

# **Bildbasierte Low-Cost-Systeme zur automatischen Generierung von 3D-Modellen archäologischer Fundstücke in Äthiopien und Katar**

Thomas KERSTEN, Klaus MECHELKE, Maren LINDSTAEDT,  
Felix TSCHIRSCHWITZ, Kristin SCHREYER und Lena MAZIULL

## **Zusammenfassung**

In den meisten Fällen verbleiben archäologische Fundstücke und Objekte im Herkunftsland. Durch 3D-Modellierung, Analyse und Visualisierung dieser Fundstücke in effizienten web-basierten Datenbanken ergeben sich vielfältige neue Forschungsmöglichkeiten und die Dokumentation der Objekte erfährt eine zunehmende Bedeutung. Die typischen 3D-Aufnahmetechnologien für Objekte dieser Art wie z.B. terrestrisches Laserscanning oder Streifenprojektionssysteme sind noch sehr teuer, oft unhandlich, umständlich bzw. unflexibel und meistens mit Expertenwissen verbunden, daher stellen kamera-basierte Systeme heute eine kostengünstige, einfach zu handhabende und flexible Alternative dar. In diesem Beitrag wird gezeigt, wie Geometrie und Textur archäologischer Objekte aus digitalen Bilddaten und frei verfügbarer und kostengünstiger Software sowie Webservices automatisch generiert werden. Texturierte 3D-Modelle verschiedener Objekte aus Äthiopien und Katar, die mit unterschiedlichen Softwarepaketen bzw. Webservices erstellt wurden, werden mit Referenzdaten von Streifenprojektionssystemen verglichen, um die hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit solcher aus Bilddaten erstellten Objekte zu analysieren und zu demonstrieren.

## **1 Einleitung**

Im letzten Jahrzehnt haben sich terrestrische Laserscanner und Streifenprojektionssysteme als typische 3D-Aufnahmetechnologien für die Dokumentation archäologischer Fundstücke und Objekte sowie Grabungsschnitte etabliert. So wird in ADOLF & BARNES (2006) und BELLENDORF (2007) beschrieben, dass Streifenprojektionsscanner zum festen Bestandteil für Anwendungen in den Bereichen Archäologie und Denkmalpflege gehören, da sich berührunglose Verfahren besonders gut für die Bestandsaufnahme kleiner Objekte eignen. Doch seit ein paar Jahren sind leistungsfähige digitale Kameras in Kombination mit entsprechenden Softwarepaketen, die Algorithmen aus dem Bereich der Computer Vision und Photogrammetrie verwenden, als kostengünstige, einfach zu handhabende und flexible Alternative verfügbar. Diese Low-Cost-Systeme bieten günstige und bedienungsfreundliche Lösungen zur bildbasierten 3D-Objektaufnahme und Modellierung für viele Anwender in der Architektur, Archäologie und Denkmalpflege an. Daher stellt sich die Frage, ob solche bildbasierten Systeme bereits heute teure distanzbasierte Systeme wie terrestrisches Laserscanning oder Streifenprojektionssysteme für die 3D-Aufnahme verschieden großer Objekte ersetzen können? Wie stellen sich die Genauigkeit, die Wiederholbarkeit und die Zuverlässigkeit dieser kamerabasierten, preiswerten Systeme im Vergleich zu Ergebnissen

vom 3D-Scanning dar? In diesem Beitrag werden einige wichtige Open-Source-Softwarepakete, Webservices und Low-Cost-Software für die automatische Generierung von 3D-Punktwolken oder 3D-Oberflächenmodellen anhand von verschiedenen Objektbeispielen aus Äthiopien und Katar getestet. Um die Qualität der erzeugten Modelle zu validieren, werden die generierten Daten teilweise auch mit Referenzdaten derselben Objekte, die durch terrestrische Laserscanner oder Streifenprojektionssysteme aufgenommen wurden, verglichen. Erste Ergebnisse mit solchen bildbasierten Low-Cost-Systemen wurden bereits durch REMONDINO & MENNA (2008), REMONDINO et al. (2008), BARAZZETTI et al. (2009), BACHFELD et al. (2012) und KERSTEN & LINDSTAEDT (2012a) veröffentlicht. Kritische Aspekte von Low-Cost und Open-Source-Lösungen für die automatisierte Generierung von 3D-Punktwolken stellen REMONDINO & KERSTEN (2012) zusammen. OMELANOWSKY et al. (2013) haben gezeigt, dass neben den bildbasierten Low-Cost-Systemen auch mit dem DAVID SLS-1 ein preisgünstiges Streifenprojektionssystem und der Microsoft Kinect ein Sensor aus dem Spielbereich entsprechendes Leistungsvermögen für die 3D-Rekonstruktion kleiner Objekte haben. HIERONYMUS et al. (2011) stellen günstige 3D-Sensoren aus dem Freizeit- und Spielmarkt in einem Genauigkeitsvergleich vor.

In dem vorliegenden Beitrag wird nach kurzer Vorstellung der an der HafenCity Universität Hamburg verwendeten Softwarepakete die automatische Generierung von 3D-Modellen verschiedener archäologischer Objekte durch bildbasierte Low-Cost-Systeme vorgestellt. Manche Objekte werden mit genaueren Referenzdaten verglichen, um das hohe Potential dieser Systeme aufzuzeigen.

## 2 Low-Cost-Systeme – Eingesetzte Software

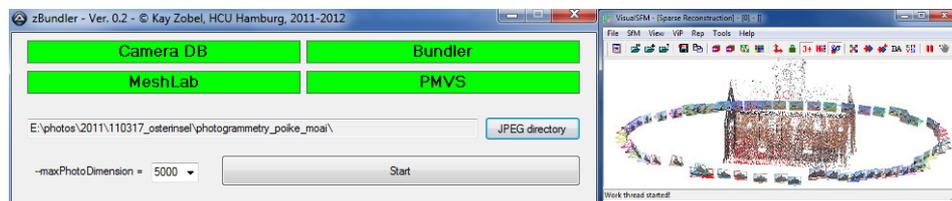
### 2.1 Digitale Spiegelreflexkameras

Für die photogrammetrischen Aufnahmen der archäologischen Fundstücke in Äthiopien und Katar wurden digitale Spiegelreflexkameras als Low-Cost-Aufnahmesysteme (Preisklasse 500 € bis 2500 € für den Kamerakörper) eingesetzt: Nikon D90, Nikon D7000 und Nikon D800. Die Kameras weisen folgende CMOS-Sensorgrößen auf: Nikon D90 (23.6 × 15.8 mm | 4,288 × 2,848 Pixel), Nikon D7000 (23.6 × 15.6 mm | 4,928 × 3,264 Pixel) und Nikon D800 (35.9 × 24.0 mm | 7,360 × 4,912 Pixel). Für die Aufnahme der archäologischen Fundstücke wurden überwiegend Objektive mit Brennweiten von 35-50 mm eingesetzt.

### 2.2 Software

Für die automatische Generierung der 3D-Oberflächenmodelle bzw. Punktwolken aus Bilddaten wurden folgende Softwarepakete bzw. Webservices eingesetzt: Bundler/PMVS2 (Open-Source-Software), VisualSFM (freie Software), Agisoft PhotoScan (günstige kommerzielle Software) und Autodesk 123D Catch (kostenloser Webservice). Diese in der HCU Hamburg eingesetzten Softwarepakete sind in KERSTEN & LINDSTAEDT (2012c) bereits ausführlich beschrieben worden. Bundler (SNAVELY et al. 2008) und PMVS2 (Patch based Multi View Stereo Software, FURUKAWA & PONCE 2010), entwickelt an der Universität von Washington in Seattle (USA) in C und C++ unter der GNU General Public License als frei verfügbare Software, verwendet für die Kamerakalibrierung neben der Brennwei-

te (aus den EXIF-Daten) zwei Parameter für die radial-symmetrische Verzeichnung. Eine an der HCU Hamburg entwickelte Benutzeroberfläche (Abb. 1 links) bietet einen vollautomatischen Ablauf von Bundler/PMVS2 mit abschließender Visualisierung der generierten 3D-Punktwolken in der Open-Source-Software MeshLab. Dagegen werden in VisualSFM (Abb. 1 rechts) für die Kamerakalibrierung die Brennweite (aus den EXIF-Daten) und nur ein Parameter für die radial-symmetrische Verzeichnung zur Modellierung systematischer Fehler berechnet (WU 2011). 123D Catch verwendet Algorithmen aus den Bereichen Computer Vision und Photogrammetrie als Grundlage (COURCHAY et al. 2010) und nutzt die Leistungsfähigkeit von Cloud Computing aus, um effizient 3D-Modelle aus 2D-Bilddaten zu erstellen. Agisoft PhotoScan ist eine preiswerte 3D-Rekonstruktionsoftware von der Firma Agisoft LLC (www.agisoft.ru) in St. Petersburg (Russland) die automatisch hochauflösende, texturierte 3D-Modelle aus digitalen Fotos berechnet. Für die Kalibrierung der Kamera(s) verwendet PhotoScan mehrere Parameter: Kamerakonstante ( $f_x$ ,  $f_y$  in Pixel), Bildhauptpunkt ( $c_x$ ,  $c_y$  in Pixel), radial-symmetrische Verzeichnung ( $k_1 - k_4$ ), tangentielle Verzeichnung ( $p_1$ ,  $p_2$ ) und einen Transformationskoeffizienten. Generell setzen diese auf einem Rechner installierten Softwarepakete genügend RAM ( $> 8$  GB) und einen leistungsfähigen Prozessor (CPU) voraus. Für VisualSFM und PhotoScan bietet es sich an, die Rechner mit einer schnellen Grafikkarte (GPU) zu nutzen oder auszurüsten, um die Rechenprozesse signifikant beschleunigen zu können.



**Abb. 1:** HCU-Benutzeroberfläche für den automatischen Ablauf von Bundler/PMVS2 (links) und graphische Benutzeroberfläche für eine benutzergesteuerte Datenverarbeitung mit VisualSFM (rechts).

### 3 Generierung der 3D-Modelle archäologischer Fundstücke

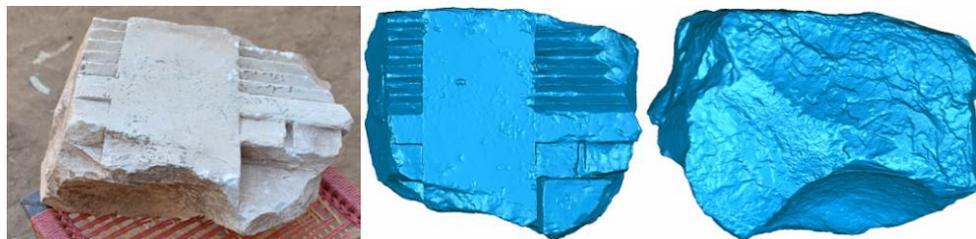
#### 3.1 Archäologische Fundstücke in Äthiopien

Seit mehreren Jahren begleitet die HafenCity Universität Hamburg die Außenstelle Sana'a (Jemen) der Orientabteilung des Deutschen Archäologischen Instituts im Rahmen einer Projektkooperation in dem archäologischen Projekt in Yeha im Norden von Äthiopien. Die archäologischen Grabungsschnitte und Fundstücke werden durch leistungsfähige Technologie wie terrestrisches Laserscanning (siehe LINDSTAEDT et al. 2010) und Streifenprojektionsssysteme in 3D dokumentiert. Aufgrund der hohen Flexibilität und der schnellen Aufnahme werden zunehmend günstigere und leichtere bildbasierte Systeme für die 3D-Dokumentation in diesem Projekt verwendet. Für die anschließende Generierung der 3D-Modelle werden sowohl vor Ort als auch später in der HCU Hamburg die in Kapitel 2 vorgestellten Softwarepakete eingesetzt. Erste Ergebnisse über die Generierung von 3D-Modellen archäologischer Fundstücke aus Yeha sind bereits in KERSTEN & LINDSTAEDT (2012b) veröffentlicht.



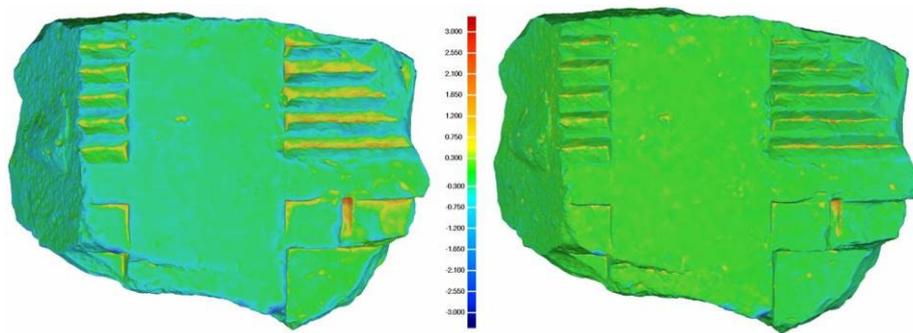
**Abb. 2:** Architekturfragmente – Teile sabäischer Wanddekorelemente (Sandstein)

Beispielhaft für die verschiedenen archäologischen Architekturfragmente aus Kalkstein und Sandstein (Abb. 2) wurde ein Fragment (Abb. 2, unten Mitte und Abb. 3 links) durch zwei Bilddatensätze mit einer Nikon D90 (Objektiv 24 mm) aufgenommen. Das Objekt wurde in zwei Teilen erfasst: die Vorderseite (oben) mit 38 Bildern und die Rückseite (unten) mit 27 Fotos. Zur Skalierung des Modells wurde ein Maßstab mit einer Länge von 27 cm im Objektraum platziert. Die Punktwolken der beiden Teile – oben und unten – wurden in Geomagic Studio 2012 über einen ICP-Algorithmus (BESL & MCKAY 1992) verschmolzen. Zum Schluss wurde aus der Punktwolke eine Dreiecksvermaschung mit einem ausgedünnten Punktabstand von 1 mm berechnet. Dieser Vorgang wurde für vier unterschiedliche Datensätze von 123D Catch, VisualSFM, PhotoScan und Bundler/PMVS2 durchgeführt. Obwohl 123D Catch und PhotoScan bereits vermaschte Modelle liefern, wurden für die Verschmelzung von Vorder- und Rückseite nur die jeweiligen Punktwolken verwendet.



**Abb. 3:** Architekturfragment (Fundstück) aus Yeha (Äthiopien) – Foto (links) und vermaschtes 3D-Modell der Vorder- (Mitte) und Rückseite (rechts) vom Breuckmann OptoTOP-HE.

Die Referenzdaten wurden mit dem Streifenprojektionssystem Breuckmann OptoTOP-HE aufgenommen. Das 3D-Modell wurde in Geomagic Studio 12 mit ca. 800,000 Dreiecken erstellt, was einem Punktabstand von ca. 1 mm entspricht (Abb. 3 rechts).



**Abb. 4:** Abweichungen zwischen 3D-Modell generiert mit PhotoScan (links) und Bundler/PMVS2 (rechts) im Vergleich zu Referenzdaten vom Streifenlichtsystem Breuckmann OptoTOP-HE (grün  $\leq 0.3$  mm).

Die durchschnittliche Abweichung zwischen den bildbasierten Modellen und der Referenz vom Streifenlichtprojektionssystem liegt für alle Systeme im Bereich von 0.1-0.3 mm, während die maximalen Abweichungen zwischen 3 und 16 mm betragen (Tab. 1). Die besten geometrischen Ergebnisse haben Bundler/PMVS2 und VisualSFM geliefert. Beispielhaft sind das beste und schlechteste Ergebnis in Abb. 4 dargestellt. Dennoch sind diese 3D-Modelle ausreichend für die meisten Anwendungen in der Archäologie. Die Berechnungszeiten mit Bundler/PMVS2 liegen auf einer Workstation (Intel Xeon CPU E5540 Prozessor, 2.53 GHz, 24 GB RAM, Windows 7, 64 Bit) für Bildverbände von 38-71 Fotos der verschiedenen Architekturfragmente zwischen 4 und 16 Minuten pro Bild. Andere Untersuchungen zeigten, dass VisualSFM mindestens um den Faktor 25 schneller als Bundler/PMVS2 ist (KERSTEN & LINDSTAEDT 2012a).

**Tabelle 1:** Abweichungen der mit verschiedenen Systemen generierten Modelle des Architekturfragments zur Referenz Breuckmann OptoTOP-HE [mm].

Software	# Dreiecke	Max. Abw.	Ø Abw. +	Ø Abw. -	Std.abw.
123D Catch Beta	183.000	9.7	0.1	-0.3	0.3
VisualSFM	1.160.000	3.0	0.1	-0.2	0.2
Bundler/PMVS2	370.000	-2.8	0.1	-0.1	0.2
PhotoScan	803.000	-16.4	0.2	-0.3	0.3

Ein interessantes Fundstück stellt der Siegelabdruck in der Laibung einer offensichtlich zugesetzten Türöffnung eines Gebäudes in Yeha (Grat Beal Gebri) dar, das vermutlich als Palast- und Verwaltungsbau genutzt wurde. Da es sich um den Zugang zu einem sehr kleinen Raum handelt, ist zu vermuten, dass hier etwas Wertvolles gelagert wurde. Der Siegelabdruck sollte vermutlich die Unversehrtheit des Raumes dokumentieren. Im Abdruck ist der Herrschername 'Rad'ium' genannt, der auch auf dem Altar in Wuqro (im Bundesstaat Tigray/Äthiopien) vorkommt. Das komplette Fundstück mit dem Siegelabdruck (Abb. 5) umspannt eine Größe von ca.  $17 \times 9 \times 5$  cm<sup>3</sup>, die trotz einer hohen Aufnahmedichte durch

Bundler/PMVS2 von ca. 5800 Punkten/cm<sup>2</sup> Aufnahmelücken enthält (Abb. 5 links unten). Nach Filterung der Punktwolke (Ausreißer & Rauschreduktion) in Geomagic wurde ein vermaschtes und texturiertes 3D-Modell des Fundstücks mit 931,647 Dreiecken generiert (Abb. 5 rechts unten), das als 3D-PDF mit einer Datenmenge von ca. 50 MB ausgegeben wurde.



**Abb. 5:** Siegelabdruck aus Yeha (Äthiopien) – Foto (links oben), Punktwolke (rechts oben), Ausschnitt des vermaschten Modells mit kleinen Lücken (links unten) und komplettes 3D-Modell des Siegelabdrucks (rechts unten).

### 3.2 Archäologische Fundstücke in Katar

Die HafenCity Universität Hamburg unterstützt das Department of Cross-Cultural and Regional Studies (ToRS) der Universität Kopenhagen und die Qatar Museum Authority (QMA) im Rahmen des Qatar Islamic Archaeology and Heritage Project (QIAH) in Al Zubarah (Katar) bei der 3D-Dokumentation der archäologischen Grabungsstätten und Fundstücke durch terrestrisches Laserscanning und digitale Photogrammetrie seit 2010. Die archäologischen Stätten von Al Zubarah gehören seit Mai 2013 zum UNESCO Weltkulturerbe (Deutsche UNESCO-Kommission e.V. 2013). In Abb. 6 sind einige archäologische Fundstücke, die 2013 digitalisiert wurden, dargestellt. Im Rahmen des QIAH-Projektes erfolgte außerdem bereits 2011 eine komplette 3D-Erfassung und Modellierung des Forts in Al Zubarah durch die HCU Hamburg als Grundlage für Restaurierungsarbeiten (KERSTEN & MECHELKE 2012).



**Abb. 6:** Dau-Ritzungen an Hauswänden und diverse Fundstücke in Al Zubarah (Katar).

In dem archäologischen Ausgrabungsgebiet der ehemaligen Stadt Al Zubarah, die von der Mitte des 18. bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts mit bis zu 6000 Einwohnern die größte Siedlung des Landes und ein Zentrum der Perlentaucher war, werden oft an frei gelegten Hauswänden (Abb. 7 links) Gravuren oder Ritzungen von arabischen Booten, den sogenannten Daus gefunden. Die Dau stellt einen bestimmten Segelschiffstyp dar, der im Indischen Ozean und auf der Arabischen Halbinsel weit verbreitet ist. Bei den Dau-Ritzungen könnte es sich um Konstruktionszeichnungen der Schiffsbauer handeln.



**Abb. 7:** Ausgegrabene Hauswand (links) und photogrammetrische Aufnahme einer Hauswand mit Dau-Ritzungen (rechts, Foto: QIAH) in Al Zubarah (Katar).

Die erste gefundene Dau-Ritzung wurde bereits im Februar 2010 durch ein Streifenprojektionssystem hochauflösend in 3D dokumentiert (KERSTEN & LINDSTAEDT 2012b). Doch die 2013 gefundenen Dau-Zeichnungen konnten nicht mit solch einem System aufgenommen werden, da die räumlichen Verhältnisse hierfür zu eng waren, das Tageslicht zu grell und der permanente sandige Wind vom Meer zu heftig und salzig. Daher wurden die vier Orte der Dau-Zeichnungen jeweils durch einen photogrammetrischen Bildverband aus einer Aufnahmeentfernung von 20-30 cm aufgenommen (Abb. 7 rechts). Im Objektraum wurden Passpunkte (Größe 2 mm) und drei Maßstäbe (27 cm, 15 cm und 10 cm) platziert, die durch eine Totalstation Leica TS09 (Genauigkeit  $s_D = 2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$ ,  $s_W = 0.3 \text{ mgon}$ ) reflektorlos in das örtliche Koordinatensystem der archäologischen Grabung eingemessen wurden. Die Generierung der 3D-Modelle erfolgt mit Agisoft PhotoScan. Die statistischen Informationen von der Aufnahme und den Auswertungen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

**Tabelle 2:** Statistische Angaben über die photogrammetrische Aufnahme und Auswertung (PhotoScan) der Dau-Ritzungen.

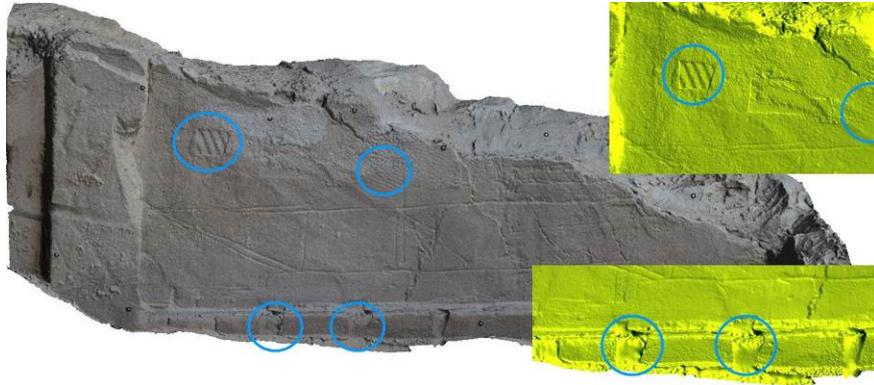
Objekt	Größe B/H [cm <sup>2</sup> ]	Kamera Nikon	# Fotos	# Passpunkte	S <sub>xvz</sub> [mm]	S <sub>xv</sub> [pix]	# Punkte [Mio]	# Dreiecke [Mio]
Dau 1	88 × 38	D800	79	18	2.3	1.3	36.5	7.3
Dau 1	88 × 38	D7000	81	18	0.9	1.1	20.2	4.1
Dau 2	166 × 56	D800	89	21	2.3	1.3	23.1	4.7
Dau 3	91 × 29	D800	40	16	2.0	0.9	14.2	8.0
Dau 4	130 × 72	D800	128	15	2.0	1.1	38.5	7.7

In PhotoScan wurden die Passpunkte in den Bildern gemessen und mit den automatischen Bildpunktmessungen ausgeglichen. Die durchschnittlichen Abweichungen an den Passpunkten lagen bei 0.9-2.3 mm, was der Genauigkeit der verwendeten Totalstation entsprach, während die Fehler der Bildpunktmessungen bei ca. 1 Pixel lagen. Nach der Bildorientierung und Kamerakalibrierung erfolgte die Berechnung der dichten Punktwolke durch Dense Image Matching. Im nächsten Schritt wurden die Punktwolken durch eine 3D-Triangulation vermascht und die Dreiecke mit den Bildinformationen texturiert. Diese texturierten 3D-Modelle der vier Wände mit Dau-Ritzungen (Abb. 8) wurden als Wavefront OBJ- oder Stanford PLY-File exportiert, um sie in weiteren Programmen wie MeshLab visualisieren zu können.

**Abb. 8:** 3D-Modelle der Dau-Ritzungen (2013 frei gelegte Wandstücke mit Dau-Zeichnungen in Al Zubarah, Katar). Aufnahme mit einer Nikon D800.

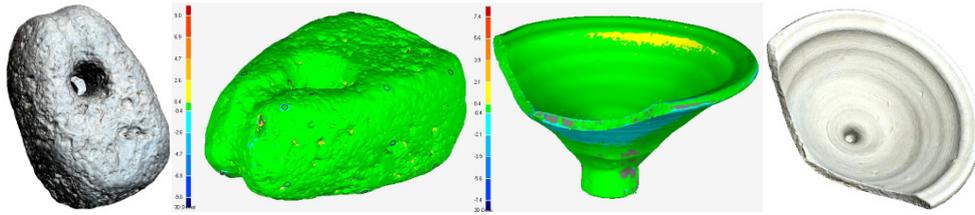
Die Qualitätsprüfung der 3D-Modelle zeigte jedoch in einem Modell Artefakte in der Oberfläche, die sich nicht alle erklären lassen. In Abb. 9 sind verschiedene Bereiche in dem Modell der Wand mit der Dau 1 durch einen Kreis markiert. Das Objekt wurde mit der Nikon D7000 aufgenommen und auch in PhotoScan als 3D-Modell berechnet. Die unteren

Kreise zeigen zwei Stellen, an denen der Algorithmus zur Dreiecksvermaschung kleine Lücken in der Punktwolke einfach durch die 3D-Triangulation schließt. Die Artefakte im oberen Bereich des Modells (starke und leichte Streifenmuster) lassen sich hingegen nicht erklären. Sie sind auch nur bei diesem Objekt aufgetreten, das mit der Nikon D7000 und dem Nikkor Objektiv mit der Brennweite von 50 mm aufgenommen wurde.



**Abb. 9:** Artefakte (siehe Kreise) im texturierten 3D-Modell der Dau-Ritzung 1 (Al Zubarah, Katar). Aufnahme mit der Nikon D7000.

Weitere Fundstücke aus dem Magazin der archäologischen Grabungsstätte in Al Zubarah wurden durch photogrammetrische Bildverbände mit der Nikon D7000 (Nikkor Objektiv 50 mm) jeweils von zwei Seiten bei indirektem Tageslicht aufgenommen, um daraus mit PhotoScan vermaschte und texturierte 3D-Modelle zu generieren. Zwei exemplarisch ausgewählte Fundstücke wurden wie folgt aufgenommen: Tauchgewicht – 31 Fotos Vorderseite und 27 Fotos Rückseite und Gefäß – 21 Fotos (Front) und 20 Fotos (Rück). Dabei sieht das Vorgehen für die beiden Teilobjekte (Vorder- und Rückseite) mit PhotoScan wie folgt aus. Nach einer groben Vororientierung des Bildverbandes mit einer mittleren Genauigkeit werden anschließend zur Skalierung die Punkte auf den drei Maßstäben und ggf. zusätzliche Verknüpfungspunkte gemessen. Durch die Vororientierung wird die Punktmessung effizienter, da ab dem dritten zu messenden Bild die Messpunkte im Bildraum genähert angezeigt werden. Nach der endgültigen Bildorientierung und Kamerakalibrierung werden die zu modellierenden Bereiche der beiden Teilobjekte maskiert. Im Anschluss daran werden die berechneten dichten Punktwolken je Teilobjekt zueinander orientiert und vereinigt, bevor dann die Gesamtpunktwolke vermascht und texturiert wird. Dabei stellt die Orientierung der beiden Teilmodelle zueinander den kritischsten Arbeitsschritt dar. Voraussetzung für eine erfolgreiche Vereinigung ist ein ausreichend großer Überlappungsbereich, der in Abhängigkeit von Aussehen und Form des Objektes nicht einfach zu gewährleisten ist. In Abb. 10 sind exemplarisch die texturierten 3D-Modelle der beiden Fundstücke Tauchgewicht (links, 3 Mio. Dreiecke) und Gefäß (rechts, 1.4 Mio. Dreiecke) dargestellt. Diese beiden 3D-Modelle wurden mit Referenzdaten (Tauchgewicht 875,094 Dreiecke, Gefäß 238,032 Dreiecke) vom Streifenprojektionssystem ATOS I (Firma GOM) in Geomagic verglichen (Abb. 10 Mitte). Die durchschnittlichen Abweichungen betragen 0.3 mm (Mitte links: Tauchgewicht) bzw. 0.2 mm (Mitte rechts: Gefäß), doch die maximalen Abweichungen weisen einen Betrag von 9 mm (Tauchgewicht) bzw. 7.4 mm (Gefäß) auf.



**Abb. 10:** 3D-Modell und Abweichung zur Referenz (grün  $\leq 0.3$  mm) – Tauchgewicht (links) und Gefäß (rechts).

## 4 Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag wurden bildbasierte Aufnahme- und automatische Modellierungsverfahren vorgestellt, mit denen detaillierte und genaue 3D-Oberflächenmodelle aus digitalen Bildverbänden von archäologischen Fundstücken und Objekten generiert wurden. Die Ergebnisse sind vergleichbar mit denen von Streifenprojektionssystemen. Die Objektaufnahme mit einer digitalen Spiegelreflexkamera und verschiedenen Objektiven ist einfach, sehr schnell, sehr flexibel und sehr kostengünstig. Das gesamte Verfahren ist weitgehend automatisiert und funktioniert auch ohne Zielmarken als Passpunkte, wenn Maßstäbe zur Objektskalierung ausreichen. Die Qualitätsfaktoren der 3D-Modelle als Ergebnisse werden durch den Bildmaßstab, die Beleuchtung und die Objekttextur beeinflusst. Da die eingesetzten Softwarepakete auch manchmal Ergebnisse mit zufälligen Artefakten liefern können, sind visuelle und geometrische Qualitätskontrollen sinnvoll. Durch die hohe Sensorauflösung einer digitalen SLR-Kamera von 36 Mio. Pixel wie bei der Nikon D800 können große Punktwolken generiert werden, die auch feine Strukturen repräsentieren. Gerade für Auswertungen im Feld sind leistungsstarke Notebooks mit mindestens 8 GB RAM, einer guten Graphikkarte und Softwarelösungen, die auf der Graphic Processing Unit arbeiten, eine gute Voraussetzung, um Ergebnisse in einem akzeptablen Zeitraum von wenigen Stunden auch bei großen Bildverbänden zu erhalten. Momentan bietet VisualSFM mit der guten geometrischen Qualität und den schnellen Berechnungszeiten eine gute Kompromisslösung an, die sich für den Einstieg in diese Thematik sehr anbietet, besonders wenn keine schnellen Internetverbindungen zur Nutzung von Websdiensten vorhanden sind, wie es oftmals bei archäologischen Grabungen bzw. Projekten der Fall ist. Bundler/PMVS2 lieferte geometrisch die besten Resultate, allerdings benötigte die Softwarelösung auch mit Abstand die längste Berechnungszeit. Bei beiden Programmen ergibt sich die Textur jedoch nur aus der Punktfarbe. Am schnellsten kommt der Anwender mit dem Webservice 123D Catch Beta zu seinem 3D-Modell, jedoch ist die geometrische Qualität gerade bei Objekten mit scharfen Kanten mangelhaft. Außerdem bleibt die Datensicherheit nach dem Hochladen der Bilddaten auf den Webserver immer eine offene Frage. Die kommerzielle Softwarelösung PhotoScan in der aktuellen Version 1.0.0 liefert dem Anwender nach relativ kurzer Berechnungszeit ein hochauflösendes und texturiertes 3D-Modell. Probleme treten immer dann auf, wenn ein Objekt (Vor- und Rückseite) vollständig nur durch zwei Bildverbände erfasst werden kann. Jedes Teilmodell für sich kann zwar texturiert werden, bei einer Vereinigung mehrerer Teilmodelle werden die Texturen aber teilweise wieder zerstört. Von den angesprochenen Programmen bietet einzig die Software PhotoScan eine zufriedenstellende Lösung, da hier die Vereinigung vor der Texturierung durchgeführt werden kann.

Die Entwicklungen der bildbasierten Aufnahme- und Auswerteverfahren stehen aus Sicht der Autoren erst am Anfang, da sich die Computertechnologie rasant weiterentwickelt und mit besseren Leistungsmerkmalen diese Verfahren weiter verbessert. Die Modellierung der systematischen Fehler der Kamerageometrie und die Verwendung von Passpunkten zur Transformation der 3D-Modelle in das gewünschte Objektkoordinatensystem liefern eine wesentliche Grundlage für zuverlässige Ergebnisse. So werden durch die Verschmelzung von photogrammetrischer Expertise im Bereich Kamerakalibrierung und Bündelblockausgleichung und den Entwicklungen der Algorithmen aus dem Bereich der Computer Vision nicht nur ein hoher Automationsgrad des Verfahrens, sondern auch eine hohe geometrische Qualität der Ergebnisse erreicht. Dazu wäre allerdings wünschenswert, wenn die Softwarepakete die Ergebnisse der Ausgleichung nachvollziehbar dokumentieren würden, damit diese Verfahren nicht nur als Black-Box ablaufen, sondern auch entsprechende Analyse-möglichkeiten der Ergebnisse bieten. Hier besteht noch erheblicher Verbesserungsbedarf. Dennoch sind die Autoren der Ansicht, dass die dominante Marktposition der Standardaufnahmesysteme der letzten zehn Jahre von terrestrischen Laserscannern und Streifenprojektionssystemen durch effiziente Low-Cost-Verfahren aus Photogrammetrie und Computer Vision bei vielen Anwendungen gerade im Bereich der Archäologie signifikant zurückgehen wird.

## Literatur

- Adolf, S. & Barnes, M. (2006): *3D-Nahbereichsscanning für die Denkmalpflege*. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2006, Luhmann/Müller (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 326-331.
- Bachfeld, D., König, P. & Zota, V. (2012): *Kopieren in 3D - Räumlich scannen mit Digitalkamera, Kinect oder Laser-Scanner*. c't, 11/2012, S. 87-91.
- Barazzetti, L. Remondino, F. & Scaioni, M. (2009): *Combined use of photogrammetric and computer vision techniques for fully automated and accurate 3D modeling of terrestrial objects*. SPIE Optics+Photonics, Vol. 7447, 2-3 August, San Diego, USA.
- Bellendorf, P. (2007): *Metallene Grabplatten aus Franken und Thüringen aus dem 15. Bis 18. Jahrhundert – eine interdisziplinäre Studie zum Denkmalbestand und seiner Gefährdung durch Umwelteinflüsse*. Dissertation, Otto-Friedrich-Universität Bamberg, Fakultät für Geschichts- und Geowissenschaften, S. 119-123.
- Besl, P. & McKay, N. (1992): *A Method for Registration of 3-D Shapes*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI), 14(2): S. 239-256.
- Courchay, J., Pons, J.-P., Monasse, P. & Keriven, R. (2010): *Dense and Accurate Spatio-temporal Multi-view Stereovision*. Computer Vision – ACCV 2009, Lecture Notes in Computer Science, Volume 5995, S. 11-22.
- Deutsche UNESCO-Kommission e.V. (2013): *UNESCO ernennt 19 neue Welterbestätten*. Pressemitteilung, 23. Juni 2013. <http://www.unesco.de/ua37-2013.html> (Zugriff 27. Februar 2014).
- Furukawa, Y. & Ponce, J. (2010): *Accurate, dense and robust multi-view stereopsis*. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, Vol. 32, No. 8, S. 1362-1376.

- Hieronimus, J., Misgaiski, M. & Reulke, R. (2011): *Genauigkeitsvergleich von 3D-Sensoren aus dem Freizeit- und Spielmarkt*. Photogrammetrie-Laserscanning-Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2011, Luhmann/Müller (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 232-241.
- Kersten, Th. & Lindstaedt, M. (2012a): *Automatic 3D Object Reconstruction from Multiple Images for Architectural, Cultural Heritage and Archaeological Applications Using Open-Source Software and Web Services*. Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation, Heft 6, S. 727-740.
- Kersten, Th. & Lindstaedt, M. (2012b): *Image-Based Low Cost Systems for Automatic 3D Recording and Modelling of Archaeological Finds and Objects*. EuroMed 2012 - Int. Conference on Cultural Heritage, Ioannides, M.; Fritsch, D.; Leissner, J.; Davies, R.; Remondino, F.; Caffo, R. (Eds.), Lecture Notes in Computer Science (LNCS), Volume 7616, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 1-10.
- Kersten, Th. & Lindstaedt, M. (2012c): *Generierung von 3D-Punktwolken durch kamera-basierte low-cost Systeme – Workflow und praktische Beispiele*. Terrestrisches Laserscanning 2012 (TLS2012), Schriftenreihe des DVW, Band 69, Beiträge zum 121. DVW-Seminar, 13.-14. Dezember 2012 in Fulda, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 25-46.
- Kersten, Th. & Mechelke, K. (2012): *Fort Al Zubarah in Katar – 3D-Modell aus Scanner- und Bilddaten im Vergleich*. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2012, Th. Luhmann/Ch. Müller (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, S. 89-98.
- Lindstaedt, M., Mechelke, K., Schnelle, M. & Kersten, Th., (2010): *Virtuelle 3D-Rekonstruktion des Almaqah-Tempels von Yeha in Äthiopien mit Hilfe terrestrischer Laserscanning-Daten*. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2010, Th. Luhmann/Ch. Müller (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, S. 50-57.
- Omelanowsky, D., Kersten, Th. & Lindstaedt, M. (2013): *Untersuchungen von Low-Cost Systemen zur 3D-Rekonstruktion kleiner Objekte*. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik – Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2013, Th. Luhmann/Ch. Müller (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, S. 217-228.
- Snavely, N., Seitz, S. M. & Szeliski, R. (2008): *Modeling the World from Internet Photo Collection*. Int. J. Comput. Vision 80(2), S. 189-210.
- Remondino, F. & Menna, F. (2008): *Image-based surface measurement for close-range heritage documentation*. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37(B5-1), S. 199-206.
- Remondino, F., El-Hakim, S.F., Gruen, A. & Zhang, L. (2008): *Turning images into 3-D models*. IEEE Signal Processing Magazine, 25(4), S. 55-65.
- Remondino, F., & Kersten, Th. (2012): *Low-cost- und open-source-Lösungen für die automatisierte Generierung von 3D Punktwolken – ein kritischer Überblick*. Terrestrisches Laserscanning 2012 (TLS2012), Schriftenreihe des DVW, Band 69, Beiträge zum 121. DVW-Seminar, 13.-14. Dezember 2012 in Fulda, Wißner-Verlag, Augsburg, S. 63-80.
- Wu, C. (2011): *VisualSFM: A Visual Structure from Motion System*. [www.cs.washington.edu/homes/ccwu/vsfm/doc.html#dep](http://www.cs.washington.edu/homes/ccwu/vsfm/doc.html#dep) (Zugriff 20. Mai 2012)

Adressen:

Thomas Kersten, Klaus Mechelke, Maren Lindstaedt, Felix Tschirschwitz, Kristin Schreyer, Lena Maziull  
HafenCity Universität Hamburg, Labor für Geomatik  
Überseeallee 16, 20457 Hamburg,  
email vorname.nachname@hcu-hamburg.de