

3D-OBERFLÄCHENERFASSUNG UND ORTHOPHOTOGENERIERUNG MITTELS EINES UAS-BASIERTEN STEREOKAMERASYSTEMS AM BEISPIEL DER ARCHÄOLOGISCHEN GRABUNGSSTÄTTE DOLICHE (TÜRKEI)

Katharina Haubeck, Torsten Prinz

Zusammenfassung: Unmanned Aerial Systems (UAS) werden in den letzten Jahren vermehrt zur fotografischen Dokumentation archäologischer Grabungsareale eingesetzt. Als vielversprechende Alternative zum Einsatz monoskopischer Kamerasysteme wird eine Kombination von UAS und einer kostengünstigen kalibrierten Stereokamera (Fujifilm Finepix REAL 3D W3) vorgestellt und ihre Eignung zur 3D-Erfassung von Oberflächenstrukturen sowie der Orthophotogenerierung evaluiert. Der Vorteil eines stereoskopischen gegenüber eines monoskopischen Kamerasystems liegt dabei in der definierten geometrischen Beziehung der Stereohalbbilder zueinander, die eine stereophotogrammetrische Auswertung (Erstellung Digitaler Geländemodelle und Orthophotos sowie 3D-Extraktion einzelner Objekte) erlaubt. Obwohl die Genauigkeit der resultierenden DGM/Orthophotos von der Flughöhe abhängt, eröffnet ein stereoskopisches UAS-Kamerasystem eine attraktive, kostengünstige und flexible Möglichkeit zur raschen Gewinnung photogrammetrisch auswertbarer Stereobilder in der Nahbereichsphotogrammetrie.

Schlüsselwörter: Archäologie, 3D, Digitales Geländemodell, Orthophoto, UAS, Stereokamera, Nahbereichsphotogrammetrie

3D SURFACE MODELING AND ORTHOPHOTO PRODUCTION WITH A UAS-BASED STEREO CAMERA SYSTEM AT AN ARCHAEOLOGICAL EXCAVATION SITE IN DOLICHE (TURKEY)

Abstract: Unmanned Aerial Systems (UAS) have become a popular assistance tool for the photographic documentation of archaeological excavation sites. A promising alternative to the use of monoscopic camera systems for 3D surface modeling and orthophoto production is a UAS-based calibrated low-cost stereo camera system (Fujifilm Finepix REAL 3D W3). Its main advantage is the possibility to produce collections of geometrically predefined stereo image pairs that can be used for 3D photogrammetric purposes like the creation of digital surface models and orthoimages or the 3D extraction of single geo-objects. Even though the positional accuracy of the outcomes directly depends on the UAS flight altitude, a UAS-based stereo camera system bears a high potential for the geocoded documentation of archaeological surface structures and objects.

Keywords: Archaeology, 3D, digital surface model, orthoimage, UAS, stereo camera, close range photogrammetry

Autoren

Dipl.-Geogr. Katharina Haubeck
Westfälische Wilhelms-Universität Münster
Institut für Geographie
Heisenbergstr. 2
D-48149 Münster
E: k.haubeck@uni-muenster.de

Dr. Torsten Prinz
Westfälische Wilhelms-Universität Münster
Institut für Geoinformatik
Heisenbergstr. 2
D-48149 Münster
E: prinz@uni-muenster.de

1 EINLEITUNG

In den letzten Jahren werden auch in der Archäologie vermehrt Unmanned Aerial Systems (UAS) zur fotografischen Dokumentation von Ausgrabungen eingesetzt (u. a. Remondino 2011, Eisenbeiss et al. 2005). Sie bieten gegenüber Satellitenbildern oder durch Befliegung mit einem Flugzeug gewonnenen Luftbildern einen wesentlichen Vorteil vor allem bei jenen Arbeiten, die eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung fordern, wie bei der Erkennung und Dokumentation historisch-geographisch relevanter Oberflächenstrukturen. Relativ niedrige Anschaffungskosten, geringes Gewicht, flexible Einsetzbarkeit und die Möglichkeit der Datenerfassung, ohne das Grabungsgelände betreten zu müssen, machen sie für den Einsatz bei archäologischen Ausgrabungen attraktiv. Die Ausstattung des Aufnahmesystems wird dabei in der Regel von der möglichen Nutzlast begrenzt. Meist wird daher die Option genutzt, eine kleindimensionierte, leichte monoskopische, nichtmetrische Digitalkamera unter dem Fluggerät zu befestigen und mit dieser während des Flugs Luftbilder zu erzeugen. Die gewonnenen Aufnahmen können im Nachhinein z.T. photogrammetrisch ausgewertet werden. So entstehen aus ihnen Digitale Geländemodelle, Orthophotos, topographische Karten und 3D-Visualisierungen. Für die photogrammetrische Auswertung eines Bildpaars wird üblicherweise ein systematischer Überlappungsgrad von mindestens 60 % empfohlen (Kraus 2007, S. 134).

Durch instabile Wetterverhältnisse (Wind!) kann es bei UAS-Flugkampagnen allerdings problematisch bis unmöglich werden, eine systematische Reihenbefliegung bzw. einen genauen Wegpunktflug mit einer Nadirausrichtung der Kamera durchzuführen. Insbesondere gilt dies, wenn sich das Untersuchungsgebiet an einem exponierten, windungeschützten Ort befindet. LoBrutto et al. (2012) haben gezeigt, dass dann selbst Bilder, die innerhalb weniger Sekunden von derselben Position aus aufgenommen werden, signifikante Unterschiede im Hinblick auf das aufgenommene Flächensegment zeigen können. Infolgedessen kann auch der notwendige Überlappungsgrad zwischen zwei unmittelbar benachbarten Bildern nicht sichergestellt werden (Aber 2010, S. 175).



Abbildung 1: MikroKopter (Quadro XL) mit der Stereokamera Fujii FinePix Real 3D W3 im Flug über das Ausgrabungsgelände bei Doliche (Foto: R. Dylka 2012)

Im Gegensatz zu der gängigen Methode, eine monoskopische Kamera zur Luftbildgewinnung durch UAS zu nutzen, stellen wir einen alternativen Ansatz vor und nutzen eine kostengünstige, kalibrierte stereoskopische Digitalkamera zur UAS-gestützten Aufnahme von Stereobildpaaren. Eine solche Kamera (auch „3D-Kamera“ genannt) verfügt über zwei synchronisierte Linsensysteme, die zeitgleich ausgelöst werden können. Die Kamera nimmt daher immer unter gleichbleibenden Rahmenbedingungen zwei Bilder desselben Objekts aus unterschiedlichen, aber definierten Perspektiven auf. Die beiden resultierenden Fotos überlappen sich um mindestens 90 % und sind daher grundsätzlich stereoskopisch auswertbar.

Ziel vorliegender Ausführungen ist es, zu evaluieren, inwiefern sich ein solches

UAS-basiertes Stereokamerasystem als Methode zur raschen Gewinnung kostengünstiger stereoskopisch auswertbarer Luftbilder und zur 3D-Erfassung historisch-geographisch relevanter Oberflächenformen eignet. Als exemplarische Fallstudie dient die Dokumentation einer archäologischen Grabungsstätte bei Doliche im Südosten der Türkei, welche zur Landschaft der antiken Kommagene zählt.

2 UNMANNED AERIAL SYSTEMS (UAS)

Unter UAS versteht man nach van Blyenburgh (1999) unbemannt fliegende Flugsysteme: „UAS's are to be understood as uninhabited and reusable motorized aerial vehicles, which are remotely controlled, semi-autonomous, autonomous, or have a combination of these capabilities, and that can carry various types of payloads,



Abbildung 2: Die Fujifilm Finepix REAL 3D W3 Stereokamera mit synchronisiertem Doppellinsensystem zur Erstellung von Stereoaufnahmen (Fujifilm 2013)

making them capable of performing specific tasks within the earth's atmosphere, or beyond, for a duration, which is related to their missions." Sie können autonom bzw. semi-autonom fliegen oder über eine Funk bzw. Satellitenverbindung vom Boden aus ferngesteuert werden und unterscheiden sich signifikant hinsichtlich Design, Größe, Gewicht, Flugdauer, Einsatzmöglichkeiten sowie Nutzlast (Eisenbeiss 2009, S. 2 ff.).

Der Aufbau des UAS-Systems für die Flugmission in Dolich ergab sich aus folgenden Anforderungen:

- ▶ kostengünstiges UAS- und Stereokamerasystem,
- ▶ geringes Packmaß, einfach zu transportieren,
- ▶ flexibel einsetzbar,
- ▶ hinreichend Nutzlast für die Stereokamera (ca. 250 g) und Möglichkeit von Nadir-Aufnahmen,
- ▶ Option, die Stereokamera ferngesteuert, wenn möglich kontinuierlich auszulösen (somit Aufnahmen entlang eines Höhengradienten generieren bzw. qualitative Unterschiede beurteilen zu können).

Oben genannte Anforderungen favorisieren einen als Bausatz erhältlichen „MK Quadro XL“ (MikroKopter 2012a), welcher um ein alternatives Landgestell sowie eine servogesteuerte Kamerahalterung (Abbildung 1) ergänzt wurde. Der QuadroKopter wird von vier Rotoren angetrieben, hat einen Durchmesser von ca. 60 cm und eine Nutzlast von ca. 1 kg. Er wird per Fernsteuerung – hier wurde eine Spektrum MX-20 verwendet – vom Boden aus kont-

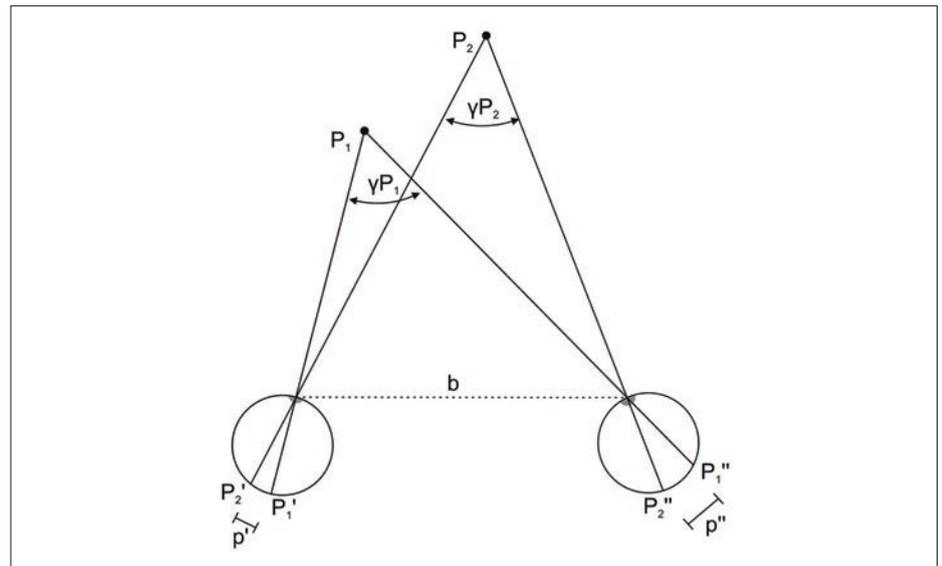


Abbildung 3: Prinzip der Aufnahme eines Stereobildpaars mit einer Stereokamera (modifiziert nach Albertz 2007; b = Stereobasis, Abstand der Kameralinsen ca. 75 mm, P_1 und P_2 = zwei Geländekoordinaten, P_1' und P_2' = Projektionen von P_1 und P_2 auf der linken Linse, P_1'' und P_2'' = Projektionen von P_1 und P_2 auf der rechten Linse, γP_1 und γP_2 = Konvergenzwinkel, $p'' - p'$ = stereoskopische Parallaxe)

rolliert. Als Energiequelle dient ein Lithium-Polymer-Akku, der eine Mindestflugzeit von 20 Minuten ermöglicht.

3 STEREOSKOPISCHES KAMERASYSTEM

Bei der verwendeten Kamera handelt es sich um eine Fujifilm FinePix REAL 3D W3 (Fujifilm 2013), eine kleine, leichte sowie kostengünstige digitale Stereokamera (vgl. Tabelle 1), welche für die digitale Amateur-Stereo-Fotografie konzipiert wurde. Die Kamera hat ein Stereo-Linsensystem und ist somit in der Lage, stereoskopische Bildpaare in einer Auflösung von 10 Megapixel

und einem fixen Überlappungsgrad von 90 % aufzunehmen. Alle Bildpaare können als eine MPO-(Multi-Picture-Objekt)-Datei oder als zwei separate JPEG-Dateien gespeichert werden. Brunn & Hastedt (2011) stellten fest, dass sich die Fujifilm FinePix Real 3D W3 und auch ihre Vorgängerin Real 3D W1 grundsätzlich für den photogrammetrischen Einsatz im Low-Cost-Bereich eignen.

Das Konzept der Aufnahme eines Stereobildpaars mit dieser Kamera gleicht dem Konzept des menschlichen, dreidimensionalen Sehens. Eine Tiefenwahrnehmung ergibt sich aus der seitlichen Verschiebung von Bildpunkten bei der Abbildung desselben Raumausschnitts mittels zweier synchronisierter Objektive (Abbildung 2): Als Folge des Abstands zwischen den Linsen nimmt bei der Aufnahme eines Stereofotos jede der zwei Linsen einen anderen Winkel zu den abzubildenden Geobjekten ein. Es resultieren zwei Bilder, die größtenteils denselben Raumausschnitt aus einer leicht veränderten, horizontal verschobenen Perspektive zeigen. Die Stereobildbasis der Kamera, die Flughöhe des UAS und die Höhe der Objekte bestimmen dabei die Größe der Konvergenzwinkel. Die unterschiedlichen Winkel führen dazu, dass Bildpunkte auf jedem der stereoskopischen Halbbilder unterschiedliche Abstände aufweisen. Bei der photogrammetrischen Auswertung nutzt man dann die Möglichkeit, die Höhe von

Effektive Pixel	10,17 Megapixel
Bildsensor	2 x 1/2.3" CCD
Objektiv	Fujinon F/3.7-4.2, Brennweite 6,3 mm - 18,9 mm (entspricht 35 mm – 105 mm im 35-mm-Format)
Sensorgroße	6,16 mm x 4,62 mm (Bockaert 2013)
Stereobasis	75 mm
Auflösung (L 4:3)	3.648 x 2.736 Pixel
Speichermedium	SD-Speicherkarte
Stromversorgung	NP-50 Lithium-Ionen-Akku
Abmessungen (BxHxT)	ca. 124,0 mm x 65,9 mm x 27,8 mm
Gewicht	ca. 250 g (inkl. Akku und SD-Karte)
Preis	ab 179,00 Euro (Stand: 09/2013)

Tabelle 1: Eigenschaften der Fujifilm FinePix Real 3D W3 (modifiziert nach Fujifilm 2013)

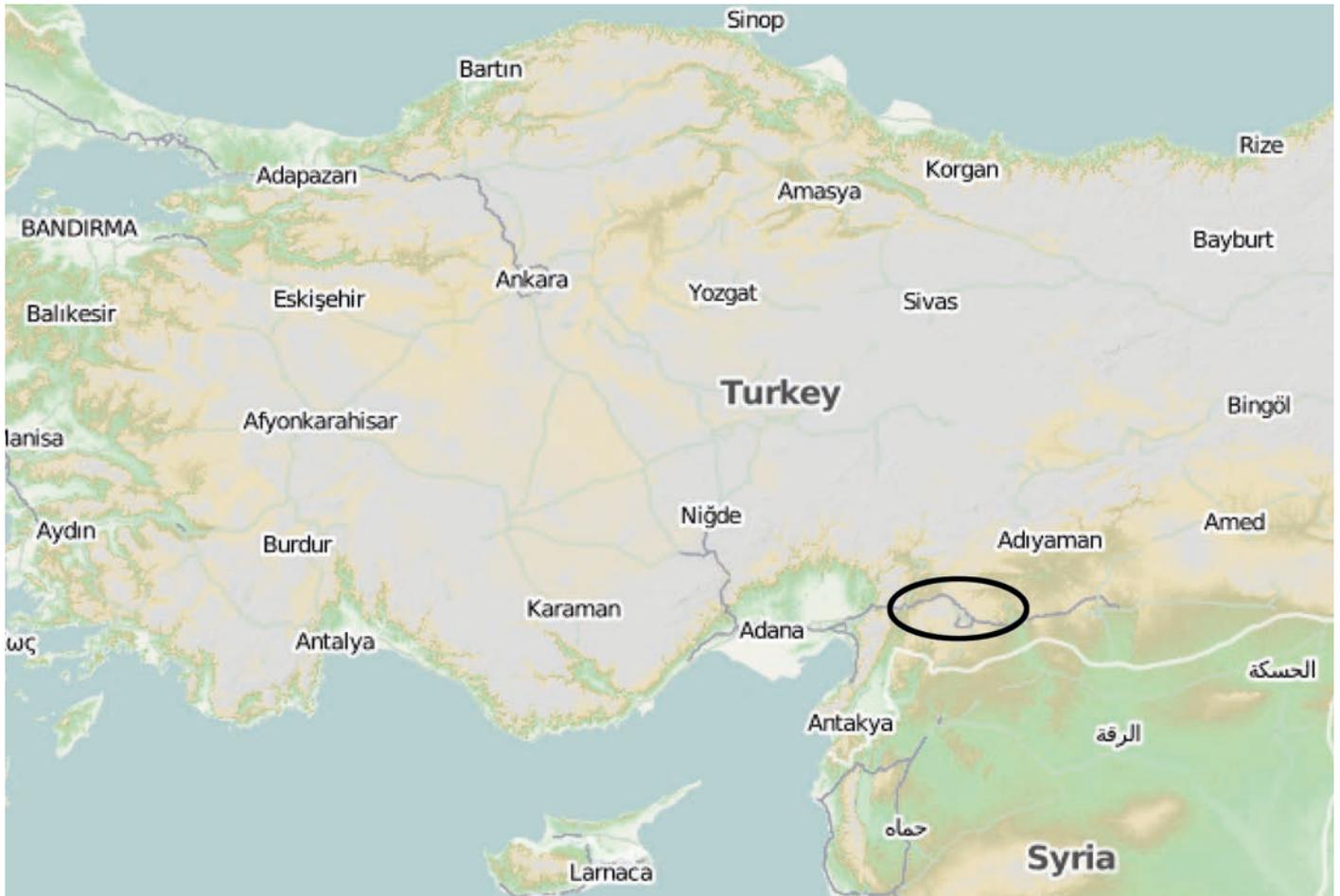


Abbildung 4: Lage der Grabungsstätte auf dem Dülük Baba Tepesi nördlich von Gaziantep und ca. 10 km südöstlich von Doliche, SO-Türkei (Quelle: OpenStreetMap 2013, bearbeitet)

Geoobjekten aus der stereoskopischen Parallaxe abzuleiten (Albertz 2007).

4 DIE GRABUNGSSTÄTTE DOLICHE

Die Flugkampagne fand im September 2012 nahe der antiken Siedlung Doliche in der Kommagene (Provinz Gaziantep, Südost-Türkei) statt. Seit 2001 führt die Forschungsstelle Asia Minor der Universität Münster hier Grabungen auf dem Gipfelbereich des Bergs Dülük Baba Tepesi (Forschungsstelle Asia Minor 2012) durch. Von dem antiken Doliche ausgehend verbreitete sich ab dem 1. Jh. n. Chr. der Kult um den römischen Soldatengott *Iuppiter Dolichenus* im gesamten Römischen Reich. Inzwischen konnte zweifelsfrei nachgewiesen werden, dass sich das Hauptheiligtum des *Iuppiter Dolichenus* einst auf dem Dülük Baba Tepesi befand (Blömer & Winter 2006).

In den letzten Jahren bot die Grabungsstätte bereits Gelegenheit zu verschiedensten interdisziplinären Arbeiten im Bereich der Archäologie und Geoinformatik. Diese fokussierten insbesondere auf die Gewinn-

nung und Verarbeitung von Geodaten sowie Luft- und Satellitenbildern, deren Integration in ein GIS sowie die Generierung hochauflösender Geobasisdaten (Lasar 2008, Krüger 2009, Prinz et al. 2010).

5 BILDDATENERFASSUNG

Im Vorfeld der Flugkampagne wurde die Stereokamera mit Unterstützung des Photogrammetrie-Labors der Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt kalibriert (AG Prof.

Brunn, 2012) und so die inneren Orientierungsparameter der beiden gekoppelten Fotosensoren bestimmt. Anschließend wurde die Auslöseelektronik der Kamera modifiziert, um ferngesteuerte Aufnahmen aus einer Servo-Kamerahalterung unter dem UAS zu gewährleisten.

Vor Ort wurde die Grabungsstätte auf dem Dülük Baba Tepesi an insgesamt sieben Flugtagen in der Zeit vom 11. – 22. September 2012 befliegen. Im Vorfeld

Bildgröße	L 4:3
Bildqualität	Fein
Zoom	Normal (minimaler Zoom-Faktor)
Fokus	Auto (Center)
Sensitivität	800 ASA
Blitz	Aus
Weißabgleich	Auto
Belichtungszeit	Auto

Tabelle 2: Ausgewählte Aufnahmeparameter der Finepix Real 3D W3 Stereokamera während der Befliegung Doliche

der Mission wurden am Boden Markierungen ausgelegt (GCP = Ground Control Points), und deren x-, y- und z-Koordinaten tachymetrisch eingemessen. Diese Passpunkte ermöglichten es, die Fotos später zu georeferenzieren bzw. photogrammetrisch auszuwerten. Insgesamt wurden im Grabungsareal mehr als 460 GCP ausgelegt, von denen (in Abhängigkeit der jeweiligen Flughöhe und -mission) bis zu 40 GCP auf einem Stereobildpaar repräsentiert sind. Im Zuge der späteren Auswertung mit ERDAS LPS (Orima) stehen somit hinreichend zusätzliche Checkpoints zur Verfügung.

Aufgrund der häufig instabilen Windverhältnisse auf dem Dülük Baba Tepesi waren Befliegungen nur während der ruhigeren frühen Vormittage möglich. Während des Flugs wurde die unter dem Kopter befestigte Stereokamera mithilfe der servogesteuerten Kamerahalterung in einer Nadir-Position gehalten. Die Einstellungen der Stereokamera selbst blieben im Hinblick auf die Einstellungen während der zuvor durchgeführten Kalibrierung (Tabelle 2) unverändert. Durch ein Verbindungskabel zwischen der Stereokamera und der FlightCtrl-Platine des Kopters sowie einer Funkverbindung vom Kopter zur Bodenstation (Notebook mit Funkmodul) war es möglich, die Kamera von der Bodenstation aus auszulösen. Verwendet wurde hierfür das Programm MikroKopterTool OSD (MikroKopter 2013b). Beispielhaft wurde so die Information an den Kopter gesandt, die Kamera nach Start der Rotoren dauerhaft auszulösen. Während des Flugs wurde dann alle 4,6 Sekunden ein Stereobildpaar erzeugt.

6 STEREOPHOTOGRAMMETRISCHE AUSWERTUNG MIT ERDAS LPS

Im Vorfeld der Bildanalyse wurden alle Stereobildpaare, die sich für die Auswertung als ungeeignet erwiesen, aussortiert. Dazu gehörten alle unscharfen Bildpaare sowie alle Bildpaare, die während der Start- und Landephase entstanden. Nach dieser Bildauswahl blieben zunächst 425 geeignete Stereobildpaare übrig.

Mit dem Ziel, den Informationsgehalt der Bilder zu erhöhen und damit die Ergebnisse der nachfolgenden Bildanalyse zu verbessern, wurden diese Bildpaare einer moderaten Kontraststreckung sowie eines partiellen Kontrastausgleichs in Adobe Photoshop CS2 (Adobe 2005) unterzogen.

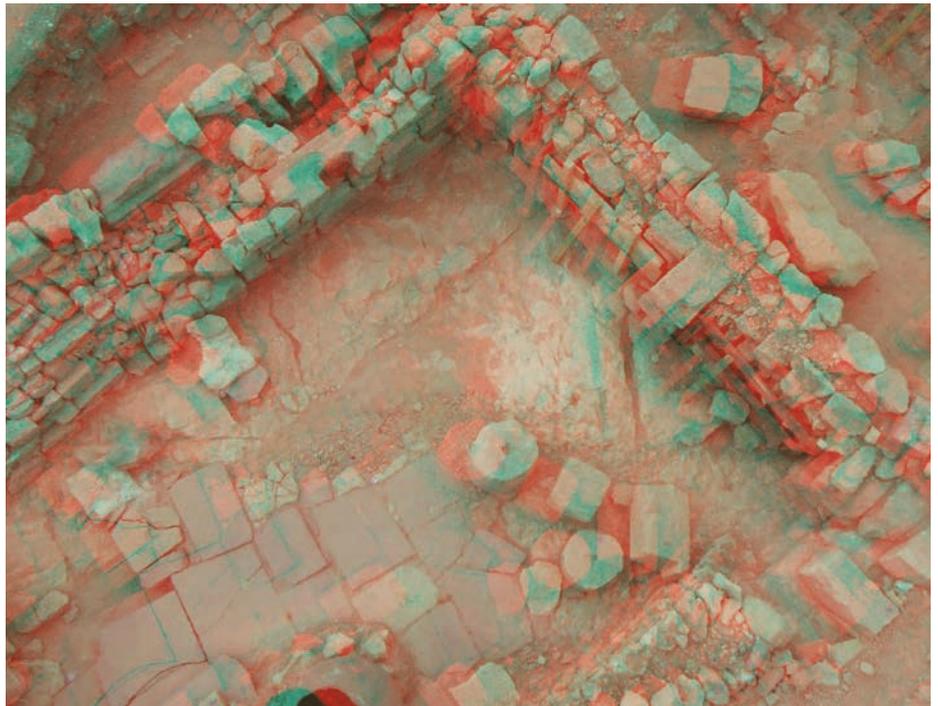


Abbildung 5: Anaglyphische Rot-Cyan-Darstellung eines Stereobildpaares aus dem zentralen Grabungsfeld Doliche aus etwa 14 m Höhe über Grund

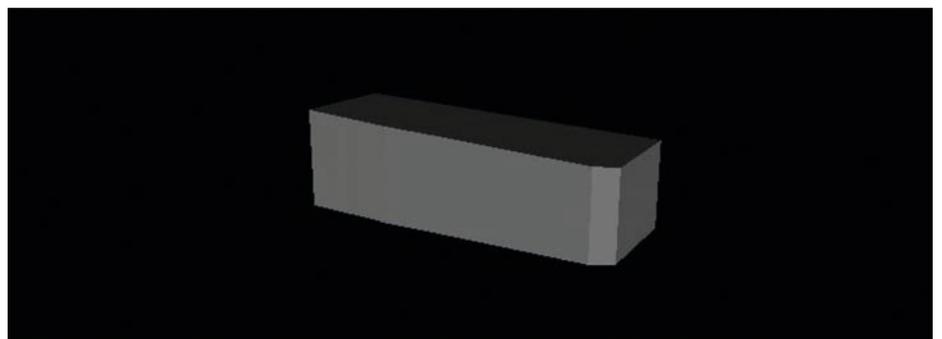


Abbildung 6: 3D-Extraktion eines Quadersteins als 3D VRML-Objekt aus der Grabung Doliche mittels ERDAS Stereo Analyst (ERDAS 2013)

Ein erster dreidimensionaler Eindruck ergibt sich bereits durch eine farbanaglyphische Darstellung der Stereobildpaare (Abbildung 5). Hierfür werden die beiden Teildarstellungen in Komplementärfarben (hier: Rot bzw. Cyan) eingefärbt und übereinandergelegt;

der Stereoeindruck entsteht bei Betrachtung mit einer entsprechenden Rot/Cyan-Anaglyphenbrille.

Mithilfe des ERDAS Stereo Analyst (2013) lassen sich ebenfalls einzelne Geoobjekte erfolgreich aus den Anaglyphenbil-

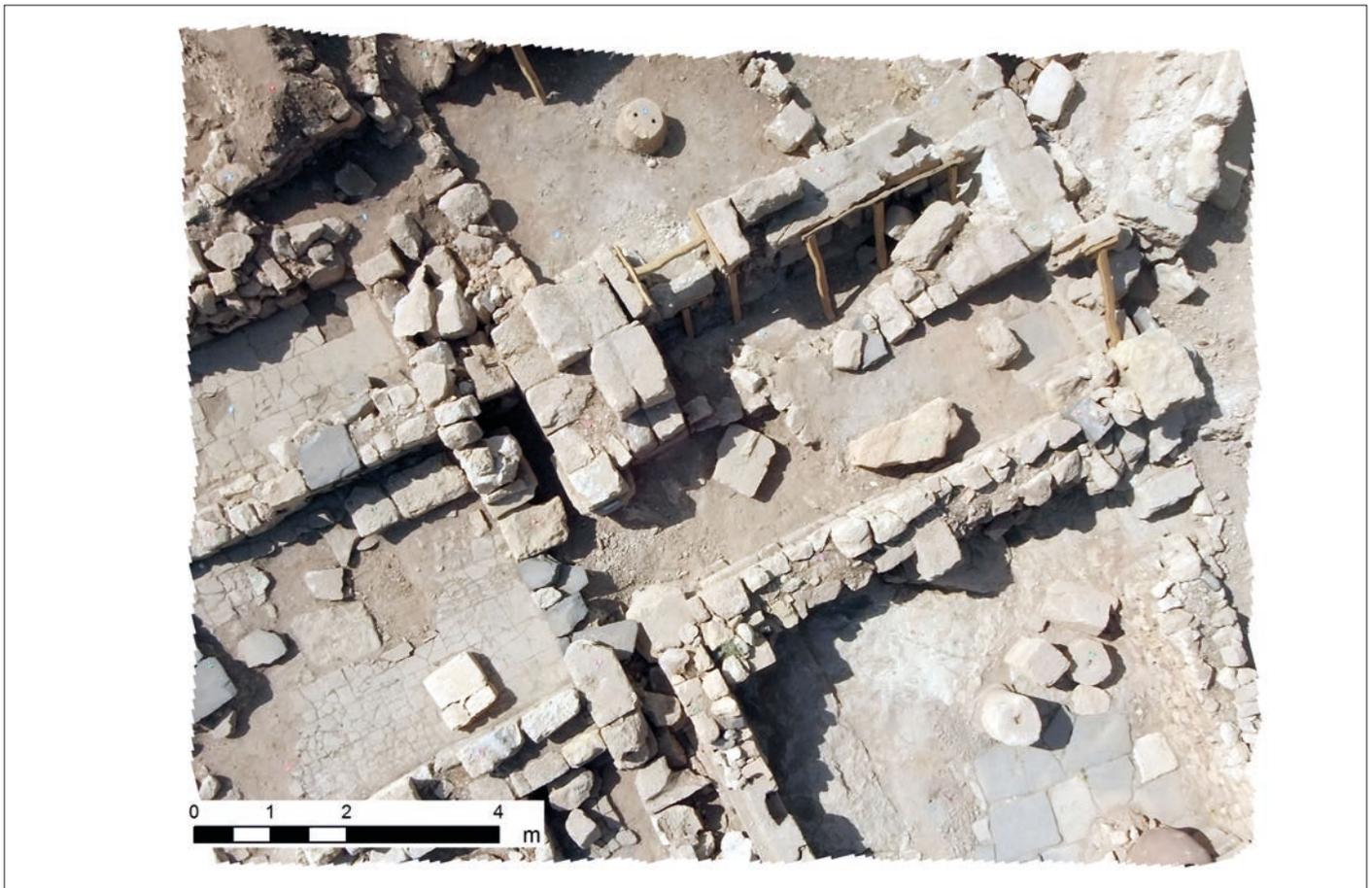


Abbildung 7: Orthophoto, abgeleitet aus einem Stereobildpaar, aufgenommen aus einer UAS-Flughöhe von 20 m

dem extrahieren. Abbildung 6 zeigt die 3D-Extraktion eines Quadersteins in Form eines *Virtual-Reality-Modeling-Language* (VRML)-Objekts; dieser ließe sich nun als 3D-Modell in ein GIS oder einen virtuellen Globus (z. B. Google Earth) importieren.

Die weitere 3D-Bildanalyse erfolgte mit ERDAS LPS/Stereo Analyst (ERDAS Imagine 2013). Über die geometrische Rekonstruktion des Aufnahmeprozesses sollen geometrische Informationen aus den Stereobildpaaren gewonnen und so Digitale Geländemodelle und Orthophotos erzeugt werden. Die für diesen Vorgang notwendigen Parameter der inneren Orientierung der Kamera sind durch die im Vorfeld erfolgte Kalibrierung bereits bekannt. Eine manuelle Identifikation der tachymetrisch eingemessenen Passpunkte mit bekannten Geländekoordinaten in den Bildern stellt die geometrische Beziehung zwischen Bild- und Geländekoordinaten her. Mit dieser Information wird in LPS (Orima) eine Aerotriangulation (AT) angestoßen, welche die Bilder einerseits in Beziehung zueinander, andererseits in Beziehung zu den Passpunkten setzt, und so die äußere Orientie-

rung, d. h. die Lage der Kamera im Raum zum Zeitpunkt der Bildaufnahme, errechnet. Vorausgegangen sind eine Blockkontrolle aller beteiligter Stereobildpaare, also das Nachmessen/die Korrektur von Pass-, Kontroll- und Verknüpfungspunkten (GCP, Check Points, Tie Points) sowie der Beurteilung der Verknüpfungsdichte und Fehlerresiduen. Insgesamt wurden so 27 Bildpaare verknüpft, deren Lagegenauigkeit sich jedoch mit zunehmender Flughöhe über Grund (u. a. bedingt durch die geringe Bildbasis der Kamera) deutlich verschlechterte (teilweise Fehler deutlich größer als zweifache Standardabweichung).

Mit dieser Information lässt sich im Folgenden ein Digitales Geländemodell (DGM) aus den Stereobildern rechnen, welches weitere quantitative Analysen, wie das Messen von Punktkoordinaten, Höhen, Strecken, Flächen und Volumen, erlaubt (vgl. auch Aber 2010). Weiterhin lässt es sich auch zur differentiellen Entzerrung der Bilder nutzen (Orthophotos, siehe Abbildung 7 und 8). Derartige Orthophotos weisen geometrisch die Eigenschaften einer topographischen Karte auf; die durch das

Geländemodell und die optische Zentralprojektion verursachten Lagefehler sind folglich korrigiert (Hildebrandt 1996, S. 278).

Liegen solche Orthophotos mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung vor, lassen sie sich für Monitoringaufgaben nutzen und liefern beispielsweise wertvolle raum-zeitliche Informationen hinsichtlich des Grabungsverlaufs oder der jeweiligen stratigraphischen Fundsituation. In der Archäologie bietet es sich außerdem an, Orthophotos als Geobasisdaten in einem Geographischen Informationssystem zu nutzen und mit weiteren Raster- bzw. Vektordaten oder thematischen Kartenlayern (archäologischen Sachdaten) zu kombinieren. So können Befunde anhand ihrer Lage ausgewählt und ihre Attributwerte im jeweiligen Kontext abgefragt werden (Lasar 2008).

7 GENAUIGKEITEN

Die Auswertung der Stereobildpaare zeigt, dass die Kombination aus UAS und Low-Cost-Stereokamera geeignet ist, Aufnahmen zu erzeugen, die wiederum zu flächendeckenden Digitalen Geländemodellen und Orthophotos verarbeitet werden

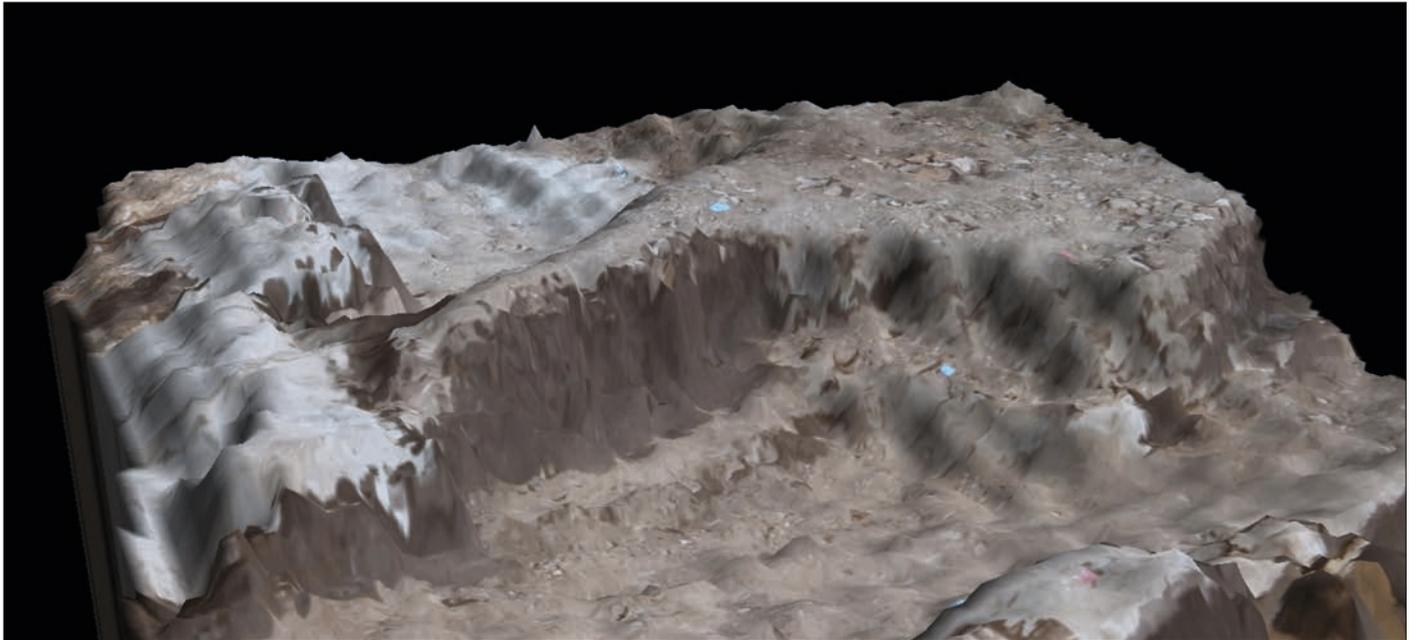


Abbildung 8: Digitales Geländemodell und Orthophoto, abgeleitet aus einem Stereobildpaar als 3D-Modell in einer GIS-Umgebung, Bildausschnitt ca. 4 m x 3 m (IMAGINE VirtualGIS 2013)

können. Auch die 3D-Extraktion einzelner Geoobjekte aus den Stereobildpaaren ist möglich. Der technische bzw. zeitliche Aufwand ist überschaubar, liefert aber nur bedingte Lagegenauigkeiten.

Der konventionelle Weg archäologischer Grabungsdokumentation besteht nun darin, Befunde und ihre Lage genau zu vermessen und in maßstäblichen, verzerrungsfreien Zeichnungen festzuhalten (VIA 2011). Dieses Verfahren ist zeit- und daher auch kostenintensiv. Es werden in der Regel sehr viele Einzelpunkte aufgenommen und die analog gezeichneten Ergebnisse wiederholt kontrolliert bzw. nachgemessen. Man kann davon ausgehen, dass die Ergebnisse somit auch eine hohe Genauigkeit aufweisen, die Geoobjekte also abbildungsgetreu dargestellt werden.

Da sowohl die Orthophotos als auch die digitalisierte zeichnerische Aufnahme einen identischen räumlichen Bezug aufweisen, können diese in einem Geographischen Informationssystem (GIS) als verschiedene thematische Layer übereinandergelegt werden. So ergibt sich rasch ein visueller Eindruck bezüglich der Lagegenauigkeit von UAS-Orthophotos bzw. konventioneller Zeichnung. Abbildung 9 zeigt diesen Zusammenhang in der Überlagerung der Daten in Abhängigkeit der UAS-Flughöhe in ArcGIS (2013).

Aufgrund der begrenzten Stereobasis der verwendeten Finepix REAL 3D W3-

Stereokamera nimmt die Lagegenauigkeit der Passpunkte und damit die Genauigkeit der Digitalen Geländemodelle (respektive Orthophotos) mit zunehmender Flughöhe ab. DGM, die aus Stereobildpaaren aus einer niedrigen Flughöhe abgeleitet wurden, weisen eine deutlich höhere Lagegenauigkeit als DGM, die aus Stereobildpaaren aus einer größeren Flughöhe entstanden, auf. Ein Vergleich der georeferenzierten Passpunktkoordinaten im Orthophoto mit den bekannten Sollwerten (den tachymetrisch eingemessenen GCP) führt zu einer eindeutigeren Einschätzung der Qualität der Digitalen Geländemodelle im Hinblick auf deren Genauigkeit. Als Maß für die Lagegenauigkeit der Punkte wird der mittlere quadratische Koordinatenfehler (Root Mean Square Error, RMSE) verwendet. Eine statistische Auswertung der horizontalen Lagegenauigkeiten der Passpunkte zeigt dabei einen signifikanten linearen Zusammenhang zwischen Flughöhe und Lagefehlern der Passpunkte im Digitalen Geländemodell bzw. Orthophoto. Die Korrelation zwischen Flughöhe und Lagegenauigkeit der DGM sowohl in x-, y- als auch in z-Richtung ist dabei auf dem 1 %-Niveau statistisch signifikant (vgl. Abbildung 10).

Eine lineare Regressionsanalyse liefert eine Regressionsgerade, die durch $y = 0,0121x + 0,0147$ beschrieben wird. Das Ergebnis der Berechnung des

Korrelationskoeffizienten nach Bravais-Pearson zeigt mit $r = 0,8268$ einen starken statistischen Zusammenhang zwischen mittlerem quadratischen Koordinatenfehler RMSE (der Lagegenauigkeit des Orthophotos) und der UAS-Flughöhe. Der Vergleich zwischen Flughöhe und vertikaler Lagegenauigkeit der Passpunkte ergibt ein ähnliches Bild. Die Regressionsgerade wird hier mit $y = 0,036x + 0,0684$ beschrieben, durch den Korrelationskoeffizienten $r = 0,8342$ wird ebenfalls ein hoher linearer Zusammenhang deutlich. Gründe für diese sich teilweise schon bei der AT abzeichnenden Ungenauigkeiten sind sicherlich in den systemgegebenen Parametern der genutzten ‚low cost‘ Kamera zu suchen, welche im Gegensatz zu sehr teuren photogrammetrischen Aufnahmesystemen keine weitreichende Parametrisierung von z. B. der inneren Orientierung (Autofocus) erlaubt. Es ist jedoch festzuhalten, dass die erzielten Ergebnisse im Rahmen einer flexibel handhabbaren und hochfrequenten archäologischen Grabungsdokumentation sehr nutzbringend sind.

8 FAZIT UND AUSBLICK

UAS-basierte Stereokamerasysteme eignen sich durchaus als Alternative zu monoskopischen Systemen bei der Gewinnung kostengünstiger stereoskopisch auswertbarer Luftbilder und 3D-Erfassung historisch-geographisch relevanter Oberflächenformen.

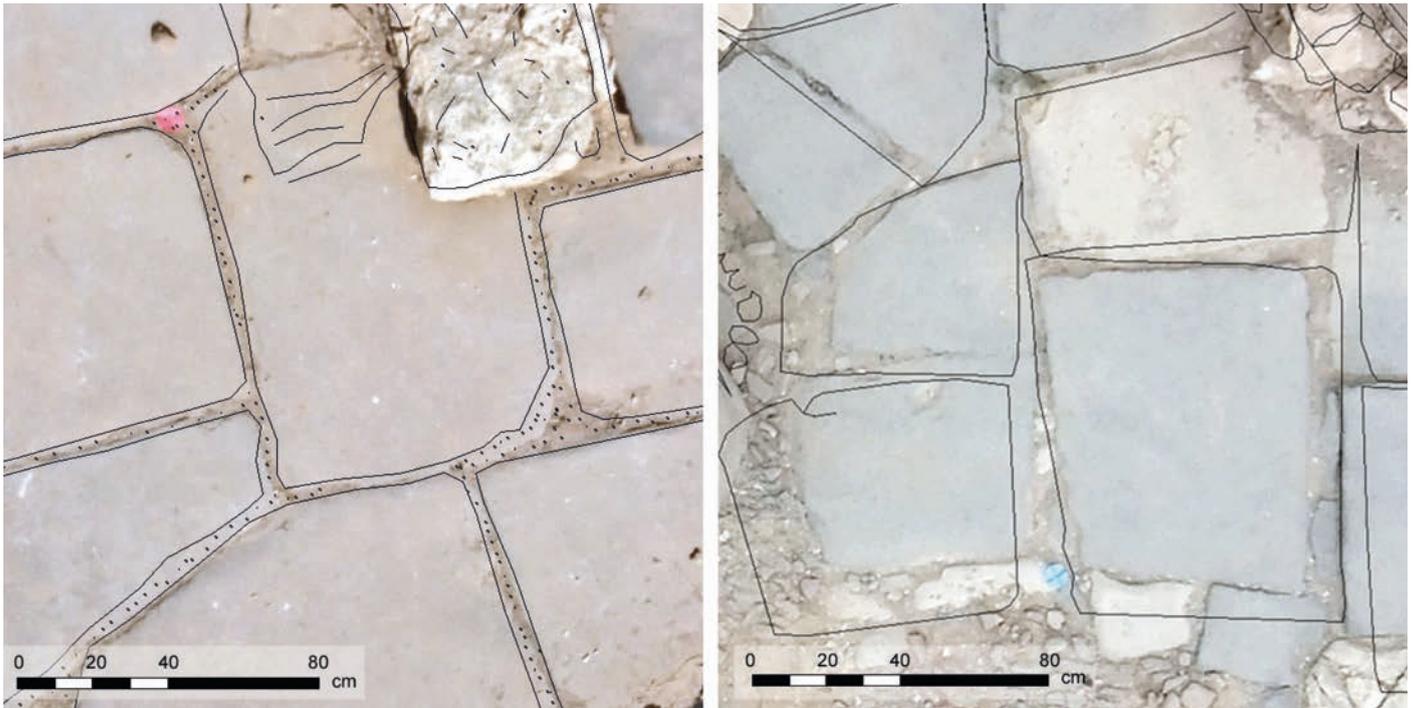


Abbildung 9: Ausschnitte eines Orthophotos aus einer Flughöhe von 4,12 m und eines Orthophotos aus einer Flughöhe von 13,97 m mit überlagerter digitalisierter zeichnerischer Aufnahme. Die Genauigkeit des Orthophotos lässt sichtbar mit steigender Flughöhe nach.

Wenn die innere Orientierung der Stereokamera bekannt ist und die äußere Orientierung der Kamera zum Zeitpunkt der Bildaufnahme mittels Passpunkte hergeleitet werden kann, ist es möglich, in Kombination aus UAS und Low-Cost-Stereokamera hinreichend genaue stereophotogrammetrisch auswertbare Stereoluftbildpaare zu erzeugen. Ergebnisse der Auswertung mit ERDAS LPS/Orima sind Digitale Gelände-Modelle und Orthophotos sowie 3D-Extraktionen einzelner Geobjekte. Als Konsequenz aus der begrenzten Stereobasis der Kamera, des daraus abzuleitenden Verhältnisses Stereobasis/Flughöhe und der geometrischen Auflösung der Bilder sinkt die Genauigkeit der DGM (und daraus folgend auch die Genauigkeit der Orthophotos) jedoch mit zunehmender Flughöhe. Es konnte ein statistisch hoch signifikanter linearer Zusammenhang zwischen Flughöhe und Genauigkeit festgestellt werden. In der konkreten Anwendung muss hier ein Kompromiss zwischen gewünschter Genauigkeit, Flughöhe und der Fläche des durch ein Stereobildpaar aufgenommenen Raumausschnitts gefunden werden. Die Dokumentation archäologischer Ausgrabungen, die Erstellung und Aktualisierung von 3D-Grabungsmodellen oder das Monitoring räumlich-zeitlicher Prozesse (Gletscherausbreitung, Dorfentwicklung, Vegetationsbe-

deckung etc.) sind einige weitere denkbare Anwendungsbereiche für das vorgestellte UAS-basierte Stereokamerasystem.

Eine alternative Weiterentwicklung des Kamerasystems, die eine höhere Genauigkeit auch bei einer großen Flughöhe vermuten lässt, wäre die Vergrößerung der Stereobasis durch zusätzliches Gerät, bspw. durch den „225 mm base extender“ von Cycloptial3D (2013). Dies stellt jedoch wiederum neue Anforderungen an die Nutzlast des UAS.

Eisenbeiss (2009) hat festgehalten, dass auch nicht jede kommerziell erhältliche photogrammetrische Software gleichermaßen für die UAS-Bildverarbeitung geeignet ist. Weitere Studien müssen zeigen, inwiefern beispielsweise Structure-from-Motion-Techniken (vgl. z. B. Neitzel & Klonowski 2011) von Vorteil für die Auswertung von Stereobildpaaren eines UAS-basierten Stereokamerasystems sein können.

Zusammenfassend kann jedoch festgehalten werden, dass eine Kombination von

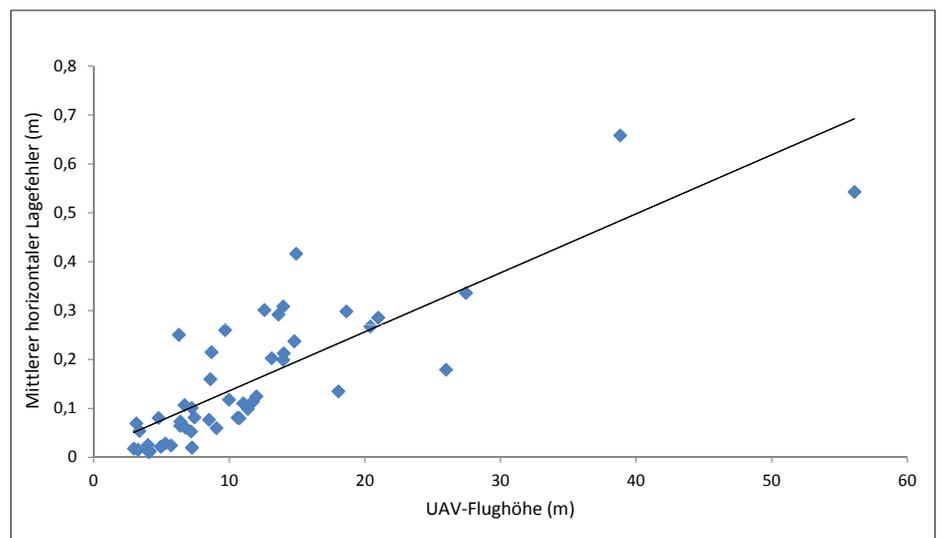


Abbildung 10: Mittlerer horizontaler Lagefehler der GCP-Koordinaten im Orthophoto (RMSE) in Abhängigkeit von der Flughöhe des UAS und lineare Regressionsgerade ($y = 0,0121x + 0,0147$), $n = 48$

UAS und einer kostengünstigen kalibrierten Stereokamera eine attraktive Ergänzung zur flächendeckenden Dokumentation von archäologischen Grabungsarealen und zur 3D-Erfassung von Oberflächenstrukturen sowie der Orthophotogenerierung

darstellt. Der Vorteil gegenüber monoskopischen Kamerasystemen ist zweifelsohne die definierte geometrische Beziehung der Stereohalbbilder zueinander. Obwohl die Genauigkeit der resultierenden DGM/Orthophotos von der Flughöhe abhängig

ist, eröffnet ein stereoskopisches UAS-Kamerasystem daher eine vielversprechende, kostengünstige und flexible Möglichkeit bei der Erfassung photogrammetrisch auswertbarer Stereobilder in der Nahbereichsphotogrammetrie.

Literatur

- Aber, J. S.; Marzolf; Ries; J. B. (2010): Small-Format Aerial Photography: Principles, techniques and geoscience applications. Elsevier Science, Amsterdam.
- Albertz, J. (2007): Einführung in die Fernerkundung: Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- Blömer, M.; Winter, E. (Hrsg.) (2012): Iuppiter Dolichenus. Vom Lokalkult zur Reichsreligion. Mohr Siebeck, Tübingen.
- Bockaert, V. (2013): Glossary: Sensor sizes. <http://www.dpreview.com/glossary/camera-system/sensor-sizes>, Zugriff 09/2013.
- Brunn, A.; Hastedt, H. (2011): Untersuchung der Fuji Real 3D Stereokameras für den photogrammetrischen Einsatz. In: Luhmann, T.; Müller, C. (Hrsg.): Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2011. Wichmann Verlag, Berlin/Heidelberg.
- Cycloptal3D (2013): Stereo Base Extender for Fuji W3. <http://www.cycloptal3d.com/Fuji-W3-Base-Extender.html>, Zugriff 09/2013.
- Eisenbeiss, H.; Lambers, K.; Sauerbier, M.; Zhang, L. (2005): Photogrammetric documentation of an archaeological site (Palpa, Peru) using an autonomous model helicopter. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV-5/C 34, S. 238-243.
- Eisenbeiss, H. (2009): UAV Photogrammetry. Dissertation. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich.
- ERDAS Imagine (2013): LPS, Stereo Analyst & Virtual GIS. Leica Photogrammetry Suite, Vers. 10, ERDAS Inc. (USA).
- Forschungsstelle Asia Minor (2012): Die Grabung auf dem Dülük Baba Tepesi. <http://www.doliche.de/dueluek-baba-tepesi>, Zugriff 09/2013.
- Fujifilm (2013): FinePix REAL 3D W3. http://www.fujifilm.com/products/3d/camera/finepix_real3dw3, Zugriff 09/2013.
- Hildebrandt, G. (1996): Fernerkundung und Luftbildmessung: Für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie. Wichmann Verlag, Karlsruhe.
- Kraus, K. (2007): Photogrammetry. Geometry from Images and Laser Scans. Walter de Gruyter Verlag, Berlin/New York.
- Krüger, K.-P. (2009): Landschaftswandel der türkischen Euphratregion (1969 – 2004) unter Berücksichtigung des Südostanatolien-Projektes – Eine multitemporale, multisensorale Fernerkundungsanalyse anhand von Fallbeispielen der Provinzen Gaziantep und Urfa. Dissertation. Institut für Geographie, WWU Münster.
- Lasar, B. (2008): Konzeption, Entwicklung und Erprobung eines Fernerkundungssystems zur Generierung hochauflösender Geobasisdaten am Beispiel der archäologischen Grabungsstätte Doliche (Südosttürkei). Diplomarbeit. Institut für Geographie, WWU Münster.
- Lo Brutto, M.; Borruso, A.; D'Argenio, A. (2012): UAV Systems for Photogrammetric Data Acquisition of Archaeological Sites. In: International Journal of Heritage in the Digital Era 1. Reihe 1, S. 7-14.
- MikroKopter (2012a): MK Basisset Quadro XL Starter. https://www.mikrocontroller.com/index.php?main_page=product_info&cPath=80&products_id=731, Zugriff 09/2013.
- MikroKopter (2012b): MikroKopterTool. <http://www.mikrokoetter.de/ucwiki/MikroKopterTool>, Zugriff 09/2013.
- Neitzel, F.; Klonowski, J. (2011): Mobile 3D mapping with a low cost UAV system. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII-1/C22, S. 39-44.
- Prinz, T.; Lasar, B.; Krüger, K.-P. (2010): High-Resolution Remote Sensing and GIS Techniques for Geobase Data Supporting Archaeological Surveys: A Case Study of Ancient Doliche, Southeast Turkey. In: Geoarchaeology, 25 (3), S. 352-374.
- Remondino, F.; Barazzetti, L.; Nex, F.; Scaioni, M.; Sarazzi, D. (2011): UAV photogrammetry for mapping and 3d modeling – current status and future perspectives. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVIII-1/C22, S. 25-31.
- Van Blyenburgh, P. (1999): UAV: an overview. In: Air & Space Europe 1, 5. S. 43-47.
- VLA – Verband der Landesarchäologen in der Bundesrepublik Deutschland e. V. (2011): Grabungstechnikerhandbuch. Kapitel 18: Grabungsdokumentation. <http://www.landesarchaeologen.de/verband/kommissionen/grabungstechnik/grabungstechnikerhandbuch>, Zugriff 09/2013.