

# Structure from Motion, Drohnen & Co. : neue Wege in der Dokumentation archäologischer Ausgrabungen

Autor(en): **Reinhard, Jochen**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Tugium : Jahrbuch des Staatsarchivs des Kantons Zug, des Amtes für Denkmalpflege und Archäologie, des Kantonalen Museums für Urgeschichte Zug und der Burg Zug**

Band (Jahr): **29 (2013)**

PDF erstellt am: **17.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-526824>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Structure from Motion, Drohnen & Co.

## Neue Wege in der Dokumentation archäologischer Ausgrabungen

Jochen Reinhard

Zusammen mit der zeichnerischen und der beschreibenden Dokumentation bildet die Fotografie seit Ende des 19. Jahrhunderts die Grundlage für die wissenschaftliche Auswertung archäologischer Ausgrabungen. Ebenso alt wie die Grabungsfotografie selbst sind die Suche nach einem geeigneten, erhöhten Aufnahmestandort und Versuche, aus den resultierenden Fotos auf photogrammetrischem Weg masshaltige Pläne zu erstellen. Auf den meisten Grabungen stehen für Fotoaufnahmen jedoch lediglich einfache Leitern zur Verfügung, die nur einen sehr geringen Abstand zum Motiv erreichen. Gesamtaufnahmen grösserer Befunde, Übersichten oder die für die Dokumentation der Plana aus perspektivischen Gründen wünschenswerte Kameraposition mittig über der zu fotografierenden Fläche sind kaum möglich. Um diese Einschränkungen zu überwinden, ist ein kostengünstiges System gefordert, das jederzeit zur Verfügung steht und dabei einen möglichst grossen Massstab zulässt.<sup>1</sup> Die konventionelle Luftbildarchäologie aus mantragenden Flugzeugen oder Hubschraubern<sup>2</sup> –

obschon eine für die archäologische Forschung sehr wertvolle Methode – kann dies nicht gewährleisten.

Bereits 1912/13 wurde daher während einer von Sir Henry Wellcome geleiteten Ausgrabungskampagne am Jebel Moya im Sudan zum ersten Mal ein Drachen als Kameraträger für Überblicksaufnahmen aus der Luft eingesetzt.<sup>3</sup> 1919 führte der Tübinger Archäologe Robert Rudolf Schmidt die senkrechte Planfotografie – von Holzgerüsten aus – bei Feuchtbodengrabungen am Federsee ein, ab 1927 kam ein von dem Fotografen Heinrich Dürr konstruiertes Leiterstativ zur Anwendung. Etwa zur gleichen Zeit entwickelte der österreichische Lehrer und Archäologe Karl Kriegler eine rahmenartige hölzerne Stativkonstruktion, um Plana und Profile prähistorischer Bestattungen mit minimierten perspektivischen Verzerrungen zu fotografieren; die Bilder sollten als Fotopläne verwendet werden.<sup>4</sup>

Die Liste der in der Grabungsfotografie seither angewendeten Lösungsansätze ist lang: Neben technischen Hilfsmitteln vom Boden aus, etwa Feuerwehr-Drehleitern, Hubarbeitsbühnen, Fototürmen oder Teleskopmasten, gab es auch immer wieder Versuche, Grabungen von unbemannten fliegenden Kameraplattformen wie Ballonen, Blimps (Luftschiiffe ohne feste Tragstruktur), Drachen, Helikites oder ferngesteuerten Flugmodellen aus zu dokumentieren.<sup>5</sup> Diese Nahbereichsluftbildfotografie (englisch *low-altitude aerial photography*) gewinnt seit einigen

<sup>1</sup> Żurawski 1993, 243 f. – Verhoeven 2009, 235. – Eisenbeiß/Sauerbier 2011, 401.

<sup>2</sup> Für die Schweiz zusammenfassend Nagy et al. 2001.

<sup>3</sup> Addison 1949, u. a. 6. – Vgl. auch Reinhard 2012, 37.

<sup>4</sup> Stern 1992, 51 f. – Kriegler 1928.

<sup>5</sup> Zusammenfassend Verhoeven 2009. – Vgl. auch Eisenbeiß 2009. – Aber et al. 2010. – Eisenbeiß/Sauerbier 2011. – Chiabrando et al. 2011. – Remondino et al. 2011.



Abb. 1  
Einsatz einer Multikopter-Drohne für einen Fotoflug in Cham-Oberwil. Blick nach Südosten.

Jahren durch die zunehmend breitere Verfügbarkeit ausgefeilter und einfach zu steuernder, mit Kameras ausgerüsteter Fluggeräte deutlich an Popularität. Gleichzeitig ergeben sich durch die Weiterentwicklung der photogrammetrischen Methoden auch neue Möglichkeiten in der Auswertung der fotografischen Grabungsdokumentation weit über den zweidimensionalen Fotoplan hinaus.

### **Drohnen – Begrifflichkeiten, Stand der Technik, Rechtslage**

Kameratragende Flugmodelle werden im allgemeinen Sprachgebrauch häufig als «Drohnen»<sup>6</sup> bezeichnet – präziser ist die Bezeichnung UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*). Hierunter werden, unabhängig von ihrer Bauart, unbemannte Luftfahrzeuge verstanden, die funkferngesteuert, halb- oder vollautonom fliegen und dabei eine Nutzlast, etwa Fernerkundungssensoren, tragen. Vor allem im militärischen Umfeld geläufig ist zusätzlich der Begriff UAS (*Unmanned Aerial System*), der nicht nur das Fluggerät selber meint, sondern auch die Bodenstation mit einschliesst. Drohnen können dabei durchaus die Abmessungen eines bemannten Flugzeuges erreichen oder übertreffen, die für die Archäologie relevanten UAVs entsprechen jedoch in der Grösse normalen Modellflugzeugen und -helikoptern; diese Fluggeräteklasse wird auch als MAV (*Micro Air Vehicle*) bezeichnet.<sup>7</sup> Bislang handelte es sich dabei häufig um umgebaute funkferngesteuerte Flugmodelle aus dem Hobbybereich. Eine neue, erst seit wenigen Jahren durch die Weiterentwicklungen in der Regeltechnik und grössere Akku-Speicherkapazitäten verfügbare UAV-Gattung sind die sogenannten Multikopter, mehrrotorige, elektrisch angetriebene Flugplattformen, die aufgrund ihrer Eignung als Träger für Kameras und andere Sensoren in kürzester Zeit starke Verbreitung auch ausserhalb des Modellbauhobbys gefunden haben (Abb. 1). Gängige Bauformen weisen vier, sechs oder acht Propeller auf und werden als Quadro-, Hexa- bzw. Oktokopter bezeichnet. Multikopter verfügen über eine ausgefeilte Bordelektronik, die die Lageregelung des Kopters sicherstellt; sie sind wie Hubschrauber, zu denen sie technisch gehören, in der Lage, auf der Stelle zu schweben.<sup>8</sup> Im Gegensatz zum klassischen Modell-Helikopter werden die Motoren direkt angetrieben: Die Propeller sitzen fest auf den Motorachsen, Lageänderungen des Kopters werden nur durch unterschiedliche Drehzahlen und damit unterschiedlichen Schub der einzelnen Motoren erreicht. Damit entfällt die aufwendige, störanfällige Rotorkopfmechanik eines Modell-Helikopters, Multikopter sind aufgrund ihrer mechanisch simplen Konstruktion erheblich robuster und wartungsfreundlicher. Die den Piloten unterstützende Lageregelungs-Elektronik vereinfacht zudem das Fliegen erheblich, gleichzeitig entstehen durch das Aufteilen des Schubs auf mehrere Propeller deutlich weniger Vibrationen als bei einem Modell-Heli, was die Verwendung als Kameraträger erleichtert.

Für archäologische Zwecke werden Multikopter im Allgemeinen mit Standard-Digitalkameras ausgerüstet,<sup>9</sup> in anderen Anwendungsbereichen werden etwa auch Wärmebild- oder Infrarotkameras genutzt, beispielsweise zum Auffinden vermisster Personen oder vom Ausmähen bedrohter Rehkitze, zur Kontrolle technischer Anlagen wie Solardächer oder Deiche sowie in der Landwirtschaft. Als Nutzlast für Multikopter eignen sich jedoch auch andere Messinstrumente, z. B. Sensoren für die Detektion von Brandgasen bei Feuerwehreinsätzen.

Rechtlich werden Drohnen in der Schweiz nicht von anderen ferngesteuerten Flugmodellen unterschieden, es gelten mithin dieselben gesetzlichen Regelungen: UAVs mit einem Gewicht von bis zu 30 Kilogramm können bewilligungsfrei geflogen werden, sofern die Regularien der «Verordnung des UVEK über Luftfahrzeuge besonderer Kategorien» eingehalten werden.<sup>10</sup> Dabei spielt es – anders als etwa in Deutschland – keine Rolle, ob der Drohneinsatz privat oder gewerbsmässig erfolgt. Vorgeschrieben ist neben einer entsprechenden Versicherung mit ausreichender Deckung ein ständiger Blickkontakt des Piloten zur Drohne, um auch bei einem autonomen Flug im Notfall manuell in die Steuerung eingreifen zu können. Diese Bestimmung limitiert den Einsatzradius des UAV auf den wenige hundert Meter betragenden Sichtbereich des Piloten, was in der archäologischen Praxis jedoch kaum Einschränkungen nach sich zieht. Sofern nicht gegen das Datenschutzgesetz und den Schutz der Privatsphäre verstossen wird und die Vorschriften zum Schutz militärischer Anlagen beachtet werden, gibt es auch keine Einschränkungen beim Erstellen von Luftbildern. Einschränkungen bestehen lediglich in der Nähe von Flughäfen und -plätzen, um die Sicherheit der bemannten Luftfahrt zu gewährleisten: Von Flugpisten ist ein Abstand von 5 km einzuhalten, in Zonen kontrollierten Luftraums (Kontrollzonen, CTR) dürfen 150 m Flughöhe nicht überschritten werden. Für den Drohneneinsatz auf der Grabung in Cham-Oberwil, Hof<sup>11</sup>

<sup>6</sup> Die Verwendung des Begriffs Drohne (englisch *drone*) in diesem Zusammenhang wird kontrovers diskutiert. Während Teile der Szene ihre Fluggeräte durchaus als Drohnen bezeichnen – etwa die Community von *diydrone.com* oder das Naturschutzprojekt *conservationdrones.org* –, lehnen andere diese Bezeichnung kategorisch ab, um sich auch begrifflich von militärisch genutzten, bewaffneten Kampfdrohnen abzugrenzen. Im deutschsprachigen Raum hat sich die Bezeichnung Drohne jedoch weitgehend als allgemeinverständlicher Ausdruck für das Akronym UAV durchgesetzt. Im vorliegenden Text werden die Begriffe synonym verwendet.

<sup>7</sup> Zur Terminologie vgl. Watts et al. 2012.

<sup>8</sup> Zu den technischen Grundlagen vgl. Büchi 2010.

<sup>9</sup> Vgl. etwa Oczipka et al. 2009. – Sauerbier/Eisenbeiß 2010. – Seitz et al. 2010. – Bankel/Strellen 2011. – Hendrickx et al. 2011. – Seitz/Altenbach 2011. – Reitmaier 2011. – Remondino et al. 2011. – Lambers/Zingman 2012, 83–85. – Novák et al. 2012. – Rinaudo et al. 2012. – Neuhauser et al. 2013.

<sup>10</sup> BAZL o. J. – UVEK 2013, besonders 7. Abschnitt, Art. 17 und 18.

<sup>11</sup> Vgl. Fundmeldung in diesem Band und Reinhard et al. 2013.



Abb. 2  
Schrägbild der Grabungssituation in Cham-Oberwil, Hof, im Oktober 2012. Im Bildvordergrund finden der Abtrag des Pflughorizontes mit dem Bagger und das anschliessende Freilegen der archäologischen Schichten von Hand statt. Im Hintergrund ist links der namensgebende Bauernhof vor der Ortschaft Niederwil und rechts die die Rettungsgrabung auslösende Kiesgrube und ein Rest des Äbnetwaldes zu sehen. Blick nach Westnordwest.

(Abb. 2 und 3) ist daher eine Ausnahmegenehmigung erforderlich, da die Grabung innerhalb des 5-km-Radius um den Flugplatz Hausen am Albis liegt.

### Zwei Hexakopter für die Grabungsdokumentation

Dem Amt für Denkmalpflege und Archäologie des Kantons Zug steht seit März 2012 ein Hexakopter für fotografische Zwecke zur Verfügung, Anfang 2013 wurde aus Redundanzgründen ein zweiter Hexakopter aufgebaut (Abb. 4).<sup>12</sup> Die Flugsteuerung beider Systeme basiert auf der Mikrokopter-Elektronik der deutschen Firma HiSystems GmbH.<sup>13</sup> Dieses modulare System verfügt – voll ausgebaut – neben den für die Lageregelung unabdingbaren, die Bewegungen des Kopters detektierenden Drehratensensoren (Gyroskopen) über einen elektronischen Kompass, einen Höhenregler und GPS. Die Zusatzsensoren erlauben es, auch die absolute Lage und Ausrichtung des Kopters im Raum zu erfassen. Damit sind so ausgestattete Systeme in der Lage, (Wind-)Abdrift zu korrigieren und ohne Eingreifen des Piloten präzise an einem Punkt im Raum zu schweben. Zudem ist es möglich, den Kopter durch dreidimensionale Koordinaten definierte Punkte im Raum anfliegen zu lassen beziehungsweise einer bestimmten, durch sogenannte Wegpunkte definierten Wegstrecke vollautomatisch zu



Abb. 3  
Senkrechtbild der Grabungssituation in Cham-Oberwil, Hof, Fläche Ost, im August 2012 mit verschiedenen, unterschiedlich weit ausgegrabenen Grabungsflächen. In der Bildmitte, zwischen den beiden für die Fotodokumentation nach aussen gestellten Bogenzelten, ist auf  $5 \times 12$  m eine dichte bronzezeitliche Steinpackung freigelegt, die wegartig verdichtet von Nordwesten nach Südosten zieht. Obere Bildkante gegen Norden.

folgen, um ein Gebiet, etwa zur Erstellung eines Orthofotomosaiks, systematisch abzufliegen.

Als Kamera wird eine Sony NEX-5C, eine 14,2 Megapixel auflösende Systemkamera mit APS-C-Sensor, verwendet, als Objektiv hat sich ein leichtes, kompaktes Weitwinkelobjektiv mit einer Festbrennweite von 16 mm (24 mm im Kleinbildäquivalent) bewährt. Die Kamera ist in einer unterhalb des Kopters zwischen den Landebeinen angebrachten Kamerahalterung befestigt. Dieses sogenannte

<sup>12</sup> Der erste Hexakopter erhielt die interne Bezeichnung KAZAPP (Kantonsarchäologie Zug Aerial Photography Project), der zweite die Bezeichnung ADAZADA (Amt für Denkmalpflege und Archäologie Zug Aerial Documentation Apparatus). Zusätzlich befindet sich ein Flächenflieger als Kameraträger für grossräumige Senkrechtbild-Kartografie in Vorbereitung; zu ähnlichen Systemen vgl. beispielsweise Aber et al. 2010, 110–114, Mézarós 2011 oder Koh/Wich 2012.

<sup>13</sup> <http://www.mikrokopter.de/>.

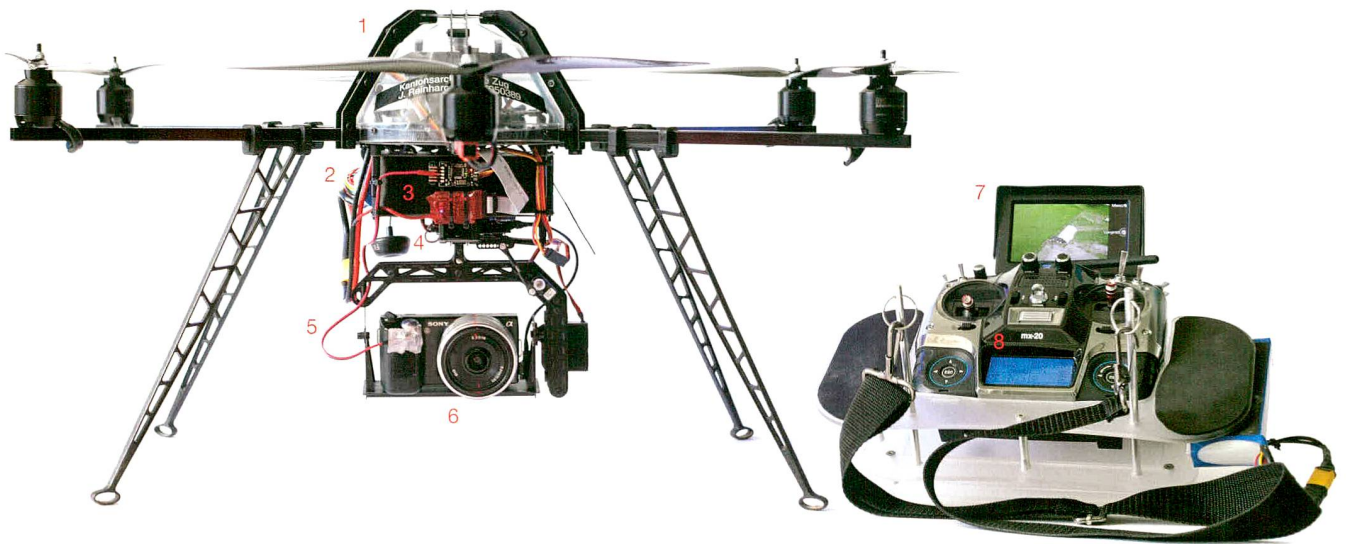


Abb. 4

Das Luftbildsystem mit seinen einzelnen Bestandteilen. Links der mit einer Kamera ausgerüstete Hexakopter, rechts die Bodenstation des Piloten mit Fernsteuerungssender und Monitor für die Kameravorschau. Bei Bedarf kann die Bodenstation um einen Laptop und zusätzliche Monitore oder Videobrillen ergänzt werden. 1 Elektronikpuckel mit Flugsteuerung, GPS-Antenne etc. 2 Akku. 3 Elektronik zur Kameraansteuerung (oben, schwarz) und Funkmodul für die Verbindung zum Laptop (unten, rot). 4 Gekapselte Sendeantenne für die Kameravorschau. 5 Kameraauslösekabel. 6 Kamera mit bewegbarer Halterung (Gimbal). 7 Monitor zur Anzeige des Vorschaubildes der Kamera. 8 Fernsteuerungssender mit Telemetrieanzeige.

Gimbal ist in zwei Achsen drehbar und gleicht über Servomotoren automatisch die Bewegungen des Kopters aus, um ein stabiles Bild der Kamera zu gewährleisten. Zusätzlich ist die Kamera aber vom Piloten per Funkfernsteuerung schwenkbar, sodass auch während des Fluges der Horizontwinkel je nach Bedarf veränderbar ist. Um gezielte Aufnahmen zu ermöglichen, wird das Live-View-Bild des Kameramonitors über eine Funkstrecke im 5,8-GHz-Band auf einen Bildschirm am Fernsteuerpult des Piloten übertragen. Wahlweise sind auch zusätzliche Monitore oder Videobrillen für weitere Personen anschliessbar, sodass beispielsweise der örtliche Grabungsleiter dem Kopteriloten Angaben bezüglich des gewünschten Bildausschnitts machen kann. Die Auslösung der Kamera erfolgt über einen Infrarot-Auslöser aktiv durch den Piloten selbst, kann aber bei Bedarf auch automatisiert in einem vorher festgelegten Zeit- oder Wegintervall, oder – im autonomen Flug – beim Erreichen eines Wegpunktes geschehen. Zur Überwachung des Fluges werden zusätzlich zum Videosignal der Kamera weitere Daten, etwa Flughöhe, Entfernung von der Startposition, Qualität des GPS-Satellitenempfangs oder verbleibende Akkuspannung, über den Rückkanal des 2,4-GHz-Fernsteuersystems auf eine Anzeige am Sender des Piloten gefunkt. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, diese und weitere Telemetriedaten mit einer 868-MHz-Funkverbindung auf einen Laptop- oder Tablet-Computer zu senden; hier können beispielsweise die Position des Kopters auf einer digitalen Karte dargestellt oder Wegpunktflüge programmiert und kontrolliert werden. Die mit Nutzlast erreichbare Flugzeit liegt je nach Flugbedingungen und Akkukapazität bei rund zwanzig Minuten. Dieser Zeitraum

reicht bei Weitem aus, um etwa Schrägbilder der Grabungssituation oder Senkrechtbilder ausgewählter Befunde oder Grabungsflächen anzufertigen. Nach einer kurzen Zwischenlandung zum Akkuwechsel ist der Kopter innerhalb weniger Minuten wieder einsatzbereit.

### 3D-Bildauswertung mit Computer Vision

Die sich durch technische Neuerungen eröffnenden Möglichkeiten betreffen aber nicht nur die Fotoaufnahmetechnik – in den letzten Jahren sind etwa auch photogrammetrische Verfahren entwickelt worden, die neue, vereinfachte Möglichkeiten in der Auswertung von Grabungsfotos bieten. Vorgestellt werden soll hier die *Structure-from-Motion-Photogrammetrie*, ein ursprünglich aus dem Bereich der Computer Vision bzw. des Maschinellen Sehens stammendes Verfahren, das es ermöglicht, aus sich überlappenden, aus unterschiedlichen Blickwinkeln fotografierten Bildern einer handelsüblichen Kamera die dreidimensionalen Eigenschaften der abgebildeten Szene abzuleiten.<sup>14</sup> Aufgrund der einfachen Handhabung und der hervorragenden Ergebnisse hat *Structure from Motion* (SfM) in kürzester Zeit unterschiedlichste archäologische Anwendungen gefunden, etwa in der Dokumentation von Ausgrabungen, antiken Steinbrüchen, historischen Gebäuden oder Felskunst, in Luftbild- und Unterwasserarchäologie und nicht zuletzt bei der Herstellung von Repliken für museale Zwecke.<sup>15</sup>

<sup>14</sup> Dieser Teil des vorliegenden Artikels basiert auf einem beim 4. Workshop der Arbeitsgemeinschaft «Computeranwendungen und Quantitative Methoden in der Archäologie» (CAA) am 15. Februar 2013 in Berlin gehaltenen Vortrag. Er stellt eine gekürzte und überarbeitete Version der Druckfassung (Reinhard im Druck) dar.

Herkömmliche Verfahren zur Aufnahme archäologischer Befunde – etwa Handzeichnungen oder tachymetrische Aufmasse – erfassen 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. 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 und teurer Software voraussetzte und daher in der Feldarchäologie ebenfalls nur selten zur Anwendung kam. Im Gegensatz zu klassisch-photogrammetrischen Methoden ist bei der SfM-Photogrammetrie weder eine Kalibrierung der Kamera notwendig noch müssen die Kamerapositionen im Moment der Aufnahme der Bilder bekannt sein. Die Bezeichnung *Structure from Motion* («Struktur aus Bewegung») nimmt Bezug auf das dem Verfahren zugrundeliegende Prinzip: Durch die Bewegung der Kamera um das Motiv und die sich daraus ergebenden unterschiedlichen Aufnahmewinkel können die dreidimensionalen Eigenschaften der Szene errechnet werden. Voraussetzung für die Anwendung ist lediglich eine gute Stereoabdeckung des Motivs; jeder Punkt der Szene muss auf mindestens zwei Bildern abgebildet sein, um im fertigen 3D-Modell rekonstruiert werden zu können. Einschränkungen ergeben sich bei der Rekonstruktion von Objekten oder Szenen mit reflektierenden oder untexturierten Oberflächen, da hier nicht genug Punkte erkannt werden können; bei archäologischen Befunden ist dies jedoch kaum der Fall. Auch können nur unbewegte Objekte bzw. Szenen dargestellt werden, eine Veränderung der Position eines Objekts während des Fotografierens führt zu Fehlern. Bei der Feldarbeit zu berücksichtigen ist zusätzlich die Empfindlichkeit der Algorithmen gegenüber Beleuchtungsunterschieden: Bei unterschiedlichen Sonnenständen oder sich verändernder 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 und bei möglichst diffuser Beleuchtung fotografiert werden.<sup>16</sup> Die benötigte technische Ausrüstung für die Datenaufnahme im Feld ist minimal und beschränkt sich auf eine (digitale) Kamera<sup>17</sup> und Vermessungsgerät für die Aufnahme von Passpunkten am Boden, um das fertige 3D-Modell später georeferenzieren zu können; beides ist auf jeder Ausgrabung bereits vorhanden. Bei der Berechnung des 3D-Modells selbst ist ein leistungsfähiger Computer unabdingbar, insbesondere was die Menge des verfügbaren Arbeitsspeichers und die Grafikkarte betrifft; für gute Ergebnisse reicht hier jedoch bereits ein Modell der gehobenen Mittelklasse aus. Die per SfM-Photogrammetrie erreichbare Präzision kann dabei mit der Präzision sowohl terrestrischer Laserscanner als auch des Airborne Laser-scannings (ALS) mithalten;<sup>18</sup> sie wird wie auch die erreichbare Messdichte durch die Auflösung des verwendeten Bildmaterials bestimmt, die wiederum ihrerseits vom Abstand zwischen Kamera und abgebildetem Objekt sowie den Kameraparametern abhängig ist. Allerdings weisen SfM-Punktwolken im Gegensatz zu Laserscannern eine unregelmässige, von der Menge der in den Ausgangsbildern erfassten Punkte abhängige Dichte auf, eine präzise Angabe der Messdichte eines SfM-3D-Modells ist daher nicht ohne Weiteres möglich. Für die Masse der archäologischen Anwendungen dürfte die Qualität der durch SfM-Photogrammetrie erreichten Ergebnisse aber weit ausreichend sein, zumal der Einsatz von Laserscannern für den Grossteil der Grabungsprojekte keine Alternative darstellt.

### **SfM-Photogrammetrie am Beispiel Cham-Grindel**

Der Arbeitsablauf für die Erstellung eines georeferenzierten 3D-Modells soll hier am Beispiel eines Befundes aus Cham-Grindel<sup>19</sup> erfolgen. Bei der Erneuerung des Verkehrskreisels wurde im September 2012 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 (Abb. 5).<sup>20</sup> Da das vom Baufortschritt vorgegebene Zeitfenster eine konventionelle zeichnerische

<sup>15</sup> Etwa Sedlazeck et al. 2010. – Doneus 2011. – Ducke et al. 2011, 2013. – Lobell 2011. – Krenn-Leeb et al. 2012. – Plets et al. 2012a, 2012b. – Reinhard 2012. – Stal et al. 2012. – Verhoeven et al. 2012a, 2012b. – De Reu et al. 2013. – Fassi et al. 2013. – Koska/Křemen 2013 (in Kombination mit Laserscanner-Daten). – Levy et al. 2013.

<sup>16</sup> Es ist damit zu rechnen, dass diese und andere Einschränkungen durch verbesserte Algorithmen zukünftig deutlich gemildert werden. Zu verschiedenen Zeitpunkten erstellte Einzelmodelle können bereits jetzt mit entsprechender 3D-Software problemlos zusammengeführt werden.

<sup>17</sup> Die Verwendung von digitalem Bildmaterial hat gegenüber gescannten analogen Bildern deutliche Vorteile, ist aber nicht zwingend. Auch

die Bearbeitung von Schwarz-Weiss-, Falschfarben- und Multispektral-Bildern ist möglich.

<sup>18</sup> Doneus et al. 2011, 84 f. – Ducke et al. 2011, 380. – Fassi et al. 2013. – Zur Präzision der Georeferenzierung vgl. auch Verhoeven et al. 2012b, 1122–1126 und De Reu et al. 2013. – Stal et al. 2012 bieten zudem einen Vergleich eines mit PhotoScan errechneten digitalen Höhenmodells mit Lidar-Daten.

<sup>19</sup> Amt für Denkmalpflege und Archäologie des Kantons Zug, Direktion des Innern, Ereignisnr. 2-1906-12, Ausbau Knoten Grindel-Bibersee, Pos. 7.

<sup>20</sup> Vgl. Fundmeldung in diesem Band (S. 30f.).



Abb. 5  
Freilegung einer urgeschichtlichen, Keramikfragmente und Holzkohle führenden Steinpackung in Cham-Grindel. Im Bildvordergrund der auf einer RAKO-Kiste zum Start bereitstehende Hexakopter, im Hintergrund der im Bau befindliche neue Verkehrskreisel. Blick nach Südosten.

Aufnahme nicht zulässig, wurde der Befund für eine Orthofotoerstellung zusätzlich zur üblichen Grabungsfotografie vom Boden und von der Fotoleiter aus mit einer Senkrechtaufnahme von einem der oben beschriebenen Hexakopter aus dokumentiert. Die Flughöhe lag dabei im Schnitt bei etwa 13 m, als Kamera kam eine Canon PowerShot G11 mit 10 Megapixeln zum Einsatz. Für die spätere Georeferenzierung wurden am Boden um die Steinpackung herum Passpunkte aus mit einem Schachbrettmuster bemalten Plastikkarten gesetzt und tachymetrisch eingemessen. Das aus dem Drohnenflug resultierende Bildmaterial wurde unbearbeitet in die SfM-Software geladen.<sup>21</sup> In einem vorbereitenden Arbeitsschritt können in der Software unerwünschte Bereiche, im vorliegenden Fall ein sich am Rand der Szene bewegendes Baustellenfahrzeug, auf einzelnen Bildern maskiert und damit von der weiteren Bearbeitung ausgeschlossen werden. Die eigentliche Berechnung des

3D-Modells erfolgt in drei weitgehend automatisierten Schritten: Zunächst ermittelt die verwendete SfM-Software charakteristische Punkte in den einzelnen Fotos, diese werden über die gesamte Bildserie miteinander korreliert (Abb. 6). Ausgehend von den erkannten Verknüpfungspunkten werden die Lage der Bilder zueinander und damit auch die Positionen der Kamera zum Zeitpunkt der Aufnahmen (äussere Orientierung, Abb. 7) sowie die Kameraparameter (innere Orientierung, etwa die Brennweite) be-

<sup>21</sup> Eingesetzt wurde das seit Mitte 2010 erhältliche Programm Agisoft PhotoScan Professional Edition der russischen Softwarefirma Agisoft LLC (<http://agisoft.ru/> – Verhoeven 2011a, 2011b. – Verhoeven et al. 2012c). – Zu alternativer SfM-Software vgl. Reinhard im Druck, Tab. 1.

<sup>22</sup> Für Fundgegenstände reicht die Angabe der Länge einer bekannten Strecke im 3D-Modell, z. B. die eines mitfotografierten Massstabes, aus, um das Modell absolut zu skalieren.

<sup>23</sup> Amt für Denkmalpflege und Archäologie des Kantons Zug, Direktion des Innern, Ereignisnr. 2-1847-11, Cham, Klostermatt.

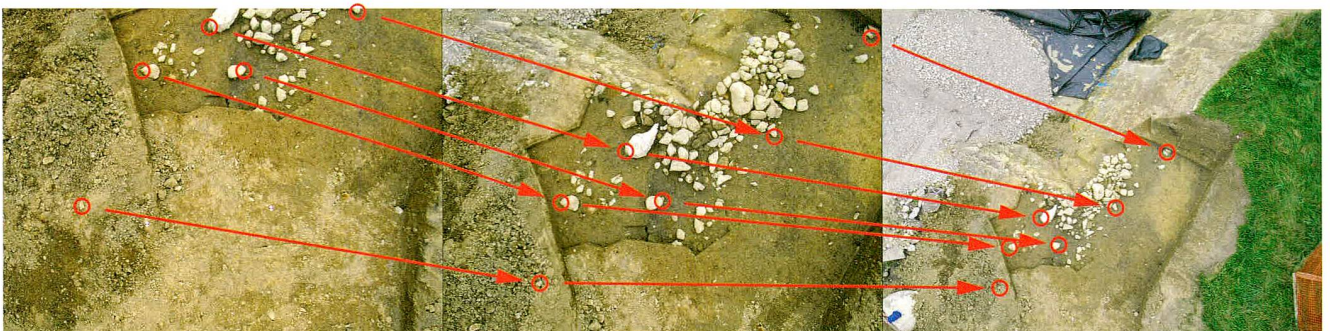


Abb. 6  
Voraussetzung für das Structure-from-Motion-Verfahren sind aus unterschiedlichen Blickwinkeln aufgenommene, sich stark überlappende Bilder derselben Szene, hier als Beispiele drei Senkrechtaufnahmen des Kopterfluges aus Cham-Grindel. In den Ausgangsbildern ermittelt die Software charakteristische Punkte (Kreise), die dann über die einzelnen Bilder miteinander verknüpft werden (Pfeile).

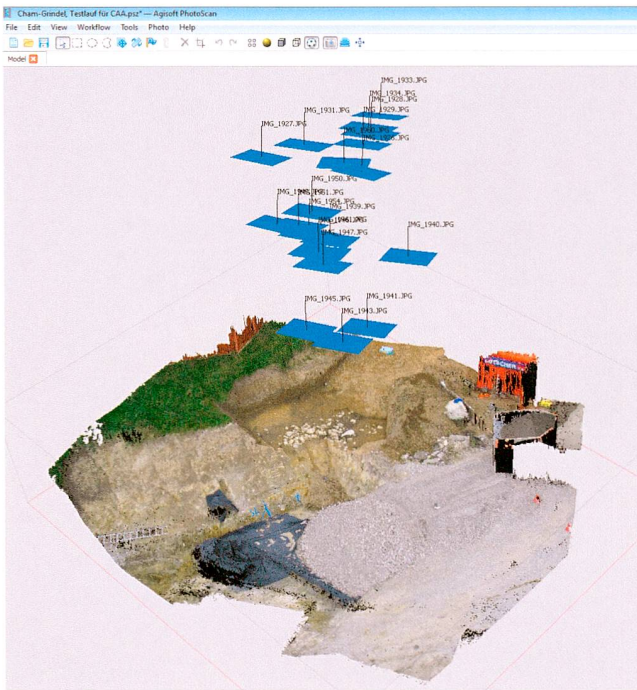


Abb. 7  
Cham-Grindel, Bildschirmfoto mit Darstellung der Kamerapositionen der einzelnen verrechneten Bilder (äussere Orientierung) und der damit rekonstruierbaren Szene. Die blauen Flächen symbolisieren die Aufnahmestandorte der einzelnen Fotos bzw. die Sensorebene der Kamera zum Aufnahmezeitpunkt.

stimmt. Das Resultat ist eine dreidimensionale Punktwolke, die sogenannte *Sparse Point Cloud*; dieses ist der Rechen-schritt, in dem die eigentlichen SfM-Algorithmen zur An-

wendung kommen. In einem zweiten, besonders rechen-intensiven Schritt wird diese erste Punktwolke verdichtet und das eigentliche 3D-Gittermodell errechnet. Schliesslich kann aus den verwendeten Fotos eine fotorealistische Textur des 3D-Modells abgeleitet und über das 3D-Modell gelegt werden (Abb. 8).

Auf die 3D-Modellierung (Abb. 9) folgt üblicherweise eine Georeferenzierung des fertigen Modells, da dieses zu-nächst in einem eigenen Modell-Koordinatensystem vor-liegt, das noch in die – beispielsweise – Schweizer Landes-koordinaten transformiert werden muss.<sup>22</sup> Dabei werden den im 3D-Modell sichtbaren Passpunkten ihre vorgängig eingemessenen Koordinaten zugeordnet. Im Fall von Cham-Grindel beträgt der Abweichungsfehler rund 5 mm; dieses Ergebnis entspricht etwa der Breite der für die Pass-punkte verwendeten Nägel und kann als völlig ausreichend angesehen werden. Die Georeferenzierung ermöglicht nun neben dem Abgreifen von Massen im 3D-Modell selbst den Export von abgeleiteten Daten wie Orthofotos oder Digitalen Oberflächenmodellen (DOMs), die zur weiteren Verwendung in CAD- oder GIS-Programme integriert werden können (Abb. 10).

### SfM-Photogrammetrie am Beispiel Cham-Klostermatt

Als Beispiel für die Anwendung der SfM-Photogram-metrie mit konventionellen, vom Boden bzw. der Leiter aus fotografierten Bildern soll hier die Grabung auf der Kloster-matt in Cham<sup>23</sup> vorgestellt werden. Im Bereich einer neuen Wohnüberbauung konnten baubegleitend Befunde der

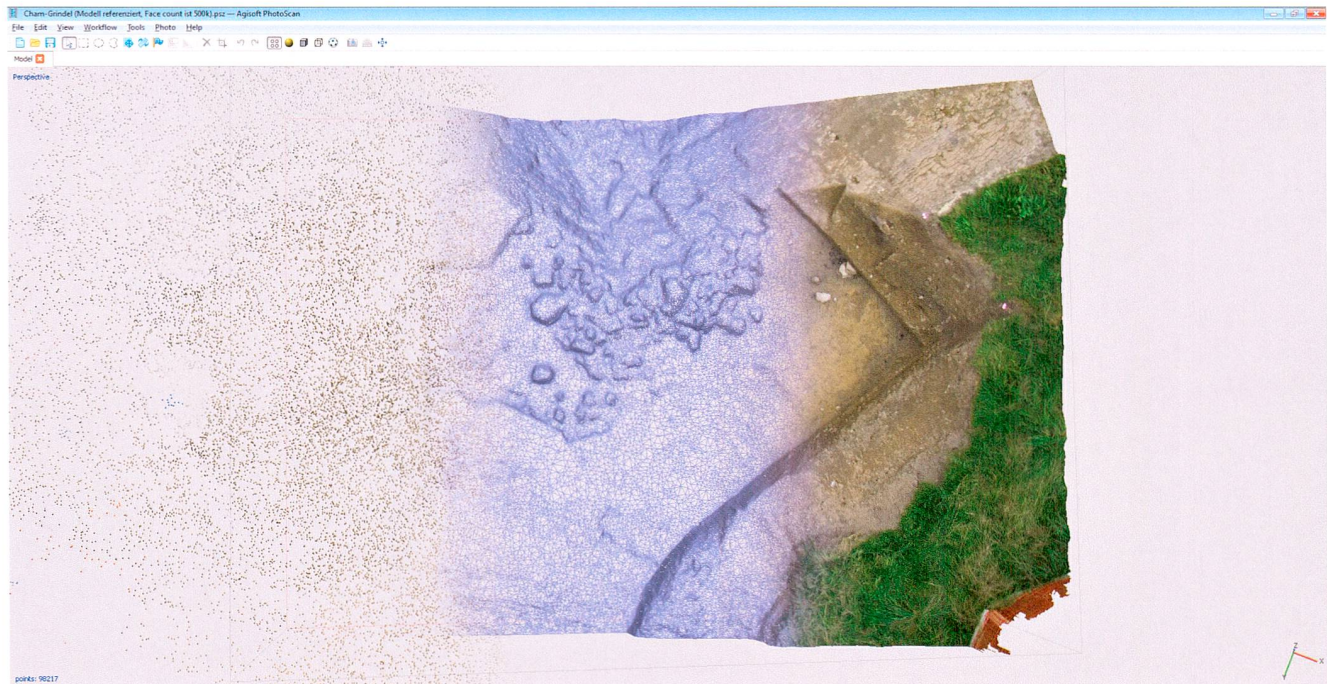


Abb. 8  
Rechenschritte bei der Erstellung eines 3D-Modells am Beispiel Cham-Grindel. Links die mit Hilfe der SfM-Algorithmen errechnete Punktwolke (*Sparse Point Cloud*), in der Mitte das verdichtete und vermaschte 3D-Modell mit sich bereits deutlich dreidimensional abzeichnenden Befundstruk-turen und rechts das fotorealistisch texturierte 3D-Modell.





Abb. 9  
Cham-Grindel. Fertiges, auf den Bereich der Stein-  
packung zugeschnittenes 3D-Modell. Das Modell ist  
in diesem Arbeitsschritt weder skaliert noch  
georeferenziert.

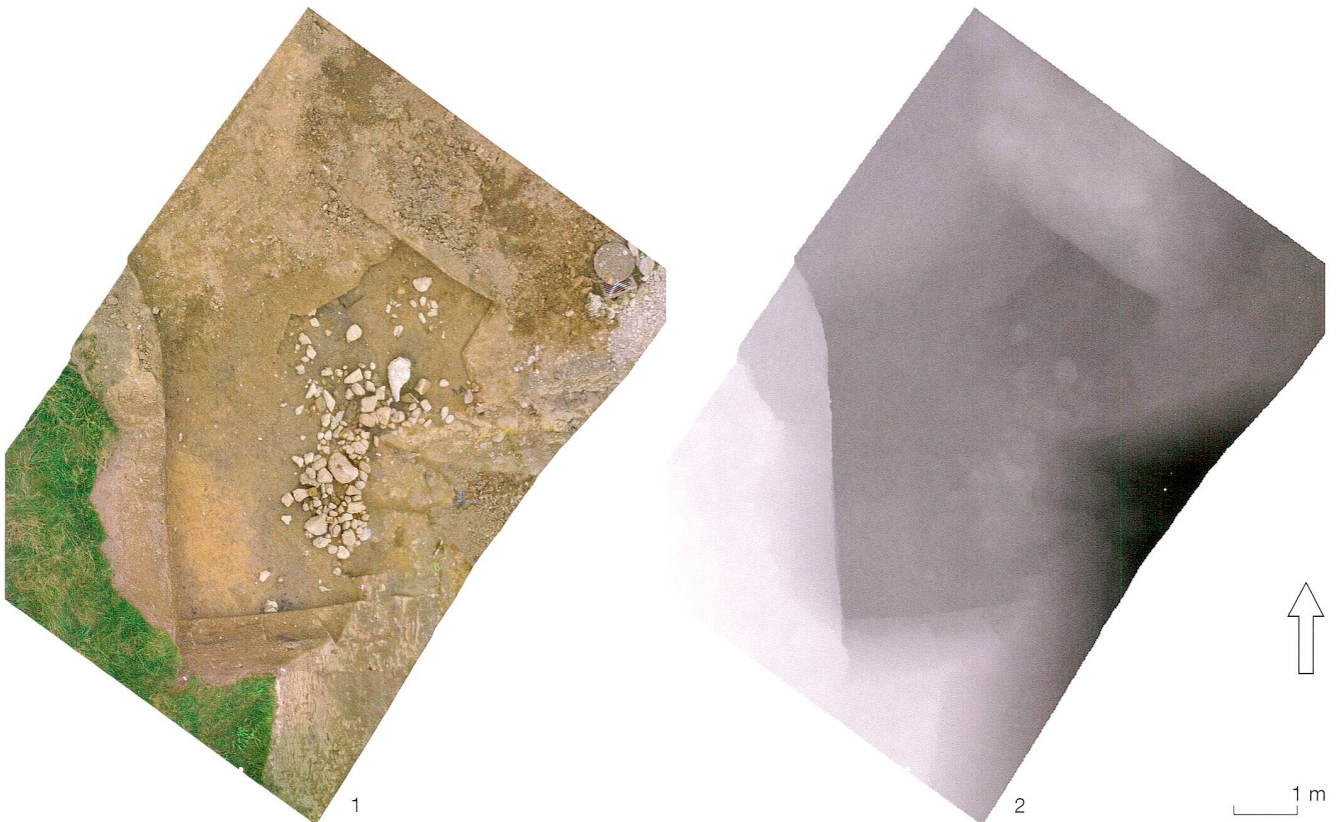


Abb. 10  
In eine CAD- oder GIS-Umgebung einbindbare Rasterdaten am Beispiel der Steinpackung aus Cham-Grindel. 1 Georeferenziertes und damit ge-  
nordetes, lagegetreues Orthofoto. 2 Digitales Oberflächenmodell (DOM) in Graustufen von schwarz (= 421,8 m ü. M.) bis weiss (= 425,59 m ü. M.).

Spätbronze- bis Karolingerzeit ergraben werden, darunter eine Reihe von Grubenhäusern, die wohl ins frühe Mittelalter zu stellen sind. Mit Hilfe des Metalldetektors wurde zudem eine Reihe von Trachtbestandteilen derselben Zeitstellung aus dem Pflughorizont geborgen.<sup>24</sup> Kurz vor dem Jahresende 2011 wurde eine kleine Grabgruppe des 9. Jahrhunderts freigelegt, die als erster Test für die Anwendung der SfM-Photogrammetrie dienen sollte (Abb. 11). Das Fotografieren der Befunde erwies sich als schwierig, da

um die direkt an der Böschungskante der bereits ausgehobenen Baugrube liegende Grabgruppe herum nur wenig Platz war, um die Fotoleiter aufzustellen, ohne umliegende Befunde zu gefährden. Das aus insgesamt 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

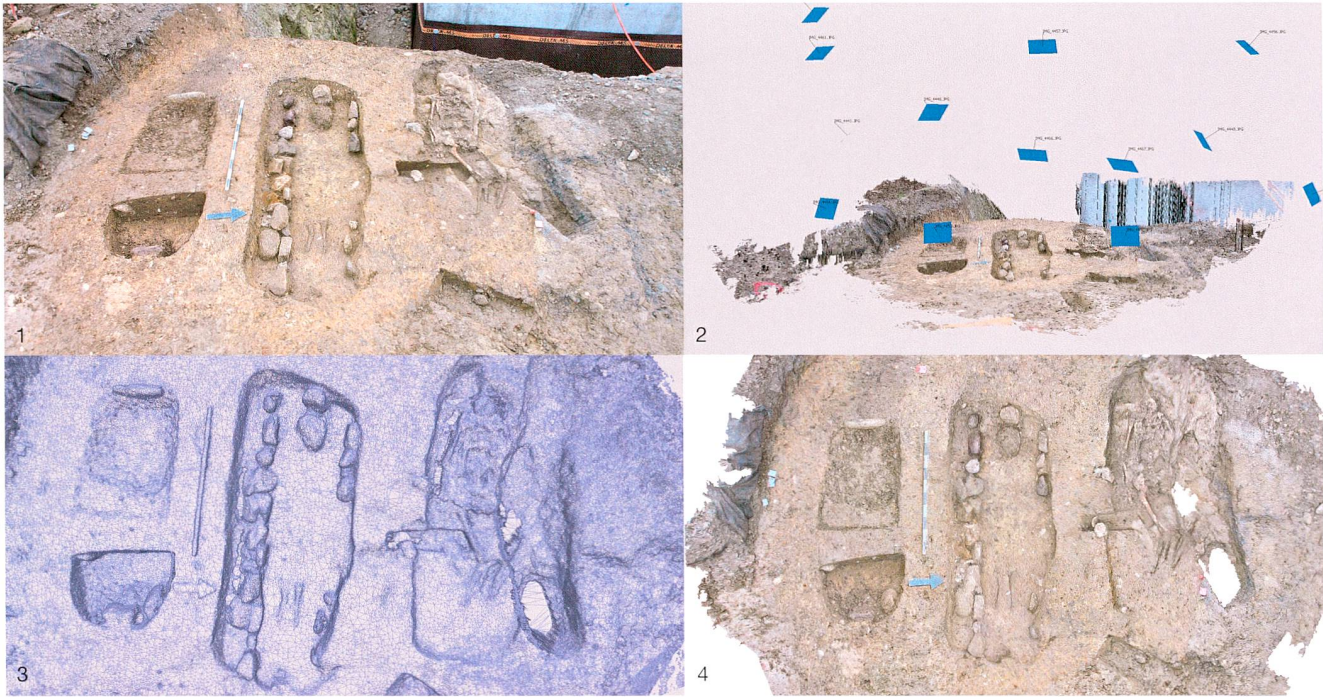


Abb. 11  
 Cham-Klostermatt, Grabgruppe des 9. Jahrhunderts. 1 Originalbild. 2 Darstellung der Kamerapositionen (äussere Orientierung) und der damit rekonstruierbaren Szene. 3 Vermaschtes 3D-Modell, der sich abzeichnende Nordpfeil ist 4 mm stark. 4 Orthofoto mit deutlichen Löchern durch mangelnde Stereoabdeckung im Bereich des rechten, nördlichen Grabes (vgl. auch 3).

Sperrholz gefertigte Nordpfeil zeichnet sich im Gittermodell deutlich ab! Der von PhotoScan angegebene Fehler in der Georeferenzierung beträgt lediglich 6,8 mm, allerdings waren im 3D-Modell nur drei der am Boden eingemessenen 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 Digitalen Oberflächenmodell und den mit einem einfachen Nivelliergerät im Feld bestimmten Höhenangaben lediglich 1–2 cm. Die Unterschiede liegen damit im Bereich der üblicherweise bei Grabungsnivellements erreichten Ables- bzw. Rundungsgenauigkeit. Bei genauerer Betrachtung des 3D-Modells fällt allerdings auf, dass das Modell Löcher aufweist, die aus mangelnder Stereoabdeckung der Ausgangsbilder in diesem Bereich resultieren. Hier fehlen, bedingt durch die schlechte Zugänglichkeit beim Fotografieren bzw. die Abschattung in den Profilschnitten, schlicht Bildinformationen. Abhilfe schaffen können hier nur zusätzliche Bilder, die den Befund möglichst senkrecht von oben abbilden. Aus dieser Erfahrung heraus wird auf den Grabungen des Amtes für Denkmalpflege und Archäologie des Kantons Zug seit Herbst 2012 als Ergänzung zur Schrägfotografie von der Leiter aus ein Monostativ, der «PhotoMob», verwendet (Abb. 12).<sup>25</sup> Mit diesem Fotogalgen können Senkrechtfotos aus einer

Höhe bis etwa 3,5 m auch ohne Zuhilfenahme eines UAVs erstellt werden, das System ist dabei so ausgelegt, dass mit einem entsprechenden Weitwinkelobjektiv eine Grabungsfläche von 4 × 5 m auch innerhalb eines Grabungszeltes vollständig abgebildet werden kann. Ähnlich wie beim Kopter wird das VorschauBild der Kamera per Funk auf den Monitor eines Handgeräts gesendet, sodass der Bildausschnitt beurteilt werden kann; das Auslösesignal für die Kamera wird ebenfalls von diesem Handgerät aus an die Kamera übermittelt.

#### Fazit

Mit der *Structure-from-Motion-Photogrammetrie* steht der Archäologie eine neue, hochpräzise dreidimensionale Dokumentationsmethode zur Verfügung, die einfach, universell und breit skaliert – von der Fundmünze bis zur Landschaftsrekonstruktion – anwendbar ist und die sich ideal zur Ergänzung der konventionellen Dokumentation von Ausgrabungen eignet. Auch wenn die Erstellung von 3D-Modellen der höchsten Qualitätsstufe mittelfristig noch eher in der abschliessenden Grabungsauswertung stattfinden wird, ist es bereits jetzt 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. Die per *Structure from Motion* (SfM) erstellten Orthofotos können aber auch als Grundlage für die zeichnerische Befunddokumentation verwendet werden: Da ein georektifiziertes Orthofoto

<sup>24</sup> Meyer et al. 2012a, 2012b.

<sup>25</sup> Krenn-Leeb et al. 2012, 22 f.

Abb. 12  
 Anwendung des «PhotoMob»  
 auf der Grabung Zugerstrasse  
 112 in Cham (Ereignisnr.  
 2-448.06-12/13). Eine Person  
 hält den Fotogalgen mit der  
 Kamera und richtet diese über  
 dem Motiv aus, eine zweite  
 Person kann – ähnlich wie beim  
 Kopter – über einen Vorschau-  
 monitor den Bildausschnitt  
 beurteilen und die Kamera aus-  
 lösen.



verzerrungsfrei und massstabsgetreu ist, bildet es den Befund bereits präzise ab, die darüber hinaus notwendige zeichnerische Aufnahme eines Befundes beschränkt sich auf die Ergänzung der archäologisch relevanten, die eigentliche Feldarbeit ausmachenden Zusatzinformationen wie Befundgrenzen, Positionsnummern, Fundnummern, Anmerkungen etc. Dieses Vorgehen vereinfacht und beschleunigt den Zeichenvorgang deutlich.<sup>26</sup> Gleichzeitig wird das Nivellieren von Hand durch ein hochpräzises, dichtes Digitales Oberflächenmodell ersetzt, dessen Qualität ausreichend ist, um z. B. auch die Volumina von Schichtabträgen zu bestimmen. Dies ist für eine ganze Reihe von Forschungsfragen relevant, so ist mit diesem methodischen Ansatz etwa die Mengenverteilung von Keramikfragmenten oder botanischen Makroresten präzise bestimmbar.

Ebenfalls bisher nur in Ansätzen erschlossen ist das Potenzial von 3D-Daten für museale Präsentationen, Internetauftritte oder 3D-Druck. Eine besondere Stärke spielt

die SfM-Photogrammetrie in Verbindung mit Luftaufnahmen aus – abgesehen von der Möglichkeit, historisches Bildmaterial zu verwenden,<sup>27</sup> eignet sich SfM ideal für die Auswertung von Nahbereichsluftbildern. Die Kombination von SfM-Photogrammetrie und UAVs erschliesst der Feldarchäologie kostengünstige und zeitsparende neue Möglichkeiten, um auch grossräumige und komplexe dreidimensionale Befundsituationen präzise zu erfassen. Die technische Entwicklung ist dabei bei Weitem noch nicht abgeschlossen.

<sup>26</sup> Eine solche Vorgehensweise ist bislang in erster Linie für Profile eingesetzt worden. Profilflächen bilden jedoch idealerweise eine einheitliche Entzerrungsebene, sodass Aufnahmen lotrecht auf die Profilebene zweidimensional entzerrt und über Passpunkte zusammengefügt werden können. Plana weisen bei Schichtgrabungen üblicherweise eine deutliche Dreidimensionalität auf, ein Versatz von Bildelementen durch die Zentralperspektive der Kamera wirkt sich erheblich stärker aus.

<sup>27</sup> Reinhard im Druck.

## Literatur

- James S. Aber, Irene Marzoff und Johannes B. Ries, *Small-Format Aerial Photography. Principles, Techniques and Geoscience Applications*. Amsterdam 2010.
- Frank Addison, *Jebel Moya. The Wellcome Excavations in the Sudan I + II*. London 1949.
- Hansgeorg Bankel und Thomas Strellen, *Photogrammetrische Vermessung der römischen Stadt Minturnae mit einer GPS-gesteuerten Drohne – ein Erfahrungsbericht*. In: Katja Heine, Klaus Rheidt, Frank Henze und Alexandra Riedel (Hg.), *Von Handaufmass bis High Tech III. Erfassen, Modellieren, Visualisieren. 3D in der historischen Bauforschung [Kolloquium vom 24.–27. Februar 2010 in Cottbus]*. Darmstadt 2011, 233–243.
- Bundesamt für Zivilluftfahrt, *Drohnen und Flugmodelle*. <http://www.bazl.admin.ch/dienstleistungen/02658/> (abgerufen am 28.05.2013) [zitiert als *BAZL o. J.*].
- Roland Büchi, *Faszination Quadropter. Technik – Elektronik – Flugpraxis*. Baden-Baden 2010.
- Filiberto Chiabrando, Francesco Nex, Dario Piatti und Fulvio Rinaudo, *UAV and RPV systems for photogrammetric surveys in archaeological areas: two tests in the Piedmont region (Italy)*. *Journal of Archaeological Science* 38, 2011, 697–710.
- Jeroen 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 Clercq, *Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage*. *Journal of Archaeological Science* 40, 2013, 1108–1121.
- 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 [XXIII<sup>rd</sup> International CIPA Symposium, 12.–16. September 2011 in Prag, Tschechische Republik]*. *Geoinformatics* 6, 2011, 81–88.
- 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.
- Benjamin Ducke, Flemming Højlund, Jonatan Rose Anderson und Shehab A. H. Shehab, *Image-based Reconstruction. Flexible and Low-cost 3D Recording of Architecture, Artefacts, Anything*. In: Regina Franken-Wendelstorf, Elisabeth Lindinger und Jürgen Sieck (Hg.), *Kultur und Informatik: Visual Worlds & Interactive Spaces*. Glückstadt 2013, 147–157.
- Henri Eisenbeiß, *UAV Photogrammetry*. Zürich 2009 (IGP Mitteilungen 105).
- Henri Eisenbeiß und Martin Sauerbier, *Investigation of UAV systems and flight modes for photogrammetric applications*. *The Photogrammetric Record* 26/136, 2011, 400–421.
- 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 [3D-ARCH 2013 – 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, 25.–26. Februar 2013, Trento, Italy], 2103, 73–80. <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-5-W1/> (abgerufen am 18.05.2013).
- Marijn Hendrickx, Wouter Gheyle, Johan Bonne, Jean Bourgeois, Alain De Wulf und Rudi Goossens, *The use of stereoscopic images taken from a microdrone for the documentation of heritage. An example from the Tuekta burial mounds in the Russian Altay*. *Journal of Archaeological Science* 38, 2011, 2968–2978.
- Lian Pin Koh und Serge A. Wich, *Dawn of drone ecology: low-cost autonomous aerial vehicles for conservation*. *Tropical Conservation Science* 5/2, 2012, 121–132.
- Bronislav Koska und Tomas Křemen, *The combination of Laser Scanning and Structure from Motion technology for creation of accurate exterior and interior orthofotos of St. Nicholas baroque church*. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 40-5/W1 [3D-ARCH 2013 – 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, 25.–26. Februar 2013, Trento, Italy], 2103, 133–138. <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-5-W1/> (abgerufen am 18.05.2013).
- 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.
- Karl Kriegler, *Über photographische Aufnahmen prähistorischer Gräber*. *Mitteilungen der Anthropologischen Gesellschaft in Wien* 58, 1928, 113–116.
- Karsten Lambers und Igor Zingman, *Am Boden, aus der Luft, aus dem All. Prospektion archäologischer Fundstellen in der Silvretta*. In: Thomas Reitmaier (Hg.), *Letzte Jäger, erste Hirten. Hochalpine Archäologie in der Silvretta*. Chur 2012 (Archäologie in Graubünden Sonderheft 1), 71–85.
- Jarrett A. Lobell, *Pompeii's Dead Reimagined*. *Archaeology* 64/5, 2011, 39–41.
- 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*. <http://antiquity.ac.uk/projgall/levy335/> (abgerufen am 28.02.2013).
- János Mészáros, *Aerial surveying UAV based on open-source hardware and software*. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 38-1/C22 [UAV-g 2011, Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, Zurich, Switzerland], 2011. [http://www.geometh.ethz.ch/uav\\_g/proceedings/meszoros](http://www.geometh.ethz.ch/uav_g/proceedings/meszoros) (abgerufen am 01.07.2013).
- [Sabrina Meyer, Gishan Schaeren und Kilian Weber], *Cham, Klostermatt: Rettungsgrabung*. *Tugium* 28, 2012, 28–29.
- [Sabrina Meyer, Kilian Weber und Gishan Schaeren], *Cham ZG, Klostermatt*. *JbAS* 95, 2012, 202–203.
- Patrick Nagy, Werner Unold und Simon Vogt, *Flug in die Vergangenheit. Die Luftbildprospektion im Dienste der Archäologie*. *HA* 125/126, 2001, 32, 4–77.
- Tina Neuhauser, Oliver Pink und Silvia Zenz, *Archäologie aus der Luft – Neue Methoden*. *Forum Archaeologiae* 66/3, 2013. <http://homepage.univie.ac.at/elisabeth.trinkl/forum/forum0313/66luft.html> (abgerufen am 03.07.2013).
- David Novák, Piotr Tokarczyk und Pascal W. Theiler, *Modeling the «Plan da Mattun» archaeological site using a combination of different sensors*. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 39-B6 [XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia], 2012, 147–152.

- <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXIX-B6/147/2012isprsarchives-XXXIX-B6-147-2012.pdf> (abgerufen am 03.07.2013).
- Martin Oczipka, Jan Bemman, Henny Piezonka, J. Munkhbayar, Birte Ahrens, Markus Achtelik und Frank Lehmann, Small drones for geoarcheology in the steppes: locating and documenting the archeological heritage of the Orkhon Valley in Mongolia. In: Ulrich Michel und Daniel L. Civco (Hg.), *Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology 9*. Bellingham 2009 (Proceedings of SPIE 7478).
- 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 [zitiert als Plets et al. 2012a].
- 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 [zitiert als Plets et al. 2012b].
- Jochen Reinhard, Things on strings and complex computer algorithms. *Kite Aerial Photography and Structure from Motion Photogrammetry at the Tulul adh-Dhahab, Jordan*. *AARGnews* 45, 2012, 37–41.
- [Jochen Reinhard, Dino Zimmermann, Gishan Schaeren und Stephen Doswald], Cham ZG, Oberwil, Hof. *JbAS* 96, 2013, 178 und 221 Abb. 40.
- Jochen Reinhard, Structure-from-Motion-Photogrammetrie mit Agisoft PhotoScan – erste Erfahrungen aus der Grabungspraxis. *eTopoi – Journal for Ancient Studies* [zitiert als Reinhard im Druck].
- Thomas Reitmaier, Alles besser als Krieg. Zum sinnvollen Einsatz ferngesteuerter Drohnen in Archäologie und Denkmalpflege. In: Amt für Kultur, Archäologischer Dienst Graubünden (Hg.), *Vom Steinbeil bis zur Flintenkugel*. Festschrift Jürg Rageth. Chur 2011, 61–65.
- Fabio Remondino, Luigi Barazzetti, Francesco Nex, Marco Scaioni und Daniele Sarazzi, UAV photogrammetry for mapping and 3D modeling – current status and future perspectives. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 38-1/C22* [UAV-g 2011, Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, Zurich, Switzerland], 2011. [http://www.geometh.ethz.ch/uav\\_g/proceedings](http://www.geometh.ethz.ch/uav_g/proceedings) (abgerufen am 03.07.2013).
- Fulvio Rinaudo, Filiberto Chiabrando, Andrea Lingua und Antonia Spano, Archaeological Site Monitoring: UAV Photogrammetry can be an answer. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 39-B5* [XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia], 2012, 583–588. <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXII-B5/583/2012/isprsarchives-XXXIX-B5-583-2012.pdf> (abgerufen am 03.07.2013).
- Martin Sauerbier und Henri Eisenbeiß, UAVs for the documentation of archaeological excavations. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 38-5* [Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK. 2010], 2010. <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/part5/papers/214.pdf> (abgerufen am 03.07.2013).
- Anne Sedlazeck, Kevin Köser und Reinhard Koch, Supporting Underwater Archaeology by 3D Reconstruction from Underwater Images. *Skyllis* 10/2, 2010, 179–186.
- Christian Seitz und Holger Altenbach, Project Archeye – The Quadcopter as the Archaeologist’s Eye. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 38-1/C22* [UAV-g 2011, Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, Zurich, Switzerland], 2011. [http://www.geometh.ethz.ch/uav\\_g/proceedings/seitz](http://www.geometh.ethz.ch/uav_g/proceedings/seitz) (abgerufen am 01.07.2013).
- Christian Seitz, Holger Altenbach und Michael Winckler, Dokumentation aus der Luft. Ein neuer Ansatz in der Archäologie und Baudenkmalforschung. *THETIS – Mannheimer Beiträge zur Klassischen Archäologie und Geschichte Griechenlands und Zyperns* 16/17, 2010, 243–245.
- 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: Konstantinos G. Perakis und Athanasios K. Moysiadis (Hg.), *32nd EARSeL Symposium Proceedings – Advances in Geosciences* [Tagung Mykonos, Griechenland, 21.–24. Mai 2012]. Mykonos 2012, 81–91. [http://www.earseel.org/symposia/2012-symposium-Mykonos/Proceedings/04-01\\_EARSeL-Symposium-2012.pdf](http://www.earseel.org/symposia/2012-symposium-Mykonos/Proceedings/04-01_EARSeL-Symposium-2012.pdf) (abgerufen am 07.06.2013).
- Thomas Stern, «Zu neuen Ufern ...». Grabungstechnik und Aufbruchstimmung der Archäologie am Federsee 1919–1930. In: Erwin Keefer (Hg.), *Die Suche nach der Vergangenheit*. 120 Jahre Archäologie am Federsee [Katalog zur Ausstellung]. Stuttgart 1991, 49–53.
- Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, 748.941 Verordnung des UVEK über Luftfahrzeuge besonderer Kategorien vom 24. November 1994 (Stand am 1. Februar 2013). <http://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19940351/> (abgerufen am 28.05.2013) [zitiert als UVEK 2013].
- 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.
- Geert Verhoeven, Software Review. Taking Computer Vision Aloft – Archaeological Three-dimensional Reconstructions from Aerial Photographs with PhotoScan. *Archaeological Prospection* 18, 2011, 67–73 [zitiert als Verhoeven 2011a].
- Geert Verhoeven, Getting computer vision airborne – using Structure from Motion for accurate orthophoto production. *The Remote Sensing and Photogrammetry Society Archaeology Special Interest Group Newsletter*, Spring 2011, 4–6 [zitiert als Verhoeven 2011b].
- 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 [zitiert als Verhoeven et al. 2012a].
- 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 [zitiert als Verhoeven et al. 2012b].
- Geert Verhoeven, Michael Doneus und Christian Briese, Computer vision techniques: towards automated orthophoto production. *AARGnews* 44, 2012, 8–11 [zitiert als Verhoeven et al. 2012c].
- Adam C. Watts, Vincent G. Ambrosia und Everett A. Hinkley, Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use. *Remote Sensing* 4, 2012, 1671–1692.
- Bogdan Żurawski, Low altitude aerial photography in archaeological fieldwork: the case of Nubia. *Archaeologia Polona* 31, 1993, 243–256.

