



# Die fliegende Kamera

## Neue Methoden der archäologischen Fotodokumentation aus der Luft

*Seit Frühsommer 2013 setzt die archäologische Denkmalpflege Baden-Württemberg intensiv eine so genannte Schwebepattform („Drohne“) zur fotografischen Dokumentation von Ausgrabungsflächen und Geländedenkmälern aus der Luft ein. Dank dieser neuen Technologie können nun ohne allzu großen Aufwand sowohl Übersichtsaufnahmen als auch unterschiedliche hoch aufgelöste 3D-Modelle der Areale schnell und effizient erstellt werden. Unter den Oktokoptern, ein Kamera tragendes Flugmodell, können verschiedene digitale Foto- oder Videokamerasysteme montiert werden. Bereits während der ersten Monate ließen sich eindrucksvolle Ergebnisse erzielen. An einigen Beispielen sollen im Folgenden Verfahren und Möglichkeiten gezeigt werden, die mithilfe der Fotodrohne bis jetzt realisiert werden konnten.*

Jörg Bofinger / Christoph Steffen

### Oktokopter, Digitalkamera, Videobrille – die Technik

Zu der vom Landesamt für Denkmalpflege eingesetzten Schwebepattform, die auch als UAV (Unmanned Aerial Vehicle) oder umgangssprachlich einfach als „Drohne“ bezeichnet wird, gehört umfangreiches technisches Equipment, welches das System erst funktions- und einsatzfähig macht. So wird der Oktokopter, dessen Rotoren von acht Elektromotoren angetrieben werden, über eine handelsübliche Modellflugfernsteuerung gelenkt. Die im Oktokopter verbaute elektronische Steuerplatine in Verbindung mit einem elektronischen Kompass, einem barometrischen Höhenmesser und einem GPS-Modul (Global Positioning System)

bildet die Grundlage für ruhige und präzise Flugmanöver, ohne die auswertbare Bildflüge kaum möglich wären. Nur so sind die zu dokumentierenden Areale zielgerichtet und aus unterschiedlichen Positionen in der Luft anzusteuern und die Bildausschnitte und Blickwinkel je nach Bedarf wählbar. GPS-Einheit und Höhenmesser garantieren neben dem automatischen Abfliegen bereits einprogrammierter Wegpunkte auch sicherheitsrelevante Funktionen wie etwa selbstständige Rückkehr des Oktokopters zum Startpunkt sowie automatische Höhen- und Positionshaltung in der Luft, bei der etwa Windabdrift automatisch durch die Bordelektronik korrigiert wird. Zur Kontrolle des Fluges werden zusätzlich in Echtzeit die wichtigsten Parameter wie Flughöhe, Anzahl der erreichbaren GPS-Satelliten, verfügbare Akkuleistung, Motorentemperatur etc. auf das Display der Fernsteuerung gesendet und die Positionsdaten in einer Art „Black Box“ aufgezeichnet.

Auf einer stabilisierten und schwenkbaren Halterung, die unter der Drohne angebracht ist und ebenfalls über die Fernsteuerung ausgerichtet wird, können unterschiedliche Foto- und Videokamerasysteme montiert und per Funk über die Fernsteuerung ausgelöst werden (Abb. 1).

Insgesamt wiegt die Flugeinheit circa 4 kg, und mit einem Akku sind rund zehn Minuten Flugzeit möglich. Damit existiert ein verhältnismäßig kostengünstiges, in der Luft frei manövrierbares Aufnahmesystem, das – bestimmte Bedingungen vorausgesetzt – schnell und unkompliziert zum Einsatz gebracht werden kann.

1 Fotodrohne und verschiedene digitale Foto- und Videokamerasysteme.



Während des Fluges wird der von der Kamera erfasste Bildausschnitt in Echtzeit über Funk direkt auf diverse mobile Monitore am Boden übertragen, sodass Bildkontrolle und genaue Motiveinstellung stets gewährleistet sind und die Grabungsverantwortlichen gleichermaßen wie der Pilot das „Zielgebiet“ beurteilen können (Abb. 2). Zusätzlich kann der Bildausschnitt auf eine Videobrille gefunkt werden, die eine weitere Möglichkeit zur Nachverfolgung der Bildflugdaten bietet. Um entsprechende Flugzeiten über den Grabungsobjekten zu garantieren – in der Regel bieten sich verschiedene Flüge für Foto- und für Videoaufnahmen an –, werden mehrere Akkus sowie Batterien für die Sender und Empfänger benötigt. Ferner gehören zur Ausrüstung diverse Ersatzteile, Antennen und feuersichere Akkubehältnisse, um die Bildflüge sicher und sachgerecht durchführen zu können (Abb. 3).

### Luftfahrtgesetze und Wetter – die Rahmenbedingungen

Der professionelle Einsatz solcher Multitrotorsysteme, wie es der Oktokopter des Landesamts für Denkmalpflege darstellt, bedarf einer offiziellen Aufstiegsgenehmigung seitens der zuständigen Luftfahrtbehörden (Regierungspräsidien). Darin werden bestimmte Parameter festgelegt, die der Sicherheit im Luftraum – aber auch am Boden – dienen. So ist beispielsweise die maximale Aufstiegsgröße auf 100 m über Grund beschränkt, das Fluggerät muss sich jederzeit im Blickfeld und Eingriffsbereich des Steuerers befinden, und der Flug über Personen und Tieren ist untersagt. Auch müssen diverse Sicherheitsbestimmungen eingehalten werden, etwa die Vorschrift, dass bei Ausfall der Funkverbindung ein Notfallszenario vorliegen muss, oder dass eine zweite Person permanent den Luftraum nach etwaigen anderen Flugobjekten zu inspizieren hat. Für jede Befliegung bebauter Areale ist eine gesonderte Erlaubnis nötig, die jeweils gezielt unter Angaben der spezifischen lokalen Gegebenheiten einzuholen ist. Daneben spielen selbstverständlich die Witterungsbedingungen bei der Durchführung eines Bildflu-



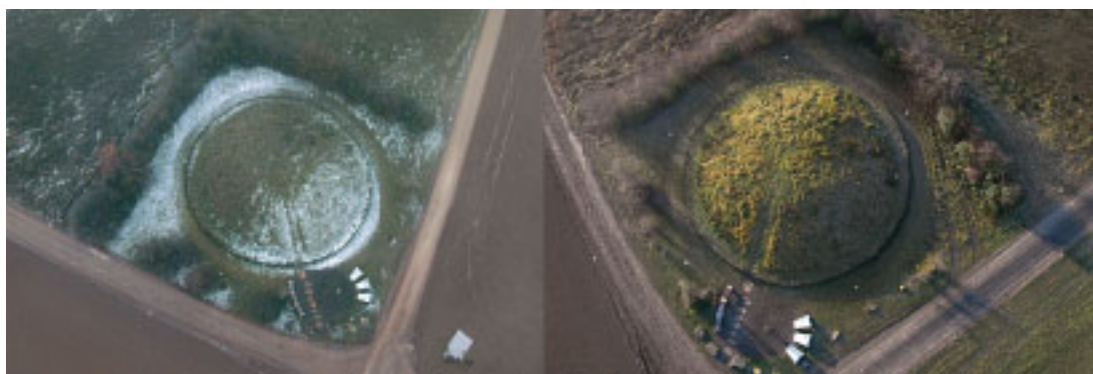
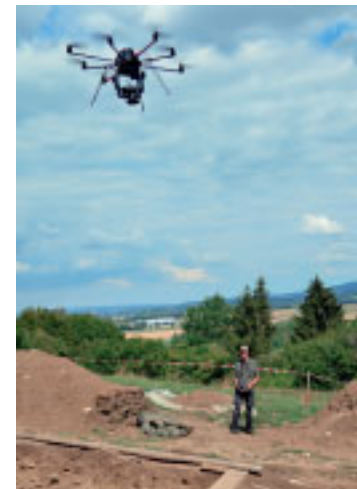
ges eine entscheidende Rolle. Abgesehen davon, dass hohe Luftfeuchtigkeit und Regen der Bordelektronik des Oktokopters schaden und somit dessen Betriebssicherheit und -fähigkeit gefährden könnten, ist ein Flug bei Windstärken über 7,5 m/Sekunde (> Windstärke 5 Beaufort) untersagt. Kälte beeinflusst die Leistung der Akkus negativ. Ideale Flug- und Aufnahmebedingungen finden sich unter einer hohen Wolkendecke, die das Sonnenlicht diffus streut, sodass Schlagschatten keine wichtigen Details im Bild verunklaren. Direkte Sonneneinstrahlung oder niedrige Wolkenschichten hingegen wirken sich ungünstig auf die Bildqualität aus (Abb. 4).

### Das Ende der Fotoleiter? Übersichtsaufnahmen aus niedrigen bis mittleren Höhen

Der Einsatz des Oktokopters zur Grabungsdokumentation aus der Luft erlaubt – den freien Luftraum vorausgesetzt – nahezu jede gewünschte Übersichtsaufnahme aus unterschiedlichsten Blickwinkeln aus Höhen bis zu 100 m über Grund. Damit wird ein Bereich abgedeckt, der in der Fachsprache als Nahbereichsluftbildfotografie oder Low Altitude Aerial Photography (LAAP) bezeichnet wird und sich besonders für hochauflösende und detailreiche Aufnahmen von Einzelobjekten wie Geländedenkmälern, Fundstellen und Grabungsflächen eignet. Die flächige Prospektion ganzer Landschaften auf archäologische Relikte

2 Mobilem Bildübertragungsmonitor, über den live das Sucherbild der Kamera verfolgt und der Auslösezeitpunkt bestimmt werden kann.

3 Fotodrohne im Einsatz bei der Dokumentation der Befunde auf der Ostterrasse der Heuneburg, Herberlingen-Hundersingen, Kr. Sigmaringen.



4 Einfluss der Witterungsbedingungen auf die Bildqualität am Beispiel des frühkeltischen Grabhügels von Ditzingen-Hirschlanden, Kr. Ludwigsburg.



5 Schema zur Darstellung unterschiedlicher Prospektionsmethoden aus der Luft, der dafür jeweils besonders geeigneten Fluggerättypen und der üblichen Arbeitshöhen.



hingegen bleibt weiterhin das Betätigungsfeld der klassischen Luftbildarchäologie, wie sie in Baden-Württemberg seit den 1980er Jahren intensiv und äußerst erfolgreich zunächst durch Hermann Gensheimer und dann vor allem durch Otto Braasch betrieben wird (Abb. 5).

Im Höhenbereich zwischen 2 und 100 m über Grund können mithilfe der Fotodrohne je nach verwendeten digitalen Kameras problemlos sowohl Fotos als auch Videoaufnahmen angefertigt werden, die eine wertvolle Ergänzung zur konventionellen Grabungsdokumentation am Boden darstellen. Bislang boten meist Fotoleitern – bei großen Flächen auch immer wieder speziell antransportierte große Feuerwehdrehleitern oder Hubsteiger – die einzige Möglichkeit, um von erhöhten Standpunkten aus Übersichtsaufnahmen zu erstellen. Sie sind jedoch neben etwaigen Kosten stets Einschränkungen hinsichtlich Höhe und Mobilität unterworfen.

Gerade die Möglichkeit, in hochauflösenden digitalen Sequenzen die Ausgrabungsstellen mit geringem Aufwand aus der Luft zu filmen und be-

wegte Bilder zu generieren, erschließt für die Dokumentation und spätere Präsentationen zusätzliches Bildmaterial, das bei Bedarf auch wieder in Einzelaufnahmen zerlegt werden kann.

Fotos werden als Schräg- oder Senkrechtaufnahmen aus unterschiedlichsten Richtungen und Perspektiven aufgenommen und liefern die Grundlage für Bildpläne und 3D-Modelle, die mit verschiedenen fotogrammetrischen Methoden erstellt werden: Hier sind neben entzerrten und somit maßhaltigen Luftbildern vor allem digitale Oberflächenmodelle und Orthofotos zu nennen. Diese lassen sich direkt aus einer entsprechend großen Zahl unterschiedlicher Fotos eines „Motivs“ berechnen, ohne dass weitere teure High-techgeräte benötigt würden. Die Einführung dieses als „Structure from Motion“ (SfM) bezeichneten Verfahrens in jüngster Vergangenheit hat die Fotodokumentation geradezu revolutioniert und erschließt Datenerhebung im dreidimensionalen Raum jenseits des zweidimensionalen Fotoplans. Mittlerweile wurden die oben cursorisch beschriebenen Möglichkeiten und Methoden bei mehreren Grabungsprojekten erfolgreich getestet und in der Praxis angewendet. Nach etwa einem Dutzend geflogener Einsätze sollen im Folgenden einige eindrucksvolle Fallbeispiele und Ergebnisse vorgestellt werden.

6 Schrägaufnahme vom Gipfelplateau der Limburg. Deutlich sind die diversen Grabungsschnitte zu erkennen.



### Ausgrabungsareale aus der Luft – Topografie- und Grabungsflächendokumentation

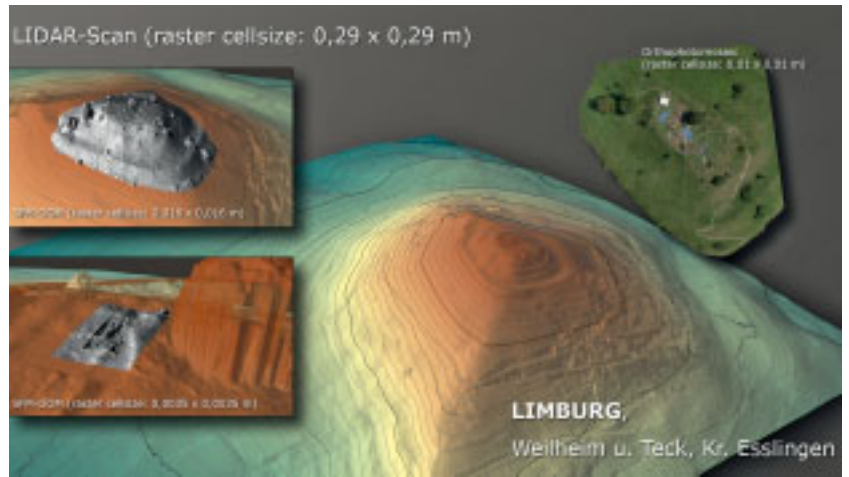
Zu den gängigsten Anwendungsbereichen des Fotodrohneinsatzes gehört das Erstellen von Übersichts- und Gesamtaufnahmen von Grabungsflä-

chen zur Dokumentation unterschiedlicher Grabungszustände. Idealerweise ist die umgebende topografische Situation gleichzeitig Gegenstand der Befliegung, sodass die Ausgrabungssituation in ihrem Gesamtzusammenhang dargestellt werden kann. Dies war beispielsweise an der Limburg bei Weilheim/Teck, Kr. Esslingen, der Fall. Hier erfolgte die topografische Aufnahme des Gipfelplateaus des ehemaligen Vulkanschlots in Verbindung mit der Dokumentation der Ausgrabungsschnitte der Universität Tübingen, Institut für Ur- und Frühgeschichte und Archäologie des Mittelalters, im mittelalterlichen Burgareal mit etwa 50 Schrägaufnahmen (Abb. 6). Weiter waren diese Bilder Grundlage für ein digitales Oberflächenmodell des Gipfelplateaus, dessen Auflösung stellenweise durch am Boden aufgenommene zusätzliche Fotos mit einer Auflösung von 3,5 cm Rasterweite berechnet werden konnte (Abb. 7). Die Verortung der Modelle im Landeskoordinatensystem erfolgte über am Boden markierte und eingemessene Referenzpunkte.

Die Bedeutung solcher Übersichtsaufnahmen konnte auch an einer Fundstelle im Hegau sehr eindrucksvoll belegt werden: Bei Anselfingen, Kreis Konstanz, wurde im Rahmen einer Notbergung der Kreisarchäologie eine lineare Steinstruktur zunächst unbekannter Funktion aufgedeckt. Eine eigens zur Befunddokumentation zeitnah durchgeführte Befliegung ließ schnell erkennen, dass es sich bei der Steinsetzung wohl um die Reste einer vermutlich römischen Straßentrasse handelte, die in ihrer Gesamtstruktur erst aus einer Höhe von circa 30 bis 40 m zu erkennen und beurteilen war (Abb. 8).

### Orthofotomosaik und dreidimensionale Oberflächenmodelle

Schrägaufnahmen in Verbindung mit nachträglich berechneten Kamerapositionen und -ausrichtungen liefern die Grundlagen, um mit spezieller Software verzerrungsfreie digitale Orthofotomosaik



zu generieren. Dies eignet sich insbesondere für weitläufige und komplexe Strukturen, wie sie unter anderem jüngst bei zwei Ausgrabungsprojekten der Mittelalterarchäologie der Landesdenkmalpflege in den Stadtkernen von Ellwangen/Jagst, Ostalbkreis, und in Isny im Allgäu, Kreis Ravensburg, angetroffen wurden.

Anfang Oktober 2013 lagen in Isny bei Ausgrabungen im Bereich „Hofstatt“ Baubefunde aus der Zeit zwischen dem 13. und 17. Jahrhundert frei – vor allem Keller und eine Straßenoberfläche. Die außergewöhnliche Erhaltung der Befunde ist dadurch zu erklären, dass das Areal nach der Zerstörung durch einen verheerenden Brand im Jahre 1631 bis heute nie wieder flächig überbaut wurde. Ziel des Fotodrohneinsatzes war die Luftbilddokumentation der Grabungsfläche mit den freiliegenden Strukturen. Die annähernd senkrecht aufgenommenen Bilder sollten mittels Passpunkten entzerrt und als Plangrundlage in die CAD-gestützte Grabungsdokumentation integriert werden. Daneben wurde die Gelegenheit genutzt, um das Potenzial des Bildmaterials für eine dreidimensionale Oberflächenrekonstruktion und letztlich für die Berechnung von digitalen Orthofotomosaiken zu prüfen. Aus insgesamt 56 Senkrecht- und Schrägaufnahmen, die während zweier jeweils rund 10-minütiger Flüge aufgenommen wurden,

7 Zusammenschau verschiedener 3D-basierter Daten am Beispiel des Gipfelplateaus der Limburg (LIDAR-Geländemodell, SFM-Oberflächenmodell und digitales Orthofotomosaik).

8 Übersichtsaufnahme eines neu entdeckten römischen Straßenabschnitts bei Anselfingen, Kr. Konstanz.

9 Isny im Allgäu, Kr. Ravensburg. Tachymetrische Planaufnahme und Orthofotomosaik der Befunde im Hofstattareal.

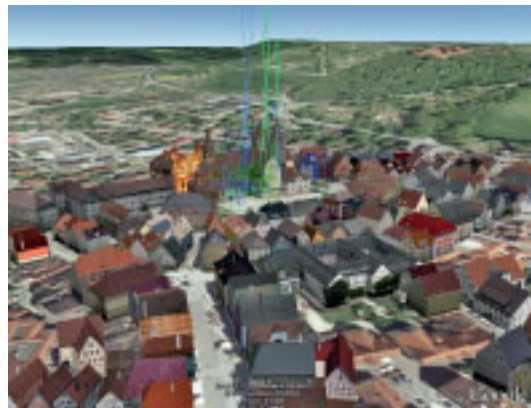




10 Ellwangen/Jagst, Ostalbkreis, Grabung Markt-  
platz. Fotodrohne über  
den freigelegten Befun-  
den des klösterlichen  
Friedhofsareals.



11 Ellwangen/Jagst, Ost-  
albkreis, Grabung Markt-  
platz. Flugbahn der Foto-  
drohne in vertikaler und  
horizontaler Aufzeichnung.



konnten in Verbindung mit den elf eingemessenen  
Passpunkten bis auf wenige Millimeter genau geo-  
referenzierte Oberflächenmodelle und Orthofotos  
berechnet werden (Abb. 9).

Die flächige Fotodokumentation der Ausgrabungen  
auf dem Marktplatz von Ellwangen stellte auf-  
grund der Dimensionen von über 1800 qm, der  
Komplexität der Befunde – Gräber, Kapellen und di-  
verse Mauerzüge unterschiedlicher Bauphasen –  
sowie der Lage mitten in der heutigen Stadt unmit-  
telbar neben der spätromanischen Basilika in jeg-  
licher Hinsicht eine Herausforderung dar. An zwei  
Tagen im August und im November 2013 wurden  
mehrere Ausgrabungsbereiche im Umfeld der ehe-  
maligen Klosterstiftskirche und heutigen Basilika  
St. Vitus mit der Fotodrohne aufgenommen (Abb. 10).  
Insgesamt 211 Luftbilder und knapp 15  
Minuten Videomaterial waren die Ausbeute der an  
den beiden Tagen geflogenen Einsätze. Neben den  
unterschiedlichsten Detail- und Übersichtsaufnah-  
men aus diversen Positionen und Höhen (Abb. 11)  
wurden entzerrte Luftbilder, Oberflächenmodelle  
und Orthofotomosaik mittels geografischer Infor-  
mationssysteme (GIS) und SFM-Software erstellt.  
Die Georeferenzierung über eingemessene Refer-  
enzpunkte erlaubt es, Aufnahmen verschiedener  
Ausgrabungsstadien zu kombinieren. Wie schon

12 Ellwangen/Jagst, Ost-  
albkreis, Grabung Markt-  
platz. Kombination aus  
entzerrter Schrägauf-  
nahme, unterschiedlichen  
Oberflächenmodellen  
und Orthofotomosaiken  
der verschiedenen Aus-  
grabungsstadien. Flä-  
che 1: Orthofotomosaik;  
Fläche 2: Oberflächen-  
modell; Fläche 3: Oberflä-  
chenmodell mit überblen-  
detem Orthofotomosaik.



eingangs erwähnt, schlägt sich im Vergleich zwi-  
schen den im August und den im November ge-  
machten Aufnahmen deutlich die starke Abhän-  
gigkeit der Methode von den Wetter- und Licht-  
bedingungen nieder (Abb. 12).

## Ausblick

Bereits während der ersten Einsätze der Foto-  
drohne hat sich das System in jeder Hinsicht be-  
währt. Es hat sich als zuverlässig und den un-  
terschiedlichen Bedürfnissen und Anforderungen an-  
gepasst erwiesen. Sowohl die fotografische als  
auch die filmische Dokumentation unterschied-  
licher Ausgrabungsflächen im offenen Gelände  
und im Bereich größerer Stadtkerngrabungen so-  
wie die anschließende rechnerische Weiterverar-  
beitung und Aufbereitung der gewonnenen Daten  
hat gezeigt, dass der Einsatz der Fotodrohne zeit-  
nah und mit vertretbarem Aufwand wichtige Do-  
kumentationsergebnisse liefern kann.

## Literatur

Jochen Reinhard: Structure from Motion, Drohnen  
und Co. Neue Wege in der Dokumentation archäolo-  
gischer Ausgrabungen, in TUGIUM 29, 2013, S. 177–  
188.

Geert Verhoeven et al: Undistorting the past – New  
techniques for orthorectification of archaeological ae-  
rial frame imagery, in: Good practice in archaeologi-  
cal diagnostics. Non-invasive survey of complex ar-  
chaeological sites, hg. v. Christina Corsi / Božidar Sla-  
pšak / Frank Vermeulen, Cham 2013, S. 31–67.

Jörg Bofinger / Otto Braasch: Grabhügel, Höhensied-  
lung, Viereckschanze: Erfolgreiche Spurensuche der  
Luftbildarchäologie zwischen Rhein und Ries, in: Mit  
Hightech auf den Spuren der Kelten. Archäologische  
Informationen aus Baden-Württemberg 61, hg. v. J.  
Bofinger / M. Merkl, Esslingen 2010, S. 28–43.

**Dr. Jörg Bofinger**

**Dr. Christoph Steffen**

Regierungspräsidium Stuttgart

Landesamt für Denkmalpflege