildern, aber das eigentliche Ziel ist es allerdings, Steine in UAV-Bildern zu segmentieren. Um die Generalisierung der annotierten, maßstabsgetreuen Trainingsdaten auf Drohnenbilder zu überprüfen, haben wir unseren Algorithmus auch auf solchen Daten getestet. In Abbildung 5b ist ein Segmentierungsergebnis dargestellt, welches beweist, dass sich das maßstabgetreue Modell aus dem Labor auch sehr gut für Drohnenbilder eignet. Der im Labormaßstab trainierte Algorithmus ist somit in der Lage mehr oder weniger direkt auf reale Daten von tatsächlichen Sprengungen übertragen zu werden.

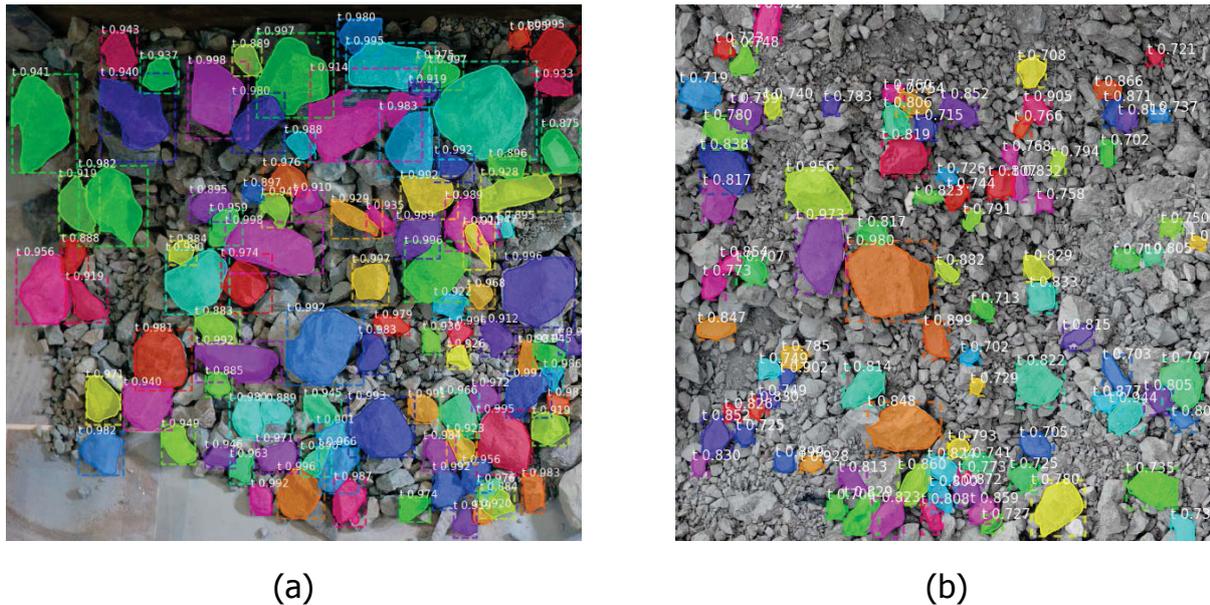


Abb. 5: Segmentierungsergebnisse (a) von einem Steinhaufen im Labor und (b) auf einem Drohnenbild von einem Haufwerk am steirischen Erzberg.

3.2.3 Nächste Schritte

Als unmittelbar nächster Schritt ist die Annotation von mehr Trainingsbeispielen mit kleineren Steinen geplant. Diese Annotation wird höchstwahrscheinlich von externen Mitarbeitern über einen entsprechenden Webservice (z.B.: Amazon Mechanical Turk) durchgeführt. Eine weitere Schritt ist die Verbesserung der Segmentierung durch Ausnutzung verfügbarer 3D Information, welche direkt aus den Bildern mittels Structure-from-Motion und Densifizierung erstellt werden kann (Tscharf et al. (2017)).

4 Quantifizierung der Genauigkeit

Neben dem Anwendungsbereich der Haufwerkscharakterisierung bieten Untersuchungen im Modellmaßstab jedoch auch eine gute Basis für grundlegende Untersuchungen zur Quantifizierung der Genauigkeit. Die in der Regel bei der Verwendung unbemannter Flugsysteme zum Einsatz kommenden automatisierten Verfahren (SfM, Structure from Motion), stellen hohe Anforderungen an die Qualität und vor allem an die geometrische Aufnahmekonfiguration der Bilder, was im negati-

ven Fall zu nicht verwertbaren Ergebnissen bis hin zum völligen Scheitern der 3D-Rekonstruktion führen kann. Aus diesem Grund stehen die Frage der Genauigkeit und die Erforschung der relevanten Einflussparameter schon seit einiger Zeit im Zentrum der Arbeiten an der MUL.

Die 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, machte es notwendig die angestellten Überlegungen in den Modellmaßstab zu übertragen. Überdies können atmosphärische Einflüsse, wie z.B.: Sonneneinstrahlung, Bewölkung oder Schattenwurf, bei Versuchen unter Laborbedingungen sehr einfach konstant gehalten werden und müssen somit nicht im Detail miteinbezogen werden.

4.1 Statistische Versuchsplanung

Das grundlegende Ziel der Forschungen zur Genauigkeit ist das Finden eines belastbaren Zusammenhangs zwischen den Parametern der Bildaufnahme und der erreichbaren Genauigkeit der 3D-Punkte. Aufgrund der Komplexität der 3D-Rekonstruktion ist eine deterministische Betrachtung 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 als Methodik zur systematischen Planung und statistischen Auswertung von Versuchen stellt dementsprechend ein wichtiges Werkzeug dar. Mit verhältnismäßig geringem Aufwand wird durch strukturierte Planung der funktionale Zusammenhang von Einflussparametern und Ergebnissen ermittelt und mathematisch beschrieben. Ohne an dieser Stelle zu tief ins Detail zu gehen soll kurz das zu Grunde liegende Konzept beschrieben werden, da dies zum Verständnis der später beschriebenen Versuchsanordnung notwendig ist.

Die Menge aller Eingangsgrößen wird „Parameter“ genannt, und jene, die als relevant betrachtet werden und somit Teil des Versuchsplans sind, werden als „Faktoren“ bezeichnet. Die Einstellungen oder Werte, die ein Faktor annehmen kann, heißen „Stufen“ oder „Level“ und bei der Wirkung eines Faktors auf das System spricht man von sogenannten „Effekten“, wobei – und das ist im vorliegenden Fall von besonderer Bedeutung – auch Wechselwirkungseffekte bestimmt werden können. Eine unbedingte Voraussetzung zum Erfolg der statistischen Versuchsplanung ist die tatsächliche Durchführbarkeit und vor allem auch Durchführung (gewählte Faktorstufen müssen unbedingt eingehalten werden) der geplanten Experimente, was wiederum unter Realbedingungen oftmals nur schwierig möglich ist. Besondere Bedeutung kommt auch der Abgrenzung des Systems zu, da eine falsche Abgrenzung und Wahl der untersuchten Stufen zum Scheitern oder zumindest zum Verfälschen der abgeleiteten Zusammenhänge führen kann. Der Versuchsplan stellt im Grunde ein lineares Gleichungssystem dar, wobei jeder Versuch eine Gleichung liefert, auf deren Basis es möglich ist Beschreibungsmodelle anzupassen. Bei einem Überschuss an Gleichungen (Versuchen) ist es naturgemäß auch möglich das Beschreibungsmodell zu kontrollieren, was auf jeden Fall anzustreben wäre. (Siebertz et al. (2010))

Grundsätzlich werden nach dem Konzept der statistischen Versuchsplanung verschiedene Faktoren auf mehreren Stufen getestet und abhängig von der geplanten Feldkonstruktion miteinander kombiniert. Neben dem zunächst logischen aber sehr aufwendigen Vollfaktorplan – jede Kombination der Faktoren wird getestet – existieren noch eine Reihe von vereinfachten Teilfaktorplänen, wo nicht

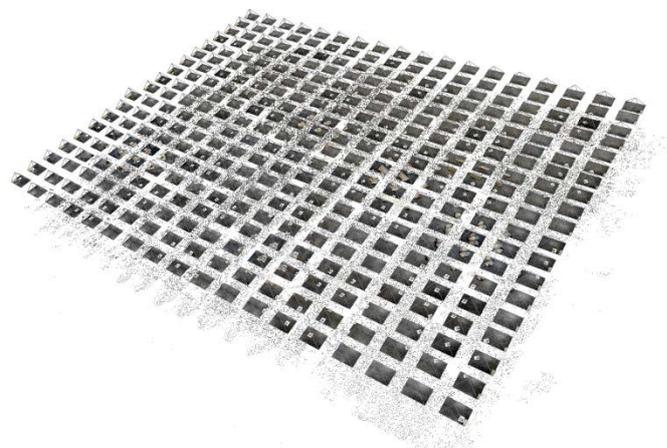
alle Effekte eindeutig sichtbar werden, allerdings der Aufwand durch eine geringere Versuchszahl signifikant verringert werden kann. Ohne auf nähere Details einzugehen wurden die hier vorgestellten Versuche als zwei- bzw. dreistufiger Vollfaktorplan durchgeführt, wobei die durchgeführten Versuche nachstehend beschrieben werden. (Siebertz et al. (2010))

4.2 Versuchsaufbau und Anordnung

Die Versuche wurden im Maßstab 1:100 durchgeführt und das rund 2x3 m große Versuchsfeld wurde mit insgesamt 33 Pass- bzw. Kontrollpunkten versehen (vgl. Abb. 6a). Die manuelle Bildaufnahme erfolgte wie bei den meisten UAV-Einsätzen üblich in regelmäßigem Raster und parallelen Bahnen, wie in der nachstehenden Abb. 6b ersichtlich ist. Zur Gewährleistung der Bahnhaltigkeit wurde die Kamera händisch an eine Führungsschiene angelegt wo zusätzlich die geplanten Bildpositionen markiert waren.



(a)



(b)

Abb. 6: Versuchsaufbau zur Quantifizierung der Genauigkeit, (a) Das Gebiet wurde mit insgesamt 33 binär codierten Markern versehen, und in regelmäßigem Raster (b) „beflogen“

Wie bereits erwähnt kommt der Abgrenzung des Versuchsraums eine hohe Bedeutung zu. Im vorliegenden Fall wurden deshalb nur jene Parameter in die Betrachtung einbezogen, die von Anwendern im Feld auch tatsächlich gesteuert werden, bzw. welche auch in den gängigen Flugplanungstools (z.B.: Pix4Dcapture oder UgCS) variiert werden können. Konkret sind dies:

- Flughöhe: Getestet auf 3 Stufen, 32, 128 und 160 cm (entspricht 32, 128 und 160 m im Realmaßstab)
- Überlapp longitudinal: Getestet auf 2 Stufen, 70 und 90 %
- Überlapp lateral: Getestet auf 2 Stufen, 70 und 90 %
- Blickwinkel relativ zum Objekt: Getestet auf 2 Stufen, 45 und 90°
- Passpunktconfiguration zur Georegistrierung: 2 verschiedene räumliche Konfigurationen mit je 6 Passpunkten getestet

Gemäß dem Konzept des Vollfaktorplans in 2 unabhängigen Blöcken (jeder Versuch wird zur Steigerung der statistischen Belastbarkeit unabhängig voneinander zweimal durchgeführt) führt die

Kombination der genannten Faktoren zu insgesamt 96 Versuchsdurchläufen bzw. Bildverbänden. Für jeden Durchlauf werden, wie bei früheren Versuchen in Bergbaubetrieben (Tscharf et al. (2016) bzw. Rumpler et al. (2014)), die Koordinaten der Kontrollpunkte bestimmt und diese mit bekannten Referenzkoordinaten gegenübergestellt und verglichen.

4.3 Referenzvermessung

Entgegen der Erfahrung aus den Versuchen zur Haufwerkscharakterisierung und der grundsätzlichen Erwartungshaltung zeigte sich bei der Schaffung von Referenzinformationen zur Evaluierung der Genauigkeit, dass dies im Modellmaßstab mitunter wesentlich schwieriger als in der realmaßstäblichen Untersuchung sein kann. Die zur Referenzvermessung eingesetzte Methode muss zumindest eine Genauigkeit in der zu erwartenden Größenordnung des untersuchten Verfahrens aufweisen und muss insbesondere auch reproduzier- und belastbare Ergebnisse liefern.

Während die Genauigkeit der photogrammetrischen Verfahren im kleineren Maßstab als Funktion der kleineren Bodenauflösung signifikant zunimmt zeigen herkömmliche geodätische Verfahren dieses Verhalten naturgemäß nicht im selben Ausmaß. Bei der hier vorgestellten Anordnung im Maßstab 1:100 bedeutet dies, dass die zu erwartenden Genauigkeiten bzw. Unterschiede zwischen verschiedenen Bildverbänden in der Größenordnung von einigen Zehntelmillimetern liegen, da in der Realität von einstelligen Zentimeterwerten ausgegangen werden kann. (Rumpler et al. (2014))

4.3.1 Genauigkeitsvoranschlag

Die Vermessung erfolgte mit der vorhandenen Trimble S6 Totalstation mit einer herstellerseitigen Genauigkeit von 0,5 mgon für Horizontal- und Vertikalwinkel bzw. $\pm 3 \text{ mm} + 3 \text{ ppm}$ in der Distanzmessung auf Prismen. Ein sehr einfacher Genauigkeitsvoranschlag für Polares Anhängen eines Punktes nach dem Varianzfortpflanzungsgesetz (Formel 1, nach Niemeier (2008)) mit den angeführten a priori Genauigkeiten führt zu Standardabweichungen der berechneten Neupunkte von rund 2,5 mm.

$$\sum_{ff} = A \sum_{ll} A^T \quad 1$$

Auch bei der Beobachtung in mehreren Sätzen unter Einbeziehung verschiedener Instrumentenstandpunkte, zeigt sich somit deutlich, dass eine gängige geodätische Netzanordnung zur Bestimmung der Referenzkoordinaten im vorliegenden Fall zunächst nicht geeignet ist. Dieser Umstand ist hauptsächlich auf die Ungenauigkeit der elektrooptischen Entfernungsmessung zurückzuführen, was vor allem auch in der theoretischen Betrachtung der Punktbestimmung über Vorwärtseinschnitt (mit der angegebenen Richtungsgenauigkeit von 0,5 mgon) deutlich wird, wo Genauigkeiten der zu bestimmenden Neupunkte in der Größenordnung weniger Zehntelmillimeter zu erwarten sind.

4.3.2 Durchführung der Vermessungen

Aufgrund der angesprochenen „Ungenauigkeit“ der elektrooptischen Entfernungsmessung – nicht nur bei reflektorloser Messung, sondern auch bei der Verwendung von Prismen - musste die Referenz-

renzvermessung mit einer alternativen Skalierung durchgeführt werden. Entsprechend wurden zwei, ein Meter lange, Referenzmaßstäbe als Basislatten orthogonal zueinander in der Szene positioniert und deren Enden von insgesamt vier, rund um das Areal angeordneten, Instrumentenstandpunkten aus in jeweils zwei Vollsätzen angezielt. Die 33 Kontrollpunkte wurden ebenfalls in zwei Vollsätzen von jedem der vier Standpunkte aus eingemessen, um deren Koordinaten anschließend zu bestimmen.

Die Bestimmung der Standpunktkoordinaten bzw. der Längen zwischen den Standpunkten erfolgte unter Lösung der Hansen'schen Aufgabe. Klassisch wird dabei von zwei unbekanntem Standpunkten (A und B in Abb. 7) ausgegangen zwischen denen einerseits gegenseitige Sicht besteht, und von wo aus auch jeweils Sicht zu beiden Endpunkten (C und D in Abb. 7) einer bekannten Basis (c in Abb. 7) besteht. Die Lösung erfolgt über trigonometrische Funktionen bzw. über geometrische Zusammenhänge (z.B.: $\alpha_2 + \beta_1 = \gamma_2 + \delta_1$) innerhalb der entstehenden Dreiecke. Aufgrund der starken Überbestimmtheit der geometrischen Figur(en), konnten außerdem noch alle Beobachtungen in einem bedingten Ausgleich verbessert werden, wodurch in weiterer Folge das Referenzkoordinatensystem festgelegt werden konnte.

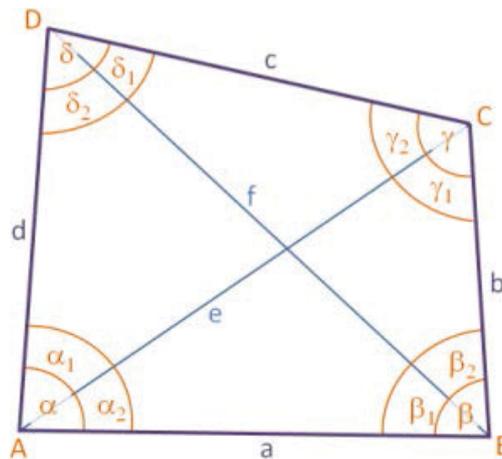


Abb. 7: Prinzipskizze zur Hansen'schen Aufgabe mit den unbekanntem Standpunkten A und B, sowie der bekannten Basislänge c (www.in-dubio-pro-geo.de)

Unter Verwendung der festen Standpunktkoordinaten wurden abschließend noch die Koordinaten der Kontrollpunkte im gemessenen Triangulationsnetz ermittelt, wobei durch das beschriebene Vorgehen auch die notwendigen Genauigkeitsanforderungen eingehalten werden konnten.

4.4 Ergebnisse

Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, sollen als Ergebnis der Versuchsdurchläufe bzw. aus der Auswertung der angesprochenen 96 Bildverbände die Effekte der einzelnen Faktoren auf die Genauigkeit der 3D-Rekonstruktion ermittelt werden, wobei als Fehlermaß das arithmetische Mittel über die Länge der 3D-Vektoren an den 33 Kontrollpunkten verwendet wurde.

Wiewohl zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Beitrags die Auswertung und insbesondere Modellbildung noch nicht vollständig abgeschlossen ist, können die bisherigen Ergebnisse zumindest schon mit realmaßstäblichen Befliegungen gegenübergestellt und abgeglichen werden. So zeigt sich

zunächst in beiden Versuchsanordnungen ein signifikanter Einfluss der Flughöhe, die dementsprechend auch den stärksten Effekt im Gesamtergebnis haben dürfte.

Wie bereits bei Befliegungen in Bergbaugebieten gezeigt (Tscharf et al. (2016)) kann auch im Modell ein relatives Minimum bei einer Höhe von rund 100 m bzw. 100 cm im Modell erkannt werden. Dies ist einerseits darauf zurückzuführen, dass bei diesen Abständen Texturen optimal aufgelöst werden können, was sich positiv auf die Feature Detektion und die weitere Schätzung der äußeren Orientierung auswirkt. Andererseits kann die Szene aus größerer Höhe von weniger Bildern abgedeckt werden, die einzelnen Bildausschnitte sind größer, der gesamte Bildverband kann robuster geschätzt werden und ist nicht so stark von systematischen Verzerrungen (bei Structure from Motion oft üblich) beeinflusst.

Hinsichtlich des Überlapps kann gesagt werden, dass der Überlapp zwischen den einzelnen Bahnen einen stärkeren Einfluss auf die Ergebnisse zu haben scheint, als der Bildüberlapp innerhalb der Bahn. Da die längere Seite des Sensors bei der Aufnahme parallel zur Bahnachse ist, ist die überlappende Bildfläche bei prozentueller Berechnung der Überlappung zwischen den Bahnen relativ gesehen größer, woraus sich wiederum der erkannte Einfluss begründen könnte.

Bei getrennter Betrachtung der Fehler in Lage und Höhe zeigt sich, dass bei geneigter Kameraachse die Abweichungen in der Höhe verhältnismäßig geringer sind, was wohl auf die veränderte Schnittgeometrie der Bildstrahlen zurückzuführen ist.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass Modellversuche einen wichtigen Beitrag zur photogrammetrischen Forschung leisten können – und dies sowohl in der angewandten Entwicklung als auch der Grundlagenforschung. Zur einfachen Generierung von Basis-, Referenz- und Trainingsdaten zur Entwicklung neuer Algorithmen im Bereich der „bergbauanwendungsorientierten“ Bildverarbeitung, und als wichtiges Werkzeug für grundlegende Untersuchungen zur Genauigkeit von UAV-Vermessungen mittels Structure from Motion konnten Ergebnisse erzielt werden, die einen unmittelbaren Rückschluss auf reale Bedingungen zulassen.

5.1 *Bildbasierte Haufwerkscharakterisierung*

Methoden basierend auf maschinellem Lernen bieten neue Möglichkeiten zur Haufwerkscharakterisierung. Im Gegensatz zu konventionellen Methoden wird die gesamte Farbinformation verwendet, Steine werden auch unter schwierigen Bedingungen (Schatten), oder bei sehr ähnlichen Farben richtig voneinander getrennt. Zusätzlich fällt die sehr aufwändige Feineinstellung einzelner Parameter komplett weg.

Positiv herauszustreichen ist vor allem auch die Tatsache, dass die im Modell vorangetriebene Entwicklung mit bekannter Ground truth Information direkt auf reale Daten vom Steirischen Erzberg angewandt werden konnte. Die Versuchsanordnung kann somit als repräsentativ betrachtet werden und auf Basis der bisherigen Ergebnisse steht einer weiteren Entwicklung der Software – geplant ist eine Erweiterung um mehr Trainingsdaten, sowie die Einbeziehung von dreidimensionaler Information als Ergänzung zur Bildinformation – unter Verwendung von Modellversuchen nichts im Wege.

5.2 Quantifizierung der Genauigkeit

Auch zur Quantifizierung der Genauigkeit konnten Modellversuche erfolgreich eingesetzt werden, was anhand der vergleichbaren Ergebnisse im Modell- und Realmaßstab deutlich unterstrichen wird. Insbesondere im beschriebenen Konzept der statistischen Versuchsplanung, wo die Einhaltung der gewählten Stufen bei der Variation der Faktoren unbedingtes Erfordernis ist, leisten modellhafte Überlegungen einen wichtigen Beitrag, da die Stufen im Realmaßstab zumeist nicht ausreichend genau eingehalten werden können.

Zur Ableitung grundlegender Zusammenhänge, die in weiterer Folge ein gewisses Maß an allgemeiner Gültigkeit aufweisen sollen, ist es überdies notwendig den Analysefehler weitestgehend auszuschalten. Dementsprechend kommt insbesondere der Schaffung einer belastbaren Referenz neben einer sauberen Versuchsdurchführung eine große Bedeutung zu, wobei dies wie beschrieben im Modellmaßstab mitunter schwieriger sein kann als in der Realität.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine Kombination von realen und modellhaften Untersuchungen einen wertvollen Beitrag zum Stand des Wissens leisten kann. Vor allem in den oft vielfältigeren Untersuchungsmöglichkeiten und dem höheren Grad an Reproduzierbarkeit, die sich in Modellen ergeben, zeigt sich der Mehrwert von Modellversuchen als wertvolle Ergänzung zu Analysen unter Realbedingungen.

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

Bamford T., Esmaeili K., Schoellig A.P. (2017) A real-time analysis of post-blast rock fragmentation using UAV technology, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 31:6, 439-456, DOI: 10.1080/17480930.2017.1339170

Berger, M., Tscharf, A., & Mayer, G. (2017). „Structure from Motion“ zur flächigen Deformationsvermessung unter Tage -: Modellversuche als Beitrag zur Entwicklung eines nutzerfreundlichen Messsystems unter Verwendung von Bildern. *Berg- und hüttenmännische Monatshefte: BHM*, 162(6), 210-215. DOI: 10.1007/s00501-017-0604-9

Canny J. (1987) “A computational approach to edge detection”, *Readings in Computer Vision*, pages 184 – 203

Daftny, 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*

He K., Gkioxari G., Dollar P., Girshick R. (2017): “Mask R-CNN”, IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2980 – 2988

Heiss, C. (2017). Überlegungen zur Sicherung von Personen und Infrastrukturbauwerken gegen Steinschlag im alpinen Bereich unter besonderer Berücksichtigung flexibler Steinschlagschutzsysteme - Modellierung flexibler Steinschlagschutzsysteme im Labormaßstab zur Beurteilung nichtgenormter Lastfälle, Dissertation, Montanuniversität Leoben

Ivanova, R., Ouchterlony, F., & Moser, P. (2015). Influence of distorted blast hole patterns on fragmentation as well as roughness of and blast damage behind remaining bench face in model scale blasting. in A. T. Spathis (Hrsg.), Fragblast 11, 11th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting (Band 7/2015, S. 693-705). Carlton, VIC.

Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. (2012): “Imagenet classification with deep convolutional neural networks”, Advances in Neural Image Processing Systems (NIPS)

Moser, P., Wimmer, M., & Ouchterlony, F. (2008). The fragment size distribution of Kiruna magnetite, from model-scale to run of the mine. in 5th International Conference and Exhibition on Mass Mining (S. 691-703). Luleå Univ. of Technology.

Pix4Dcapture flight planning, <https://pix4d.com/product/pix4dcapture/>, 28.03.2018

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

Schimek, P., Ouchterlony, F., & Moser, P. (2015). Influence of blasthole delay times on fragmentation as well as characteristics of and blast damage behind a remaining bench face through model-scale blasting. in A. Spathis et al. (Hrsg.), Fragblast 11, 11th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting (Band 7/2015, S. 257-265). Carlton, VIC.

Siebertz K.; van Bebber D.; Hochkirchen T. (2010): Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (VDI-Buch).

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.; Mostegel C.; Mayer, G.; Fraundorfer F., Bischof, H. (2017): Der Einsatz unbemannter Flugsysteme zur Charakterisierung von gesprengtem Haufwerk. - in: Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie der TU Freiberg, Heft 2017-1. (2017), S. 132 – 145

Tutorium: Hansen’sche Aufgabe, <http://www.in-dubio-pro-geo.de/?file=tutorial/hansen>, 29.03.2018

UGcS flight planning, <https://www.ugcs.com/>, 28.03.2018

Van Aswegen, H., C V B Cunningham (1986): The estimation of fragmentation in blast muckpiles by means of standard photographs. J South African Inst Min Met, vol. 86, no 12, pp 469-474

Van den Bergh M., Boix X., Roig G., Van Gool L. (2014): “SEEDS: Superpixels Extracted via Energy-Driven Sampling.” International Journal of Computer Vision (IJCV)