

Rebecca Döhl

# Digitale Aufnahme von Landschaft und Felsbildgruppen mit Laserscanner und Structure-from-Motion im Wadi Berber, Ägypten

## Zusammenfassung

In diesem Artikel werden die Anwendungen zweier digitaler archäologischer Aufnahmeverfahren an dem Beispiel eines Gebietes mit Felsbildern in Ägypten vorgestellt. Dabei geht es einerseits um den Einsatz eines Terrestrischen Laserscanners, andererseits um die Anwendung des Structure-from-Motion-Verfahrens. Zu dem Vergleich des Einsatzes beider Techniken in der Archäologie existiert bereits Literatur. Daher konzentriert sich dieser Artikel auf die konkrete Anwendung dieser Techniken bei der Aufnahme von Felsbildfundplätzen mit ihrer Umgebung und stellt die jeweiligen Vor- und Nachteile dar, gemessen an den konkreten Projektanforderungen.

Keywords: Structure-from-Motion; Terrestrischer Laserscanner; Felsbilder; Ägypten; DGM; Textur.

This paper presents the application of two digital documentation methods in archaeology used for an area with evidence for ancient rock art in Egypt. They involve both the use of a terrestrial laser scanner and the application of the 'structure from motion' method. The application of both methods were already compared and discussed extensively in archaeological literature. This article therefore focuses on the practical application of these techniques in recording rock art sites and their environment. The aim is also to present the advantages and disadvantages of the methods in relation to the project requirements.

Keywords: Structure-from-Motion; terrestrial laser scanner; rock art in Egypt; DTM; texture.

Da bereits Literatur zu dem vergleichenden Einsatz von Terrestrischen Laserscannern und Structure-from-Motion für die Zwecke der Archäologie existiert,<sup>1</sup> widmet sich der vorliegende Artikel einem praktischen Anwendungsbeispiel dieser Techniken in Form von Fundplätzen mit Felsbildern.

## I Projektvorstellung

Das Projekt ‚Medienuniversum Aswân‘ des Archäologischen Institutes, Abteilung Kairo, widmet sich der Erfassung und Dokumentation aller Texte und Bilder im Gebiet des Ersten Nilkataraktes in Ägypten bis in die Frühe Moderne. In diesen Rahmen reiht sich auch das Projekt der Aufnahme von Felsbildern im Wadi Berber ein. Das Wadi liegt auf der Westseite des Nils, ca. 5 km nördlich des Hochdammes, gegenüber der modernen Stadt Aswân (Abb. 1). Am Eingang dieses Wadis, beziehungsweise entlang der das Wadi begrenzenden Hänge, finden sich mehrere Felsflächen, auf denen Felsbilder angebracht sind.

Im Rahmen des Projektes sollte die landschaftliche Einbettung der einzelnen Bildträger dokumentiert werden. Dazu zählt einerseits das Gelände, andererseits der Platz selber, welcher meist aus Felsblöcken oder Felswänden besteht (Abb. 2). Diese werden traditionell per Hand aufgenommen. Doch im vorliegenden Fall kam eine digitale Dokumentationsmethode bevorzugt zum Einsatz.

Dabei waren zwei Anforderungen zu berücksichtigen: einerseits sollte ein Digitales Geländemodell erstellt werden, um weitere Abfragen und Modellierungen zu ermöglichen; andererseits sollten die einzelnen Felsbildstellen als 3D-Modelle dokumentiert werden. Dieses letztere Anliegen hatte mehrere Gründe. So besteht ein visueller Vorteil von 3D-Modellen gegenüber 2D-Darstellungen, insbesondere in Bezug auf Anschaulichkeit und Beweglichkeit. Weiterhin ist das 3D-Modell ein Versuch zur digitalen Konservierung dieser Felsbildplätze, deren Erhalt unter Umständen wegen des vor Ort betriebenen privaten Sandsteinabbaus gefährdet ist.

Zur Durchführung dieses Vorhabens kamen zwei verschiedene Techniken zum Einsatz. Einerseits erfolgte die 3D-Vermessung mithilfe eines Terrestrischen Laserscanners<sup>2</sup> und die Weiterverarbeitung der so entstandenen Punktwolke mit der von Leica angebotenen Software Cyclone®. Als zweites Verfahren wurde Structure-from-Motion ein-

1 Siehe: Kersten und Lindstaedt 2012.

2 Hierbei handelt es sich um die ScanStation 2 von Leica, welche von dem Exzellenzcluster 264 *Topoi – The Formation and Transformation of Space and Knowledge in Ancient Civilizations* zur Verfügung gestellt wurde. Die ScanStation 2 verfügt

über eine Punktgröße von 4–6 mm unter 50 m, einer Reichweite von 300 m und einer maximalen Abtastdichte von < 1mm ([http://hds.leica-geosystems.com/downloads/123/hds/hds/ScanStation/brochures-datasheet/Leica\\_ScanStation%202\\_datasheet\\_de.pdf](http://hds.leica-geosystems.com/downloads/123/hds/hds/ScanStation/brochures-datasheet/Leica_ScanStation%202_datasheet_de.pdf) (besucht am 01/10/2015)).

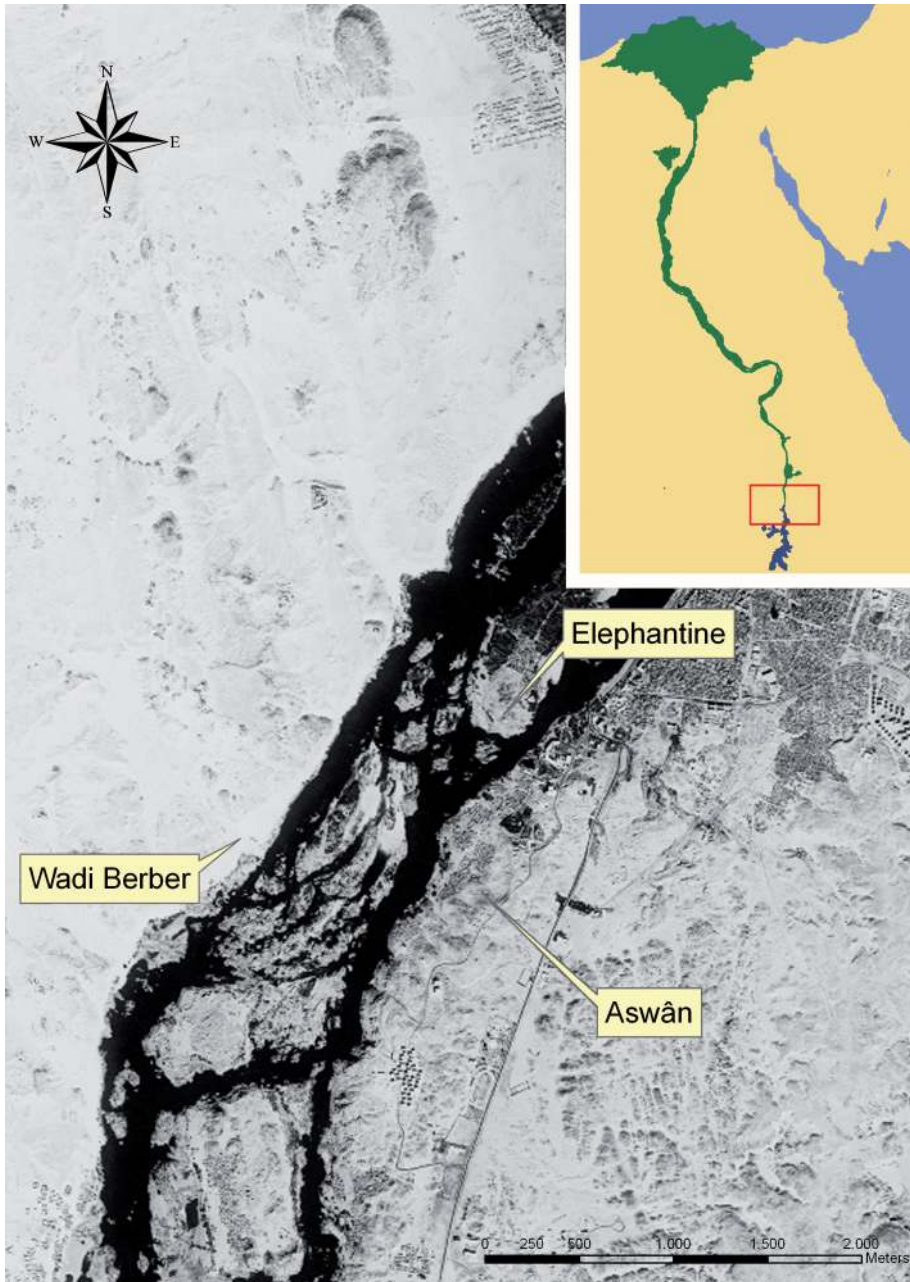


Abb. 1 Lage des Wadi Berber, Ägypten.



Abb. 2 Felsgruppe mit Bildern.

gesetzt, wofür eine Digitalkamera<sup>3</sup> zum Einsatz kam. Für die Erstellung und Weiterverarbeitung der so entstandenen Punktwolke wurde auf die freie beziehungsweise *Open Source* Software VisualSfM<sup>4</sup>, MeshLab<sup>5</sup> sowie Cloud Compare<sup>6</sup> zurückgegriffen.

## 2 Durchführung des Laserscans

Die Aufnahme des Geländes und der Felsbildgruppen erfolgte von 15 Stationen aus mit einer Auflösung zwischen 10 x 10 und 1 x 1 cm, variierend nach Gelände oder Felsgruppe (Abb. 3). Insgesamt wurde eine Fläche von ca. 75.000 m<sup>2</sup> gescannt.

Als Targets – Referenzpunkte für die spätere Georeferenzierung, sowie Ankerpunkte für die Verbindung (Registrierung) der einzelnen Scans – fanden die von Leica zur Verfügung gestellten HDS (High-Definition Surveying) – Targets Verwendung. Diese wurden entweder direkt an den Felsen angebracht und mit Kreide umrandet, um ihre Position zu einem späteren Zeitpunkt für die Einmessung rekonstruieren zu können,

3 Hierbei handelt es sich um eine vom Deutschen Archäologischen Institut, Abteilung Kairo ausgeliehene Nikon D300S.

4 VisualSfM: <http://homes.cs.washington.edu/~ccwu/vsfm/> (besucht am 01/10/2015).

5 MeshLab: <http://meshlab.sourceforge.net/> (besucht am 01/10/2015).

6 Cloud Compare: <http://www.danielgm.net/cc/> (besucht am 01/10/2015).



Abb. 3 Leica ScanStation 2 im Einsatz.

oder in Form von *tilt and turn*-Targets auf Eisenstäben befestigt, die ebenfalls vor Ort belassen wurden.

Im Laufe der Arbeiten ergaben sich einige logistische Probleme, welche den Einsatzradius des Scanners begrenzten. Dazu gehörte einerseits der Transport des recht umfangreichen und schweren Scanners samt Zubehör, welcher, durch fehlende Möglichkeiten des motorisierten Transportes in der Umgebung, allein mit Muskelkraft innerhalb des Einsatzbereiches bewegt werden musste. Aus diesem Grund wurde auf die Aufnahme einer Fundstelle verzichtet, welche sich ca. 1,5 km weit im Wadi-Inneren und damit außerhalb der Transportreichweite befindet. Erst nach der Aufnahme stellte sich heraus, dass viele der HDS-Targets, wahrscheinlich aufgrund der hohen Sonneneinstrahlung, nicht komplett vom Scanner erkannt wurden. Darüber hinaus war die Haltbarkeitsdauer der Akkus das größte Problem, welche aus diversen Gründen nicht zu ihrer vollen Leistung gelangten, so dass die Verbindung zu einer externen Stromquelle notwendig war.

Die Nachbearbeitung der so generierten Punktwolken erfolgte mit Cyclone®. Die Registrierung der einzelnen Punktwolken musste aufgrund des bereits erwähnten Problems bei der Target-Erkennung von Hand vorgenommen werden und erreichte dennoch einen Lagefehler von lediglich 1–2 cm. In einem weiteren Schritt wurde die Punktwolke nachbereinigt, um rezente Bebauung, Bewuchs und Rauschen zu entfernen (Abb. 4).

Die Georeferenzierung musste nachträglich erfolgen, da sich zum Zeitpunkt der Durchführung des Laserscans noch keine Fixpunkte mit Weltkoordinaten in dem Wadi befanden und diese erst später etabliert wurden. Als Referenzpunkte dienten die noch vorhandenen Targets, teilweise wurden neue prominente Objekte eingemessen, die in ihrer deutlichen Charakteristik auch in der Punktwolke im Nachhinein erkennbar waren. Die Georeferenzierung wurde wiederum mit Cyclone® vorgenommen. Hierbei trat



Abb. 4 Punktwolke des Geländes mit Felsbildgruppe.

ein Lagefehler von 10 bis 15 cm auf, welcher für das zu erstellende Digitale Geländemodell im tolerierbaren Rahmen liegt.

Die so georeferenzierte Punktwolke wurde im ASCII-Format in ein GIS (Geographisches Informationssystem) geladen und darin ein interpoliertes Höhenraster mit 20 cm Rasterauflösung erstellt. Fehlende Punkte zum Ufer des Nils hin, welches aufgrund des dichten Bewuchses und des steil abfallenden Hanges nicht mit dem Scanner aufgenommen werden konnte, wurden durch mit der Totalstation eingemessene Punkte ersetzt oder teilweise bei der Bildung des Höhenrasters interpoliert.

Dagegen benötigten die mit dem Laserscanner aufgenommenen Punktwolken der Felsgruppen kaum eine Nachbearbeitung in Cyclone®, da nur wenig Rauschen auftrat, auch gab es keine zu entfernenden rezenten Strukturen.

Die Größe der Punktwolken variierte je nach Ausgangsgröße der Felsgruppen, welche sich nicht eklatant voneinander unterschieden, zwischen 2 und 3 Millionen Punkten, wobei auch die Umgebung, meist bestehend aus Sand und Geröll, mitberechnet wurde. Da diese Punktwolken hauptsächlich für visuelle Zugänge benutzt werden sollen, ist hier die Textur von ausschlaggebender Bedeutung.<sup>7</sup>

Durch die Auswertung der relativen x-, y- und z-Daten zusammen mit den RGB-Farbwerten, übernommen aus den ebenfalls mit dem Laserscanner erstellten Photos, ergab sich bereits eine zufriedenstellende Visualisierung (Abb. 5).

7 Auf eine Vermaschung wurde vorerst verzichtet, da diese aufgrund der vielen heterogenen Oberflä-

chen bei ersten Versuchen in Cyclone® zu einer Verschlechterung der visuellen Erscheinung führte.

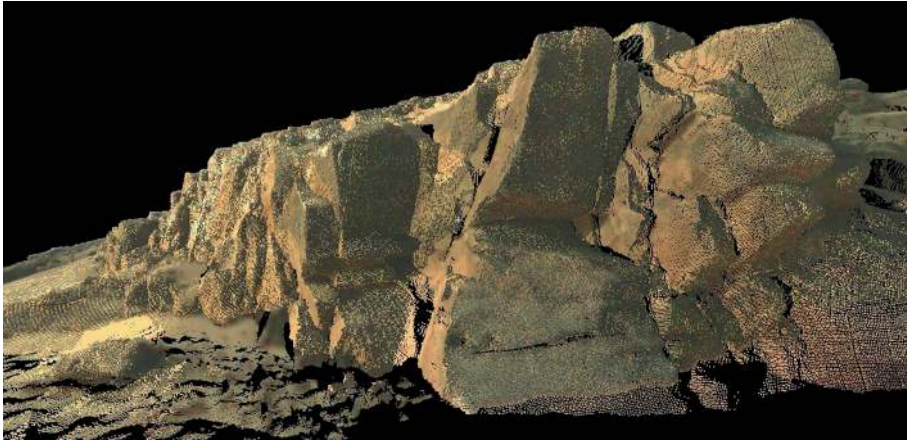


Abb. 5 3D-Modell der Felsbildgruppe.

Allerdings wurde schnell deutlich, dass die Bilder, die sich auf den Felsen befinden, in den Modellen nicht gut zu erkennen sind, so dass diese durch ein *texture mapping*<sup>8</sup> ergänzt werden sollten. Als Ausgangsbasis dienten mehrere Photos, auf denen nachträglich die Umzeichnungen der Felsbilder eingefügt wurden. Für diesen Arbeitsschritt wurde ebenfalls auf die Software Cyclone® zurückgegriffen. Auf diese Weise wurden die Farbwerte der Photos auf die Punktwolke übertragen (Abb. 6). Zu beachten war hierbei, dass jede Felsgruppe viele inhomogene, in verschiedene Richtungen weisende Oberflächen besitzt. Um zu vermeiden, dass viele der Flächen somit falsche Farbwerte zugewiesen bekommen, wurden nur sehr kleinflächige *texture mappings* vorgenommen.

Die Genauigkeit der so entstandenen Punktwolken lag bei Abweichungen im Millimeterbereich, wie im Vergleich mit vor Ort gemessenen Werten festgestellt werden konnte.

### 3 Einsatz von Structure-from-Motion

Ein Problem, welches sich während der Arbeiten herauskristallisierte, war, dass einer der Felsbildplätze aufgrund seiner steilen Hanglage mit dem Laserscanner nicht aufgenommen werden konnte. Eine Hanglage von bis zu 30°, hauptsächlich aus Sand und lockerem Geröll bestehend, bot wenig Möglichkeiten für einen festen Stand des Gerätes

<sup>8</sup> Eine Transformationsmethode um 3D-Modelle mit Eigenschaften von 2D-Oberflächen zu versehen,

zum Beispiel die Übertragung von Farbwerten aus Photographien auf 3D-Punktwolken.



Abb. 6 3D-Modell der Felsbildgruppe mit Phototextur.

(Abb. 7). Außerdem war es so nicht möglich eine Position zu erlangen, aus welcher der Scanner alle Teile des Felsblocks hätte aufnehmen können.

Daher sollte dieser Fall dafür benutzt werden, mithilfe von Structure-from-Motion ein 3D-Modell dieser Felsgruppe zu erstellen. Ein weiteres Ziel war die Erprobung von kostenloser Software zur Weiterverarbeitung der Punktwolke als Alternative zur kommerziellen Software Cyclone®.

Bei Structure-from-Motion handelt es sich um ein im weitesten Sinne photogrammetrisches Verfahren, das aus korrespondierenden Punkten auf mehreren Photos, aufgenommen aus verschiedenen Kamerapositionen, eine 3D-Oberflächenstruktur rekonstruiert.<sup>9</sup>

Die Photos, welche die Grundlage dieses Verfahrens bilden, wurden, nach Möglichkeit mit einer 60-prozentigen Überlappung aufgenommen, aus unterschiedlichen Perspektiven. Da es sich um Felswände handelt, welche in den Hang übergehen und deren Oberseiten nur durch schräg abfallenden Sand und Geröll begrenzt werden, lag das Hauptinteresse nur an der Rekonstruktion der aus dem Hang hinausragenden Felswände bzw. -blöcke und ihres Verhältnisses zueinander. Insgesamt wurde diese Felsgruppe (ca. 70 m<sup>2</sup>) mit 99 Photos dokumentiert. Die Berechnungen erfolgten mit dem von Changchang Wu hergestellten System VisualSfM.<sup>10</sup> VisualSfM bündelt verschiedene

9 Robertson und Cipolla 2009. Siehe auch Artikel von J. Reinhard in diesem Band.

10 Das Exzellenzcluster Topoi hat ebenfalls ein Tool zur Verwendung des Structure-from-Motion-

Verfahrens entwickelt. Dieses ist Linux basiert und beinhaltet die Pakete: Bundler, CMVS und PMVS2. <https://community.topoi.org/web/forum-sda/software> (besucht am 01/10/2015).





Abb. 7 Vereinzelte Felsgruppe mit steiler Hanglage.

Freeware-Produkte zur Erstellung dichter Punktwolken aus Photos unter einer graphischen Benutzeroberfläche.<sup>11</sup> So ergab sich eine vollständige Rekonstruktion der Felsgruppe, welche aus ca. 200.000 Punkten besteht.

Eine relevante Erkenntnis in Bezug auf die Möglichkeit des Einsatzes dieser Methode für die Geländerekonstruktion offenbarte sich an dieser Stelle: alle Bereiche, in denen auf den Photos Sand wiedergegeben wurde, konnten nicht rekonstruiert werden. Sandflächen weisen zu wenige Kontraste auf, so dass das Verfahren keine gemeinsamen Punkte innerhalb einer Bildgruppe identifizieren konnte.

Die so entstandene Punktwolke wies einige Lücken auf, beziehungsweise bestand aus einer sehr unregelmäßigen Abdeckung einzelner Flächen, weshalb einige Felsblöcke in kleineren Bildgruppen erneut berechnet wurden. In denjenigen Fällen, wo auf diese Art ein weniger fehlerhaftes Modell entstand, wurden diese kleineren Punktwolken mit der ursprünglichen verschmolzen (Abb. 8). Dazu wurde auf die *Open Source* Software Cloud Compare zurückgegriffen, etwaige Lücken konnten so ebenfalls geschlossen werden und die Größe der Punktwolke erhöhte sich auf ca. 1.000.000 Punkte.

Um das so entstandene Modell in das Digitale Geländemodell des Terrestrischen Laserscans zu integrieren, wurde eine Georeferenzierung vorgenommen. Diese kann

<sup>11</sup> Zu diesem Paket zählen u. a.: SiftGPU, Multicore Bundle Adjustment, PMVS/CMVS, siehe: Wu 2007, Wu 2011, Wu u. a. 2011.



Abb. 8 3D-Modell der Felsgruppe mit Structure-from-Motion.

ebenfalls mit VisualSFM durchgeführt werden. Hierzu werden Referenzpunkte in den Photos oder der groben Punktwolke per Hand identifiziert, um ihnen dann Koordinaten manuell zuzuordnen. Im vorliegenden Fall ergaben sich diese Referenzpunkte zufällig, da vorhandene rezente Graffiti in markanter roter und blauer Farbe als Passpunkte verwendet werden konnten, welche sowohl in den Punktwolken als auch auf den Photos sehr genau zu erkennen waren. Die so entstandene georeferenzierte Punktwolke wurde ebenfalls mithilfe eines GIS in ein Digitales Geländemodell interpoliert und mit dem schon vorhandenen Höhenraster ergänzend verknüpft. Das generierte 3D-Modell trägt zwar ebenfalls schon Farbinformationen, allerdings trat auch hier das Problem auf, dass die Felsbilder selber nicht zu erkennen waren, ein Umstand der, wie oben beschrieben, durch *texture mapping* behoben werden sollte. Dabei kam die *Freeware* Meshlab mit dem Tool „Image alignment: Mutual Information“<sup>12</sup> zum Einsatz, die es erlaubt, Photos, deren Kamerapositionen in Bezug auf das Modell nicht bekannt sind, nachträglich manuell mit diesem in Einklang zu bringen. In einem weiteren Schritt werden dann die Rasterfarben des Photos auf das Modell übertragen (Abb. 9).

Auch hier wurde die Genauigkeit der entstandenen Punktwolke mithilfe bekannter Abstände überprüft – es findet sich eine Abweichung von ca. 2 cm, welche auch hier im tolerierbaren Bereich liegt.

## 4 Zusammenfassung

Der Einsatz sowohl eines Terrestrischen Laserscanners als auch des Structure-from-Motion-Verfahrens zur digitalen Aufnahme von Gelände und Felsgruppen wurde von einigen Vor- und Nachteilen im vorliegenden Beispiel begleitet.

<sup>12</sup> MeshLab „Image alignment: Mutual Information“  
nach: Corsini u. a. 2009.

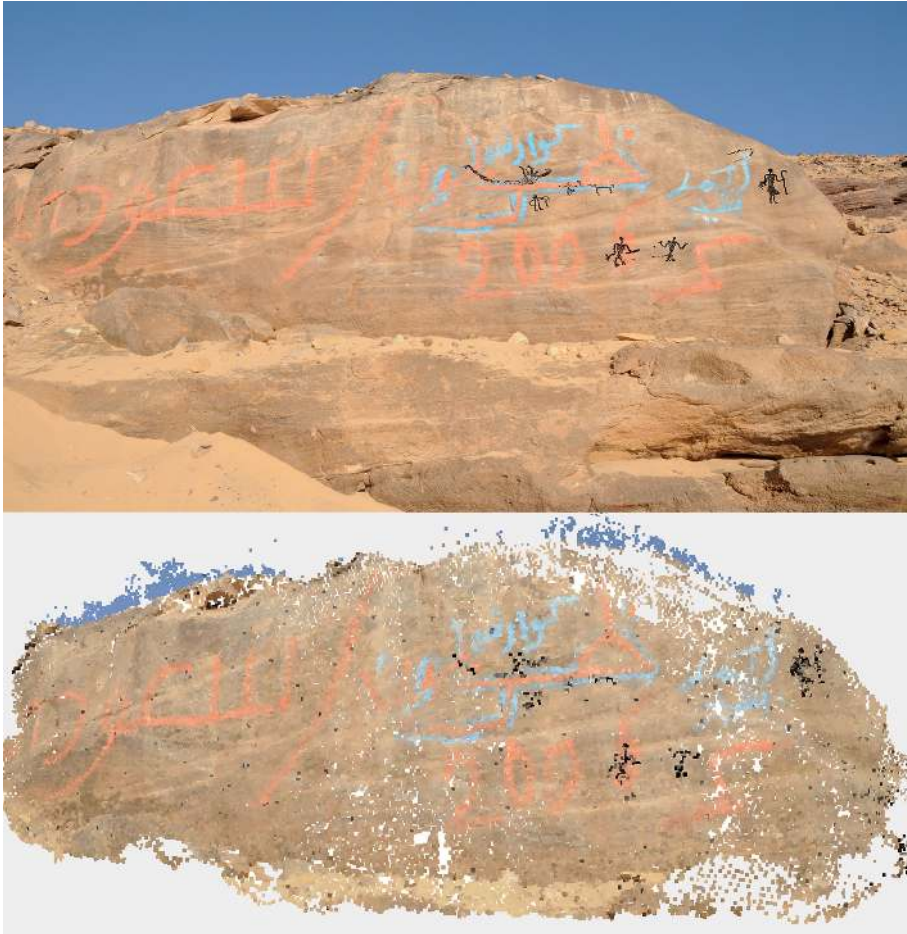


Abb. 9 Oben: Photographie des Felsblockes mit Felsbildern. Unten: 3D-Modell durch Structure-from-Motion erstellt, mit Phototextur.

Ein Nachteil beim Einsatz des Laserscanners ist die Abhängigkeit von einer Stromquelle, hinzu kommen Schwierigkeiten bei schlecht zugänglichen Felsgruppen. Auch für kleinere Laserscanner dürfte das Problem der Stromzufuhr bestehen bleiben. Allerdings ist die Aufnahme großer Geländeflächen, insbesondere wenn diese aus einheitlich homogenen Sandflächen bestehen, mit einem Terrestrischen Laserscanner leichter zu bewältigen. Structure-from-Motion würde hier entweder aufgrund des fehlenden Kontrastes nicht greifen und benötigt darüber hinaus die Hilfe eines zusätzlichen Fluggerätes, um größere Flächen zu erfassen. Für diese Art der Aufnahme ist Structure-from-Motion im hier betrachteten Gelände kein Ersatz.

Bei der Anwendung auf flächenmäßig begrenzte Objekte, wie etwa Felsauswüchse, zeigen sich dagegen die Vorteile von Structure-from-Motion, da nur eine Kamera an Ausrüstung benötigt wird. Gerade in unwegsamem oder abgelegenen Gelände kommen die Vorzüge des Structure-from-Motion-Verfahrens zur Geltung, auch in Bezug auf die anfallenden Kosten.

Hinsichtlich der Weiterverarbeitung beider Punktwolken greifen die Vorteile proprietärer Software nur noch bedingt, da eine Reihe von *Freeware* und *Open Source* Software mittlerweile die gleichen in diesem Zusammenhang benötigten Arbeitsschritte unterstützt. Zu diesen zählt: Bereinigung und Verbinden von Punktwolken, *texture mapping*, Georeferenzierung und Vermaschung der Punktwolken, sowie die Animation der so entstandenen Modelle.

In Bezug auf die Genauigkeit sind im vorliegenden Fall noch Einbußen im durch Structure-from-Motion generierten Modell zu verzeichnen; allerdings dürfte dieses Problem durch eine Aufnahme zusätzlicher Photos mit höherer Auflösung und unterschiedlichen Aufnahmeweiten und -winkeln zu beheben sein.

# Bibliographie

## Corsini u. a. 2009

Massimiliano Corsini, Matteo Dellepiane, Federico Ponchio und Roberto Scopigno. „Image-to-Geometry Registration: a Mutual Information Method Exploiting Illumination-related Geometric Properties“. *Computer Graphics Forum* 28.7 (2009), 1755–1764.

## Kersten und Lindstaedt 2012

Thomas P. Kersten und Maren Lindstaedt. „Generierung von 3D-Punktwolken durch kamera-basierte low-cost Systeme – Workflow und praktische Beispiele“. In *Terrestrisches Laserscanning 2012, Schriftenreihe des DVW* 69. Augsburg: Wißner-Verlag, 2012, 25–46.

## Robertson und Cipolla 2009

Duncan P. Robertson und Roberto Cipolla. „Structure from Motion“. In *Practical Image Processing and Computer Vision*. Hrsg. von Margaret Varga. New York: John Wiley, 2009. URL: <http://mi.eng.cam.ac.uk/~cipolla/publications/contributionToEditedBook/2008-SFM-chapters.pdf> (besucht am 01. 10. 2015).

## Wu 2007

Changchang Wu. *SiftGPU: A GPU Implementation of Scale Invariant Feature Transform (SIFT)*. 2007. URL: <http://cs.unc.edu/~ccwu/siftgpu> (besucht am 01. 10. 2015).

## Wu 2011

Changchang Wu. *VisualSFM: A Visual Structure from Motion System*. 2011. URL: <http://homes.cs.washington.edu/~ccwu/vsfm/> (besucht am 01. 10. 2015).

## Wu u. a. 2011

Changchang Wu, Sameer Agarwal, Brian Curless und Steven M. Seitz. *Multicore Bundle Adjustment*. CVPR. 2011. URL: <http://grail.cs.washington.edu/projects/mcba/pba.pdf> (besucht am 01. 10. 2015).

## Abbildungsnachweis

1 Quelle Satellitenbild: Center for Advanced Spatial Technologies, University of Arkansas/U.S. Geological Survey. Zusammenstellung: Rebecca Döhl. 2 Rebecca Döhl.

3 Rebecca Döhl. 4 Cyclone®/Rebecca Döhl. 5 Cyclone®/Rebecca Döhl. 6 Cyclone®/Rebecca Döhl. 7 Rebecca Döhl. 8 MeshLab/Rebecca Döhl. 9 MeshLab/Rebecca Döhl.

REBECCA DÖHL

Die Ägyptologin Rebecca Döhl, M.A. (Berlin 2008), arbeitet derzeit an ihrer Dissertation zu den Felsbildern Ägyptens. Ihre Forschungsschwerpunkte sind ägyptische Felsbilder, Landschaftsarchäologie, archäologische Theorien sowie die Prähistorie und Prädynastik Ägyptens.

Rebecca Döhl  
Humboldt-Universität zu Berlin  
Archäologie und Kulturgeschichte Nordostafrikas  
Unter den Linden 6  
10099 Berlin, Deutschland  
E-mail: rebecca.doehl@hu-berlin.de