

Jochen Reinhard

Structure-from-Motion-Photogrammetrie mit Agisoft PhotoScan. Erste Erfahrungen aus der Grabungspraxis

Zusammenfassung

Photogrammetrische Dokumentationsmethoden in der Archäologie waren bislang aufgrund ihrer Komplexität und der notwendigen kostspieligen Ausrüstung überwiegend Spezialisten vorbehalten und fanden nur in Einzelfällen im Grabungsalltag Anwendung. Seit kurzem sind jedoch Softwarelösungen verfügbar, die eine dreidimensionale photogrammetrische Auswertung von Bildern auch handelsüblicher unkalibrierter (Digital-)Kameras gestatten. Eines dieser Programme ist das einfach zu bedienende und preisgünstige ‚PhotoScan‘ der russischen Firma Agisoft LLC. Erste Praxiserfahrungen mit diesem Programm sollen in diesem Artikel an drei ganz unterschiedlichen archäologischen Beispielen vorgestellt werden.

Keywords: Structure from Motion; Photogrammetrie; *Computer Vision*; 3D-Punktwolke; Orthophoto; Multikopter; UAV.

Until recently, photogrammetric documentation methods in archaeology have been mainly applied by specialists due to their complexity and the need for expensive equipment. Therefore, these methods were only used in exceptional archaeological case studies. However, recently released software solutions are now available that allow a three-dimensional photogrammetric analysis of images derived from common uncalibrated (digital) cameras. One of these programs is the easy-to-use and cost-effective software ‘PhotoScan’ from the Russian company Agisoft LLC. In this paper, first practical experiences with this program of three very different archaeological examples are presented.

Keywords: Structure from Motion; photogrammetry; computer vision; 3D point cloud; orthophoto; multicopter; UAV.

1 Einleitung

Die Aufnahme komplexer archäologischer Befunde erfolgt bis heute – begleitend zur photographischen und schriftlich-beschreibenden Dokumentation – überwiegend mit traditionellen nivellierten Handzeichnungen, einfachere Befundsituationen werden gegebenenfalls auch direkt tachymetrisch aufgemessen. Beide Verfahren erfassen jedoch nur einen Bruchteil der dreidimensionalen Information eines Befundes, eine befriedigende Punktdichte ist nur mit erheblichem Aufwand zu erreichen. Methoden, die geeignet sind, dichte dreidimensionale Punktwolken zu generieren, bieten die Vermessungstechnik mit Hilfe terrestrischer Laser- oder Streifenlichtscanner sowie die Photogrammetrie.¹ Bei der alltäglichen Feldarbeit stehen 3D-Scanner üblicherweise jedoch nicht zur Verfügung, ihre Verwendung bedingt im Allgemeinen den Einsatz von Spezialfirmen und beschränkt sich derzeit auf wenige Projekte mit Leuchtturmcharakter. Auch die dreidimensionale Photogrammetrie war – im Gegensatz etwa zur zweidimensionalen Bildentzerrung – noch bis vor wenigen Jahren ein aufwendiges Verfahren, das Spezialkenntnisse und Spezialausrüstung in Form kalibrierter Kameras voraussetzte und daher ebenfalls nur selten zur Anwendung kam. Seit einiger Zeit steht jedoch mit der Structure-from-Motion-Methode ein Verfahren zur Verfügung, das die Gewinnung dreidimensionaler Informationen aus einfachen Photos unkalibrierter Kameras deutlich vereinfacht und damit für den Einsatz auch in der täglichen denkmalpflegerischen Arbeit geeignet ist. Aufgrund der einfachen Handhabung und der hervorragenden Ergebnisse hat Structure-from-Motion (SfM) in kürzester Zeit breite Anwendung in unterschiedlichen Gebieten gefunden, neben der Ausgrabungsdokumentation² beispielsweise in der Luftbildarchäologie, bei der Dokumentation von antiken Steinbrüchen, historischen Gebäuden, von Felskunst im Altai oder fossilen miozänen Elefantenfährten, in der Unterwasserarchäologie, bei der Herstellung von Repliken der Gipsausgüsse pompejanischer Erdbebenopfer, in der angewandten Vermessung oder bei Untersuchungen zur Vegetation und Erosion im Gezeitenbereich.³

Das SfM-Verfahren gehört nicht zur klassischen Photogrammetrie, es stammt ursprünglich aus dem Bereich der *Computer Vision* bzw. des Maschinellen Sehens. Datengrundlage ist eine Serie sich stark überlappender Photographien, die die zu rekonstru-

- 1 Zusammenfassend etwa Opitz 2013 bzw. Remondino 2013.
- 2 Etwa Doneus u. a. 2011; Ducke, Score und Reeves 2011; Ducke, Højlund u. a. 2013; Häser und Vieweger 2011, 49; Krenn-Leeb, Maurer und Weßling 2012; Reinhard 2012; De Reu, Plets u. a. 2013; De Reu, De Smedt u. a. 2014; Levy u. a. 2015.
- 3 Stal u. a. 2012; Verhoeven, Doneus, Briese und Vermeulen 2012; Verhoeven, Taelman und Vermeulen

2012; Fassi u. a. 2013; Koutsoudis, Vidmar, Ioannakis u. a. 2013; Koska und Křemen 2013 (in Kombination mit Laserscanner-Daten); Plets, Gheyle u. a. 2012; Plets, Verhoeven u. a. 2012; Bibi u. a. 2012; Sedlazeck, Köser und Koch 2010; Lobell 2011; Neitzel und Klonowski 2011; Neitzel, Klonowski u. a. 2011; Harwin und Lucieer 2012; Pauly und De Clerck 2011.

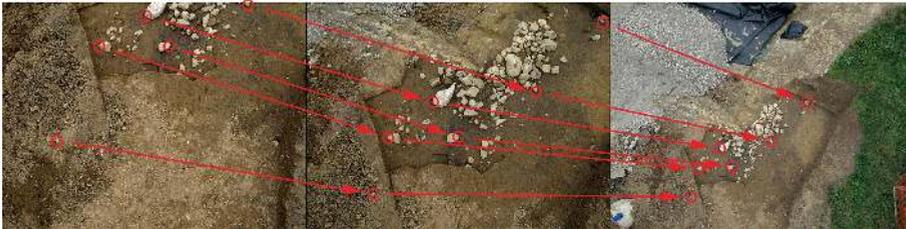


Abb. 1 Voraussetzung für das Structure-from-Motion-Verfahren sind aus unterschiedlichen Blickwinkeln aufgenommene, sich stark überlappende Photographien derselben Szene. In diesen werden charakteristische Punkte (Kreise) ermittelt, die über die einzelnen Bilder miteinander verknüpft werden (Pfeile).

ierende Szene bzw. das zu rekonstruierende Objekt aus unterschiedlichen Blickwinkeln lückenlos abdeckt, jeder Punkt muss dabei auf mindestens zwei Bildern abgebildet sein, damit seine dreidimensionale Position errechnet werden kann. Weitere Informationen, etwa zu den Kamerapositionen im Moment der Aufnahme der Bilder, sind nicht notwendig, sondern können aus den Bilddaten selbst abgeleitet werden. Für die Berechnung eines 3D-Modells ermittelt ein Algorithmus zunächst charakteristische Punkte in den einzelnen Photos, die dann über die gesamte Bildserie miteinander verknüpft werden (Abb. 1). Aus den unterschiedlichen Parallaxen der sich beim Photographieren um die abzubildende Szene bewegendes Kamera können schließlich die dreidimensionalen Eigenschaften der Szene errechnet werden – daher die Bezeichnung *Structure from Motion* („Struktur aus Bewegung“). Grundlage hierfür ist das auch dem menschlichen stereoskopischen Sehen zugrundeliegende Prinzip, dass sich Punkte im Raum scheinbar verschieben, wenn sie aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet werden. Diese perspektivischen Unterschiede erlauben es der SfM-Software, die einzelnen Kamerastandorte zu bestimmen. Methodische Einschränkungen ergeben sich bei der Rekonstruktion von Objekten oder Szenen mit reflektierenden oder sehr glatten und einheitlichen Oberflächen, da hier nicht genug Punkte erkannt werden können; bei archäologischen Befunden ist dies jedoch selten der Fall. Auch können nur unbewegte Objekte bzw. Szenen dargestellt werden – eine Veränderung der Position eines Objekts zwischen zwei Aufnahmen führt zu Fehlern. Bei der Feldarbeit zu berücksichtigen ist die Empfindlichkeit der Algorithmen gegenüber Beleuchtungsunterschieden: Bei unterschiedlichen Sonnenständen oder wechselnder Wolkendecke und damit voneinander abweichenden Schattenwürfen innerhalb einer Bildserie ist eine 3D-Rekonstruktion häufig nicht möglich, die Bilddaten eines Modells sollten also in einem relativ kurzen Zeitraum photographiert werden.⁴

⁴ Es ist damit zu rechnen, dass diese und andere Einschränkungen durch verbesserte Algorithmen zu-

künftig deutlich gemildert werden. Zu verschiedenen Zeitpunkten erstellte Einzelmodelle können

2 Verfügbare Software

Für die SfM-Photogrammetrie sind mittlerweile zahlreiche Softwarelösungen verfügbar (vgl. Tab. 1); die Bandbreite reicht dabei von Open-Source-Anwendungen über kostenlose, sich etwa über 3D-Druck-Angebote tragende Webdienste bis hin zu Programmen, die in der Lage sind, georeferenzierte, GIS- und CAD-taugliche Datenformate für professionelle kartographische Anwendungen auszugeben. Für die alltägliche Anwendung auf Ausgrabungen kommen Webdienste bzw. ein auf Cloud Computing basierender Arbeitsablauf aus rein technischen Gründen kaum in Frage – das Hochladen größerer Bilddatenmengen ist im Feld selbst in gut mit mobilem Breitbandinternet abgedeckten Gegenden noch immer mühsam, in abgelegenen Regionen unmöglich. Zudem ist mit einer Wartezeit von häufig 24 Stunden zu rechnen, bis das fertige 3D-Modell heruntergeladen und überprüft werden kann. Ein solcher Zeitraum ist für die meisten Grabungen deutlich zu lang und würde den Arbeitsablauf empfindlich stören. Ein Großteil der Webdienste lässt zudem keinen Einfluss auf die Rekonstruktionsparameter zu, die kostenlosen Dienste bieten zwar Schnittstellen zu CAD- und 3D-Software, aber keine Anbindung an ein GIS. Eine für archäologische Zwecke unabdingbare Georeferenzierung muss extern erfolgen. Für Einzelanwendungen sind solche Webdienste sicher brauchbar, für eine breite Anwendung in der Grabungspraxis nicht.

3 SfM mit Agisoft PhotoScan

Für die hier vorgestellten Anwendungsbeispiele wurde das seit Mitte 2010 erhältliche Programm ‚Agisoft PhotoScan Professional Edition‘ der russischen Softwarefirma Agisoft LLC eingesetzt.⁵ PhotoScan bietet bei moderatem Preis gebündelt alle notwendigen Funktionen von der Rekonstruktion der ersten *Sparse Point Cloud* bis hin zum Export von georeferenzierten Orthophotos oder Digitalen Oberflächenmodellen (DOMs). Das Programm ist trotz seiner Leistungsfähigkeit für Laien sehr einfach zu bedienen, erlaubt gleichzeitig bei Bedarf aber auch detaillierte Eingriffe in die Rekonstruktionsparameter.⁶ Auch die Bearbeitung von Schwarzweiß-, Falschfarben- und Multispektral-Bildern ist möglich. Während PhotoScan in einigen Aufsätzen aus dem Bereich der Vermessungstechnik im Vergleich mit anderen SfM-Programmen und Scanning-Methoden nur

jedoch problemlos mit Hilfe externer 3D-Software zusammengeführt werden.

⁵ Verwendet wurde die Version 0.9.0 auf einem Rechner mit vierkernigem Intel®-Core™-i7-2600-Prozessor, Windows 7 Home Premium (64-Bit) und 16 Gigabyte RAM, Graphik-

karte war eine NVIDIA GeForce GTX 550 Ti. Auch wenn diese Hardware bereits recht leistungsfähig ist, handelt es sich nicht um eine speziell auf 3D- oder Graphikrechenleistung zugeschnittene Maschine.

⁶ Agisoft LLC 2013; Verhoeven 2011b; Verhoeven 2011a; Verhoeven, Doneus und Briese 2012.

mäßig gut abschneidet,⁷ weisen andere, insbesondere archäologisch orientierte Publikationen nach, dass die Präzision der mit Agisoft PhotoScan erstellten Daten sowohl mit der Präzision terrestrischer Laserscanner als auch des Airborne Laserscannings (ALS) mithalten kann.⁸ Im Gegensatz zu Laserscannern weisen durch SfM errechnete Punktwolken allerdings eine unregelmäßige Dichte auf, die von der Menge der in den Ausgangsbildern erkannten gemeinsamen Punkte abhängig ist; eine präzise Angabe der Messdichte eines SfM-3D-Modells ist nicht ohne weiteres möglich. Zudem ist die Messdichte vom Abstand zwischen Kamera und Objekt sowie den Kameraparametern abhängig. Laserscanner dagegen verwenden ein regelmäßiges Messraster, arbeiten also mit einer definierten Auflösung. Die Qualität einer SfM-Rekonstruktion ist direkt von den Eigenschaften des abgebildeten Objekts und der Eignung der Algorithmen des verwendeten Programms für dieses Objekt abhängig, eine objektive, quantifizierbare Qualitätskontrolle ist daher schwierig. Für Anwendungen aus der Luft ist weiterhin zu beachten, dass es bei SfM-Punktwolken im Gegensatz zu Lidar-Daten nicht möglich ist, die den Boden be- bzw. verdeckende Vegetation automatisch herauszufiltern. Für die Masse der archäologischen Anwendungen dürfte die Qualität der durch SfM erreichten Ergebnisse aber bereits jetzt weit ausreichend sein, überdies stellt der Einsatz von Laserscannern für den Großteil der Grabungsprojekte keine Alternative dar. Weitere Verbesserungen sind mit der technischen Weiterentwicklung der SfM-Algorithmen zu erwarten und deuten sich etwa im Vergleich verschiedener PhotoScan-Programmversionen bereits an.

Die zur Erstellung eines 3D-Modells mit PhotoScan notwendigen Rechenzeiten variieren stark, sie hängen unter anderem von der verwendeten Hardware, der Menge der in ein Modell eingehenden Bilddaten und dem gewünschten Detaillierungsgrad der Rekonstruktion ab. Besondere Ansprüche stellt PhotoScan an die Größe des verfügbaren Arbeitsspeichers (RAM) sowie die Graphikkarte des verwendeten Computers.⁹ Bereits jetzt ist es aber möglich, mit Computern ‚von der Stange‘ in einem Zeitraum von ein bis zwei Stunden 3D-Modelle in guter Auflösung zu erstellen, die als Grundlage für eine Qualitätskontrolle sowie weitere Arbeiten im Feld tauglich sind (vgl. Tab. 2). Die

7 Ein Vergleich verschiedener SfM-Programme findet sich bei Remondino und Kersten 2012 sowie Neitzel und Klonowski 2011 bzw. Neitzel, Klonowski u. a. 2011, hier jedoch ohne nähere technische Angaben und mit herunterskalierter Bildqualität. Kersten und Lindstaedt 2012 vergleichen die gängigen SfM-Softwarelösungen zusätzlich mit Ergebnissen von Streifenlicht- und Laserscannern. Koutsoudis, Vidmar, Ioannakis u. a. 2013 und Koutsoudis, Vidmar und Arnaoutoglou 2013 bieten jeweils eine Gegenüberstellung der Ergebnisse von PhotoScan mit denen eines Laserscanners am Beispiel

eines osmanischen Grabmonuments bzw. einer Kykladen-Statuette.

8 Doneus u. a. 2011, 84–85; Fassi u. a. 2013; Ducke, Score und Reeves 2011, 380; De Reu, De Smedt u. a. 2014, 256 und 256, Abb. 5. Zur Präzision der Georeferenzierung vgl. auch Verhoeven, Taelman und Vermeulen 2012, 1122–1126 und De Reu, Plets u. a. 2013. Harwin und Lucieer 2012 erreichen mit UAV-Bilddaten aus einer Flughöhe von 40–50 m eine Genauigkeit der SfM-Punktwolke von 2,5–4 cm. Stal u. a. 2012 bieten zudem einen Vergleich eines mit PhotoScan errechneten DOMs mit Lidar-Daten.

9 Agisoft LLC 2013, 1–2.

Erstellung von Modellen in der höchsten Qualitätsstufe bleibt mittelfristig noch der abschließenden Grabungsauswertung vorbehalten.¹⁰ Da die Berechnung der 3D-Modelle weitgehend automatisiert abläuft, bindet sie zwar Rechenzeit des Computers, aber nur wenig Arbeitszeit beim Anwendenden – 3D-Modelle können somit problemlos ‚nebenbei‘, gegebenenfalls auch in Arbeitspausen oder über Nacht, gerechnet werden.

Der Arbeitsablauf für die Erstellung eines georeferenzierten 3D-Modells ist im Folgenden zunächst am Beispiel der Fundstelle Cham-Grindel¹¹ beschrieben: Bei der Erneuerung eines Verkehrskreisels wurde im Spätsommer 2012 in der Flur Grindel, Gemeinde Cham ZG (Schweiz), im Hangbereich eine in humoser, holzkohlehaltiger Erde liegende, annähernd rechteckige hangparallele Steinpackung angeschnitten, die vereinzelt Fragmente urgeschichtlicher Keramik enthielt. Einzelne Steine wiesen Brandspuren auf, randlich anschließend fanden sich verkohlte Hölzer mit bis zu 60 cm Länge.¹² Da das vom Baufortschritt vorgegebene Zeitfenster eine konventionelle zeichnerische Aufnahme nicht zuließ, wurde der Befund – zusätzlich zur üblichen Grabungsphotographie vom Boden und von der Photoleiter aus – für eine Orthophotoerstellung mit einer von einer Multikopter-Drohne¹³ aus photographierten Bildserie dokumentiert. Die Flughöhe lag dabei im Schnitt bei etwa 13 m. Um die Steinstreue herum verteilte, tachymetrisch eingemessene Passpunkte aus mit einem pink-schwarzem Schachbrettmuster bemalten, 5,5 x 5,5 cm großen Plastikkarten erlaubten die spätere Georeferenzierung. Das aus dem Drohnenflug resultierende Bildmaterial wurde zunächst kritisch durchgesehen, um unscharfe oder nicht den Befund zeigende Aufnahmen auszusondern. Die verbliebenen Bilder wurden unbearbeitet in PhotoScan geladen. Eine Verringerung der Bildauflösung, etwa um große Bildmengen schneller bearbeiten zu können, ist möglich,¹⁴ die Bilder dürfen jedoch nicht geometrisch verändert, etwa entzerrt oder zugeschnitten, werden.¹⁵ In einem weiteren vorbereitenden Arbeitsschritt wurden unerwünschte Bereiche, in diesem Fall ein sich am Rand der Szene bewegendes Baustellenfahrzeug, auf den einzelnen Bildern maskiert und damit von der Bearbeitung ausgeschlossen.

10 De Reu, Plets u. a. 2013, 1111 etwa geben für hohe Auflösungen und große Bilddatenmengen realistisch Rechenzeiten von 12–14 Stunden pro Modell an. Zur Vorgehensweise in der Grabungspraxis vgl. De Reu, De Smedt u. a. 2014, 254 und 259–261.

11 Ereignisnummer 2-1906-12, Ausbau Knoten Grindel-Bibersee, Pos. 7; Amt für Denkmalpflege und Archäologie des Kantons Zug, Direktion des Innern.

12 Weber und Schaaeren 2013.

13 Bei einem *Multikopter* handelt es sich um einen Modellhelikopter ähnliche, jedoch mehrrotorige Flugplattform, die sich aufgrund ihrer Flug-

bzw. Schwebeeigenschaften besonders als Kameraträger für die Nahbereichsluftbildphotographie eignet. Gängige Bauformen weisen vier, sechs oder acht Propeller auf und werden dementsprechend als Quadro-, Hexa- oder Oktokopter bezeichnet.

Im vorliegenden Beispiel fand ein mit einer Canon PowerShot G11 ausgerüsteter Hexakopter Verwendung (vgl. Reinhard 2013, bes. 178–183 und 182 Abb. 5).

14 Vgl. Neitzel und Klonowski 2011, 3; Neitzel, Klonowski u. a. 2011, 341.

15 Agisoft LLC 2013, 5.

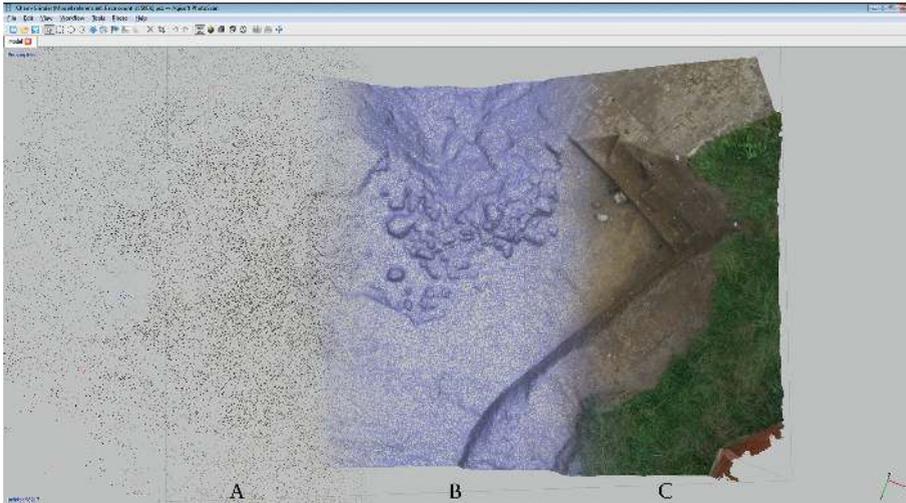


Abb. 2 Rechenschritte bei der Erstellung eines 3D-Modells am Beispiel Cham-Grindel ZG, Schweiz. A: die mit Hilfe der SfM-Algorithmen errechnete *Sparse Point Cloud*. B: das vermaschte 3D-Modell (*mesh*). C: das photorealistisch texturierte 3D-Modell (Collage aus drei PhotoScan-Screenshots).

Die eigentliche Berechnung des 3D-Modells erfolgt in drei Schritten (Abb. 2):¹⁶ Zunächst wird eine *Sparse Point Cloud* berechnet, dies ist der Rechenschritt, in dem die eigentlichen SfM-Algorithmen zur Anwendung kommen. Die in den einzelnen Bildern erkannten Verknüpfungspunkte und gegebenenfalls vorhandener Exif (*Exchangeable Image File Format*)-Daten digitaler Bilder bilden die Grundlage für die Berechnung der 3D-Geometrie der Szene, der Kameraparameter (innere Orientierung, zum Beispiel Brennweite, Lage des Hauptpunkts, Objektivparameter) und der Positionen der Kamera zum Zeitpunkt der Aufnahmen (äußere Orientierung). Die daraus resultierende Punktwolke besteht aus den Verknüpfungspunkten zwischen den Bildern mit ihren Farbwerten; sie ist noch vergleichsweise schütter (*sparse*), Einzelheiten der Szene sind noch nicht oder kaum erkennbar. In einem zweiten, besonders rechenintensiven Schritt wird mit Hilfe von *multiview stereo-matching algorithms* (MVS)¹⁷ das eigentliche, vermaschte 3D-Modell errechnet, Grundlage sind dabei die Farbwerte der einzelnen Pixel (*pixel values*) der Ausgangsbilder. Die ursprüngliche *Sparse Point Cloud* wird in diesem Schritt deutlich verdichtet. Schließlich kann aus den verwendeten Photos eine photorealistische Textur

16 Bei allen Rechenschritten ist ein Datenexport in verschiedenen 3D-Formaten oder als Punktwolken problemlos möglich, außerdem bestehen weitere Exportmöglichkeiten, etwa für die Parameter der inneren und äußeren Orientierung. Teilweise können

Daten auch extern weiterbearbeitet und in PhotoScan reimportiert werden.

17 Eine alternative Bezeichnung ist *Dense Multi-View 3D Reconstruction* (DMVR).

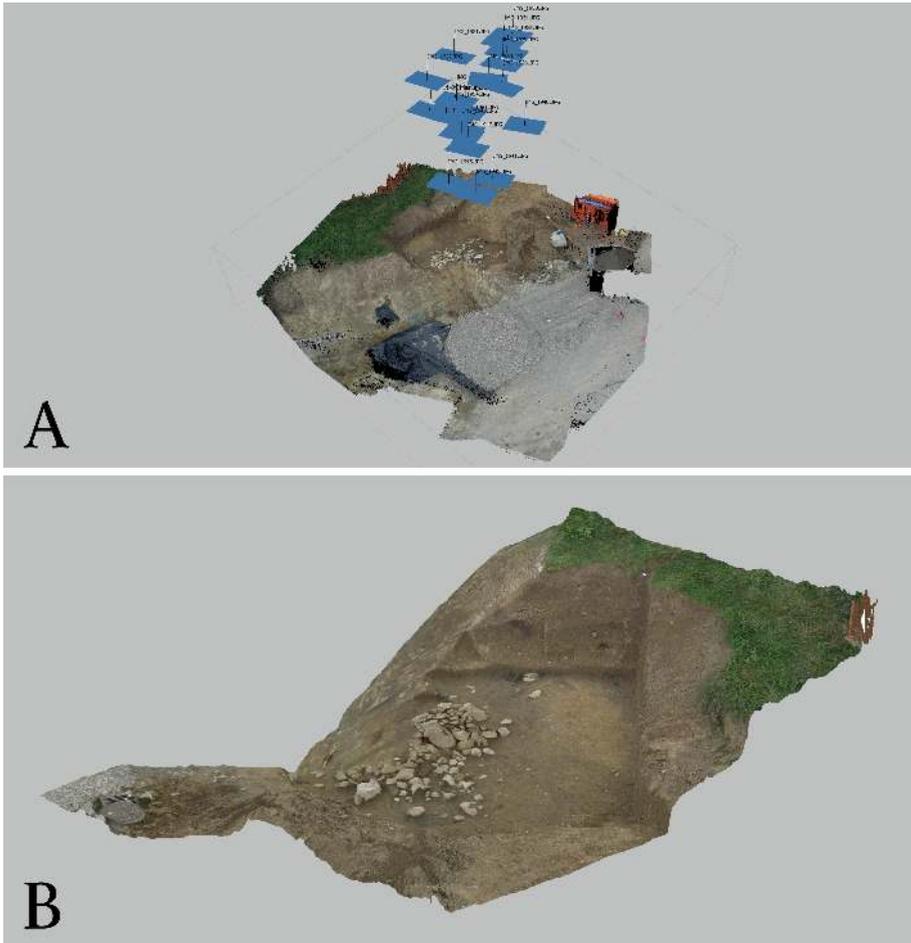


Abb. 3 Cham-Grindel ZG, Schweiz. A: Darstellung der Kamerapositionen der einzelnen verrechneten Bilder (äußere Orientierung) und der damit rekonstruierbaren Szene; die blauen Flächen symbolisieren die Aufnahmestandorte der einzelnen Photos bzw. die Sensorebene der Kamera zum Aufnahmezeitpunkt. B: das fertige texturierte, auf den Bereich der Steinpackung zugeschnittene 3D-Modell (Screenshots aus PhotoScan).

des 3D-Modells abgeleitet werden. Unterschiedliche Ausgabeformate für das fertige, texturierte 3D-Modell (Abb. 3) werden unterstützt. Zum Betrachten eignet sich etwa das von (fast) jedem Rechner lesbare PDF-Format, das auch 3D-Modelle darstellen kann; die Auflösung ist hier aus technischen Gründen allerdings begrenzt. Eine plattformunabhängige Austauschmöglichkeit der Daten in voller Qualität bietet beispielsweise die freie und quelloffene Software MeshLab.¹⁸

¹⁸ <http://meshlab.sourceforge.net/> (besucht am 01/10/2015).

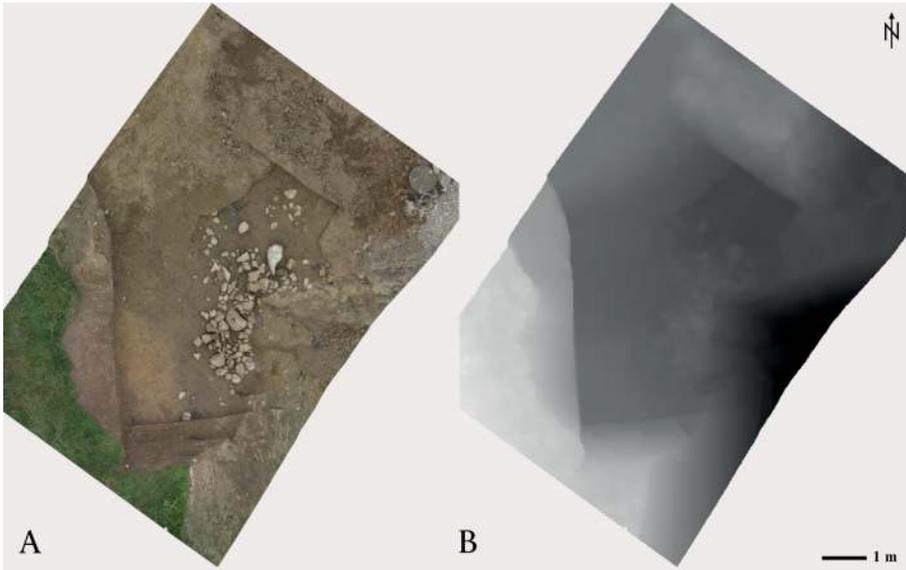


Abb. 4 In eine CAD- oder GIS-Umgebung einbindbare Rasterdaten am Beispiel Cham-Grindel ZG, Schweiz. A: georeferenziertes und damit genordetes lagegetreues Orthophoto. B: Digitales Oberflächenmodell (DOM) in Graustufen von schwarz = 421,8 bis weiß = 425,59 m ü. M.

Da die 3D-Modellierung in PhotoScan in eigenen, relativen Koordinatensystemen erfolgt, schließt sich üblicherweise eine Georeferenzierung der fertigen 3D-Modelle an.¹⁹ Das Modell von Cham-Grindel wurde über acht dreidimensional eingemessene Passpunkte referenziert, der von PhotoScan angegebene *Total Error* der Georeferenzierung beträgt rund 5 mm. Dieses Ergebnis entspricht etwa der Kopfbreite der für die Passpunkte verwendeten Nägel und ist damit völlig ausreichend. Die Georeferenzierung ermöglicht nun neben dem Abgreifen von Maßen im 3D-Modell den Export von abgeleiteten Daten wie *True Orthophotos* oder Digitalen Oberflächenmodellen (Abb. 4), die in CAD- oder GIS-Umgebungen integriert und weiterbearbeitet werden können.

3.1 Beispiel Cham-Klostermatt – bodengebundene Photodokumentation

Als Beispiel für die Anwendung der SfM-Photogrammetrie mit konventionellen, vom Boden bzw. der Leiter aus fotografierten Bildern soll hier die Grabung auf der Klostermatt im schweizerischen Cham ZG²⁰ dienen: Im Bereich einer neuen Wohnüber-

19 Für Fundgegenstände reicht die Angabe der Länge einer bekannte Strecke im 3D-Modell, z. B. die eines mitphotographierten Maßstabes, aus, um das Modell absolut zu skalieren.

20 Ereignisnummer 2-1847-11, Cham, Klostermatt; Amt für Denkmalpflege und Archäologie des Kantons Zug, Direktion des Innern.



Abb. 5 Cham-Klostermatt ZG, Schweiz, Grabgruppe des 9. Jahrhunderts: Originalbild.

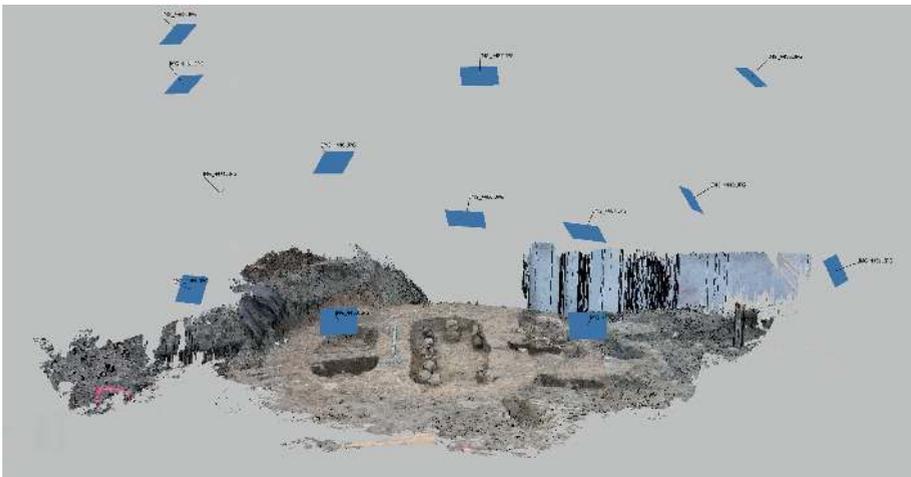


Abb. 6 Cham-Klostermatt ZG, Schweiz, Grabgruppe des 9. Jahrhunderts: Darstellung der Kamerapositionen (äußere Orientierung) und der damit rekonstruierbaren Szene.

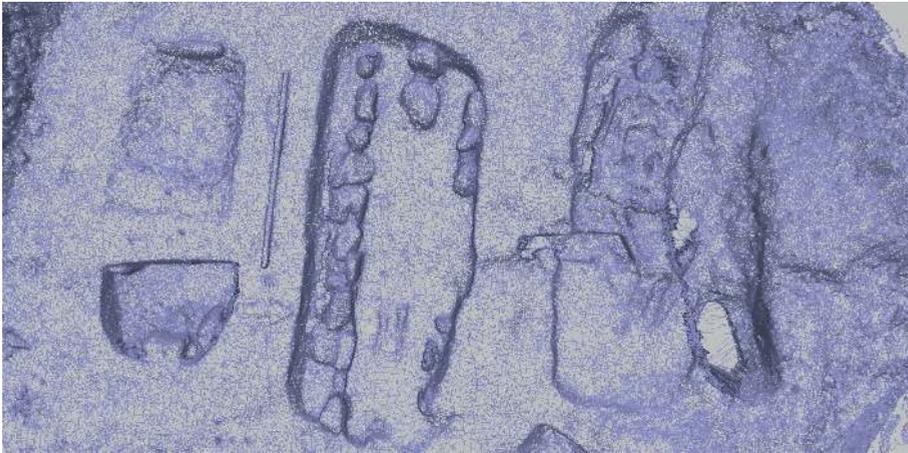


Abb. 7 Cham-Klostermatt ZG, Schweiz, Grabgruppe des 9. Jahrhunderts: vermaschtes 3D-Modell (*mesh*), der sich abzeichnende Nordpfeil ist 4 mm stark.



Abb. 8 Cham-Klostermatt ZG, Schweiz, Grabgruppe des 9. Jahrhunderts: Orthophoto mit deutlichen Löchern durch mangelnde Stereoabdeckung im Bereich des rechten, nördlichen Grabes (vgl. auch Abb. 7).

bauung konnten baubegleitend Befunde der Spätbronze- bis Karolingerzeit ergraben werden, mit Hilfe des Metalldetektors wurden zudem eine Reihe frühmittelalterlicher Trachtbestandteile aus dem Pflughorizont geborgen.²¹ Die kurz vor dem Jahresende 2011 freigelegte kleine Grabgruppe des 9. Jahrhunderts diente als erster Test für die Anwendung der SfM-Methode (Abb. 5–8). Photographiert wurde mit einer Canon EOS 5D Mark II, der Motivabstand lag dabei zumeist deutlich unter 5 m, was in Bodenaufösungen von weit unter 2 mm pro Pixel resultiert. Das Photographieren der Befunde erwies sich jedoch als schwierig, da um die direkt an der Böschungskante der bereits ausgehobenen Baugrube liegende Grabgruppe herum nur wenig Platz war, um die Photoleiter aufzustellen, ohne weitere umliegende Befunde zu gefährden. Das aus insgesamt (nur) 13 Einzelaufnahmen errechnete 3D-Modell bildet den Bereich der drei Gräber Pos. 505, 507 und 509 sehr gut ab, die Steinsetzungen im mittleren der drei Gräber, Pos. 507, sowie die einzigen hier erhaltenen Knochenreste – die Schienbeine – werden problemlos modelliert. Sogar der aus 4 mm starkem Sperrholz gefertigte Nordpfeil zeichnet sich im vermaschten Modell deutlich ab! Der von PhotoScan angegebene *Total Error* der Georeferenzierung beträgt lediglich 6,8 mm, allerdings waren im 3D-Modell nur drei der am Boden vermarkten Passpunkte sichtbar. Ein Abgleich der SfM-Ergebnisse mit den Handzeichnungen der Befunde ergab eine sehr hohe Übereinstimmung: So betragen etwa die Höhendifferenzen zwischen dem aus PhotoScan exportierten DOM und den mit einem einfachen Bau-Nivellier im Feld bestimmten Höhenangaben nur 1–2 cm. Die Unterschiede liegen damit im Bereich der üblicherweise bei Grabungsnivellements erreichten Ablese- bzw. Rundungsgenauigkeit. Bei genauerer Betrachtung des 3D-Modells fällt allerdings auf, dass das Modell am Nordrand Löcher aufweist, die aus mangelnder Stereoabdeckung der Ausgangsbilder in diesem Bereich resultieren. Hier fehlen, bedingt durch die schlechte Zugänglichkeit beim Photographieren, schlicht Bildinformationen. Abhilfe schaffen könnten in einer solchen Situation Photogalgen oder -kräne, die die Kamera senkrecht über den zu photographierenden Befund bringen²² – eine Methode, die zwar sehr lange bekannt ist, aber nur selten in der Praxis zum Einsatz kommt, obwohl sie geeignet ist, die photographische Dokumentation nicht nur für photogrammetrische Zwecke entscheidend zu verbessern. Mit Senkrechtaufnahmen werden in der Regel deutlich bessere SfM-Ergebnisse erreicht als mit Schrägaufnahmen, da Aufnahmen in Draufsicht den technischen Anforderungen der SfM-Methode besser entsprechen.²³ Aus dieser Erfahrung heraus verwendet die Kantonsarchäologie Zug seit Herbst 2012 als Ergänzung zur Schrägphotographie von der Leiter aus ein von Ronny Weßling, Wien, gebautes Monostativ, den ‚PhotoMop‘.²⁴

21 Meyer, Schaeren und Weber 2012; Meyer, Weber und Schaeren 2012.

22 Zusammenfassend Verhoeven 2009, 235–236. Zur modernen Anwendung vgl. etwa Krenn-Leeb, Maurer und Weßling 2012, 19–23.

23 Agisoft LLC 2013, 4–6; Verhoeven 2011b, 68 und 71.

24 Krenn-Leeb, Maurer und Weßling 2012, 22–23.

3.2 Beispiel Tall adh-Dhahab el-Gharbiyeh – Nahbereichsluftbilder

Ein weiteres Anwendungsbeispiel entstammt der Teilnahme an einem Grabungsprojekt der TU Dortmund unter der Leitung von Thomas Pola: Seit 2004 werden im nord-westlichen Jordanien die Tulul adh-Dhahab und ihr Umfeld erforscht.²⁵ Die in einer s-förmigen Flussschleife des Zarqa, des biblischen Jabbok, gelegenen Zwillingshügel sind seit dem Chalkolithikum besiedelt. Ein Nutzungsschwerpunkt scheint in der Eisenzeit zu liegen, die Nutzung bricht in der Spätantike ab. Beide Hügel sind massiv befestigt, die Anlage kontrolliert die Verkehrswege in das östlich des Jordangrabens gelegene Hochland. Ziel der 3D-Modellierung war die Dokumentation des Zustands der Grabungsflächen im Bereich der antiken Bebauung auf der Spitze des westlichen Tells (Terrasse 1), des Tall adh-Dhahab el-Gharbiyeh,²⁶ am Ende der Kampagne 2011 (Abb. 9–12). Ausgangsdaten für das 3D-Modell sind wie in Cham-Grindel Nahbereichsluftbilder,²⁷ als Kameraträger kam hier jedoch ein Einleiner-Drachen zum Einsatz.²⁸

Das aus diesen Bildflügen resultierende Material ist völlig ungeordnet; die Aufnahmhöhen liegend größtenteils zwischen 20 und 60 m, ein Teil der Bilder ist wegen des in Windböen schwankenden Kamera-Riggs nicht exakt senkrecht aufgenommen worden (Abb. 10). Trotzdem – oder gerade deswegen – bietet das Bildmaterial ideale Bedingungen für die SfM-Photogrammetrie: Das Schwanken des Riggs um den Nadir und seine windbedingten Positionsänderungen verändern die Kamerastandorte und damit die Parallaxen im Bildmaterial; durch die große Bildanzahl auf relativ engem Raum ist für ausreichend Überlappung gesorgt. Im 3D-Modell sind die verschiedenen Grabungsschnitte und Raubgrabungen gut erkennbar, Mauerzüge zeichnen sich deutlich ab (Abb. 11 und 12). Auch größere Steine und Architekturteile sind deutlich sichtbar, etwa die Trommeln der umgestürzten herzförmigen Ecksäulen des Peristylhofes, während kleinere Steine von weniger als 10 cm Größe nicht mehr erkennbar sind oder sich nur noch als raue, unruhige Zonen abzeichnen. Die Auflösung der Textur dagegen ist deutlich höher: Bei dem weißen Strich, der sich entlang der unteren Bildkante von Abb. 12 über die Terrasse 1 zieht, handelt es sich um die Hauptmessachse in Form eines Maßbandes. Die Bodenauflösung muss, damit das Maßband erkennbar ist, weniger als die Hälfte der Maßbandbreite und damit deutlich unter 1 cm liegen. Dieses und weitere 3D-Modelle der Grabungsflächen bilden, verknüpft mit der tachymetrischen Aufnahme aller obertägig sichtbaren archäologischen Strukturen und charakteristischen Gelände-merkmale,²⁹ die Grundlage für eine dreidimensionale Erfassung des westlichen Hügels

25 Gordon und Villiers 1983; Gordon 1984; Pola u. a. 2009; Pola 2010.

26 JADIS: # 2117003, MEGA: # 2709; vgl. <http://www.megajordan.org/> (besucht am 01/10/2015).

27 Zu Nahbereichsluftbildern zusammenfassend Verhoeven 2009.

28 Reinhard 2012.

29 Durchgeführt von Frank Siegmund, Münster, und Sandra Viehmeier, Basel, während der Kampagnen 2008 und 2009.



Abb. 9 Terrasse 1 des Tall adh-Dhahab el-Gharbiyeh, Jordanien, mit partiell freigelegten spätantiken Baustrukturen: Originalbild.

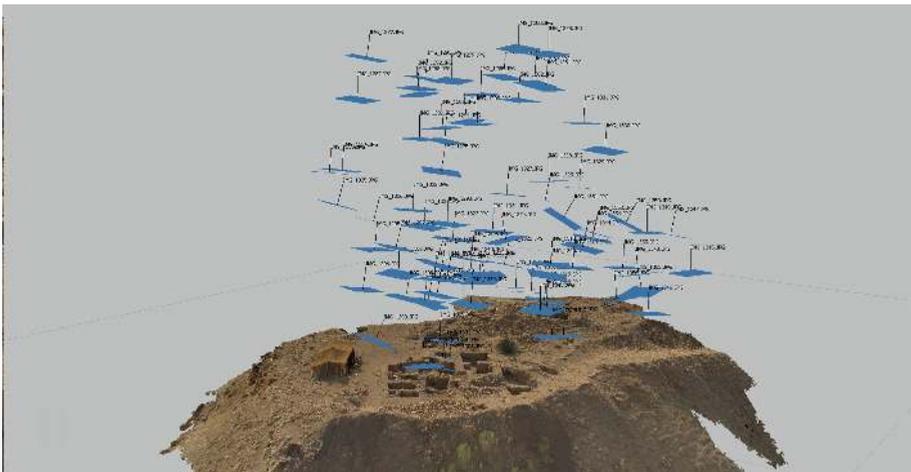


Abb. 10 Terrasse 1 des Tall adh-Dhahab el-Gharbiyeh, Jordanien, mit partiell freigelegten spätantiken Baustrukturen: Darstellung der Kamerapositionen (äußere Orientierung) und der damit rekonstruierbaren Szene.

der Tulul adh-Dhahab. Da für die Grabungsschwerpunkte auf dem Tell inzwischen Luftbildserien aus mehreren Kampagnen existieren, kann der Fortgang der Grabungen mittlerweile auch mit einer vierten, zeitlichen Dimension veranschaulicht werden.

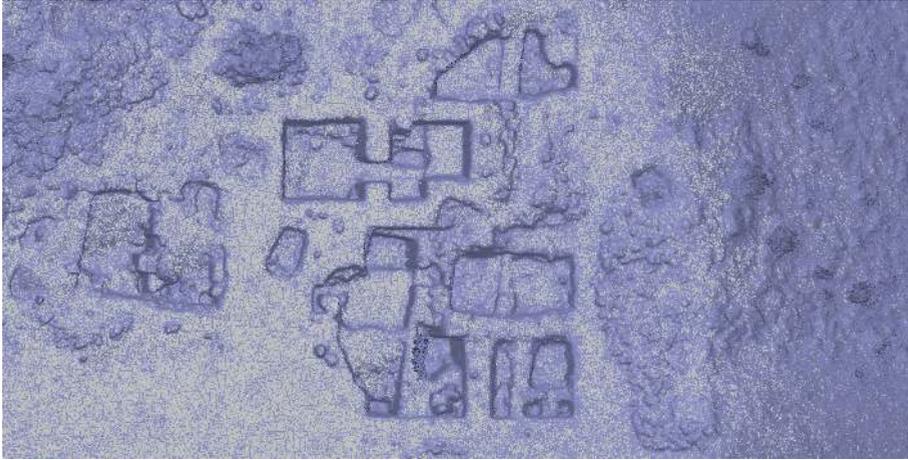


Abb. 11 Terrasse 1 des Tall adh-Dhahab el-Gharbiyeh, Jordanien, mit partiell freigelegten spätantiken Baustrukturen: vermaschtes 3D-Modell (*mesh*) mit Grabungsschnitten und Raubgrabungen.



Abb. 12 Terrasse 1 des Tall adh-Dhahab el-Gharbiyeh, Jordanien, mit partiell freigelegten spätantiken Baustrukturen: Orthophoto mit einer Texturauflösung von deutlich unter 1 cm, am unteren Bildrand markiert ein Maßband die West-Ost-Hauptmessachse.

3.3 Beispiel Tulul adh-Dhahab – Auswertung alter Luftbilder

Im Rahmen des oben bereits beschriebenen Tulul-adh-Dhahab-Projektes wurden zusätzlich von einem Flugzeug aus aufgenommene Luftbilder mit Hilfe von SfM ausgewertet.³⁰ Datengrundlage war hier Material eines Luftbild-Surveys der britischen Firma Hunting Aerosurveys Ltd. über dem westlichen Jordanien aus dem Jahr 1953.³¹ Die knapp 4.000 zu kartographischen Zwecken erstellten Senkrechtaufnahmen, es handelt sich um 23 x 23 cm, das heißt knapp 10 Zoll große Schwarzweiß-Bilder im Maßstab 1:25.000, werden im Royal Jordanian Geographic Centre in Amman aufbewahrt, ein Satz Kopien hält das Aerial Photographic Archive for Archaeology in the Middle East (APAAME) der University of Western Australia in Perth.³² Das APAAME hat mir dankenswerterweise Scans der Bilder im Umfeld der Tulul adh-Dhahab zur Verfügung gestellt. Die Bilder zeigen etwa 5,8 km im Quadrat, das heißt ca. 33 km², bei einer Auflösung von etwa 50 cm pro Pixel, sie weisen eine Querüberdeckung von 40 % und eine Längsüberdeckung von 70 % auf. Auf den Bildern sind feine parallele Kratzer zu erkennen, die wohl bereits während des Luftbildfluges beim Weitertransportieren des Films durch Sandkörner in der Messkammer verursacht worden sind. Trotzdem lässt sich aus den Bildern ein 3D-Modell der Landschaft im unteren Zarqa-Tal errechnen (Abb. 13–16). Die Ergebnisse aus PhotoScan bieten dabei, verglichen mit den frei verfügbaren SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)-Höhendaten der Region, eine deutlich bessere Auflösung: Das SRTM-Höhenmodell³³ liegt in einer Auflösung von 90 m vor, das per SfM gerechnete Modell weist eine Auflösung von unter 10 m auf (Abb. 17). Theoretisch wäre sogar eine noch höhere Auflösung erzielbar, jedoch führen die oben erwähnten Kratzer auf den Originalphotos zunehmend zu Störeffekten. Erste Versuche einer Georeferenzierung des Modells über aktuelle SPOT-Satellitenbilder deuten auf eine sehr hohe geometrische Genauigkeit. Bei Verwendung alter Luftbilder zur Erstellung von Höhenmodellen ergibt sich über die höhere Auflösung hinaus noch ein weiterer, sehr wertvoller Vorteil: die resultierenden 3D- bzw. Höhenmodelle bilden eine Geländesituation ab, die heute nicht mehr existiert und damit auch nicht mehr – etwa mit Satelliten oder Airborne Laser Scanning (ALS) – erfasst werden kann. Wir können somit quasi ‚Satellitendaten‘ aus Datenmaterial generieren, das vor dem Sputnik-Schock von

30 Vgl. auch Reinhard 2012, 40 mit Abb. 5 rechts sowie Verhoeven 2011b, 71–72 und 71, Abb. 3. Eine Einschätzung der Genauigkeit von per SfM aus modernen Luftbildern abgeleiteten Höhenmodellen bieten Stal u. a. 2012.

31 Kennedy und Bewley 2009, 70; Kennedy und Bewley 2010; 193–195 und 194, Abb. 17.1; Bewley und Kennedy 2013, 225 und 227, Abb. 13.3.

32 <http://www.humanities.uwa.edu.au/research/cah/aerial-archaeology>; <http://www.apaame.org/> (besucht am 01/10/2015).

33 Verwendet wurden Daten von USGS 2008. Ein weiteres frei verfügbares Höhenmodell mit einer potentiellen Auflösung von 30 m bietet ASTER – die mir vorliegenden Daten weisen im Untersuchungsgebiet jedoch offensichtliche Fehler auf, vermutlich durch Abschattungen im engen Zarqatal.

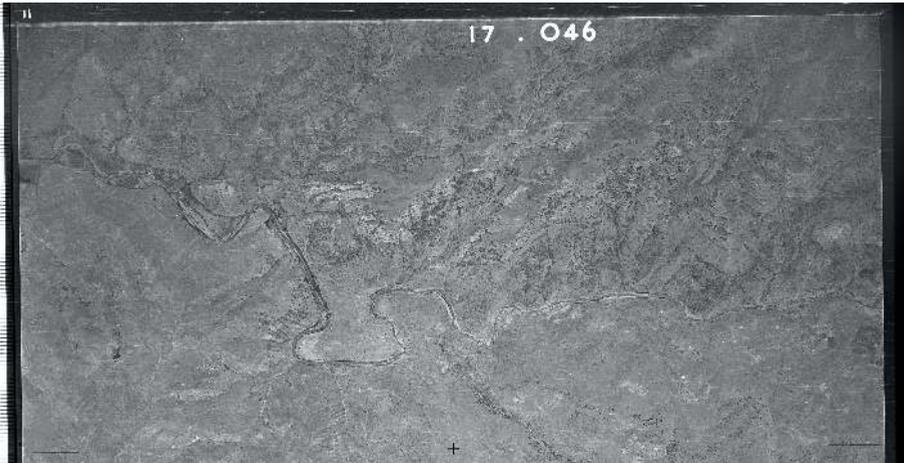


Abb. 13 Tulul adh-Dhahab und Umland, Jordanien. Der Doppelhügel liegt in einer s-förmigen Flusschleife im Tal des nach Westen in den Jordan entwässernden Zarqa. Originalbild, Ausschnitt.

1957 entstanden ist! Für die Tulul adh-Dhahab und ihr Umfeld bedeutet dies, dass zur Beantwortung landschaftsarchäologischer Fragestellungen ein Höhenmodell zur Verfügung steht, in dem die einschneidenden Veränderungen der letzten 60 Jahre – Planierungen für landwirtschaftliche Zwecke, Straßenbau, der Durchstich der Zarqa-Flusschleife für den Bau eines Laufwasserkraftwerks oder das Freischieben eines Wirtschaftsweges auf die Hügelspitze mit einem Bulldozer – ausgeblendet sind. Das Höhenmodell entspricht damit deutlich besser der feintopographischen Situation der Antike als aktuelle Höhendaten; lediglich die durch die natürliche Erosion (Bodenabtrag) der letzten Jahrtausende bedingten Reliefunterschiede werden in diesem Modell nicht abgebildet. Ein Abgleich mit aktuellen Höhenmodellen³⁴ dürfte noch zusätzliche interessante Ergebnisse liefern. So ließe sich etwa das Ausmaß der Schäden durch die Bautätigkeiten oder das Erosionsvolumen seit 1953 abschätzen.

34 Auch diese können natürlich mittels SfM erstellt werden: Seit 1997 existiert in Jordanien ein von David Kennedy und Robert Bewley getragenes Luftbildprogramm der University of Western Australia (vgl. <http://www.apaame.org>, besucht am

01/10/2015), das auch die Tulul adh-Dhahab befliegen hat. Bislang lassen die vorliegenden Bilddaten jedoch keine befriedigenden Geländerekonstruktion zu.

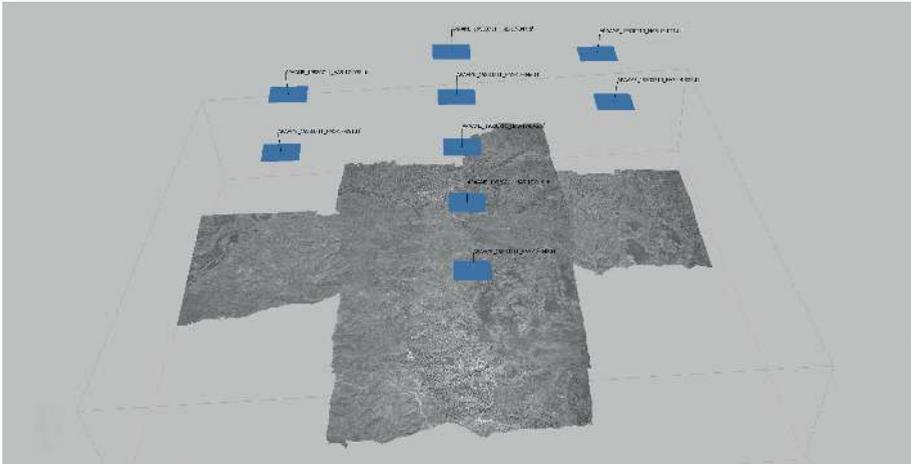


Abb. 14 Tulul adh-Dhahab und Umland, Jordanien. Der Doppelhügel liegt in einer s-förmigen Fluss Schleife im Tal des nach Westen in den Jordan entwässernden Zarqa; Darstellung der Kamerapositionen (äußere Orientierung) und der damit rekonstruierbaren Szene. Der Luftbildflug erfolgte in etwa Nord-Süd-ausgerichteten Streifen.

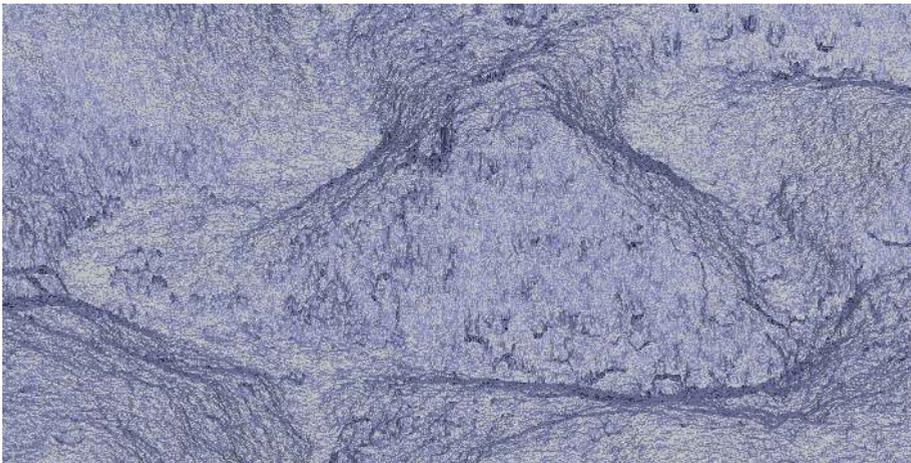


Abb. 15 Tulul adh-Dhahab und Umland, Jordanien. Der Doppelhügel liegt in einer s-förmigen Fluss Schleife im Tal des nach Westen in den Jordan entwässernden Zarqa; vermaschtes 3D-Modell (*mesh*) des westlichen Teils. Die grundlegende Topographie wird exakt wiedergegeben, erste Fehler im Modell sind bedingt durch die eingeschränkte Bildqualität.

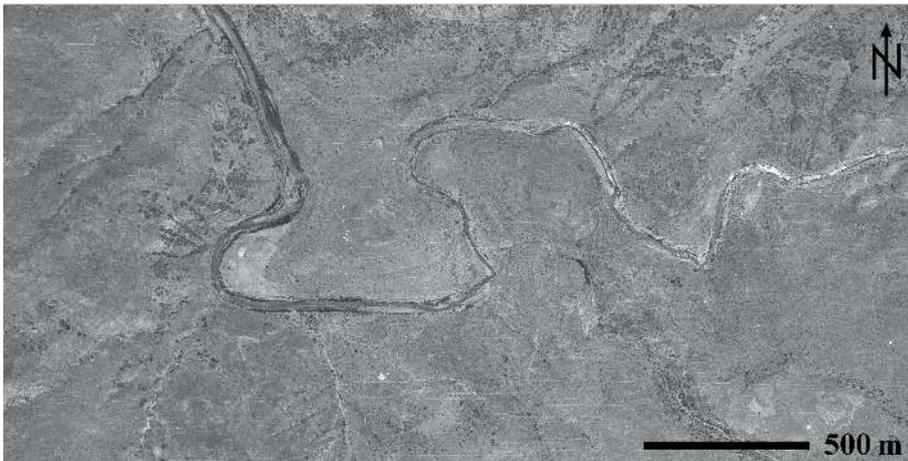


Abb. 16 Tulul adh-Dhahab und Umland, Jordanien. Der Doppelhügel liegt in einer s-förmigen Flusschleife im Tal des nach Westen in den Jordan entwässernden Zarqa: Orthophoto der Tulul adh-Dhahab in der Situation von 1953.

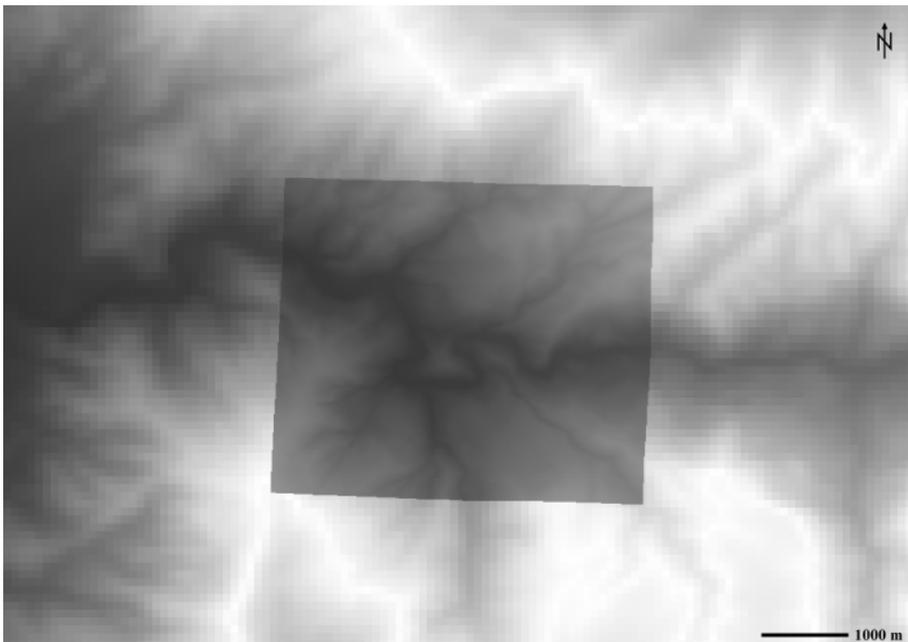


Abb. 17 Unteres Zarqa-Tal, Jordanien: Vergleich des Höhenmodells auf Grundlage der SRTM-Daten (Bildhintergrund) mit dem per SfM aus Senkrechtluftbildern des Hunting Aerial Survey von 1953 gerechneten DOM (Bildmitte). Die per SfM erreichte Bodenauflösung ist fast 10fach höher.

4 Fazit

Mit der SfM-Photogrammetrie steht der Archäologie eine neue dreidimensionale Dokumentationsmethode zur Verfügung, die einfach, universell und breit skaliert – von der Fundmünze bis zur Landschaftsrekonstruktion – anwendbar ist, sie eignet sich ideal zur Ergänzung der konventionellen Dokumentation von Ausgrabungen. Der Zusatzaufwand im Feld ist gering, die notwendige technische Ausrüstung für die Datenaufnahme ist auf jeder Grabung bereits vorhanden und beschränkt sich auf eine Kamera sowie Vermessungsgerät für die spätere Georeferenzierung der 3D-Modelle. Die Berechnung der 3D-Modelle kann dabei problemlos nach Abschluss der Grabung erfolgen, wobei in diesem Fall allerdings keine Möglichkeit zur Korrektur besteht, wenn das vorliegende Bildmaterial keine befriedigende 3D-Modellierung zulässt. Auch eine nachträgliche Anwendung mit nicht eigens für SfM erstelltem Bildmaterial, etwa von Altgrabungen, ist problemlos möglich, wenn die Bilder eine den technischen Bedürfnissen der Methode entsprechende Stereoabdeckung bzw. Überlappung aufweisen. Es wäre daher wünschenswert, wenn auch die photographische Dokumentation von Grabungen, bei denen zunächst keine SfM-Anwendung geplant ist, den SfM-Anforderungen entsprechen würde, damit bei einer späteren Auswertung diese Option flexibel erhalten bleibt. Die inzwischen insbesondere bei kleineren Projekten wie etwa Cham-Grindel nur noch kurzen und durch die technische Weiterentwicklung stetig sinkenden Rechenzeiten zur Erstellung der 3D-Modelle erlauben zukünftig eine völlig neue Herangehensweise an die zeichnerische Grabungsdokumentation: Denkbar wäre eine Aufnahme des Befundes auf Grundlage eines vorgängig per SfM gerechneten Orthophotos.³⁵ Eine solche Vorgehensweise kam bislang in erster Linie für Profile zum Einsatz; Profilflächen bilden jedoch idealerweise eine einheitliche Entzerrungsebene, so dass Aufnahmen lotrecht auf die Profilebene zweidimensional entzerrt und über Passpunkte zusammengefügt werden können. Plana sind dagegen erheblich schwieriger exakt senkrecht zu photographieren und weisen zudem bei Schichtgrabungen üblicherweise eine deutliche Dreidimensionalität auf, so dass sich der Versatz von Bildelementen durch die Zentralperspektive der Kamera stärker auswirkt. Die Verfügbarkeit eines Orthophotos als Grundlage für

35 Ein solches *Orthophoto* kann die zeichnerische Dokumentation lediglich vereinfachen und beschleunigen, nicht aber vollständig ersetzen, da photogrammetrische Methoden lediglich den tatsächlichen Zustand eines Befundes darstellen. Die aus der interpretativen Auseinandersetzung mit dem Befund selbst entstehenden Zusatzinformationen (Befundgrenzen, Befundnummern, Fundnummern, Anmerkungen etc.) machen die eigentliche archäologische Feldarbeit aus; diese Angaben müssen auch wei-

terhin von Hand ergänzt werden, unabhängig davon, ob dies auf einem maßstäblichen Ausdruck des Orthophotos, einem Transparentpapier-Überlieger oder digital im CAD oder GIS – vielleicht zukünftig auf einem Tablet-Computer – geschieht. Der Versuch, diese Informationen auf den Photos selbst sichtbar zu machen, etwa durch Anreißen der Befundgrenzen oder Stecken der Befundnummern, sollte im Sinne einer möglichst objektiven Befunddokumentation unterbleiben.

den Zeichenvorgang vereinfacht und beschleunigt diesen deutlich. Gleichzeitig wird das Nivellieren von Hand durch ein hochpräzises, dichtes DOM ersetzt, dessen Qualität ausreichend ist, um auch die Volumina von Schichtabträgen zu bestimmen. Dies ist für eine ganze Reihe von Forschungsfragen relevant, so lässt sich etwa die Mengenverteilungen bzw. der Volumenanteil von Scherben oder botanischen Makroresten präzise bestimmen. Weitere Stärken spielt die SfM-Anwendung in Verbindung mit Luftaufnahmen aus: Abgesehen von der Möglichkeit, historisches Bildmaterial zu verwenden, eignet sich SfM ideal für die Auswertung von Nahbereichsluftbildern. In Verbindung mit der technischen Weiterentwicklung und zunehmenden Verfügbarkeit autonomer unbemannter Luftfahrzeuge (UAVs, „Drohnen“) ergeben sich hier zukünftig spannende, neue Einsatzmöglichkeiten. Ebenfalls bisher nur in Ansätzen erschlossen ist das Potential von 3D-Daten für museale Präsentationen, Internetauftritte oder 3D-Druck. Insgesamt lässt sich festhalten, dass sich der Feldarchäologie mit der SfM-Photogrammetrie eine kostengünstige und zeitsparende neue Möglichkeit erschließt, komplexe dreidimensionale Befundsituationen präzise zu erfassen. Die technische Entwicklung ist dabei bei Weitem noch nicht abgeschlossen.

	Webadresse	Rechenort	Preis
Agisoft PhotoScan Professional	http://www.agisoft.ru/products/photoscan/professional/	lokal	€ 420* bzw. € 2.685
ArcTron aSPECT3D	http://www.arctron.de/de/produkte/software/aspect_3d/	lokal	€ 2.300
ARC3D	http://www.arc3d.be/	serverbasiert	kostenlos
Autodesk 123D Catch	http://www.123dapp.com/catch	serverbasiert	kostenlos
Bundler/CMVS/PMVS2	http://phototour.cs.washington.edu/bundler/ , http://www.di.ens.fr/cmvs/ , http://www.di.ens.fr/pmvs/	lokal	<i>Open Source</i>
Cubify Capture	http://cubify.com/products/capture/	Webdienst	kostenlos
Eos Sys. PhotoModeler Scanner	http://www.photomodeler.com/products/scanner/default.html	lokal	€ 1.990
Microsoft Photosynth	http://photosynth.net/	serverbasiert	kostenlos
Pix4UAV 3D Desktop	http://pix4d.com/	lokal	€ 15.500 bzw. € 9.300**
Pix4UAV 3D Cloud		serverbasiert	projektbezogen (ab € 240)
VisualSFM	http://ccwu.me/vsfm/	lokal	kostenlos**

Tab. 1 Zusammenstellung der wichtigsten Structure-from-Motion-Softwarelösungen. Die Bandbreite reicht von kostenlosen Webdiensten bis hin zu ausgefeilten lokal laufenden Programmen, die georeferenzierte GIS- und CAD-taugliche Daten erstellen können (Stand der Internetadressen und Preisangaben April 2013). – * Educational license für Bildungseinrichtungen, nur für nichtkommerzielle Zwecke. ** Für nichtkommerzielle Zwecke.

	Ausgangsdaten	Rechenzeit	Mesh-Eigenschaften
Cham-Grindel	Canon PowerShot G11 (10,0 Megapixel), 20 Bilder im JPG-Format mit insgesamt 61,1 MB	26 min	Faces: 1.707.012, Vertices: 865.296
Cham-Klostermatt	Canon 5D Mark II (21,1 Megapixel), 13 Bilder im JPG-Format mit insgesamt 124 MB	1 h 11 min	Faces: 1.988.328, Vertices: 1.079.004
Tall adh-Dhahab el-Gharbiyeh, Terrasse 1	Canon PowerShot G11 (10,0 Megapixel), 82 Bilder im JPG-Format mit insgesamt 298 MB	3 h 3 min	Faces: 12.980.345, Vertices: 6.640.010
Tulul adh-Dhahab, Umland	Scans der analogen Dias mit je 144 Megapixel, 9 Bilder im TIFF-Format mit insgesamt 1.04 GB	55 min	Faces: 29.148.961, Vertices: 14.687.239

Tab. 2 Vergleich der verrechneten Datenmengen und der daraus resultierenden Rechenzeiten zu den vier im Text aufgeführten Beispielen. Bei einer Erhöhung von Präzision und Auflösung der Modelle ergeben sich zu lange Rechenzeiten im Grabungsaltag. Die hier aufgeführten Qualitäten der einzelnen Modelle reichen für die Weiterarbeit im Feld jedoch aus. – Die Werte in Spalte 3 beziehen sich auf die reine Rechenzeit für ein untexturiertes 3D-Modell, ohne Beschnitt, Maskierungen, Georeferenzierungen oder Datenexporte. Zur Berechnung wurden folgende Parameter verwendet: Align Photos: High Accuracy; Build Geometry: Height Field, Sharp, High Target Quality, Face count 0, Filter threshold 0, Hole threshold 10. Zur verwendeten Hard- und Software vgl. Anm. 5.

Bibliographie

Agisoft 2013

Agisoft LLC. *Agisoft PhotoScan User Manual. Professional Edition, Version 0.9.0*. URL: http://downloads.agisoft.ru/pdf/photoscan-pro_0_9_0_en.pdf (besucht am 26. 04. 2013).

Bewley und Kennedy 2013

Robert Bewley und David Kennedy. „Historical Aerial Imagery in Jordan and the Wider Middle East“. In *Archaeology from Historical Aerial and Satellite Archives*. Hrsg. von William S. Hanson und Ioana A. Oltean. New York: Springer, 2013, 221–242.

Bibi u. a. 2012

Faysal Bibi, Brian Kraatz, Nathan Craig, Mark Beech, Mathieu Schuster und Andrew Hill. „Early Evidence for Complex Social Structure in Proboscidea from a Late Miocene Trackway Site in the United Arab Emirates“. *Biology Letters* 8.4 (2012), 670–673.

De Reu, De Smedt u. a. 2014

Jeronen De Reu, Philippe De Smedt, Davy Herremans, Marc Van Meirvenne, Pieter LaLal und Wim De Clerck. „On Introducing an Image-Based 3D Reconstruction Method in Archaeological Excavation Practice“. *Journal of Archaeological Science* 41 (2014), 251–262.

De Reu, Plets u. a. 2013

Jeronen De Reu, Gertjan Plets, Geert Verhoeven, Philippe De Smedt, Machteld Bats, Bart Cherretté, Wouter De Maeyer, Jasper Deconynck, Davy Herremans, Pieter Laloo, Marc Van Meirvenne und Wim De Clerck. „Towards a Three-Dimensional Cost-Effective Registration of the Archaeological Heritage“. *Journal of Archaeological Science* 40 (2013), 1108–1121.

Doneus u. a. 2011

Michael Doneus, Geert Verhoeven, Martin Fera, Christian Briese, Matthias Kucera und Wolfgang Neubauer. „From Deposit to Point Cloud – A study of Low-Cost Computer Vision Approaches for the Straightforward Documentation of Archaeological Excavations“. *Geoinformatics* 6 (2011), 81–88.

Ducke, Højlund u. a. 2013

Benjamin Ducke, Flemming Højlund, Jonatan Rose Anderson und A. H. Shehab. „Image-Based Reconstruction. Flexible and Low-cost 3D Recording of Architecture, Artefacts, Anything“. In *Kultur und Informatik: Visual Worlds & Interactive Spaces*. Hrsg. von Regina Franken-Wendelstorf, Elisabeth Lindinger und Jürgen Sieck. Glückstadt: Verlag Werner Hülsbusch, 2013, 147–157.

Ducke, Score und Reeves 2011

Benjamin Ducke, David Score und Joseph Reeves. „Multiview 3D Reconstruction of the Archaeological Site at Weymouth from Image Series“. *Computers & Graphics* 35 (2011), 375–382.

Fassi u. a. 2013

Francesco Fassi, Luigi Fregonese, Sebastiano Ackermann und Vincenzo De Troia. „Comparison between Laser Scanning and Automated 3D Modelling Techniques to Reconstruct Complex and Extensive Cultural Heritage Areas“. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 40-5/W1 (2013), 73–80.

Gordon 1984

Robert L. Gordon. „Telul edh Dhahab Survey (Jordan) 1980 and 1982“. *Mitteilungen der Deutschen Orient-Gesellschaft zu Berlin* 116 (1984), 131–137.

Gordon und Villiers 1983

Robert L. Gordon und Linda E. Villiers. „Telul edh Dhahab and its Environs Surveys of 1980 and 1982. A Preliminary Report“. *Annual of the Department of Antiquities of Jordan* 27 (1983), 275–289.

Harwin und Lucieer 2012

Steve Harwin und Arko Lucieer. „Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery“. *Remote Sensing* 4 (2012), 1573–1599.

Häser und Vieweger 2011

Jutta Häser und Dieter Vieweger. „Neues vom Tall Zira'a in Nordjordanien“. *Jerusalem. Gemeindebrief – Stiftungsjournal* 2 (2011), 47–49.

Kennedy und Bewley 2009

David Kennedy und Robert Bewley. „Aerial Archaeology in Jordan“. *Antiquity* 83 (2009), 69–81.

Kennedy und Bewley 2010

David Kennedy und Robert Bewley. „Archives and Aerial Imagery in Jordan: Rescuing the Archaeology of Greater Amman from Rapid Urban Sprawl“. In *Landscapes through the Lens. Aerial Photographs and Historic Environment*. Hrsg. von David C. Cowley, Robin A. Standing und Matthew J. Abicht. Occasional Publication of the Aerial Archaeology Research Group 2. Oxford: Oakville, 2010, 193–206.

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 (TLS 2012). Beiträge zum 121. DVW-Seminar am 13. und 14. Dezember 2012 in Fulda*. DVW-Schriftenreihe 69. Augsburg: Wißner-Verlag, 2012, 25–46.

Koska und Křemen 2013

Bronislav Koska und Tomas Křemen. „The Combination of Laser Scanning and Structure from Motion Technology for Creation of Accurate Exterior and Interior Orthophotos of St. Nicholas Baroque Church“. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 40.5/W1 (2013), 133–138.

Koutsoudis, Vidmar und Arnaoutoglou 2013

Anestis Koutsoudis, Blaž Vidmar und Fotis Arnaoutoglou. „Performance Evaluation of a Multi-Image 3D Reconstruction Software“. *Journal of Archaeological Science* 40 (2013), 4450–4456.

Koutsoudis, Vidmar, Ioannakis u. a. 2013

Anestis Koutsoudis, Blaž Vidmar, George Ioannakis, Fotis Arnaoutoglou, George Pavlidis und Christodoulos Chamzas. „Multi-Image 3D Reconstruction Data Evaluation“. *Journal of Cultural Heritage* 15.1 (2013), 73–79.

Krenn-Leeb, Maurer und Weßling 2012

Alexandra Krenn-Leeb, Jakob Maurer und Ronny Weßling. „Der Einsatz neuer Dokumentationsmethoden auf dem Kleinen Anzingerberg. Ein Erfahrungsbericht“. *Archäologie Österreichs* 23.1 (2012), 17–26.

Levy u. a. 2015

Thomas E. Levy, Christopher A. Tuttle, Matthew L. Vincent, Matthew Holland, Ashley M. Richter, Vid Petrovic, David Vanoni und Falko Kuester. *The 2012 Petra Cyber-Archaeology Cultural Conservation Expedition: Temple of the Winged Lions and Environs, Jordan*. URL: <http://antiquity.ac.uk/projgall/levy335/> (besucht am 01. 10. 2015).

Lobell 2011

Jarrett A. Lobell. „Pompeii's Dead Reimagined“. *Archaeology* 64.5 (2011), 39–41.

Meyer, Schaaeren und Weber 2012

Sabrina Meyer, Gishan Schaaeren und Kilian Weber. „Cham, Klostermatt: Rettungsgrabung“. *Tugium* 28 (2012), 28–29.

Meyer, Weber und Schaaeren 2012

Sabrina Meyer, Kilian Weber und Gishan Schaaeren. „Cham ZG, Klostermatt“. *Jahrbuch Archäologie Schweiz* 95 (2012), 202–203.

Neitzel und Klonowski 2011

Frank Neitzel und Jörg Klonowski. „Mobile 3D Mapping with a Low-Cost UAV System“. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 38-1/C22 (2011), 39–44.

Neitzel, Klonowski u. a. 2011

Frank Neitzel, Jörg Klonowski, Sebastian Siebert und Jan-Philipp Dasbach. „Mobile 3D Mapping mit einem low-cost UAV-System am Beispiel der Deponievermessung“. *avn – Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* 10 (2011), 336–347.

Opitz 2013

Rachel S. Opitz. „An Overview of Airborne and Terrestrial Laser Scanning in Archaeology“. In *Interpreting Archaeological Topography. Airborne Laser Scanning, 3D Data and Ground Observation*. Hrsg. von Rachel S. Opitz und David C. Cowley. Occasional Publication of the Aerial Archaeology Research Group No. 5. Oxford und Oakville: Oxbow Books, 2013, 13–31.

Pauly und De Clerck 2011

Klaas Pauly und Olivier De Clerck. „Low-Cost Very High Resolution Intertidal Vegetation Monitoring Enabled by Nearinfrared Kite Aerial Photography“. In *GIS-based Environmental Analysis, Remote Sensing and Niche Modeling of Seaweed Communities*. Hrsg. von Klaas Pauly. Dissertation Ghent, 2011, 169–186.

Plets, Gheyle u. a. 2012

Gertjan Plets, Wouter Gheyle, Geert Verhoeven, Jeroen De Reu, Jean Bourgeois, Jeroen Verhegge und Birger Stichelbaut. „Three-Dimensional Recording of Archaeological Remains in the Altai Mountains“. *Antiquity* 86 (2012), 884–897.

Plets, Verhoeven u. a. 2012

Gertjan Plets, Geert Verhoeven, Dimitry Cheremisin, Ruth Plets, Jean Bourgeois, Birger Stichelbaut, Wouter Gheyle und Jeroen De Reu. „The Deteriorating Preservation of the Altai Rock Art: Assessing Three-Dimensional Image-based Modelling in Rock Art Research and Management“. *Rock Art Research* 29.2 (2012), 139–156.

Pola 2010

Thomas Pola. „Ritzzeichnungen. Werfen archäologische Funde aus dem Ostjordanland Licht auf Ez 8,10 und 1Kön 6,29–36?“. *Theologische Beiträge* 41 (2010), 97–113.

Pola u. a. 2009

Thomas Pola, Mohammad al-Balawnah, Wolfgang Thiel, Emmanuel Rehfeld und Tobias Krause. „Fragments of Carved Stones from Tulul adh-Dhabab in the Lower Wadi az-Zarqā“. *Journal of Epigraphy & Rock Drawings* 3 (2009), 17–24.

Reinhard 2012

Jochen Reinhard. „Things on Strings and Complex Computer Algorithms. Kite Aerial Photography and Structure from Motion Photogrammetry at the Tulul adh-Dhabab, Jordan“. *AARGnews* 45 (2012), 37–41.

Reinhard 2013

Jochen Reinhard. „Structure from Motion, Drohnen & Co. Neue Wege in der Dokumentation archäologischer Ausgrabungen“. *Tugium* 29 (2013), 177–188.

Remondino 2013

Fabio Remondino. „Worth a Thousand Words – Photogrammetry for Archaeological 3D Surveying“. In *Interpreting Archaeological Topography. Airborne Laser Scanning, 3D Data and Ground Observation*. Hrsg. von Rachel S. Opitz und David C. Cowley. Occasional Publication of the Aerial Archaeology Research Group No. 5. Oxford und Oakville: Oxbow Books, 2013, 115–122.

Remondino und Kersten 2012

Fabio Remondino und Thomas P. Kersten. „Low-Cost und Open-Source Lösungen für die automatisierte Generierung von 3D-Punktwolken – ein kritischer Überblick?“. In *Terrestrisches Laserscanning 2012 (TLS 2012). Beiträge zum 121. DVW-Seminar am 13. und 14. Dezember 2012 in Fulda*. DVW-Schriftenreihe 69. Augsburg: Wißner-Verlag, 2012, 63–80.

Sedlazeck, Köser und Koch 2010

Anne Sedlazeck, Kevin Köser und Reinhard Koch. „Supporting Underwater Archaeology by 3D Reconstruction from Underwater Images“. *Skyllis* 10.2 (2010), 179–186.

Stal u. a. 2012

Cornelis Stal, Jean Bourgeois, Philippe De Maeyer, Guy De Mulder, Alain De Wulf, Rudi Goossens, Marijn Hendrickx, Timothy Nuttens und Birger Stichelbaut. „Test Case on the Quality Analysis of Structure from Motion in Airborne Applications“. In *32nd EARSeL Symposium Proceedings – Advances in Geosciences*. Hrsg. von Konstantinos G. Perakis und Athanasios K. Moysiadis. (Mykonos, Griechenland, 21.–24. Mai 2012). 2012, 81–91. URL: http://www.earsel.org/symposia/2012-symposium-Mykonos/Proceedings/04-01_EARSeL-Symposium-2012.pdf (besucht am 01. 10. 2015).

USGS 2008

United States Geological Survey. „Shuttle Radar Topography Mission, 1 degree tile 3 arc second scene SRTM_u03_n032e035.tif, unfilled unfinished“. In *Global Land Cover Facility www.landcover.org*. College Park: University of Maryland, 2008. URL: ftp://ftp.glcf.umiacs.umd.edu/glcf/SRTM/Degree_Tiles/n032/SRTM_u03_n032e035/ (besucht am 12. 05. 2013).

Verhoeven 2009

Geert Verhoeven. „Providing an Archaeological Bird’s-eye View – an Overall Picture of Ground-Based Means to Execute Low-Altitude Aerial Photography (LAAP) in Archaeology“. *Archaeological Prospection* 16 (2009), 233–249.

Verhoeven 2011a

Geert Verhoeven. „Getting Computer Vision Airborne – Using Structure from Motion for Accurate Orthophoto Production“. In *The Remote Sensing and Photogrammetry Society Archaeology Special Interest Group Newsletter*. Spring, 2011, 4–6.

Verhoeven 2011b

Geert Verhoeven. „Software Review. Taking Computer Vision Aloft – Archaeological Three-dimensional Reconstructions from Aerial Photographs with PhotoScan“. *Archaeological Prospection* 18 (2011), 67–73.

Verhoeven, Doneus und Briese 2012

Geert Verhoeven, Michael Doneus und Christian Briese. „Computer Vision Techniques: Towards Automated Orthophoto Production“. *AARGnews* 44 (2012), 8–11.

Verhoeven, Doneus, Briese und Vermeulen 2012

Geert Verhoeven, Michael Doneus, Christian Briese und Frank Vermeulen. „Mapping by Matching – A Computer Vision-Based Approach to Fast and Accurate Georeferencing of Archaeological Aerial Photographs“. *Journal of Archaeological Science* 39 (2012), 2060–2070.

Verhoeven, Taelman und Vermeulen 2012

Geert Verhoeven, Devi Taelman und Frank Vermeulen. „Computer Vision-Based Orthophoto Mapping of Complex Archaeological Sites: the Ancient Quarry of Pitaranha (Portugal-Spain)“. *Archaeometry* 54.6 (2012), 1114–1129.

Weber und Schaeren 2013

Kilian Weber und Gishan Schaeren. „Cham, Grindel-Bibersee, Ausbau Verkehrsknoten: Auszubegleitung“. *Tugium* 29 (2013), 30–31.

Abbildungs- und Tabellennachweis

ABBILDUNGEN: 1 Jochen Reinhard, Salvatore Pungitore. 2 Jochen Reinhard. 3 Jochen Reinhard. 4 Jochen Reinhard. 5 Jochen Reinhard. 6 Jochen Reinhard. 7 Jochen Reinhard. 8 Jochen Reinhard. 9 Jochen Reinhard. 10 Jochen Reinhard. 11 Jochen Reinhard. 12 Jochen Reinhard. 13 Hunting Aerosurveys

Ltd., zur Verfügung gestellt vom Aerial Photographic Archive for Archaeology in the Middle East (APAAME). 14 Jochen Reinhard. 15 Jochen Reinhard. 16 Jochen Reinhard. 17 Jochen Reinhard. **TABELLEN:** 1 Jochen Reinhard. 2 Jochen Reinhard.

JOCHEN REINHARD

M.A. (Freiburg 2004), ist prähistorischer Archäologe und als wissenschaftlicher Mitarbeiter beim Amt für Denkmalpflege und Archäologie des Kantons Zug in der Schweiz beschäftigt. Hauptsächlich in der Feldarchäologie tätig, liegt sein wissenschaftliches Interesse in der prähistorischen Archäologie, insbesondere dem Neolithikum, Remote Sensing, GIS (Geographische Informationssysteme)-Anwendungen sowie photogrammetrischen Dokumentationsmethoden in der Archäologie.

Jochen Reinhard
Amt für Denkmalpflege und Archäologie
Kanton Zug, Direktion des Innern
Hofstrasse 15
6300 Zug, Schweiz
E-Mail: jochen.reinhard@zg.ch