Einbindung von UAV-Messungen in bestehende Prozesse der Markscheiderei der MIBRAG

Frank Menge[1], Oliver Lohsträter[2]

[1]VMT GmbH, Bruchsal
[2]Mitteldeutsche Braunkohlengesellschaft mbH, Markscheiderei

ZUSAMMENFASSUNG:

Für die photogrammetrische Datenakquise und Auswertung befindet sich seit dem Frühjahr 2017 ein Unmanned Aerial Vehicle (UAV) bei der GALA-MIBRAG-Service GmbH im Einsatz. Mit diesem werden kleingliedrige Strukturen, geotechnische Ereignisse und zeitlich begrenzt vorhandene Haufwerke erfasst. Die Integration dieser Messungen in die bestehenden Arbeitsabläufe erfordert in Abhängigkeit der eingesetzten Hard- und Software bestimmte Be- und Verarbeitungen für eine fachgerechte Auswertung. Betrachtet wurden diese Bearbeitungen, in Zusammenhang mit einer Abschätzung der erreichbaren Genauigkeiten, im Rahmen einer Abschlussarbeit (Menge, 2018). Im Zuge dieser Veröffentlichung werden, neben der grundsätzlichen Vorstellung der eingesetzten Hard- und Software, die durchgeführten Untersuchungen bezüglich erreichbarer Genauigkeiten näher beleuchtet. Dies umfasst insbesondere die durchgeführte Kamerakalibrierung.

ABSTRACT:

In spring of 2017 an unmanned aerial vehicle has been acquired by the GALA-MIBRAG-Service GmbH for photogrammetric data acquisition and evaluation. It is used to record small-limbed structures, geotechnical events and temporarily limited heaps. The integration of such measurements into existing processes requires data processing, dependent upon the used evaluation Software. This overall process was considered in connection with an estimation of achievable accuracies in the context of a thesis. In course of this publication, this process will be examined in more detail, with special attention given to the performed camera calibration, and a basic presentation of the used hard- and software with its corresponding peculiarities will be given.

1 Einleitung

Zur Dokumentation des monatlich erreichten Tagebaufortschrittes sowie für die markscheiderische Betriebs- und Sicherheitskontrolle, werden im Auftrag der Mitteldeutschen Braunkohlengesellschaft mbH (MIBRAG) Befliegungen der Tagebaue Profen und Vereinigtes Schleenhain durchgeführt. Auf Basis der dabei erzeugten Luftbilder werden Veränderungen visuell erfasst, in CAD-Dateien nachgetragen und anschließend als aktueller Stand des Abbaus in das Risswerk eingepflegt. Allerdings existieren diverse Sonderbereiche, wie archäologische Grabungsstellen, mobile Gewinnungsbereiche u.a., welche aufgrund ihrer Lage bzw. ihrem kurzzeitigen Vorhandensein nicht mit den monatlichen Befliegungen abgedeckt werden und erfordern somit alternative Aufnahmeverfahren.

Infolge technischer Weiterentwicklungen und damit einhergehender Kostensenkungspotentiale finden Unmanned Aerial Vehicle (UAV) für die Bearbeitung derartiger Problemstellungen immer größere Anwendung. Sie erlauben es, solch kleingliedrige Strukturen bzw. Objekte und Gefahrenbereiche photogrammetrisch zu dokumentieren und auszuwerten, deren Einmessung mit herkömmlichen terrestrischen Messinstrumenten nicht praktikabel und eine Befliegung aufgrund der geringen Ausdehnung des Messgebietes, nicht wirtschaftlich ist.

Im Rahmen einer Abschlussarbeit wurde ein Konzept erarbeitet, welches den Einsatz eines UAV, in Kombination mit einer Vollformatkamera, zur Erzeugung von digitalen Luftbildern und der anschließenden Ableitung vektorisierter 3D-Daten aus diesen beschreibt. Die Integration der bei dieser
Prozedur gewonnenen Daten, in die bestehenden Arbeitsabläufe des Markscheidewesens, erfolgte mit den bei der MIBRAG vorhandenen Hard- und Softwarelösungen.

Darüber hinaus wurde eine Untersuchung bezüglich erreichbarer Lage- und Höhengenauigkeiten vorgenommen. Dabei erfolgte eine Betrachtung der für die Auswertung mindestens notwendigen Bildüberdeckungen, Passpunkkonfigurationen und dem Einfluss einer Kamerakalibrierung.

2 Eingesetzte Hard- und Software

2.1 Zur Verfügung stehende Hardware

Basierend auf den zu erwartenden Aufgabenstellungen, wie z.B. der Befliegung archäologischer Grabungsstellen, Rutschungen und Mobilkippen, innerhalb der MIBRAG, welche von (Wittchen, 2016) im Rahmen einer Praktikumsarbeit betrachtet wurden, fiel die Entscheidung ein Multirotorsystem zu erwerben. Ausgewählt wurde dabei ein *Aibot X6 V2* der Fa. Aibotix (siehe Abb. 1). Dieser Hexakopter ermöglicht es u.a. den Gimbal, die kardanische Aufhängung zur Sensorbefestigung, unter- oder oberhalb des Chassis zu montieren. Hervorzuheben ist an dieser Stelle die Vielzahl der mit dem *Aibot X6 V2* kompatiblen Sensoren wie Digital-, Thermal- und Spektralkameras. Zur Steigerung der GNSS-Qualität wurde zusätzlich der *Aibot HP GNSS 2* RTK-Empfänger
erworben. Die Herstellerangaben zu den technischen Spezifikationen dieses UAV sind in der folgenden Tab. 1 aufgeführt, wobei die tatsächliche Flugzeit und somit auch zurückzulegende Flugdis-

tanz sowie die unter den Einsatzbedingungen sinnvolle Fluggeschwindigkeit von diesen Werten erheblich abweichen.

Abb. 1: *Aibot X6 V2* (Aibotix GmbH, 2016a)

Tab. 1: Herstellerangaben zu den technischen Spezifikationen des *Aibot X6 V2* (Aibotix GmbH, 2016a)

Maße	[cm]	105 x 105 x 45
Startgewicht	[kg]	6,6
Nutzlast	[kg]	2
Flugzeit	[min]	≤ 20
Geschwindigkeit	[km/h]	40
Reichweite	[km]	3

Aufgrund der maximalen Nutzlast des *Aibot X6* und den technischen Anforderungen für eine möglichst hohe Abbildungsqualität ergeben sich verschiedene Anforderungen an die für UAV-Messungen eingesetzten Digitalkameras. Bei diesen Kriterien handelt es sich um das Gewicht und die Bauweise der Kamera, die Konnektivität zur Flugplattform sowie das Sensorformat und die Kameraeinstellungen bezüglich Blende, Belichtungszeit und ISO-Wert (Cramer & Leinss, 2016).

Derzeit steht für die Bild- und Videoaufnahme eine *Sony α 7R* mit einem 35 mm Weitwinkelobjektiv zur Verfügung. Diese bietet neben einem Kleinbild-Vollformatsensor eine Belichtungszeit zwischen 30s und 1/8000s, eine Blendenöffnung zwischen F2,8 und F22 und einen ISO-Wert von ISO-50 – ISO-102400. Weitere Angaben bezüglich Sensorformat und Pixelgröße sind in der folgenden Tab. 2 zu finden.

Tab. 2: Technische Details der *Sony α 7R* (Przybilla, 2017)

Gewicht	[g]	465
Brennweite	[mm]	35
Sensorbreite	[mm]	35,90
Sensorhöhe	[mm]	24,00
Pixelgröße	[µm]	4,89
effektive Pixel	[Mio. px]	36,40
Konnektivität		WLAN, NFC

2.2 Zur Verfügung stehende Software

In Kombination mit dem *Aibot X6* wurden die Softwarelösungen *AiProFlight* für die UAV-Flugplanung, Datentransfer und Geotagging sowie *Agisoft PhotoScan Professional* für die photogrammetrische Auswertung erworben. Darüber hinaus stehen mit dem Softwarepaket *Inpho* der Fa. Trimble und *Microstation* / *InRoads* der Fa. Bentley weitere Lösungen für die photogrammetrische Auswertung und CAD-Bearbeitung zur Verfügung, die bereits seit mehreren Jahren bei der MIBRAG bzw. GALA-MIBRAG-Service GmbH erfolgreich im Einsatz sind.

3 Einbindung in bestehende Prozesse des Markscheidewesens

Die Prozesse zur Einbindung von UAV-Messungen gestalten sich hinsichtlich der Planung, Durchführung und Auswertung weitestgehend analog zu denen der Aerophotogrammetrie.

Wesentliche Unterschiede sind die Planung mit Hilfe von Gebietsumringen, anstelle von Flugstreifen sowie der Verzicht auf kleinräumige Befliegungen durch Fremdunternehmen. Die notwendigen Schritte lassen sich wie in der folgenden Abb. 2 dargestellt zusammenfassen.

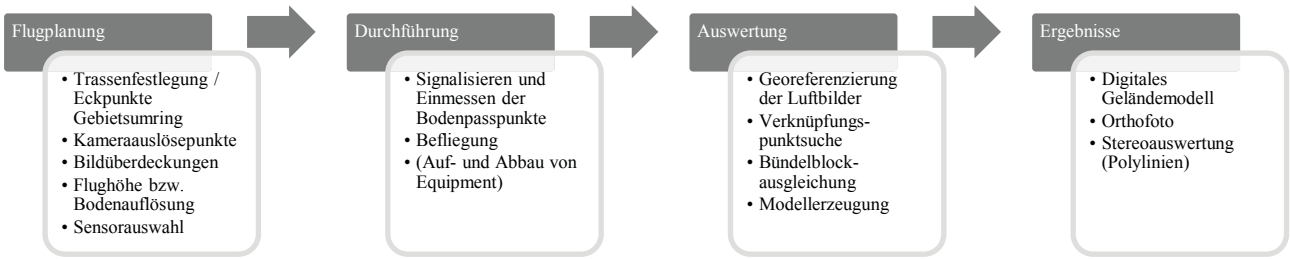

Abb. 2: Prozessschritte der Aerophotogrammetrie und UAV-Messungen

Im Sinne einer fachgerechten Auswertung gilt es Kalibrierungen der eingesetzten Kamerasysteme durchzuführen sowie Koordinatentransformations- und Kameradateien für die Bearbeitung mit *PhotoScan* und *Inpho* zu entwickeln. Aus den sich bei der Auswertung ergebenden Geländemodellen, Punktwolken und Stereomodellen werden in Analogie zur Aerophotogrammetrie risswerkrelevante Objekte bzw. Konturen erfasst und zur Fortführung des Datenbestandes genutzt.

4 Genauigkeitsbetrachtung

4.1 Kamerakalibrierung

Als Grundlage für die anschließende photogrammetrische Auswertung mit *Inpho* und *PhotoScan* galt es eine Kalibrierung zu erarbeiten, die an beide Systeme übergeben werden kann. Softwarelösungen die dafür in Betracht kamen, waren *Agisoft Lens*, *Camera Calibration Toolbox for Matlab* (Bouguet, 2015) und *Python*.

Aufgrund eines möglichst hohen Maß an Kompatibilität und der Durchführbarkeit mit unternehmenseigener Software, insbesondere bei zukünftig neuen Kamerasystemen, wurde die Kalibrierung

der *Sony α 7R* mit *Agisoft Lens* umgesetzt. Analog zu anderen Kalibrierlösungen werden mit *Lens* Korrekturen für die Bildhauptpunktlage und die fokale Länge sowie die Koeffizienten der radialen und tangentialen Verzeichnung bestimmt. Dabei basiert die Bestimmung der nicht-linearen Verzeichnungen auf dem Brown´schen Verzeichnungsmodell oder auch Brown-Conrady-Verzeichnungsmodell (Agisoft LLC, 2017a), (Brown, 1966).

Parameter und Berechnungsgleichungen, die der Kalibrierung zu Grunde liegen, können dem aktuellsten Benutzerhandbuch von *PhotoScan* entnommen werden. Die sich aus dieser Kalibrierung ergebenden Resultate sind in der folgenden Abb. 3 dargestellt. Berechnete Werte werden dabei in Pixeln angegeben.

Parameter	Value	Std Error
Image width	7360	
Image height	4912	
Focal length	7605.37	2.38935
Principal point (x)	10.5587	2.73483
Principal point (y)	-1.29231	2.01667
Affinity B1	0.503964	0.36174
Skew B2	1.69376	0.363928
Radial K1	0.103755	0.00698817
Radial K2	0.138048	0.0983182
Radial K3	-1.83449	0.548712
Radial K4	3.70401	1.04834
Tangential P1	0.0025677	0.000319776
Tangential P2	8.10029e-05	0.000189548
Tangential P3	-2.8105	0.625339
Tangential P4	3.04338	2.36765

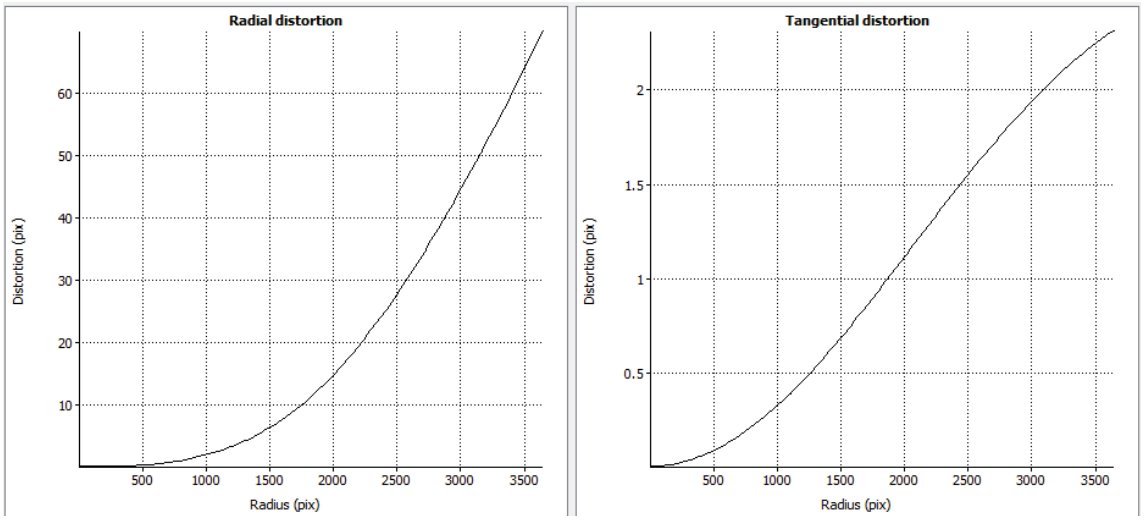

Abb. 3: Kalibrierergebnisse in *Agisoft Lens*

Für die anschließende Verwendung in *Inpho* und *PhotoScan* erfolgte der Export dieses Modells, wobei *Inpho* zusätzliche Visualisierungsmöglichkeiten bietet. Eine entsprechende Darstellung des dreidimensionalen Verzeichnungsmodells wird mit Abb. 4 gegeben.

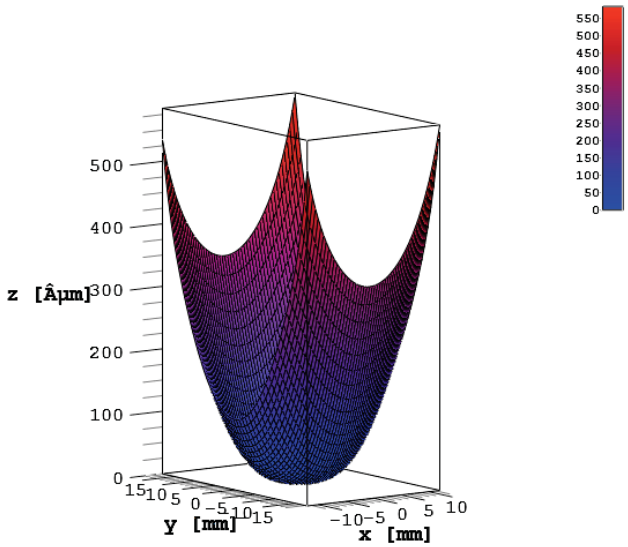

Abb. 4: 3D-Ansicht des Verzeichnungsmodells in *Inpho*

Aus diesem Modell werden die für Weitwinkelobjektive typischen großen Verzeichnungen in den Bildecken ersichtlich. Im Vergleich dazu ergeben sich für Luftbildmesskameras, die bei der Aerophotogrammetrie zum Einsatz kommen, Verzeichnungen von maximal 5 – 10 µm in den Bildecken. Entgegen der zu erwartenden negativen Verzeichnungen entlang der z-Achse verlaufen diese in positiver Richtung. Denkbar ist, dass es sich dabei um softwareinterne Konventionen bezüglich der Vorzeichen bestimmter Parameter handelt, da auch beim Entwurf der Transformationsdatei mit den MIBRAG-eigenen Transformationsparametern für *PhotoScan* und den Winkeln der äußeren Orientierung entgegengesetzte Vorzeichen auftreten.

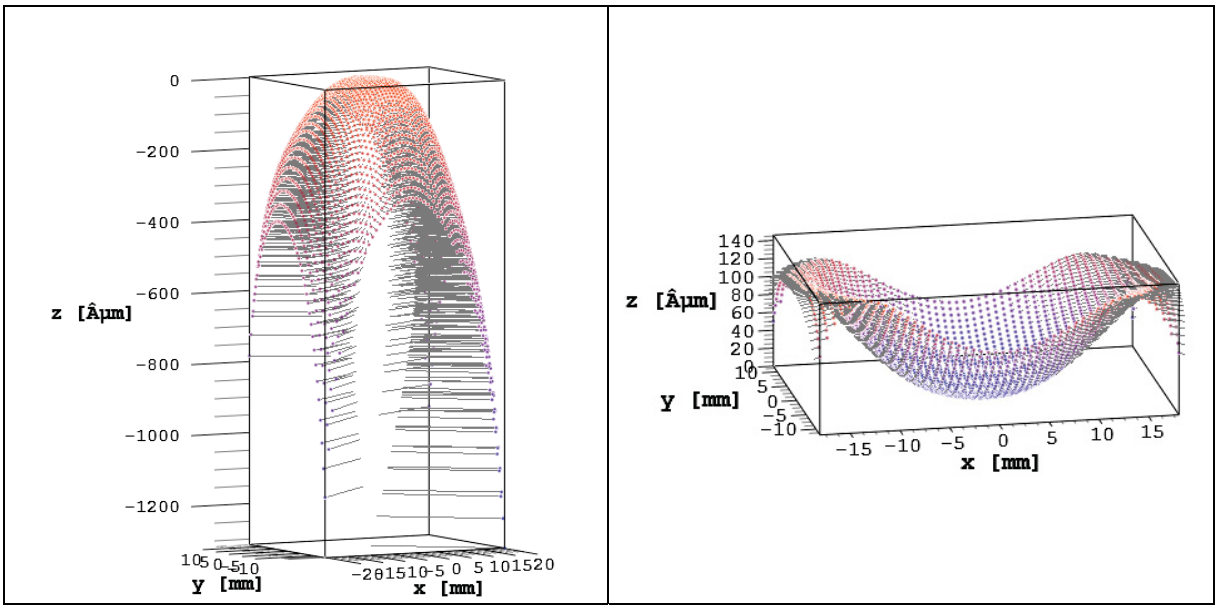

Abb. 5: Mit *Python* (links) und *Matlab Toolbox* (rechts) abgeleitete Kalibriermodelle

Zur Überprüfung dieses Modells erfolgten weitere Kalibrierungen mit Hilfe von *Python* und der *Camera Calibration Toolbox for Matlab*. Die sich daraus ergebenden Kalibrierungen, welche in Abb. 5 dargestellt sind, zeigten erhebliche Abweichungen untereinander und sind aufgrund der Größenordnungen ihrer Korrekturparameter äußerst fraglich, wobei das Modell der Kalibrierung mit *Python* zumindest den erwarteten Verlauf wiederspiegelt. Demgegenüber erscheint das Modell

mit Hilfe der *Calibration Toolbox for Matlab* nicht plausibel. Die zugehörigen Kalibrierparameter sind in Tab. 3 aufgeführt.

Tab. 3: Mit der Kalibrierung in *Python* und *Matlab Toolbox* erhaltene Kalibrierparameter

	Python	Matlab Toolbox
Parameter	**Wert**	**Wert**
f_x	7746,75 Pixel	7447,48 Pixel
f_y	7721,93 Pixel	7445,83 Pixel
c_x	3204,74 Pixel	3669,19 Pixel
c_y	2961,68 Pixel	2457,08 Pixel
K_1	-0,140700	0,075030
K_2	0,384311	-0,190800
K_3	-0,561314	nicht berechnet
P_1	-0,001907	-0,000283
P_2	-0,005788	0,000873

Aufgrund dieser erheblich differierenden Kalibrierungen und Problemen bei der Eingabe, wurde die mit *Lens* erarbeitete Kalibrierung in *PhotoScan* verwendet. Für die Bearbeitung in *Inpho* war es notwendig, diese Kalibrierung im Sinne einer Simultankalibrierung an die Bedingungen einer UAV-
Messung anzunähern und über die vorhandene Projektschnittstelle von *PhotoScan* an *Inpho* zu übergeben, da andernfalls Probleme bei der Bündelblockausgleichung auftreten. Daraus ergibt sich das in der folgenden Abb. 6 dargestellte Kalibriermodell.

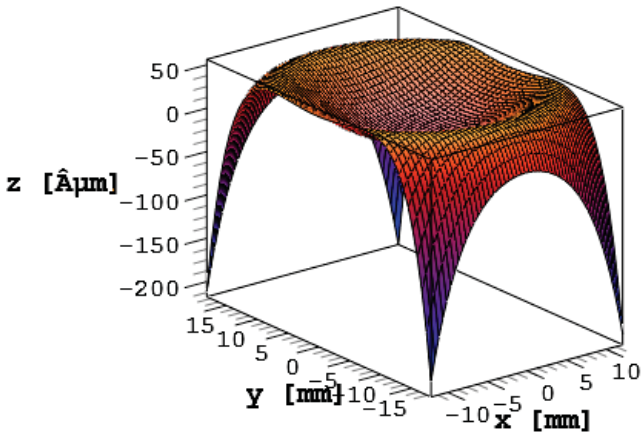

Abb. 6: Aus Simultankalibrierung erhaltenes Verzeichnungsmodell

Basierend auf dieser Kalibrierung konnte sowohl in *PhotoScan* als auch in *Inpho* eine signifikante Verringerung der Passpunktresiduen herbeigeführt werden, wobei sich die Qualitätssteigerung in

PhotoScan lediglich im Bereich von wenigen Millimetern und in *Inpho* im Bereich von mehreren Zentimetern beläuft.

4.2 Überdeckungsbereiche und Passpunktkonfigurationen

Neben den Auswirkungen einer Kamerakalibrierung zeigten sich auch bei den notwendigen Bildüberdeckungen und Passpunktkonfigurationen erhebliche Unterschiede zwischen den Softwarelösungen *PhotoScan* und *Inpho*.

Bei der Bearbeitung mit *PhotoScan* sind bereits ab geflogenen Überdeckungen von 70% längs und 40% quer zur Flugrichtung sowie nahezu willkürlich verteilten Bodenpasspunkten Auswertungen möglich, die nur geringfügige Qualitätsunterschiede zu besseren Konfigurationen aufweisen.

Für die Auswertung mit *Inpho* hingegen ist es neben größeren Überdeckungen von 80% längs und 60% quer zur Flugrichtung von besonderer Bedeutung günstige Konstellationen der Bodenpasspunkte zu wählen, da aufgrund des großen Zeitaufwandes für die Signalisierung und Einmessung der Bodenpasspunkte zumeist lediglich 6 Passpunkte zum Einsatz kommen. Diese sollten wie von (Kraus, 1997) beschrieben, die Ecken des Bildverbandes mit einer möglichst hohen Anzahl der Mehrfachmessung der Bodenpasspunkte stabilisieren. Schlecht verteilte Passpunkte machen die Auswertung von UAV-Messungen mit *Inpho* nahezu unmöglich.

4.3 Residuen und Punktwolkendifferenzen

Mit Hilfe angepasster Kamerakalibrierungen, günstiger Passpunktkonfigurationen und ausreichenden Bildüberdeckungen belaufen sich die mit der zur Verfügung stehenden Hard- und Software erhaltenen Pass- und Kontrollpunktresiduen bisheriger Messungen auf einen Betrag von deutlich unter
10 cm. Lediglich einzelne Punkte können diesen Betrag aufgrund von schlechten Konfigurationen und unzureichenden Verknüpfungen an Anfang und Ende der Flugstreifen übersteigen.

Der Vergleich der erhaltenen Punktwolken von Laserscanning und UAV-Messungen zeigte ebenfalls nur geringfügige Differenzen von wenigen Zentimetern. Allerdings ist es aufgrund der Oberflächenmodellierung bei der photogrammetrischen Auswertung nur begrenzt möglich Bewuchs zu Filtern, wodurch teilweise überhöhte Bereiche der Oberfläche rekonstruiert werden. Demgegenüber weisen die Punktwolken der UAV-Messungen keine Lücken auf, wie sie bei Abschattungen der Scanpunktwolken vorkommen können und ermöglichen so die Erfassung der gesamten Oberfläche des Messareals.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Rahmen der Abschlussarbeit wurde ein Konzept für die Einbindung von UAV-Messungen in bestehende Prozesse des Markscheidewesens der MIBRAG mit *PhotoScan* und *Inpho* erarbeitet. Einhergehend damit wurden notwendige Kalibrier-, Kamera- und Koordinatentransformationsdateien für die Softwarelösungen erarbeitet und die erhaltenen Ergebnisse verglichen.

Für die Abschätzung erreichbarer Genauigkeiten erfolgte eine Analyse der Einflussfaktoren, wie Bildüberdeckungsbereichen und Passpunktverteilungen, die für eine fachgerechte Auswertung zu berücksichtigen sind sowie der Vergleich von UAV-Messungen mit terrestrischem Laserscanning. Daraus ergeben sich unter günstigen Projektbedingungen Standardabweichungen von wenigen Zentimetern, welche an den Rändern des Bildverbandes und aufgrund von schlechten Konfigurationen überschritten werden können.

Die durchgeführten Auswertungen zeigten sowohl mit dem auf der Computer Vision basierenden *PhotoScan* als auch mit *Inpho* qualitativ hochwertige Ergebnisse, wobei beide Programme teilweise entgegengesetzte Vorzeichen verwenden. *PhotoScan* zeigte sich deutlich robuster gegenüber unzureichenden Konfigurationen als *Inpho*, erfordert allerdings eine sorgfältige Auseinandersetzung mit den erhaltenen Ergebnissen.

Zukünftig gilt es die durchgeführte Testfeldkalibrierung im Sinne einer Laborkalibrierung zu überprüfen und gegebenenfalls zu verbessern. Für einen höheren Grad der Automatisierung bei der Auswertung sollte die Abkehr von klassischen Bodenpasspunkten hin zu Fiducial Marks erfolgen sowie eine Überprüfung und Korrektur der Synchronisation von RTK- und Kameraauslösung.

LITERATURVERZEICHNIS

Agisoft LLC. 2017a. Agisoft User Manuals. [Online] 2017a. [Zitat vom: 7. September 2017.] http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_3_en.pdf.

Aibotix GmbH. 2016a. Der Aibot X6 Version 2. [Online] 2016a. [Zitat vom: 24. Oktober 2017.] https://aibotix.com/de-de/products/aibot-x6.

Bouguet, Jean-Yves. 2015. Camera Calibration Toolbox for Matlab. [Online] 14. Oktober 2015. [Zitat vom: 18. Oktober 2017.] http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/.

Brown, Duane C. 1966. Decentering Distortion of Lenses. *Photogrammetric Engineering.* 1966, S. 444-462.

Cramer, Michael und Leinss, Benedikt. 2016. *Welche ist am besten? - Anmerkungen zur Auswahl von Kamerasystemen in der UAS-Luftbildphotogrammetrie.* Stuttgart : DVW - Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e.V., 2016.

Kraus, Karl. 1997. *Photogrammetrie - Band 1, Grundlagen und Standardverfahren.* 6. Bonn : Ferd. Dümmler, 1997.

Menge, Frank. 2018. Einbindung von UAV-Messungen in bestehende Prozesse des Markscheidewesens mit Abschätzung erreichbarer Genauigkeiten. Freiberg : Diplomarbeit, 2018.

Przybilla, Heinz-Jürgen. 2017. *Kameras für UAS - eine Marktübersicht.* Stuttgart : DVW - Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e.V., 2017.

Wittchen, Dennis. 2016. *Praktikumsbericht - Einsatz von UAS in Braunkohletagebauen der MIBRAG mbH.* Dresden : s.n., 2016.