



Zustandsdokumentation ausgedehnter untertägiger Hohlräume

WILHELM HANNEMANN, TILMAN BROCK & WOLFGANG BUSCH, Clausthal-Zellerfeld

Keywords: structure-from-motion, digital archaeology, subsurface objects, 3d reconstruction, photo-realism

Summary: *Documentation of conservation state in large-scale subsurface objects.* Scene reconstruction by structure-from-motion algorithms has received a great deal of attention due to the freely available software *Bundler*. We describe a workflow mainly based on *Bundler*, *PMVS2* and *Meshlab* for a three-dimensional documentation of conservation state in subsurface objects. The presented procedure is also suitable for locations difficult to access. Specific challenges in subsurface objects need to be addressed. This contribution describes the employed photo recording and processing procedure. As a result, photo-realistic textured models are exported in *WebGL* format, which is viewable in recent web browsers. Experiments were performed in the abandoned ore mine “Thurm Rosenhof” in Clausthal-Zellerfeld, the karst cave “Bielshöhle” in Rübeland and a drilling site of a potash mine. Two water wheel chambers and the connecting (and partly water-filled) adit of “Thurm Rosenhof” were photographically documented. 3D geometry and texture was reconstructed based on these images. The karst cave provides a second test object, which is characterized by a more irregular geometry and varying passage dimensions. The blast hole drilling site in potash mining provides an object where reference data from laser scanning is available, enabling comparisons to the data derived with the structure-from-motion based approach. Median point distance between both models was found to be 8 mm.

Zusammenfassung: Die dreidimensionale Rekonstruktion von Objekten mittels des Structure-from-Motion Algorithmus hat durch die frei erhältliche Software *Bundler* vermehrt Beachtung gefunden. Dieser Beitrag beschreibt einen Workflow zur dreidimensionalen Zustandsdokumentation untertägiger Hohlräume, welcher zu großen Teilen auf *Bundler*, *PMVS2* und *Meshlab* basiert. Das beschriebene Vorgehen kann auch an schwer zugänglichen Stellen eingesetzt werden. Untertägige Objekte stellen bei der Aufnahme spezielle Herausforderungen. Im Folgenden wird sowohl die Fotoaufnahme vor Ort als auch der Workflow zur Prozessierung beschrieben. Als Endergebnis entstehen fotorealistisch texturierte Modelle, die in vielen gängigen Webbrowsers per *WebGL* dargestellt werden können. Experimente erfolgten in dem stillgelegten Erzbergwerk „Thurm Rosenhof“ in Clausthal-Zellerfeld, der durch Verkarstung entstandenen Bielshöhle in Rübeland sowie einem Bohrort im Kali-Bergbau. Zwei Radstuben und die sie verbindende (und teilweise wasserführende) Rösche in „Thurm Rosenhof“ wurden in mehreren Befahrungen fotografisch aufgenommen und aus diesen Digitalfotos die Geometrie und Textur rekonstruiert. Mit der Karsthöhle stand ein verwinkeltes und in den Raumdimensionen stark variierendes Testobjekt zur Verfügung. Der Bohrort im aktiven Kalibergbau wurde wegen zur Verfügung stehender Laserscanner-Referenzmessungen als weiteres Objekt ausgewählt. Ein Vergleich mit den Ergebnissen des Structure-from-Motion Ansatzes ergab für die punktwisen Abstände zwischen beiden Modellen einen Median von 8 mm.

1 Einleitung

Untertägige Objekte, wie Höhlen und Hohlräume des Altbergbaus, stellen im Gegensatz zu oberirdischen Objekten besondere Anforderun-

gen an eine dreidimensionale Erfassung, nicht nur durch den Wegfall der Nutzung von GNSS. Der Zugang kann technisch schwierig und beengt sein, ebenso die Situation vor Ort. Die Objekte sind teilweise sehr verwinkelt, so

dass sie für optische Verfahren nur kurze Zielweiten zulassen. Einige Bereiche können wasserführend sein, Luftfeuchtigkeit und Temperatur können stark schwanken. Die Anbringung von Zielmarken ist ggf. durch Auflagen des Natur- und Denkmalschutzes nicht möglich. Eine Stromversorgung oder Beleuchtung ist vor Ort meist nicht vorhanden. Durch diese Besonderheiten ist u.a. auch die Verwendung großer und empfindlicher Messinstrumente eingeschränkt.

Die Möglichkeit einer nahezu automatischen Rekonstruktion einer dreidimensionalen Punktwolke allein aus einer Menge von sich überlappenden Digitalfotos durch Software-Pakete wie Bundler (SNAVELY et al. 2006) oder APERO (PIERROT-DESEILLIGNY & CLÉRY 2011) bot sich als Ergänzung zu bisherigen Verfahren wie z.B. der Verwendung von Distometern mit Inklinationsmessung und Kompass zur Höhlenkartierung (HEEB 2008) oder Messungen mit klassischer Tachymetrie bzw. Laserscanning (für Präzisionsmessungen) an. Das Mitführen einer Digitalkamera mit Blitzgerät ist fast überall möglich. Daher wurden Experimente mit dieser Vorgehensweise in Höhlen und Bergbau-Objekten praktisch durchgeführt (HANNEMANN et al. 2010, HANNEMANN et al. 2011).

Die verwendeten Software-Pakete zur Offline-Berechnung der dreidimensionalen Punktwolke werden in vielen Anwendungsbereichen eingesetzt, u.a. zur Visualisierung in der Archäologie (DUCKE et al. 2011) oder zur Auswertung von Luftbildern autonom fliegender Systeme/UAVs (KLONOWSKI & NEITZEL 2011). Darüber hinaus existieren z.B. in der Robotik Software-Lösungen zur echtzeitfähigen Umgebungsrekonstruktion, welche teilweise weitere Sensoren mit einbeziehen (ENGELHARD et al. 2011). Hierfür ist allerdings ein leistungsstarker mobiler Rechner notwendig.

In diesem Beitrag werden zunächst die in den Experimenten verwendete Ausrüstung und der Prozessierungsablauf beschrieben. Die eingesetzten Open-Source-Programme und daran vorgenommene Modifikationen werden kurz beschrieben, ebenso eigene Ergänzungen. An Hand von mehreren praktischen Beispielen räumlich ausgedehnter untertägiger Hohlräume wird die praktische Durchführbarkeit demonstriert.

2 Vorgehensweise

2.1 Verwendete Ausrüstung

Durch die in der Einleitung angesprochenen Besonderheiten muss das mitgeführte Instrumentarium möglichst robust und klein sein. Es sollte relativ unempfindlich gegenüber Luftfeuchtigkeits- und Temperaturschwankungen sein und sich ggf. auch wasserdicht verpacken lassen. Die minimale Ausrüstung besteht verfahrensbedingt aus einer Digitalkamera, einer geeigneten Lichtquelle und einem mitgeführten Referenzobjekt zur Bestimmung des Maßstabs.

Als Digitalkamera ist erfahrungsgemäß eine robuste Spiegelreflexkamera gut geeignet. Je nach Objekt ist zusätzlich die Verwendung einer robusten Outdoor-Kompaktkamera sinnvoll. Als Beleuchtung erwies sich statt der Verwendung eines Blitzgeräts bei starker Luftfeuchtigkeit oder Staubeentwicklung alternativ die Nutzung von batteriegetriebenen (LED-)Scheinwerfern als sinnvoll. Eine Kombination von Fotoserien verschiedener Kameras ist je nach Beschaffenheit der einzelnen aufgenommenen Objektabschnitte denkbar.

In den durchgeführten Experimenten wurde folgende Ausrüstung eingesetzt:

- digitale Spiegelreflexkamera (Nikon D50) mit 5 Megapixel Bildsensor,
- lichtstarkes Normalobjektiv (Nikkor 35 mm – F/1.8), zusätzlicher abnehmbarer Weitwinkel-Vorsatz (x 0.45),
- Blitzgerät (Sigma EF-500 DG ST),
- akkubetriebene Videoleuchte, LED-Scheinwerfer,
- Nivellierlatte (4 m, klappbar), Gliedermaßstab,
- Laserdistanzmessgerät (Leica D8).

2.2 Aufnahme vor Ort

Die Aufnahme der Fotos erfolgt von verschiedenen frei gewählten Standpunkten in der Regel freihändig. Dabei ist zu beachten, dass jeder Teil des Objekts auf mehreren Fotos von unterschiedlichen Kamerapositionen aus abgebildet ist. Benachbarte Fotos sollten überlappende gemeinsame Bereiche enthalten. Da für eine erfolgreiche Rekonstruktion der Ob-

jektgeometrie weniger auf Ästhetik der Aufnahmen als auf eine gute Abdeckung des Objekts geachtet werden muss, können durchaus mehrere hundert Bilder innerhalb einer Stunde aufgenommen werden.

2.3 Prozessierungsablauf

Die Prozessierung erfolgt in weiten Teilen automatisch mit wenigen notwendigen manuellen Eingriffen. Einige der im Folgenden aufgelisteten Teilschritte sind optional:

1. (optional) Entzerrung der Fotos nach erfolgter Kamera-Kalibrierung,
2. Berechnung markanter Punkte/Features,
3. Matching der markanten Punkte/Features,
4. Rekonstruktion der Kamerapositionen und -parameter (ggf. mit manueller Vorgabe von Startbildern),
5. Berechnung der dichten 3D-Punktwolken (ggf. manuelle Aufteilung in Objektabschnitte),
6. (optional) Glättung der Punktnormalen,
7. Berechnung einer Dreiecksvermaschung (ggf. Vorgabe der Berechnungstiefe),
8. (optional) manuelles Zuschneiden der Dreiecksvermaschung,
9. Reduzierung der Dreiecksanzahl,
10. Texturatlas-Erstellung,
11. Projektion der Fotos auf die Dreiecksvermaschung,
12. (optional) Transformation mehrerer Modelle in ein gemeinsames Koordinatensystem,
13. (optional) Maßstabskorrektur,
14. (optional) Konvertierung des texturierten Gesamtmodells in WebGL bzw. PDF.

Der Ablauf ist für eine automatisierte Prozessierung soweit möglich durch Shell-Scripte umgesetzt. Folgend werden die einzelnen Arbeitsschritte und die verwendeten Programme detaillierter erläutert:

Schritt 1: Eine Kalibrierung des verwendeten Kamerasystems liefert bessere Startwerte für die Bestimmung der Kameraparameter und kann damit Schritt 4 sowohl beschleunigen als auch die Ergebnisse verbessern. Zur Kalibrierung wird die „Camera Calibration Toolbox for MATLAB“ (BOUGUET 2010) verwendet. Die anschließend durchgeführte Ent-

zerrung der Fotos erfolgt mit dem Programm *Bundle2PMVS* aus *Bundler* (BUNDLER 2012).

Schritt 2: Die Berechnung der markanten Punkte und ihrer Deskriptoren erfolgt mittels des SIFT-Algorithmus (LOWE 2004); verwendet wird die Implementation aus *libsiftfast* (LIBSIFT 2012).

Schritt 3: Das Matching der Punkte aus Schritt 3 wird mit einem gepatchten *KeyMatchFull* aus *Bundler* durchgeführt. Die im Programm hinzugefügte Angabe einer Teilmenge an zu matchenden Fotos ermöglicht die Aufteilung der Berechnung auf mehrere Computer. Ein „forken“ des KeyMatch-Prozesses erlaubt zusätzlich eine Parallelisierung auf Multicore-Maschinen ohne übermäßig zusätzlichen Hauptspeicher zu nutzen. Ergänzend wäre auch die Nutzung von GPUs zur Beschleunigung der Berechnung möglich (WU 2007).

Schritt 4: Die Rekonstruktion der Kamerapositionen und -parameter erfolgt mit *Bundler*. Teilweise ist eine manuelle Vorgabe der Startbilder für die iterative Rekonstruktion nötig, um ein gutes Ergebnis zu erhalten. Über diese Vorgabe können auch einzelne Abschnitte des Objektes parallel berechnet werden; hierbei ist eine spätere Überführung in ein gemeinsames Koordinatensystem zu beachten. Eine weitere Möglichkeit zur Beschleunigung der Berechnung ist die Verwendung einer Ausschlussliste, um als Zwischenschritt bereits vollständig rekonstruierte Bereiche aus der weiteren Berechnung herauszunehmen und damit die interne Bündelgleichung zu beschleunigen. Falls die Fotos vor der Berechnung entzerrt wurden, kann zunächst auf die Berechnung der Verzeichnung verzichtet werden. Nach Beendigung der Berechnung sollte auf dem Zwischenergebnis neu aufgesetzt werden, diesmal mit *Bundler*-interner Schätzung der Verzeichnung.

Schritt 5: Die Berechnung der in den weiteren Schritten verwendeten dichten Punktwolken erfolgt mittels *PMVS2* (FURUKAWA & PONCE 2007). *PMVS2* (PMVS2 2012) ermöglicht die Angabe eines „levels“, um die Fotos vor der Berechnung in ihrer Auflösung zu verkleinern. Es werden dabei je nach Auflösung teilweise unterschiedliche, sich ergänzende

Bereiche abgedeckt. Daher hat sich als sinnvoll herausgestellt, die Punktwolken für verschiedene Auflösungen zu berechnen und anschließend in einem gemeinsamen Datensatz zusammenzufassen.

Schritt 6: Das umfangreiche Programm *Meshlab* (MESH LAB 2012) ermöglicht u.a. eine Glättung der Punktnormalen anhand benachbarter Punkte. Dies verbessert ggf. das Ergebnis des nachfolgenden Schrittes, da *PMVS2* die Normalen anhand der Kamerapositionen abschätzt.

Schritt 7: Die Berechnung einer Dreiecksvermaschung aus der Punktwolke erfolgt mittels *Poisson Surface Reconstruction* (POISSON 2012). Hierbei gibt die mit Normalen versehene 3D-Punktwolke die Lösung einer Poisson-Gleichung vor. Die Dreiecksvermaschung enthält nicht notwendigerweise die Eingangspunkte, sondern nähert sich ihnen nur an (KAZHDAN et al. 2006). Das Ergebnis ist ein „wasserdichtes“ Mesh ohne Lücken.

Schritt 8: Die Dreiecksvermaschung kann in *Meshlab* zugeschnitten werden. Große Dreiecke sollten ggf. entfernt werden, da in Schritt 7 auch Bereiche ohne Punkte gefüllt werden, um ein „wasserdichtes“ Mesh zu erhalten.

Schritt 9: Die Anzahl der Dreiecke wird zur Reduzierung der Datenmenge und Beschleunigung einer späteren Darstellung in *Meshlab* mit dem Filter „Quadric edge collapse“ verringert.

Schritt 10: Die Berechnung des Texturatlas erfolgt mittels *ABF++* (SHEFFER et al. 2005).

Das ist z.B. mit der Software *Graphite* (ALLICE 2012) möglich.

Schritt 11: Die Fotos werden unter Verwendung der in Schritt 4 rekonstruierten Parameter auf das Mesh bzw. in den Texturatlas projiziert (eigene Implementation). Es wird je Textur-Pixel ein abstandsgewichteter Mittelwert aller RGB-Farbwerte der projizierten Fotos berechnet, da meist mehrere Fotos für einen Bereich des Objekts vorhanden sind (Abb. 1). Die Texturierung kann auf eine manuelle Vorauswahl gut geeigneter Fotos begrenzt werden. Eine Verbesserung des Verfahrens zur Texturierung ist zurzeit in Arbeit, da durch die Mittelwertbildung eine stellenweise unscharfe Textur entsteht.

Schritt 12: Falls das Objekt aus mehreren Teilmodellen zusammengesetzt ist, müssen diese in ein gemeinsames Koordinatensystem überführt werden. Hierzu werden die Teilmodelle über die in Schritt 2 berechneten markanten Punkte der Modelle fusioniert, indem mittels *RANSAC* (random sample consensus) die Parameter einer 3D-Helmert-Transformation berechnet werden. Alternativ ist auch die manuelle Auswahl von Passpunkten möglich, um daraus anschließend die Transformationsparameter zu bestimmen.

Schritt 13: Zur Maßstabskorrektur muss ein in der Realität bekanntes Längenmaß im Modell abgegriffen und das Modell entsprechend skaliert werden. Das Abgreifen kann direkt in der 3D-Punktwolke erfolgen. Um genauere Ergebnisse zu bekommen, wurde die Berechnung von Punktkoordinaten aus manu-

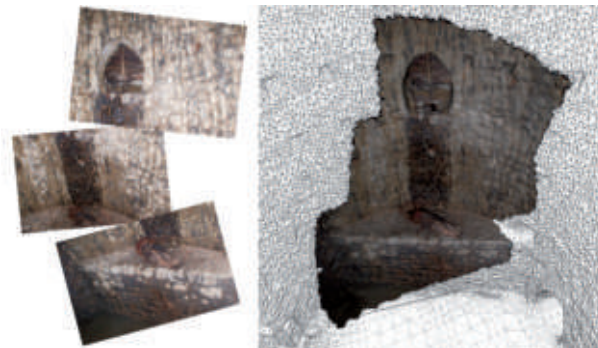


Abb. 1: Texturprojektion.

ell identifizierten Punkten in den Originalfotos implementiert. In mehreren Fotos werden Anfangs- und Endpunkt der gesuchten Länge markiert und anschließend über die bekannten Projektionsmatrizen der Fotos mittels Ausgleichsrechnung die 3D-Koordinaten der Längenreferenz, und daraus wiederum die Länge der gesuchten Strecke in Modelleinheiten ermittelt. Über den so gewonnenen Maßstabsfaktor kann das Modell dann metrisch skaliert werden.

Schritt 14: Als Darstellungsformat bieten sich wegen der weiten Verbreitung geeigneter Viewer sowohl *WebGL* als auch PDF-Dateien mit eingebettetem 3D-Inhalt an. Über einen Export aus *Meshlab* kann *LaTeX*-Code und aus diesem dann PDF-Dateien erzeugt werden. Zur Darstellung in WebGL-fähigen Browsern, z.B. *Mozilla Firefox* oder *Google Chrome*, wird auf die Bibliothek *three.js* (THREEJS 2012) zurückgegriffen. Die Modelle müssen für die Verwendung mit *three.js* einmalig in ein Präsentationsformat konvertiert werden. Bewegung und Blickwinkelveränderung im Modell erfolgen mittels Maus (Blickrichtung) und Tastatur (Bewegung). Einzelne Positionen und Blickwinkel können über Tastenkürzel angesteuert werden. Die Beleuchtung der Szene kann dynamisch angepasst werden.

3 Experimente in untertägigen Objekten

3.1 Radstuben der Grube „Thurm Rosenhof“

Als ein räumlich ausgedehntes Altbergbauobjekt wurden die untertägigen Rosenhöfer Radstuben der ehemaligen Grube „Thurm Rosenhof“ in Clausthal-Zellerfeld gewählt. Hier wurde seit Mitte des 16. Jahrhunderts bis in das 20. Jahrhundert hinein silberreiches Erz abgebaut. Ein in jeder Radstube installiertes Wasserrad diente der Energiegewinnung für den Grubenbetrieb. Das Wasser wurde über horizontale Gänge bis zur Tagesoberfläche geführt. Die am westlichen Ortsrand gelegene „Runde Radstube“ ist seit einigen Jahren touristisch erschlossen und über ein neu eingebautes Treppenhaus begehbar. Sie hat einen Durchmesser von etwa 10 m bei einer

maximalen Tiefe von 24 m (Abb. 2). Von dieser Radstube aus ist über die ehemalige Abfallrösche (wasserführender Gang) die derzeit nicht touristisch zugängliche „Ovale Radstube“ erreichbar. Sie ist rund 12,50 m hoch und liegt ca. 10 m unter der heutigen Geländeoberfläche.

3.1.1 Aufnahme vor Ort

In vier jeweils ca. zweistündigen Befahrungen wurden die Radstuben und die sie verbindende Rösche mit insgesamt rund 2600 Fotos aufgenommen. Die „Runde Radstube“ konnte von der eingebauten Treppe aus hinreichend gut aufgenommen werden; die Messung einer Referenzstrecke für die spätere Maßstabsbestimmung war problemlos möglich. Um Erfahrungswerte für Objekte zu sammeln, bei denen diese einfache Möglichkeit nicht gegeben ist, wurde eine Seilstrecke bis zur Sohle (dem Boden) der Radstube aufgebaut (Abb. 2). Die vertikalen Abstände der vom Seil aus aufgenommenen Fotos wurden näherungsweise festgehalten, um später den Maßstab abschätzen zu können.

Die von der „Runden Radstube“ wegführende Abfallrösche ist bis zu einem Meter Tiefe mit Wasser gefüllt. Um einhändig mit der Spiegelreflexkamera arbeiten zu können, wurde die Autofokus-Funktion verwendet. Helmlampen reichen als Beleuchtung für den Autofokus aus.

Ab dem Kreuzungspunkt zur Ovalen Radstube folgt eine Kriechstrecke bis in die Ovale Radstube. Auch hier war es von Vorteil, die Kamera einhändig bedienen zu können. Der Weitwinkelvorsatz diente in dieser Strecke zusätzlich als Schutz für das Kameraobjektiv.

In der Ovalen Radstube konnte von der Sohle aus eine hinreichende Anzahl Fotos erstellt werden.

3.1.2 Prozessierung und Ergebnisse

Die Prozessierung der Daten erfolgte wie in Abschnitt 2.3 beschrieben. Zeitaufwendig waren sowohl das Matching als auch die Berechnung mit *Bundler*. Das Matching wurde innerhalb einiger Tage auf einem Mehrprozessorsystem berechnet. Obwohl die Bündelausgleichung parallel in drei unterschiedlichen

Abschnitten gerechnet wurde, dauerte die Berechnung mehrere Tage. Dabei entstanden die Modelle der Radstuben jeweils mit angrenzendem Abschnitt der Rösche und ein komplettes Modell der Rösche.

Die Visualisierung des Gesamtmodells für den aufgenommenen Bereich der Rosenhöfer

Radstuben erfolgte in einem Geoinformationssystem. Abb. 3 zeigt eine perspektivische Ansicht dieses Modells.

Zur Darstellung der Ergebnisse kann es je nach Zielsetzung sinnvoll sein, die Textur ein- oder auszublenden. In Abb. 4 ist links die Geometrie als schattiertes Dreiecksnetz zu se-



Abb. 2: Runde Radstube mit Seilstrecke.

hen, rechts daneben das texturierte Modell. In der schattierten Ansicht sind die unterschiedlichen Bauabschnitte der „Runden Radstube“ anhand der Größe der verwendeten Mauersteine gut zu erkennen; auch die Auflager der ehemals eingezogenen Balken sind sichtbar. In der entsprechenden texturierten Ansicht ist

der Oberflächenzustand, Moosbewuchs usw., erkennbar.

In Abb. 5 ist die Rösche in einer perspektivischen Ansicht zu sehen. In der Kriechstrecke sind zwei kleine Abzweige zu erkennen. Diese sind wenige Meter lang und nur bäuchlings liegend zugänglich.



Abb. 3: Perspektivische Ansicht Radstube und Rösche.

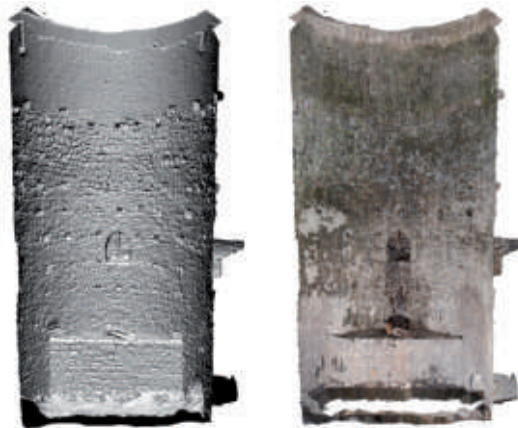


Abb. 4: Runde Radstube, Geometrie und Textur.



Abb. 5: Perspektivische Ansicht der Rösche (groß); Lageskizze und Aufsicht 3D-Modell (links oben).

3.2 *Bielshöhle bei Rübeland*

Als weiteres Testobjekt wurde der vordere Teil der ehemaligen Schauhöhle „Bielshöhle“ bei Rübeland im Harz ausgewählt. Die Höhle bietet bedingt durch den natürlichen Entstehungsprozess der Verkarstung eine unregelmäßige und somit „anspruchsvolle“ Geometrie. Abb. 6 zeigt einen nur bäuchlings kriechend zugänglichen Bereich, den sogenannten Fledermausgang.

Der insgesamt ca. 40 m lange Zugang konnte zusammen mit der sogenannten Teilungshalle in zwei jeweils ca. dreistündigen Befahrungen aufgenommen werden. Der Zu-

gang besteht aus dem Eingangsbereich, dem Schlangengang und dem davon abzweigenden parallelen Fledermausgang. Es entstanden insgesamt 2000 Digitalfotos. In Abb. 7 ist eine Aufsicht auf das errechnete Modell zu sehen. Darin ist der Rundschluss aus Schlangengang, Fledermausgang und Teilungshalle zu erkennen. Dass dieser nahezu 100 m lange Rundweg während der Prozessierung ohne Zwang bündig geschlossen werden konnte, spricht für die gute Qualität des Verfahrens, zumal der Rundschluss in einem sehr verwinkelten Objektteilbereich mit nur jeweils sehr kleinen einsehbaren Bereichen (Abb. 6) erfolgte.



Abb. 6: Fledermausgang, kriechend befahren.



Abb. 7: Bielshöhle, Darstellung mit WebGL.

3.3 Bohrort im Kali-Bergbau

Bei den in Zusammenarbeit mit einem Bergbauunternehmen durchgeführten Versuchen zur Erstellung dreidimensionaler Modelle untertägiger Abbaue konnte ein Vergleich mit parallel erstellten Aufnahmen eines Laserscanners durchgeführt werden (THIELE et al. 2011).

Für einen Bohrort mit ca. 15 m Länge und Breite und einer Höhe von ca. 3 m standen sowohl eine wie oben beschriebene fotobasierte Rekonstruktion als auch ein Laserscan (Laserscanner: Faro Focus 3D) zur Verfügung. Zum Vergleich der beiden Modelle wurde die fotobasierte Rekonstruktion mit 1,5 Mio. 3D-Punkten in das Modell (Koordinatensystem) des Laserscans (27 Mio. 3D-Punkte) überführt. Hierzu wurde die Punktwolke des Laserscans auf eine zylindrische Fläche projiziert, um anschließend mit dem SIFT-Algorithmus markante Punkte zu detektieren und beide Auswertungen zu fusionieren. Die mittels RANSAC bestimmte 7-Parameter-Transformation zwischen den Koordinatensystemen erfolgte über 372 Punktpaare. Die mittlere Klaffung ergab sich zu 1,1 mm.

Der Median der Abweichungen zwischen den 1,5 Mio. Punkten aus der fotobasierten Rekonstruktion zu den jeweils räumlich nächsten Punkten des Laserscans beträgt 8 mm. 67% der Punkte liegen maximal 11,2 mm von den räumlich nächsten Punkten des Laserscans entfernt. Abb. 8 zeigt das Histogramm der Abweichungen.

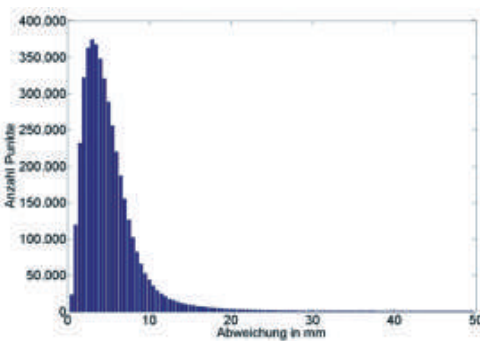


Abb. 8: Histogramm der Abweichungen fotobasierte 3D-Rekonstruktion / Laserscan beim Bohrort im Kalibergbau.

4 Zusammenfassung und Fazit

Es wurde anhand mehrerer Objekte die Anwendbarkeit eines fotobasierten Rekonstruktionsverfahrens zur Erstellung dreidimensionaler Modelle untertägiger Hohlräume demonstriert. Die zur Aufnahme vor Ort notwendige Ausrüstung ermöglicht auch unter beengten räumlichen Verhältnissen die Erzeugung detailreicher und qualitativ ausreichender 3D-Modelle.

Das gezeigte Verfahren zur Erstellung von 3D-Modellen lässt sich mit relativ geringem Zeitaufwand vor Ort anwenden. Lediglich die automatisierte Auswertung der Daten benötigt auf handelsüblichen Computern je nach Umfang der Aufnahmeserien mehrere Tage. Die verwendete Ausrüstung ist sehr kostengünstig. Auch schwierig zugängliche oder verwinkelte Bereiche sind erfassbar, solange sie von Menschen begehbar sind. Dies wurde am Beispiel eines Altbergbauobjektes und einer größeren, durch Verkarstung entstandenen Höhle gezeigt. Ein dort rekonstruierter Rundweg deutet darauf hin, dass für die untersuchten Objekte auch über große Strecken eine geringe Winkel- und Streckenabweichung erzielt werden kann.

Das verwendete Verfahren zur Texturierung des 3D-Modells aus den Originalfotos kann noch verbessert werden. Bei der Rekonstruktion der Kamerapositionen ist noch zu untersuchen, welche Vorteile sich durch die Verwendung blickwinkel-unabhängiger Features (WU et al. 2008, WU 2011) in untertägigen Objekten ergeben. Auch kommerzielle Programme wie *PhotoScan* (AGISOFT 2012) bieten eine Alternative.

Die Präsentation mit WebGL (Abb. 7) ist eine einfache Möglichkeit, um ohne dedizierte 3D-Viewer-Software und ohne Browser-Plugins die gewonnenen Modelle für die Öffentlichkeit zu präsentieren. Für einige der hier aufgeführten Beispiele sind entsprechende WebGL-Umsetzungen unter IGMC (2012) abrufbar. Bei der Darstellung der Modelle mit WebGL sind weitere Entwicklungen denkbar. Zur verbesserten Zustandsdokumentation ist eine Annotationsmöglichkeit an beliebigen Modellpositionen wünschenswert. Dadurch würde es möglich werden, schnell auf die dem Modell zugrunde liegenden Detailfotos,

Messwerte oder andere ortsbezogene Informationen zuzugreifen, die bisher wenn überhaupt nur über komplexe Desktop-Applikationen zugänglich sind.

Literaturverzeichnis

- AGISOFT, 2012: <http://www.agisoft.ru/products/photoscan/> (26.5.2012).
- ALICE, 2012: <http://alice.loria.fr/index.php/software/3-platform/22-graphite.html> (26.5.2012).
- BOUGUET, J.-Y., 2010: Camera Calibration Toolbox for Matlab. – http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/ (29.8.2011).
- BUNDLER, 2012: <http://phototour.cs.washington.edu/bundler/> (26.5.2012).
- DUCKE, B., SCORE, D. & REEVES, J., 2011: Multiview 3D reconstruction of the archaeological site at Weymouth from image series. – *Computers & Graphics* **35** (2), ISSN 0097-8493.
- ENGELHARD, N., ENDRES, F., HESS, J., STURM, J. & BURGARD, W., 2011: Real-time 3D visual SLAM with a hand-held RGB-D camera. – RGB-D Workshop on 3D Perception in Robotics at the European Robotics Forum, Västerås, Sweden.
- FURUKAWA, Y. & PONCE, J., 2007: Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis. – *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Minneapolis, MN, ISBN 1-4244-1180-7.
- HANNEMANN, W., BROCK, T., HEBEL, H.-P. & BUSCH, W., 2010: Photogrammetrische Hohlräumfassung einer Radstube. – Tagungsband Altbergbaukolloquium **10**: 43–57, TU Bergakademie Freiberg, VGE Verlag.
- HANNEMANN, W., BROCK, T. & BUSCH, W., 2011: Fotobasierte 3D Zustands- und Geometriedokumentation altbergbaulicher Objekte. – Tagungsband Altbergbaukolloquium **11**: 34–45, TU Wrocław, Polen, VGE Verlag.
- HEEB, B., 2008: Paperless Caving – An Electronic Cave Surveying System. – **4th** European Speleological Congress, Vercors, Frankreich.
- IGMC, 2012: <http://www.igmc.tu-clausthal.de/index.php?id=foto3d> (25.8.2012).
- KAZHDAN, M., BOLITHO, M. & HOPPE, H., 2006: Poisson Surface Reconstruction. – **4th** Eurographics Symposium on Geometry Processing, Cagliari, Italien.
- KLONOWSKI, J. & NEITZEL, F., 2011: Mobile 3D-Mapping with a Low-Cost UAV System. – *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **XXXVIII** (1/C22), Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics; Zürich, ISSN 1682-1777.
- LIBSIFT, 2012: <http://sourceforge.net/projects/lib-sift/> (26.5.2012).
- LOWE, D.G., 2004: Distinctive image features from scale-invariant keypoints. – *International Journal of Computer Vision* **60** (2), ISSN 0920-5691.
- MESHLAB, 2012: <http://meshlab.sourceforge.net/> (26.5.2012).
- PMVS2, 2012: <http://grail.cs.washington.edu/software/pmvs/> (26.5.2012).
- PIERROT-DESEILLIGNY, M. & CLÉRY, I., 2011: APERO, an Open Source Bundle Adjustment Software for Automatic Calibration and Orientation of a Set of Images. – *ISPRS Commission V Symposium, Image Engineering and Vision Metrology*, Trento, Italy.
- POISSON, 2012: <http://www.cs.jhu.edu/~misha/code/poissonrecon/> (26.5.2012).
- SHEFFER, A., LÉVY, B., MOGLNITSKY, M. & BOGOMYAKOV, A., 2005: ABF++: fast and robust angle based flattening. – *ACM Transactions on Graphics* **24**.
- SNAVELY, N., SEITZ, S.M. & SZELISKI, R., 2006: Photo tourism: Exploring photo collections in 3D. – *ACM Transactions on Graphics*, SIGGRAPH, Boston, Massachusetts, ISBN 1-59593-364-6.
- THIELE, J.C., HANNEMANN, W. & BUSCH, W., 2011: VR-Methoden in der Ausbildung bei K+S Aktiengesellschaft. – Tagungsband Energie und Rohstoffe **2011**, Beitrag des Markscheidewesens: 209–216, TU Bergakademie Freiberg, Papierflieger Verlag.
- THREEJS, 2012: <https://github.com/mrdoob/three.js/blob/master/readme.md> (26.5.2012).
- WU, C., 2007: SiftGPU: A GPU Implementation of Scale Invariant Feature Transform (SIFT), <http://cs.unc.edu/~ccwu/siftgpu/> (29.8.2011).
- WU, C., CLIPP, B., LI, X., FRAHM, J.-M. & POLLEFEYS, M., 2008: 3D Model Matching with Viewpoint Invariant Patches (VIPs). – *CVPR 2008*.
- WU, C., 2011: VisualSFM: A Visual Structure from Motion System, <http://www.cs.washington.edu/homes/ccwu/vsfm/> (9.1.2012).

Adresse der Autoren:

WILHELM HANNEMANN, TILMAN BROCK & Prof. Dr. WOLFGANG BUSCH, Institut für Geotechnik und Markscheidewesen, TU Clausthal, 38678 Clausthal-Zellerfeld, Tel.: +49-5323-72-2294, Fax: +49-5323-72-2479, e-mail: {wilhelm.hannemann}{tilman.brock}{wolfgang.busch}@tu-clausthal.de

Manuskript eingereicht: Mai 2012
Angenommen: August 2012