

Der Einsatz unbemannter Flugsysteme zur Charakterisierung von gesprengtem Haufwerk

**Alexander Tscharf¹, Christian Mostegel², Andreas Gaich³,
Gerhard Mayer¹, Friedrich Fraundorfer², Horst Bischof²**

¹Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft,
²Technische Universität Graz, Institut für Maschinelles Sehen und Darstellen, ³3GSM GmbH

ZUSAMMENFASSUNG:

Die erreichte Zerkleinerung und die Form des Haufwerks sind die beiden wichtigsten Ergebnisse einer Tagebausprengung. Schnelle Informationen über die Eigenschaften des gesprengten Haufwerks ermöglichen eine zielgerichtete und effiziente Produktionsplanung und Kenntnisse über die erreichte Zerkleinerung ermöglichen außerdem Anpassungen in der weiteren Zerkleinerungskette. Durch den Einsatz von UAVs (unmanned aerial vehicles) gemeinsam mit modernen Algorithmen aus dem Bereich Computer Vision und des maschinellen Lernens soll eine schnelle Erfassung und Interpretation der Daten bei gleichzeitiger Integration in die herkömmlichen betrieblichen Abläufe ermöglicht werden, und außerdem können Schwächen bodengebundener Systeme hinsichtlich Vollständigkeit und Repräsentativität umgangen werden.

Im vorliegenden Beitrag wird einerseits auf den relevanten Stand des Wissens und der Technik eingegangen und andererseits wird die verfolgte Stoßrichtung bei der Systementwicklung dargelegt sowie erste Arbeiten präsentiert.

ABSTRACT:

The fragmentation and the shape of the muck pile are the two major outcomes of open pit mine and quarry blasts. Fast information about the muck pile properties will help to improve the production scheduling and furthermore this information could be used to optimize the blasting patterns of future production blasts. The combined use of unmanned aerial vehicles (UAVs) and modern machine learning and computer vision systems offers a new way of acquiring spatial data to determine on-site fragment size distribution, while at the same time enabling integration into common work flows and mitigating the weaknesses of ground-based systems with special regard to completeness and representativeness.

In the present paper, we will discuss the relevant related work, present the planned path for system development and give examples of first work.

1 Einleitung

Die Gewinnungssprengung im Tagebau stellt die erste Stufe der Zerkleinerungskette dar und hat naturgemäß einen starken Einfluss auf alle nachgeschalteten Prozesse, wie das Laden, Fördern und die weitere Aufbereitung. Die Form des Haufwerks kann zum Beispiel bestimmen ob ein Radlader oder ein Bagger eingesetzt wird. Das Vorhandensein von Knäppern, sowie deren Größe beeinflusst wo mit der Ladearbeit begonnen wird, bzw. ob vorab eine gesonderte Behandlung sowie weitere Zerkleinerung notwendig ist. Schnelle Informationen über die Eigenschaften des gesprengten Haufwerks ermöglichen eine zielgerichtete und effiziente Produktionsplanung und Kenntnisse über die erreichte Zerkleinerung ermöglichen außerdem Anpassungen in den weiteren Schritten bzw. können Rückschlüsse auf zukünftige Gewinnungssprengungen und deren Planung bzw. Auslegung gezogen werden. (Mosher (2011))

Die Bestimmung der Haufwerkseigenschaften einer modernen Gewinnungssprengung mittels Siebanalyse ist weder praktisch noch wirtschaftlich sinnvoll durchführbar, weshalb schon seit einiger Zeit bildbasierte Verfahren in verschiedenen Formen zum Einsatz kommen. Die Photogrammetrie, als flächiges und berührungsloses Verfahren, ist in der Lage die Szene mit sehr hohem Detailgrad zu erfassen, wobei insbesondere bei der Analyse von gesprengtem Haufwerk Abschattungen sowie teilweise und vollständige Überlappung ein großes Problem darstellen. Aufgrund der stetigen Weiterentwicklung unbemannter Flugsysteme (unmanned aerial vehicle, UAV) gemeinsam mit modernen Methoden der bildbasierten 3D-Rekonstruktion (Structure from Motion, SfM) kommen vergleichbare Verfahren mittlerweile in vielen Bereichen der Geodatenerfassung (Inspektion, Masenermittlung, Nachtragsvermessung, ...) zum Einsatz (Briese et al. (2013)). Sie schließen die (geometrische) Lücke zwischen Luftbildphotogrammetrie und terrestrischen Methoden und führen - hervorgerufen durch die weitestgehende Automatisierung der Auswertung - gleichsam zu einer Wiederbelebung bildbasierter Vermessungsverfahren in der Praxis. Im Gegensatz zu vielen herkömmlichen Messsystemträgern (Flugzeuge, Satelliten, Fahrzeuge oder Schiffe) zeichnen sich UAVs vor allem durch die Möglichkeit der schnellen, einfachen, sicheren und kostengünstigen Datenerfassung aus (Rumpler et al. (2014)), was in weiterer Folge den Schluss nahe legt die „neu gewonnene Perspektive“ auch zur Beurteilung von Sprengergebnissen zu nutzen.

Im Rahmen eines internationalen Forschungsprojekts („Sustainable Low Impact Mining solution for exploitation of small mineral deposits based on advanced rock blasting and environmental technologies“, SLIM, Grant agreement No 730294) beschäftigen sich die Autoren gemeinsam mit weiteren Forschungs- und Industriepartnern aus dem In- und Ausland mit dem Potential unbemannter Flugsysteme zur Analyse von gesprengtem Haufwerk. Das Ziel des gegenständlichen Projekts ist die Entwicklung eines Systems, das mittels Methoden der Bildverarbeitung sowie des Maschinellen Lernens, die schnelle Erfassung der Eigenschaften eines gesprengten Haufwerks, wie Form, Zerkleinerung und das Vorhandensein von Knäppern ermöglicht.

Nachdem im Folgenden zunächst der relevante Stand der Technik sowie die theoretischen Grundlagen dargelegt werden, wird anschließend der Stand der aktuellen Forschungsarbeiten präsentiert bzw. ein Ausblick gegeben.

2 Anwendungsorientierte Grundlagen

2.1 Beschreibung von Sprengergebnissen

Neben sicherheitlichen Belangen – vornehmlich Bruchwandstabilität - und relevanten Umwelteinflüssen – wie Staub, Lärm, Erschütterungen oder Steinflug – kann die Güte einer Gewinnungssprengung vordergründig in Form der erreichten Zerkleinerung sowie nach der Form des gesprengten Haufwerks beurteilt werden. Die Beschreibung der Zerkleinerung erfolgt grundsätzlich anhand geometrischer Parameter und beinhaltet im allgemeinen Aussagen über die Korngrößen, Kornform (Kantigkeit bzw. Rundheit) und vor allem deren kollektive Verteilung. Die Definition des Begriffes „Korngröße“ ist jedoch nicht problemlos möglich, da sich vor allem mit abnehmender Symmetrie Schwierigkeiten hinsichtlich der charakteristischen Hauptabmessungen ergeben. Da in der Praxis jedoch nahezu ausschließlich unregelmäßig geformte Körner und Fragmente vorliegen, werden in der Regel Korngrößendefinitionen aus messbaren physikalischen Korneigenschaften abgeleitet (Schubert (1988)):

- Charakteristische Längen (z.B.: Öffnungsweiten von Sieböffnungen oder charakteristische Sehnenlängen)
- Oberfläche oder Projektionsfläche
- Volumen oder Masse
- Im Fein und Feistbereich: Stationäre Sinkgeschwindigkeit bzw. Feldstörungen

Je nach Anwendungsfall, Verfahrensschritt und Korngröße finden zumeist unterschiedliche Korngrößendefinitionen Anwendung, was insbesondere bei der vollständigen Betrachtung des gesamten Materialflusses (Mine to Mill) berücksichtigt werden muss.

2.1.1 Korngrößenverteilung

Bei der Ermittlung einer Korngrößenverteilung wird versucht Aussagen über die Verteilung der Korngrößen im Kollektiv zu gewinnen, d.h. darüber welcher Mengen- bzw. in der Regel Massenanteil kleiner oder größer als eine bestimmte Bezugskorngröße ist, oder auch welche Anteile auf vorgegebene Korngrößenklassen entfallen. (Schubert (1988))

Eine der gängigsten Darstellungsformen ist die Korngrößenverteilungsfunktion (Verteilungssummenkurve), die zumeist als anteiliger Durchgang bzw. Rückstand gegenüber der Maschenweite eines Siebes aufgetragen wird (vgl. Abb. 1). Obwohl es sich bei der Korngrößenverteilungsfunktion um eine diskrete Funktion handelt, wird sie zumeist als kontinuierliche Funktion (Rosin-Rammler-Sperling, Gates-Gaudin-Schuhmann, Kuz-Ram, Swebrec, ...) dargestellt. Für sprengpraktische Anwendungen werden oft charakteristische Kennwerte der Verteilungsfunktion herangezogen, die in Abb. 1 dargestellt und nachfolgend kurz beschrieben werden:

- x_{50} = Eine Maßzahl der mittleren Zerkleinerung. Sie entspricht jener Maschenweite durch die 50% des Haufwerks passen würden. Der x_{50} stellt oft einen zentralen Parameter für die Produktion und deren Planung dar.

- x_N = Allgemeine Maßzahl der Zerkleinerung. Eine Korngröße, der ein definierter Durchgang N zugeordnet ist. N Prozent der Aufgabe sind feiner als x_N (bzw. gröber wenn Rückstände aufgetragen werden)
- $1 - P_O$ = Der Anteil jener Fragmente, die größer sind als eine charakteristische Korngröße x_O , welche wiederum die mit dem vorhandenen Equipment maximal „handhabbare“ Korngröße darstellt.
- P_F = Der Anteil jener Fragmente die feiner sind als eine charakteristische Korngröße x_F , die entweder in der weiteren Verarbeitung oder hinsichtlich der Marktsituation problematisch sein kann.

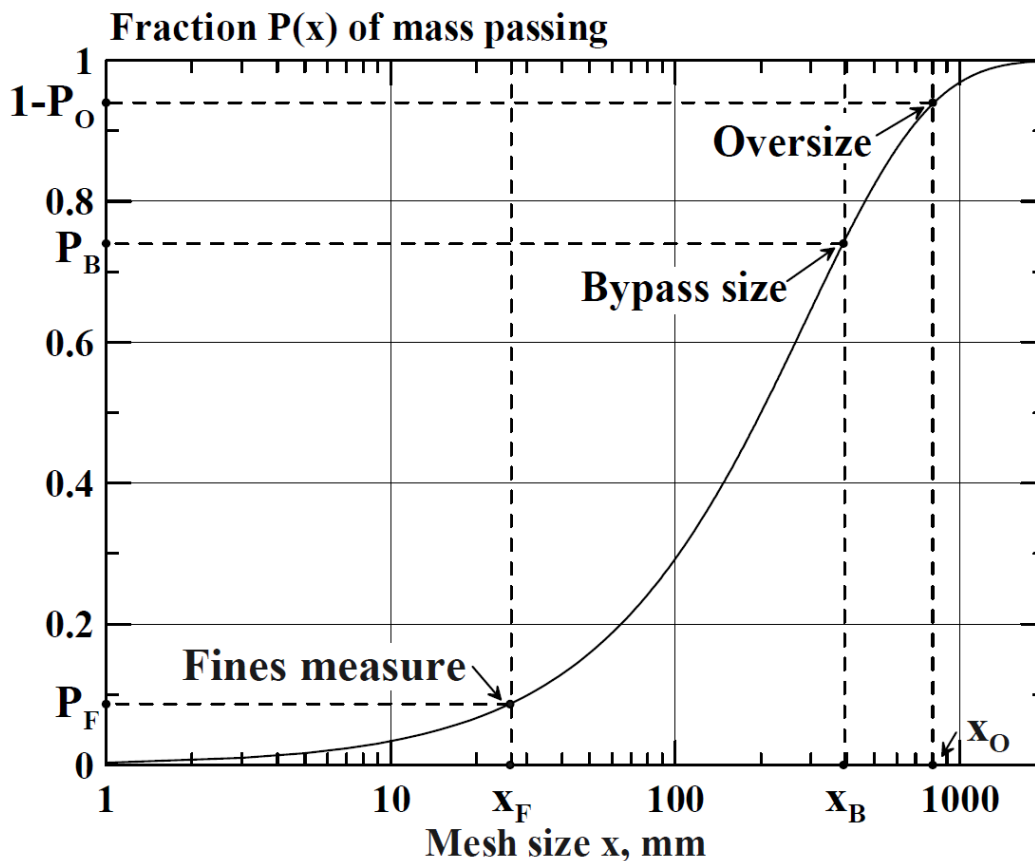


Abb. 1: Beispiel einer Korngrößenverteilung

2.1.2 Kornform

Zusätzlich zur Korngröße ist auch die Kornform oft von Bedeutung. Zur Beschreibung finden zu meist geometrische Formfaktoren Anwendung, wobei in der Praxis nicht selten mit verbalen Ausdrücken wie kugelig, kubisch, plattig, usw. das Auslangen gefunden wird. Formfaktoren sind in der Regel dimensionslose Verhältnisse messbarer Teilcheneigenschaften. Üblich sind Verhältnisse der größten zur kleinsten Abmessung (Länge zu Dicke), oder aber Verhältnisse zwischen Volumen und Oberfläche bzw. Umfang und projizierter Fläche der einzelnen Körner. (Schubert (1988))

Problematisch ist die Kornform insbesondere aufgrund der Tatsache, dass verschiedenen Methoden zur Bestimmung der Korngröße auch unterschiedliche Definitionen der Kornform zu Grunde liegen.

So ist bei der Siebanalyse der kleinste vorhandene Querschnitt entscheidend, weshalb lang gestreckte Körner in ihrer Größe systematisch unterschätzt werden. Eines der Hauptziele der aktuellen Arbeiten ist jedoch die robuste Detektion von Knäppern, also von Fragmenten, die die Größe x_0 überschreiten. In diesem konkreten Fall ist der Grenzwert zumeist schon erreicht sobald zumindest eine Abmessung des Blocks die gegebene Größe x_0 überschreitet, weshalb hier die Siebanalyse nicht nur aus Gründen der Durchführbarkeit keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefert.

2.2 **Bildbasierte Haufwerkscharakterisierung**

Aufgrund der vorhandenen betrieblichen, praktischen und wirtschaftlichen Einschränkungen ist es nicht überraschend, dass die Analyse von Bildern zur Erfassung der Haufwerkscharakteristik schon lange im Fokus von Forschung und Entwicklung steht, wobei sowohl zweidimensionale Bildklassifikation als auch 3D-Stereophotogrammetrie, sowie die photogrammetrische Bearbeitung von Laserscandaten (Donner (2007), Thurley (2002, 2014)) zum Einsatz kommen. Neben Problemen der Repräsentativität – im Gegensatz zur Siebanalyse werden bei berührungslosen Verfahren nur die Partikel an der Oberfläche berücksichtigt - müssen vor allem die folgenden Punkte in die Betrachtung miteinbezogen werden:

- Was zeigen die Bilder? Flach liegende Blöcke im Gegensatz zur Betrachtung des geringsten, meist aufgestellten Querschnitts bei der Siebanalyse.
- Wie erfolgt die Auswertung einer 2D Korngrößenverteilung?
- Wie kann ein 2D Bild in das Volumen oder die Masse einzelner Fragmente überführt werden?
- Die Haufwerksform und die relative Orientierung des Kamerasystems können zu Abschätzungen führen.
- Die Bodenauflösung (ground sample distance, GSD); Wie groß sind die feinsten Partikel die erkannt werden sollen? Dabei muss überdies die Tiefenauflösung, bzw. 3D Genauigkeit - in der Regel um den Faktor 1,5-2 schlechter ist als die GSD – mitberücksichtigt werden.

Erste Lösungen, die versuchten diese Probleme zu überwinden basierten im Wesentlichen auf 2D Bildanalysen (Carlsson und Nyberg (1983)). Van Aswegen und Cunningham (1986) präsentierten bereits sehr früh ein System, das auf dem Vergleich von Fotos eines gesprengten Haufwerks mit „Standardfotos“ basiert (Quick Rating System, QRS). Diese Standardbilder zeigten künstlich hergestellte „Modellhaufwerke“ mit bekannter Korngrößenverteilung, wobei zusätzlich noch Skalierungsobjekte in der Größe des x_{50} in den Bildern sichtbar waren. Die „Referenzhaufwerke“ gehorchten der Kuz-Ram bzw. Rosin-Rammler Verteilung ($x_C = x_{50}/(\ln 2)^{1/n}$) und das System fußte auf der Erkenntnis, dass jedem Wert des Gleichförmigkeitsindex n eine „charakteristische Textur“ zugeordnet werden kann, die skaleninvariant ist und woraus dann in weiterer Folge der x_{50} Wert abgeleitet werden konnte. (Van Aswegen und Cunningham(1986))

In den folgenden Jahren gewannen bildbasierte Verfahren zusehends an Bedeutung, wobei eine umfassende Zusammenfassung bei Franklin et al. (1996) gefunden werden kann. Alle frühen 2D-Verfahren zeigen jedoch im Wesentlichen zwei gemeinsame Schwächen:

- die Unfähigkeit mehr als 1-1,5 Größenordnungen in der Partikelgröße aufzulösen und

- die Tendenz steilere bzw. gleichmäßigere Korngrößenverteilungen zu produzieren als die Siebanalyse.

Der Grund hierfür liegt vordergründig in Fehlern bei der Extraktion einzelner Fragmente: Große Partikel neigen dazu in mehrere Teile zu „zerfallen“ und kleinere werden zu größeren „vereinigt“. Außerdem führen Abschattungen, Überlappung und Verdeckung sehr oft dazu, dass Fragmente falsch klassifiziert werden, da in der Bildebene überlappende Bereiche oft nur sehr schwer bzw. gar nicht erkennbar sind. Die meisten Systeme nutzen Bildsegmentierung, wodurch die Bilder in homogene Bereiche unterteilt werden (Edge-detection oder Morphologie basierte Verfahren), zur Erkennung der „Partikelgrenzen“ (Jemwa (2012)). Die Güte der Bildsegmentierung bestimmt naturgemäß am stärksten die Qualität der ermittelten Haufwerkscharakteristik, wobei die Entwicklung allgemein anwendbarer Algorithmen aufgrund der starken Variation in Beleuchtung, Perspektive, Farbe und allgemein Materialeigenschaften aus heutiger Sicht noch eine ungelöste Aufgabe darstellt und ein interaktives Eingreifen seitens des Anwenders demnach nahezu immer notwendig macht.

Untersuchungen zur Genauigkeit von bildbasierten 2D-Verfahren zeigen außerdem, dass Bildanalyseverfahren im Bereich großer Korngrößen zwar verhältnismäßig gut funktionieren (Fehler < 30%), jedoch im Feinbereich keine zuverlässigen Ergebnisse erreicht werden können (Sanchidrián et al. (2009)). Viele kommerzielle Produkte bieten daher Möglichkeiten zur Korrektur des Feinanteils, was einerseits durch die Kombination von Bildern unterschiedlicher Auflösung, oder aber durch eine rechnerische Korrektur und Kalibrierung erfolgen kann. (Katsabanis (1999))

Trotz der aufgezeigten Schwächen sind 2D Bildanalyseverfahren noch immer die am häufigsten eingesetzte Methode zur Ermittlung der Zerkleinerung im Bergbau. Zumeist kommen hierbei fix installierte Kameras terrestrisch und unmittelbar vor dem gesprengten Haufwerk, an bzw. über Radladerschaufeln und Muldenkippern, sowie an Brechern bzw. Materialübergabestationen zum Einsatz. Für vergleichbare Anwendungen (Vermessung der Korngrößen in der Bildebene) wurde in den letzten Jahren auch eine Reihe von Softwareprodukten - WipFrag, FragScan, Split-Desktop, Power-Sieve, IPACS, TUCIPS, CIAS, GoldSize uvm. - entwickelt, wovon allerdings nur wenige erfolgreich am Markt bestehen konnten. Am weitesten verbreitet sind WipFrag, Fragscan, Split-Desktop und Power Sieve, welche auch bei Latham et al. (2003) näher analysiert wurden. Im Ergebnis brachten die Untersuchungen keinen „eindeutigen Sieger“ hervor. Jedes System hat in gewissen Bereichen – Detektion von Veränderungen in x_C , oder möglichst genaue Bestimmung von x_{10} , x_{50} , x_C , oder x_{95} - Stärken und Schwächen und je nach Anwendungsfall sollte das geeignete Produkt ausgewählt werden. (Latham et al. (2003))

Einige der genannten Schwächen zweidimensionaler Verfahren können durch die Verwendung von 3D-Information abgemindert werden, wie bei Thurley (2002, 2014), Donner (2007) und Campbell (2017) anhand von Laserscandaten und bei Wimmer et al. (2015) am Beispiel von Zerkleinerungsanalysen im Blockbruchbau gezeigt wird. Neben der Möglichkeit größere zusammenhängende Areale aufzunehmen, können auch Probleme hinsichtlich Verdeckung und Skalierung umgangen werden. Durch die vorhandene dreidimensionale Geometrieinformation können hochaufgelöste „Orthofotos“ abgeleitet werden, oder aber auch die 3D Information zur Partikelerkennung herangezogen werden. So können teilweise verdeckte Fragmente erkannt und von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen werden, sowie auch Zonen unterschiedlicher Zerkleinerung erkannt werden. Wie auch bei der zweidimensionalen Analyse stellt jedoch insbesondere die Detektion von Feinanteilen - so-

fern diese im Haufwerk überwiegen - nach wie vor ein Problem dar, das ein händisches Eingreifen unerlässlich macht (Wimmer et al. (2015)). Bei der unmittelbaren Betrachtung von gesprengtem Haufwerk an Ort und Stelle ergeben sich überdies weitere Nachteile aufgrund der Tatsache, dass zumeist terrestrische Systeme zum Einsatz kommen, die einerseits die laufenden betrieblichen Tätigkeiten beeinflussen und andererseits perspektivische Einschränkungen hinsichtlich der Aufnahmeposition einer vollständigen Erfassung der charakteristischen Merkmale entgegen stehen.

Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass die Erfassung der Haufwerkscharakteristik unter Verwendung von Kameras oder LIDAR-Daten zumeist ein starkes händisches Eingreifen erfordert und demgemäß die relevanten Informationen oftmals nur in sehr geringer räumlicher und zeitlicher Auflösung vorliegen. Die Nutzung dreidimensionaler Information führt zwar zu einer signifikanten Verbesserung der Ergebnisse, eine vollautomatische und robuste Erfassung der Haufwerkscharakteristik ist jedoch nach wie vor nicht möglich.

2.3 *Automatisierte Mehrbildauswertung*

IM Rahmen des gegenständlichen Projekts wird eine Verbindung aus photogrammetrischer Erfassung mit maschinellem Lernen zur Charakterisierung des Haufwerks angestrebt. In diesem Kapitel beschreiben wir zuerst die automatische Rekonstruktions-Pipeline und anschließend erläutern wir, wie die daraus erzeugte 3D Information die Charakterisierung des Haufwerks unterstützen wird. Beide Teile sollen am Ende des Projekts mit einem Minimum an menschlicher Interaktion funktionieren und somit die Effizienz des gesamten Abbauprozesses steigern.

2.3.1 *Planung der Bildaufnahme*

Um eine metrische 3D Rekonstruktion aus 2D Bildern zu erzeugen sind mehrere Dinge vonnöten. Zuerst benötigt man einen Satz von Bildern, welcher die zu rekonstruierende Szene aus mehreren Blickwinkeln abbildet. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Bilder mit der richtigen Strategie aufgenommen werden. Einerseits, sollen die Bilder untereinander genügend Parallaxe beinhalten (die Szene von möglichst verschiedenen Blickwinkeln abbilden), weil nur so 3D Information extrahiert werden kann. Andererseits, sollen die Blickwinkeldifferenzen zwischen benachbarten Bildern nicht zu groß sein, da sonst das Finden von Korrespondenzen in den Bildern nicht mehr möglich ist. Um beides zu gewährleisten bietet sich deshalb ein regulärer Rasterflug mit genügend Bildüberlappung an (80% Überlappung ist für die meisten photogrammetrischen Aufgaben ausreichend). In diesem Flugmuster lassen sich auch die Bodenauflösung und die Tiefenungenauigkeit mittels der Kameraparameter im Vorfeld abschätzen (für Details hierzu siehe Rumpler et al. (2016)).

Aus 2D Bildern lässt sich nun eine 3D Rekonstruktion erstellen, welche allerdings ohne weitere externe Information noch keine metrische Skalierung besitzt. Um zu einer metrischen Rekonstruktion zu gelangen, gibt es im Allgemeinen zwei Ansätze. Entweder man bestimmt den metrischen Abstand zwischen den Kamera-Bildern (z.B. mittels GNSS Empfänger) oder man platziert Referenzpunkte mit bekannten Positionen in der Szene, welche in den Bildern wieder gefunden werden können.



Abb. 2: 3D Rekonstruktionsergebnis. (a) Das Structure-from-Motion (SfM) Ergebnis enthält eine dünne Punktwolke und die Kameraposen. (b) Nach dem Multi-View Stereo Schritt wird die Punktwolke wesentlich dichter und enthält Millionen von Punkten. Das rote Viereck markiert den Ausschnitt (c).

2.3.2 Automatische 3D Rekonstruktions-Pipeline

Im Folgenden wird die 3D-Rekonstruktions-Pipeline beschrieben, welche vollständig automatisiert abläuft. Alles was für eine metrische Rekonstruktion benötigt wird, sind Bilder und die absolute Position der automatisch detektierbaren Referenz- bzw. Bodenkontrollpunkte in der Szene (Abb. 3a). Aus diesen Daten lassen sich dann zuerst die Kamera-Posen bestimmen (Abb. 2a), mit welchen dann anschließend eine dichte georeferenzierte Punktwolke erzeugt werden kann (Abb. 2b). Die folgenden Paragraphen beschreiben die wichtigsten Schritte des Rekonstruktionsprozesses im Detail.

Finden von Korrespondenzen. Um eine 3D Rekonstruktion aus 2D Bildern zu erstellen, müssen Korrespondenzen zwischen Bild-Paaren hergestellt werden. Zu diesem Zweck, werden im ersten Schritt SIFT-Punkte und die dazugehörigen Deskriptoren (Lowe (2004)) extrahiert. Anschließend versucht man korrespondierende Punkte in Bild-Paaren zu finden. Da der Brute-Force-Ansatz quadratische Komplexität in der Anzahl der Bilder zeigt, ist man bei größeren Datensätzen darauf angewiesen die Anzahl der Bildpaare zu verkleinern. Eine bewährte Art dies zu erreichen ist die Verwendung eines Vocabulary Trees (Irschara et al. (2009)). Mit dieser gelernten Baumstruktur ist es möglich, die k-nächsten Nachbarbilder effizient zu finden, wobei zumeist die nächsten 40 Nachbarn für stabile Ergebnisse ausreichend sind. Zwischen den resultierenden Bild-Paaren werden dann korrespondierende SIFT-Punkte anhand ihres Deskriptors gesucht. Da dieser Prozess allerdings fehlerbehaftet ist und viele der Korrespondenzen inkorrekt sind, wird danach ein Verifikationsschritt abgeschlossen. Fehlerhafte Korrespondenzen werden hier mittels des 5-Punkt Algorithmus (Stewenius et al. (2006)) zur Epipolar-Verifizierung robust innerhalb einer RANSAC-Schleife (Fischler und Bolles (1981)) detektiert. Da auch nicht garantiert ist, dass in diesem Schritt alle Ausreißer detektiert wurden, können fehlerhafte Epipolar-Hypothesen mittels Dreiergruppen von Bildern detektiert werden (Zach et al. (2010)).

Structure-from-Motion. Mit den gefundenen Korrespondenzen kann nun der eigentliche 3D Rekonstruktions-Prozess gestartet werden. Dieser Prozess wird in der Computer Vision Domäne „Structure-from-Motion“ (SfM) genannt, und stellt die gleichzeitige Schätzung von Kamera-Posen und Geometrie (3D Punkten) anhand der gefunden Korrespondenzen dar. Unsere Pipeline arbeitet diesen Prozess in einem inkrementellen Schema ab. Begonnen wird mit dem Bild-Paar mit der höchsten Anzahl der Korrespondenzen zu anderen Bildern. Mittels der relativen Pose dieses Paares (definiert durch die Epipolar-Matrix) werden die gefunden Punkt-Korrespondenzen trianguliert. Das

heißt, dass die Sichtstrahlen geschnitten werden und so die 3D-Position des korrespondierenden Punktes geschätzt wird. Nach dieser Initialisierung, werden nun nach und nach weitere Kameras (geordnet nach der Anzahl der Korrespondenzen) hinzugefügt. Die Pose der neuen Kamera-Bilder wird nun mittels 3-Punkt Algorithmus (Gao et al. (2003)) in einer RANSAC-Schleife bestimmt. Mit dieser Pose werden dann auch anschließend neue Punkte trianguliert. Nach einer fixen Anzahl an neu hinzugefügten Kameras, werden nun Kamera-Posen und Geometrie simultan und global optimiert. Diese nicht-lineare Optimierung wird Bündelblockausgleich genannt und ist essentiell um Drift-Erscheinungen zu minimieren. Sollte keine genaue Kalibrierung der Kamera vorliegen, kann diese auch in diesem Schritt mit optimiert werden.

Geo-Referenzierung. Unsere Pipeline unterstützt sowohl eine Georeferenzierung mittels GNSS-Positionen der Kamera, als auch mittels Referenz-Punkten in der Szene. Für vermessungstechnische Aufgaben in diesem Maßstab ist allerdings die Referenzierung mittels Referenz-Punkt genauer, weshalb wir diese Referenzierungsart bevorzugen. Um die manuelle Interaktion minimal zu halten, verwenden wir Referenz-Punkte welche voll automatisch in den Bildern detektiert werden können (Rumpler et al. (2016)) (siehe Abb. 3a). Alles was nun für eine metrische Rekonstruktion benötigt wird, ist die absolute Position der Referenz-Punkte. Mit dieser Information kann die 3D Rekonstruktion, dann einfach mittels Similarity Transformation (3D-Helmert Transformation) in ein metrisches und georeferenziertes System gebracht werden. Zur Erhöhung der Genauigkeit und insbesondere zur Vermeidung beziehungsweise Abschwächung systematischer Deformationen des Bildblocks können die zusätzlichen Informationen aus Bodenkontrollpunkten und bekannten Kamerapositionen auch in den Bündelblockausgleich integriert werden. Im Gegensatz zur formerhaltenen Transformation werden sowohl die innere als auch die äußere Orientierung nochmals optimiert, wobei die Kamera- und Objektpunktpositionen an die bekannten Referenzpositionen gekoppelt werden und sich somit nur beschränkt bewegen dürfen.

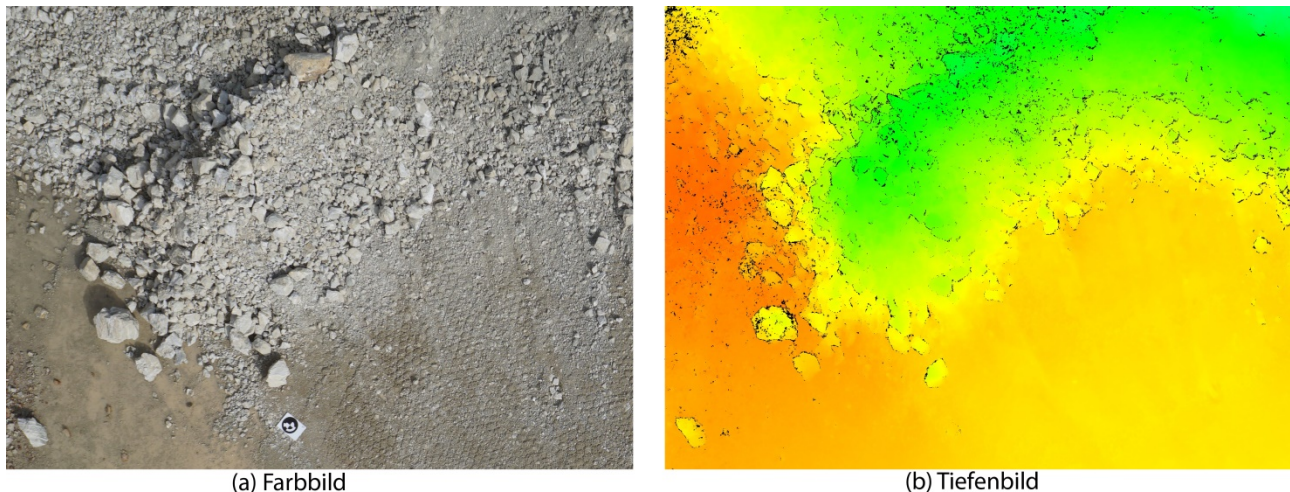


Abb. 3: Beispiel einer Luftbildaufnahme. (a) zeigt das Farbbild einer Luftbildaufnahme des Haufwerks. Im unteren Teil des Bildes lässt sich auch der automatisch detektierbare Referenz-Punkt erkennen. (b) zeigt ein farbkodiertes Tiefenbild welches mit Multi-View Stereo erstellt wurde. Grüne Objekte sind näher als rote. Knäpper und größere Brocken sind im Tiefenbild sehr gut erkennbar.

Multi-View Stereo. Da die Kamera-Positionen nach der Georeferenzierung ebenfalls metrisch vorliegen, kann nun direkt eine „dichtere“ Punktwolke in richtiger Skalierung erzeugt werden. Bei die-

sem Prozess, der auch Multi-View Stereo genannt wird, ist es das Ziel für jeden Pixel im Bild einen Tiefenwert zu bestimmen. Diese Tiefenwerte können dann entweder in einem Tiefenbild weiterverarbeitet werden, oder zu einer Punktwolke verbunden werden. In Abb. 2 wird eine Punktwolke, welche mit SURE (Rothermel et al. (2012)) verdichtet wurde dargestellt und Abb. 3b zeigt ein Beispiel eines Tiefenbildes.

2.3.3 Haufwerkscharakterisierung mit maschinellem Lernen

Im Rahmen des Projektes wollen wir die metrische 3D Rekonstruktion mit maschinellem Lernen verbinden. Unser Ziel ist es die Korngrößenverteilung vollautomatisch zu bestimmen, sowie Knäpper und Bereiche unterschiedlicher Zerkleinerung zu detektieren. Teil dieser Aufgabe ist es die Umrisse der Gesteinsbrocken richtig zu erkennen und zu interpretieren. Da reine Farbbilder wegen Schattenwurf nicht immer gut dafür geeignet sind, werden wir auch die Tiefen-Information aus der 3D Rekonstruktion (siehe Abb. 3b) dazu verwenden. Da die Korngrößenbestimmung und Knäpperdetektion metrische Aufgaben sind, ist eine metrische Rekonstruktion eine sehr wichtige Informationsquelle. Für die Segmentierung der einzelnen Körner werden wir neuronale Netze verwenden. Diese Netzwerke sind in der Lage die Unterschiede zwischen scheinbaren Kanten (z.B. durch Schattenschlag) von echten Objektumrissen zu unterscheiden (Xie und Tu (2015)). Um diese Unterscheidung treffen zu können müssen die Netzwerke allerdings speziell für diese Aufgabe trainiert werden. Es muss jedoch nicht immer alles von Null weg gelernt werden. Mit Transfer Learning (siehe z.B. Yosinski et al. (2014)) können Netzwerke, die für eine bestimmte Aufgabe mit großen Mengen an Trainingsdaten (z.B. Bild-Klassifikation) trainiert wurden, mit nur geringen Mengen an zusätzlichen Trainingsdaten für andere Aufgaben adaptiert werden. Diese Eigenschaft werden wir nutzen um die benötigte Menge an Trainingsdaten möglichst gering zu halten.

3 Stand der Forschungsarbeiten

Im Folgenden soll der Stand der Tätigkeiten bei der angestrebten Systementwicklung dargelegt werden, wobei grundsätzlich zwei Stoßrichtungen verfolgt werden: Neben der Auswertung realmaßstäblicher Daten von Gewinnungssprengungen im Tagebau, sollen vor allem aufgrund der einfacheren Reproduzierbarkeit und der Möglichkeit eine exakte „Ground Truth“ zu ermitteln auch Modellversuche durchgeführt werden.

3.1 Befliegungen in Testgebieten

Um die Funktion der entwickelten Technologieplattform und der Algorithmen unter realen Bedingungen sicherzustellen werden schon zu Beginn der Entwicklung reale Befliegungsdaten in die Betrachtungen miteinbezogen. Die ersten Befliegungen dieser Art wurden am Steirischen Erzberg durchgeführt, wobei die Sprenganlage sowohl vor der Sprengung, unmittelbar danach und auch während und nach der Ladearbeit aufgenommen wurde und wird. Bei den Sprengungen am Steirischen Erzberg handelt es sich in der Regel um einreihige Sprengungen, mit einer Vorgabe von rund 6 m, einem Seitenabstand von rund 6,5 m, einem Bohrlochdurchmesser von 152 mm und einer Bruchwandhöhe zwischen 15 und 25 m. Als Sprengstoff kommt Site sensitized Emulsions-spreng-

stoff, ANFO und Heavy ANFO zum Einsatz, die Zündung erfolgt nicht elektrisch (NONEL) aus dem Bohrlochtiefsten und eine durchschnittliche Sprengung umfasst zwischen zehn- und fünfzigtausend Tonnen.

Die Aufnahme erfolgt mit der Ausrüstung des Lehrstuhls für Bergbaukunde an der Montanuniversität und als Kamera kommt eine Sony Alpha 6000 Systemkamera mit einer Auflösung von 24Mp und einer fixen Brennweite von 16 mm zum Einsatz (Tscharf et al. (2016-1)). Zur Skalierung und Georeferenzierung der 3D Rekonstruktionen werden Bodenkontrollpunkte (GCPs) eingesetzt, die als binär codierte und automatisch detektierbare „fiducial Marker“ ausgeführt sind, wobei vor allem auf eine gleichmäßige Verteilung der Punkte - sowohl auf der Grund- als auch auf der Kopfetage – zu achten ist. (Daftry et al. (2013) und Tscharf et al. (2016-2))

Der vordergründige Zweck dieser Befliegungen ist die Schaffung einer fundierten Datenlage für die weitere Algorithmenentwicklung, weshalb die Sprenganlagen immer in mehreren Höhen und auch aus verschiedenen Blickrichtungen aufgenommen werden. Die Flughöhe bzw. der Objektabstand muss an die gewünschte Zielsetzung angepasst werden, da die Bildauflösung naturgemäß einen limitierenden Faktor bei der Detektion einzelner Fragmente darstellt. Im Rahmen der Testbefliegungen wird die Auflösung gemäß der nachstehenden Formel 1 gewählt, wodurch die Erkennbarkeit der kleinsten relevanten Partikel sichergestellt werden soll.

$$\text{Bildauflösung} \left[\frac{mm}{px} \right] = 0.1 * \text{kleinste zu erkennende Korngröße [mm]} \quad 1$$

Für die quantitative Beurteilung der Ergebnisse und zur Verifizierung der abgeleiteten Korngrößenverteilungen ist jedoch eine aussagekräftige und vor allem reproduzierbare Referenz unbedingte Voraussetzung. Da eine vollständige Siebanalyse der Gewinnungssprengungen am Steirischen Erzberg praktisch jedoch nahezu unmöglich ist, kann diese für die realmaßstäblichen Daten nur bedingt gegeben werden und eine Bestimmung der tatsächlichen Haufwerkscharakteristik ist nicht möglich. Neben dem Vergleich mit am Markt vorhandenen bildbasierten Lösungen (z.B.: Fragscan, WipFrag oder Split-Desktop) können die Ergebnisse nur durch händische Klassifizierung und Beurteilung überprüft werden.

3.2 Modellversuche

Aufgrund der angesprochenen Probleme hinsichtlich Schaffung einer vollständigen Referenz- bzw. „Ground Truth“-Information sollen neben den realmaßstäblichen Befliegungen auch Modellversuche im Maßstab 1:25 durchgeführt werden. Durch die Verwendung von zerkleinertem Material vom Steirischen Erzberg wird die Vergleichbarkeit der Modellversuche mit den Befliegungen sichergestellt und die Modelldaten können überdies auch als Trainingsdaten für die Algorithmen des Maschinellen Lernens herangezogen werden. Basierend auf den Ergebnissen von realmaßstäblichen Gewinnungssprengungen sollen definierte und durch Siebanalyse verifizierte Versuchskörnungen hergestellt werden, die anschließend mehrmals geworfen und in einem entsprechend skalierten Bildverband fotografiert werden sollen. Das Ziel dieser Versuche ist zu überprüfen ob das 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.

Zu diesem Zweck sollen sowohl „gute“ (gleichmäßige Zerkleinerung) als auch „schlechte“ (zu grob, zu fein, bzw. „dust and boulders“) Sprengungen simuliert werden. Dadurch wird sichergestellt, dass das System am Ende in der Lage ist zwischen unterschiedlichen Zerkleinerungsergebnissen zu unterscheiden und auch deren Qualität zu beurteilen. Jede Versuchskörnung soll rund 70 kg umfassen und entsprechend dem geplanten Maßstab von 1:25 werden die größten Fragmente Korngrößen bis zu 7 cm aufweisen. Das Material soll an eine „Bruchwand“ angeböschert werden und aus vorab definierten Bildpositionen fotografiert werden. Die Bildaufnahme soll aus mehreren Höhen, sowie auch aus verschiedenen Blickrichtungen erfolgen. Der Bildüberlapp wird bei 90% liegen, wodurch ein nachträgliches Ausdünnen der Bilddaten ermöglicht wird und überdies der Einfluss der Bildaufnahme auf die Ableitung der Haufwerkscharakteristika, sowie auf die Erstellung der 3D-Geometrie analysiert werden kann.

4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Unbemannte Flugsysteme in Verbindung mit leistungsstarken und automatisierten 3D-Bildauswertungen haben in den letzten Jahren einen nicht mehr zu übersehenden Stellenwert in der bergmännischen Vermessung erreicht. Aufgrund der Möglichkeit der raschen, sicheren und vollständigen Möglichkeit zur Datenerfassung sollen vergleichbare Systeme jedoch zukünftig nicht nur zur Ableitung von Geometrieinformationen sondern auch für spezielle bergtechnische Anwendungen, wie z.B.: zur Charakterisierung von gesprengtem Haufwerk, eingesetzt werden. Sprenganlagen unterschiedlicher Größe können ohne signifikanten Mehraufwand rasch aufgenommen werden und die abgeleiteten, hoch aufgelösten und vor allem dreidimensionalen Informationen bilden eine wertvolle Grundlage zur Beurteilung der Sprengergebnisse.

Die im Beitrag aufgezeigten Schwächen bildbasierter Verfahren können jedoch nicht allein durch eine neue Trägerplattform umgangen werden, sondern es sind auch signifikante Weiterentwicklungen in der Datenanalyse- und Bearbeitung von Nöten um robuste Aussagen zu generieren. Die Verbindung aus photogrammetrischer Erfassung und maschinellem Lernen soll die Belastbarkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse erhöhen und zur Entwicklung eines weitestgehend automatisierten Systems beitragen, das mit einem Minimum an menschlicher Interaktion funktioniert.

5 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

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

- Campbell AD, Thurley MJ (2017): Application of laser scanning to measure fragmentation in underground mines, *Mining Technology Journal: Transactions of Mining and Metallurgy, Section A*
- Carlsson, O. and Nyberg, L. (1983): A method for estimation of fragmentation size distribution with automatic image processing, in *Proc. First International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting – FRAGBLAST*, August 1983, 333–345, Lulea, Sweden.
- 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*
- Donner R. (2007): Photogrammetrische Haufwerksanalyse unter Verwendung von Laserscannerdaten. 8. Geokinematischer Tag des Instituts für Markscheidewesen und Geodäsie der TU Bergakademie Freiberg. Niemeyer & Sroka (Hrsg.), VGE Verlag, Essen, 232-237
- Fischler, M. A.; Bolles, R. C. (1981). Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24(6), S. 381-395, 1981.
- Franklin J., J M Kemeny und K K Girdner (1996): Evolution of a measuring systems: A review. In *Measurement of blast Fragmentation*, J Franklin & T Katsabanis, pp 47-52, Balkema, Rotterdam
- Gao, X. S.; Hou, X. R.; Tang, J.; Cheng, H. F. (2003). Complete solution classification for the perspective-three-point problem. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 25(8), S. 930-943, 2003.
- Irschara, A.; Zach, C.; Frahm, J. M.; Bischof, H. (2009): From structure-from-motion point clouds to fast location recognition. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (CVPR)*, S. 2599-2606, 2009.
- Jemwa G.T., Aldrich C. (2012): Estimating size fraction categories of coal particles on conveyor belts using image texture modeling methods. *Expert Systems with Applications*, 39(9), 7947-7960
- Katsabanis T (1999): Calibration of optical digital fragmentation measuring systems. In *Proc ISEE 25th ann Conf Expl & Blasting Techn*, Vol II, pp 325-332. ISEE, Cleveland OH.
- Latham J-P, Kemeny J, Maerz N, Noy M, Schleifer J, Tose S (2003): A blind comparison between results of four image analysis systems using a phot-library of piles of sieved fragments. *Int J Fragmentation by Blasting*, vol 7, pp 105-132
- Lowe, D. G. (2004): Distinctive image features from scale-invariant keypoints. *International journal of computer vision*, 60(2), 91-110, 2004.
- Mosher J: (2011): *Crushing, Milling and Grinding*. In P.Darling (Ed.), *SME Mining Engineering Handbook*, 3rd ed., Vol.II, pp1461-1465, SME.
- Rothermel, M.; Wenzel, K.; Fritsch, D.; Haala, N. (2012): Sure: Photogrammetric surface reconstruction from imagery. In *Proceedings LC3D Workshop, Berlin (Vol. 8)*, 2012.
- 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.
- Sanchidrián J.A., Segarra P., Ouchterlony F., López L.M., (2009), On the accuracy of fragment size measurement by image analysis in combination with some distribution functions. *Rock mechanics and rock engineering*, 42(1), 95-116.
- Schubert H.: *Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe*, Band 1. 4. stark überarbeitete Auflage. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1964
- Stewenius, H.; Engels, C.; Nistér, D. (2006): Recent developments on direct relative orientation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60(4), S. 284-294, 2006.
- Thurley, MJ (2002): Three dimensional data analysis for the separation and sizing of rockpiles in mining, PhD thesis, Monash University, Australia
- Thurley MJ (2014) Measuring the visible particles for automated online particle size distribution estimation, *Proceedings of the XXVII International Mineral Processing Congress: IMPC 2014*, 20-24 October 2014, Santiago, Chile
- Tscharf, A.; Mayer, G.; Rumpler, M.; Bischof, H.: UAV-Vermessung im Bergbau – Stand der Forschung und Ausblick. - in: *Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie der TU Freiberg*, Heft 2016-1. (2016), S. 250 – 265
- Tscharf, A., Mayer, G., Rumpler, M., Fraundorfer, F., Bischof, H. (2016). Potentiale und Herausforderungen der UAV-Vermessung im Bergbau – Stand der Forschung und Ausblick. *Das Markscheidewesen*, 123(2-3/2016), S. 33-40.
- 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
- Wimmer M, Nordquist A, Righetti E, Petropoulos MJ Thurley (2015): Analysis of Rock Fragmentation and its Effect on Gravity Flow at the Kiruna Sublevel Caving Mine, *11th International Symposium on Rock Fragmentation by blasting*, Sydney, NSW, 24-26 August 2015
- Xie, S.; Tu, Z. (2015): Holistically-nested edge detection. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (CVPR)*, S. 1395-1403, 2015.
- Yosinski, J.; Clune, J.; Bengio, Y.; Lipson, H. (2014): How transferable are features in deep neural networks?. In *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS)*, S. 3320-3328, 2014.
- Zach, C.; Klopschitz, M.; Pollefeys, M. (2010). Disambiguating visual relations using loop constraints. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (CVPR)*, S.1426-1433, 2010.