



Die ältesten Plastiken der Menschheit in 3-D Kombination von 3-D-Streifenlichtscan und -Fotogrammetrie zur Dokumentation und Visualisierung von Funden

Seit 2012 wird im Landesamt für Denkmalpflege intensiv daran gearbeitet, die Aufnahme der Höhlen der ältesten Eiszeitkunst als drittes archäologisches Ensemble in Baden-Württemberg in die UNESCO-Liste der Weltkulturerbestätten zu erreichen. Seit Anfang dieses Jahres liegt der umfangreiche Antrag beim UNESCO-Welterbezentrums in Paris zur Prüfung vor, wo 2017 die Entscheidung des Welterbekomitees bekannt gegeben wird. Im Zuge der wissenschaftlichen Aufarbeitung der Fundstätten im Lone- und Aachtal wurden 2013 und 2014 insgesamt sechs Höhlen mittels terrestrischem Laserscanning neu vermessen. Die daraus entstandenen hochgenauen 3-D-Modelle der Höhlenräume bilden eine neue und moderne Vermessungsgrundlage für aktuelle und zukünftige Forschungen (<http://www.denkmalpflege-bw.de/denkmale/projekte/archaeologische-denkmalpflege/3d-modelle/hoehlen3d.html>). Im Frühjahr 2016 wurde beschlossen, auch die wichtigsten Fundstücke eiszeitlicher Kunst zu scannen, als virtuelle dreidimensionale Modelle zu dokumentieren und damit in ihrem heutigen Zustand digital zu konservieren.

Markus Steffen/Christoph Steffen

1 Aufbau des mobilen Fotostudios im Urgeschichtlichen Museum in Blaubeuren. Für die fotogrammetrische Aufnahme kamen neben einer digitalen Spiegelreflexkamera mit Makroobjektiv und Polfilter auch ein Lichtzelt, Stativ sowie eine flexible Objekthalterung zum Einsatz.

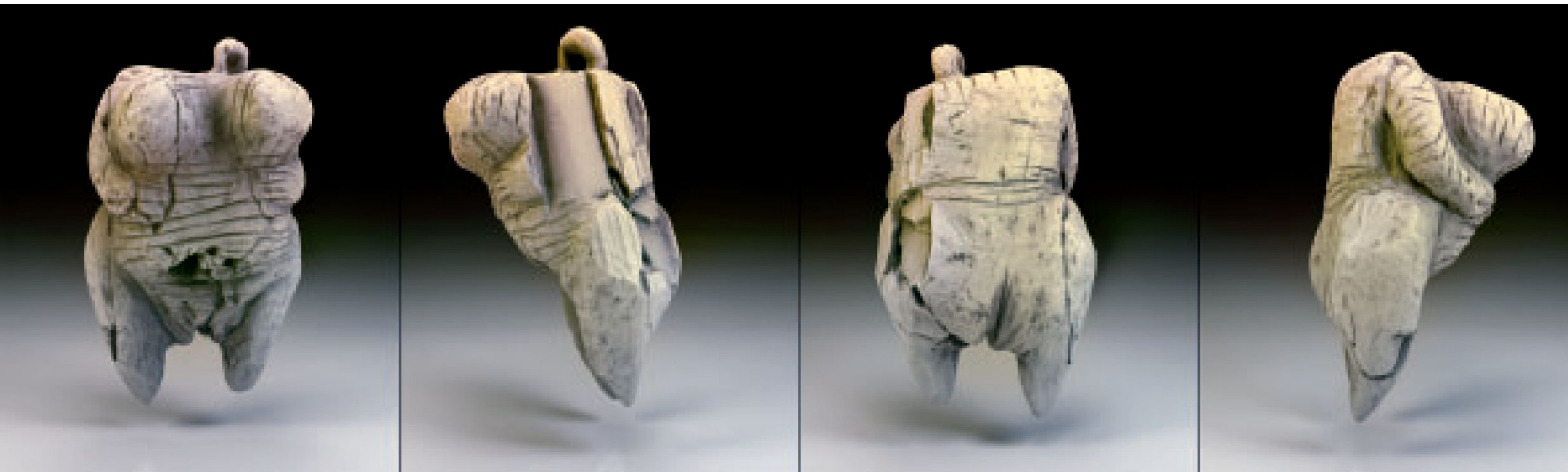
Zielsetzung und Schwierigkeiten der 3-D-Vermessung

Ziel der Messungen war es, ein geometrisch möglichst genaues 3-D-Abbild der Artefakte mit einer hochauflösenden fotorealistischen Textur zu erzeugen. Neben den Modellen für die Archivierung und wissenschaftliche Auswertung sollten auch

weitere, in der Datengröße reduzierte Modelle gerechnet werden. Diese sind in idealer Weise geeignet, um Inhalte für Medienanwendungen und Online-Angebote zu generieren. Dazu zählt interaktive Museumsdidaktik genauso wie die Aufbereitung der Objekte für Webanwendungen oder mobile Apps.

Bereits die ersten Überlegungen, wie ein solches Vorhaben geeignet umgesetzt werden könnte, zeigten, dass mit einigen Schwierigkeiten, auch im methodischen Bereich, zu rechnen war. Die Artefakte selbst stellten dem Projekt hierbei die ersten Hürden in den Weg. Es gibt sehr kleine Objekte, zum Beispiel der so genannte kleine Löwenmensch mit nur 2,6 cm Höhe. Dies ist sowohl für das Streifenlichtscanning (kurz: SLS) als auch für die Fotoaufnahmen für das Structure-from-Motion-Verfahren (kurz: SFM) ungünstig, da immer nur ein kleiner Ausschnitt des Messfelds für das Objekt genutzt werden kann. Alle Fundstücke sind zudem extrem wertvoll und oftmals auch sehr empfindlich. Infolgedessen konnten die Funde nicht nach Esslingen transportiert werden, sondern mussten jeweils am Aufbewahrungsort gemessen werden. Dadurch wurde es notwendig, jeweils das gesamte Messequipment zu transportieren, neu aufzu-





bauen und zu kalibrieren, und es ergaben sich natürlich auch jedes Mal unterschiedliche Umgebungsparameter (Lichtbedingungen, Temperatur, Vibrationen), die jeweils individuell zu berücksichtigen waren (Abb. 1).

Aufgrund ihrer Fragilität ist auch die Handhabung der Funde erschwert. Es war nicht immer möglich, diese in der für eine Messung optimalen Position vor dem Scanner oder der Kamera anzubringen.

Eine weitere Herausforderung war das Material. Bearbeitete Knochen und in noch höherem Maß Zahn- und Elfenbeinobjekte weisen häufig polierte Bereiche der Oberfläche auf oder, wie im Fall der „Wildschwein-Venus“, sogar transparente Bereiche (Abb. 7). Diese erzeugen Glanzpunkte, Reflexionen und Spiegelungen, erschweren eine saubere Datenaufnahme und können im Extremfall zur Artefaktbildung in den 3-D-Daten führen. Da sowohl der Streifenlichtscanner als auch die Fotogrammetrie rein optische Sensorik verwenden, mussten diese Probleme entsprechend beachtet werden.

Im Vorfeld wurden deshalb am Landesamt für Denkmalpflege in Esslingen eine Reihe von Tests an rezentem Walrosselfenbein und sibirischem

Mammutelfenbein durchgeführt, um die optimalen Parameter zu eruiieren und so die Beeinflussung durch materialbedingte Faktoren möglichst zu minimieren.

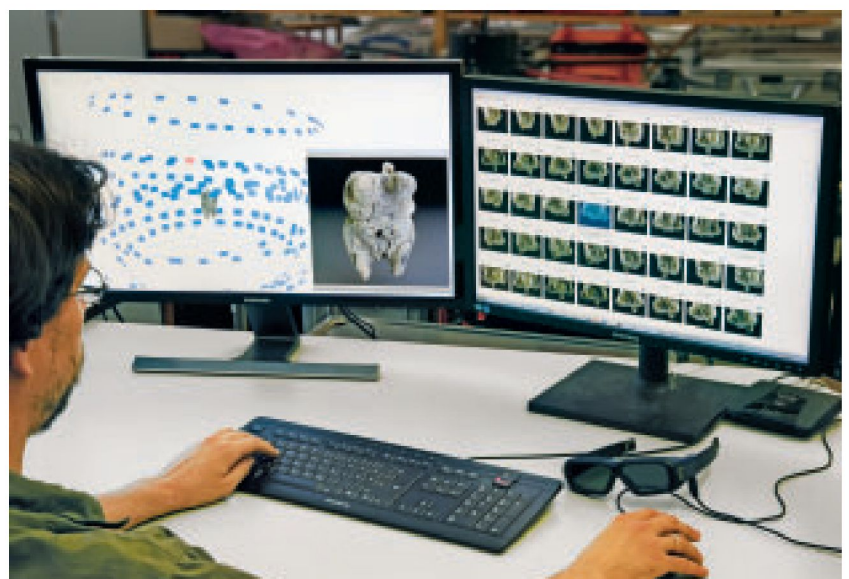
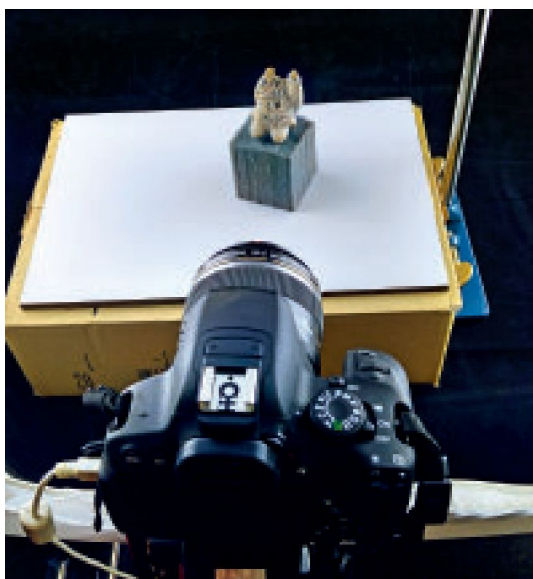
Kombinierte Aufnahmestrategie aus Streifenlichtscans und SFM-Fotogrammetrie

Um die gewünschte Genauigkeit und Detailauflösung zu erreichen, war es notwendig, mit zwei unterschiedlichen 3-D-Dokumentationsverfahren zu arbeiten. Durch den Einsatz eines Streifenlichtscanners (Polygon PTM1660 c) wurde eine hochpräzise Vermessung der Objektgeometrie gewährleistet. Die Messungenauigkeit lag bei der Venus vom Hohlefelds im Mittel bei nur 0,009 mm. Alle Objekte wurden auf einem kalibrierten Drehteller gelagert und mit 24 beziehungsweise 36 Scans pro 360° in mindestens vier Positionierungen gemessen. Dies genügte in aller Regel für eine vollständige Abdeckung der Oberfläche. Lediglich sehr tiefe und schmale Ritzen oder komplexe Hinterschnidungen und Hohlräume, beispielsweise das Innere der Knochenflöten aus dem Hoh-

2 Die Darstellung der Oberflächengeometrie der Venus vom Hohlefelds auf Basis des Streifenlichtscans macht auch feinste Ritzungen und Brüche sichtbar.

3 Aufnahmesituation während der fotogrammetrischen Vermessung der Venus vom Hohlefelds. Insbesondere die Positionierung der kleinen und überaus empfindlichen Objekte stellte eine Herausforderung dar.

4 Die Berechnung der 3-D-Modelle aus den Fotoserien erfolgt am PC in Esslingen.





5 Gerenderte Ansicht der Wasservogelfigur aus dem Hohle Fels. Kombination aus der hochpräzisen Geometrie des Streifenlichtscans und der qualitativollen Farbtextur aus dem Structure-from-Motion-Verfahren. Im Bereich der Schnabelspitze ist eine winzige Lücke in der Fotoabdeckung auszumachen, die in der Textur aus benachbarten Pixeln interpoliert wurde.

lefelds, können aus verfahrenstechnischen Gründen nicht gemessen werden. Aus den insgesamt 154 Einzelscans im Falle der Venus vom Hohlefelds ergaben sich etwas mehr als 6,4 Millionen Messpunkte auf der Oberfläche des nur 59,7 mm × 34,6 mm × 31,3 mm großen Objekts (Abb. 2).

Als zweites 3-D-Dokumentationsverfahren wurde das fotogrammetrische Structure-from-Motion-Multi-View-Stereo-Verfahren (kurz SFM-MVS bzw. SFM) eingesetzt. Dabei werden aus sich großflächig überlappenden konventionellen Digitalfotos 3-D-Oberflächeninformationen errechnet. Neben der Form wird auch die Farbe der Artefaktoberfläche hochauflösend dokumentiert. Dies ermöglicht im Ergebnis eine fotorealistische Wiedergabe.

Ziel der im Vorfeld entworfenen Aufnahmestrategie war es, die Stärken beider Verfahren optimal zu nutzen, um letztlich zu einem 3-D-Datensatz zu gelangen, der die hohe Geometrieauflösung des Scans mit der qualitativollen Farbtextur aus dem fotogrammetrischen Verfahren kombiniert.

Für das fotogrammetrische Modell der Venus vom Hohlefelds wurden 223 Digitalfotos mit einer Canon EOS 700D mit 60 mm Makroobjektiv und einem Zirkularpolfilter aufgenommen. Dazu wurde das Objekt vor einem schwarzen Hintergrund in einem Lichtzelt vor der Kamera gedreht (Abb. 3). Insgesamt wurden so acht Bildserien aus verschiedenen Blickrichtungen aufgenommen. Jede Serie entspricht jeweils einer vollen 360°-Drehung des Objekts um dessen Längsachse in etwa 13°-Schritten. So konnte die für das Verfahren notwendige sehr hohe Bildüberlappung erreicht werden (Abb. 4).

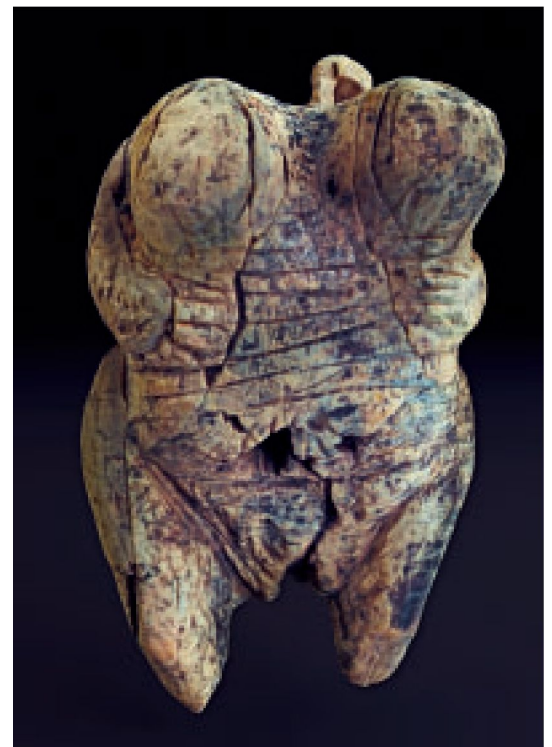
Bei der Beleuchtung wurde auf ein möglichst diffuses Licht geachtet. Der einheitlich schwarze Hintergrund ermöglichte es mittels Differenzmasken, das Objekt auf den Fotos automatisch freizustellen, und der Polfilter half, Spiegelungen beziehungsweise Glanz auf der Artefaktoberfläche zu reduzieren.

6 Gerenderte Frontalansicht der Venus vom Hohlefelds auf Basis des Streifenlichtscans und der Farbtextur aus der fotogrammetrischen Aufnahme.

Für die Berechnung des SFM-Modells kam die Software Photoscan Professional zum Einsatz. Aus den 223 Fotos wurde eine 3-D-Punktwolke extrahiert und zu einem fünf Millionen Polygone umfassenden Oberflächenmodell verrechnet. Nun konnten die beiden aus Streifenlichtscan und Fotogrammetrie vorliegenden Oberflächenmodelle verglichen und gemeinsame Referenzpunkte bestimmt werden. Mittels dieser ließen sich das SFM-Modell sowie die ermittelten Kamerapositionen korrekt im lokalen Koordinatensystem des Streifenlichtscanmodells ausrichten. Das fotogrammetrische Oberflächenmodell wurde in Photoscan durch das geometrisch präzisere Oberflächenmodell des Streifenlichtscans ersetzt. So gelang es, das genaueste Geometriemodell mit der besten Farbtextur (maximale theoretische Auflösung 256 Megapixel) zu kombinieren (Abb. 6).

Probleme und Lösungsansätze

Die Herausforderungen bei Messungen, die durch Polituren oder noch extremer bei transparentem Material auftreten können, wurden weiter oben schon angedeutet. Glanz und Reflektion lassen sich durch Polfilter und eine angepasste Ausleuchtung zu erheblichen Teilen in den Griff bekommen. Transparenz stellt beide Methoden vor wesentlich größere Herausforderungen. Materialien wie zum Beispiel Glas sind ohne spezielle Maßnahmen weder mit dem Scanner noch fotogrammetrisch zu erfassen. Bei industriellen Anwendungen kann ein so genanntes 3-D-Anti-Glare-Spray eingesetzt werden. Es bildet eine extrem dünne (ca. 2,8 µm) homogene mattweiße Antireflexschicht auf der zu



scannenden Oberfläche. Auf diese Weise lassen sich auch völlig transparente Materialien oder spiegelnde Flächen sauber geometrisch vermessen. Im Falle der Eiszeitkunst kam der Einsatz eines solchen Sprays aus konservatorischer und restauratorischer Sicht natürlich nicht in Frage. Mögliche Reaktionen des Materials mit dem Pulver oder dem Trägerlösungsmittel oder irreversible Verschmutzungen konnten nicht ausgeschlossen werden. Zudem verhindern solche Mattierungen der Oberflächen natürlich auch die Dokumentation ihrer Farbigkeit. Am ersten Einsatzort im Urgeschichtlichen Museum in Blaubeuren konnten alle Objekte erfolgreich vermessen werden. Nichtsdestotrotz gab es doch die eine oder andere grundsätzliche Schwierigkeit zu bewältigen. Zum Beispiel konnte die äußerste Schnabelspitze des Wasservogels durch die fotogrammetrische Messung nicht vollständig erfasst werden. Sie ist so klein, dass selbst bei Verwendung einer 18-Megapixel-Kamera letztlich nicht genügend Pixel auf die Spitze platziert werden konnten, um eine 3-D-Vermessung im Submillimeterbereich zu realisieren. Dieses Manko konnte durch den 3-D-Scan, zumindest, was die geometrische Vermessung anbelangt, kompensiert werden. Jedoch ist bei genauerem Hinsehen die Fototextur auf den letzten circa 0,5 mm der Schnabelspitze nicht perfekt, die Farbgebung wurde durch die Software aus den benachbarten Pixeln interpoliert (Abb. 5).

Hinzu kamen, wie bereits angesprochen, Probleme bei der optimalen Positionierung und Halterung der Objekte, hervorgerufen hauptsächlich durch ihre Fragilität und ihren außerordentlichen Wert. Insbesondere für eine vollständige und vor allem nahtlose Vermessung mittels SFM muss die gesamte Oberfläche des Zielobjekts mit hohen Bildüberlappungen fotografiert werden. Dabei sollte die Beleuchtung in Relation zum Objekt möglichst statisch sein, um einen einheitlichen, das heißt unveränderlichen Schattenwurf zu gewährleisten. Zudem muss beachtet werden, dass Halterungen oder auch Auflagen einerseits Teile der Oberfläche verdecken, andererseits zu unerwünschtem Schattenwurf führen. Diese Verdunklungen auf den Fotos können später in der Textur kaum noch korrigiert werden. Es mussten daher Möglichkeiten gefunden werden, das Objekt so zu fixieren, dass die Halterung nur jene Bereiche verdeckt, die außerhalb der jeweils fotografierten Bildausschnitte liegen. Um im Anschluss die verdeckten Bereiche mittels einer weiteren Fotoserie dokumentieren zu können, wurde die Halterung verlagert, ohne die Objektausrichtung im Verhältnis zu den Lichtquellen allzu stark zu verändern. Dazu waren teils flexible Halte- beziehungsweise Positionierungsvorrichtungen nötig, die ad hoc an die jeweilige Situation angepasst wurden.



7 Der Scan der aus einem Wildschweinzahn gefertigten Venusfigur zeigt die Mikrorisse der transparenten Oberfläche als positive Messartefakte.

8 Im Streifenlichtscan sind die zur Befestigung angebrachten Nylon-schnüre am Miniaturlöwenmann aus dem Hohlefels deutlich erkennbar. Auch die Bruchkante am unteren Rand der Figur konnte durch die Sockelung für die Präsentation in der Vitrine nicht erfasst werden.

Ein weiteres Problem wurde durch die Transparenz der äußersten Zahnschmelzschicht der aus einem Wildschweinhauer gefertigten Venusfigur verursacht. Mit bloßem Auge zunächst nicht zu erkennen, zeigten sich im 3-D-Scan Strukturen, die an





9 Versuch einer Rekonstruktion der farblichen Originalanmutung des „Mammute“ aus der Vogelherdhöhle.

eine Krakelierung erinnerten. Erklären lässt sich dies dadurch, dass die hauchdünne oberste Zahnschmelzschicht so transparent ist, dass der Scanner sie nicht erfassen konnte und erst die darunterliegende opake Schicht gemessen hat. Die Krakelierungen sind wahrscheinlich Mikrorisse im transparenten Zahnschmelz, die durch die Lichtbrechung vom Scanner erfasst werden konnten und sich somit als positive Geometrieabweichung auf der Modelloberfläche zeigen.

Ein weiteres zunächst eher banal anmutendes Problem sind restauratorische Einbauten. Gemeint sind damit Stütz- oder Befestigungsstrukturen, die für die museale Präsentation der Artefakte nötig sind. Da der Aufwand, diese Strukturen zu entfernen und nach erfolgter Messung wieder anzubringen, zum Teil sehr erheblich ist, wurde in manchen Fällen darauf verzichtet. So zeigt das Geometriemodell wie auch die Textur des kleinen Löwenmenschen den Draht und die Nylonschnüre um Hals und Hüfte, die zur Befestigung in der Vitrine dienen. Natürlich lassen sich diese Störungen aus dem Modell herauschneiden und optisch kaschieren, aber Fehlstellen in der Messung sind es trotzdem, und diese sollten im Sinne einer sauberen Dokumentation auch entsprechend erkennbar bleiben (Abb. 8).

Fazit und Ausblick

Trotz der oben angesprochenen Schwierigkeiten hat sich die kombinierte Aufnahmestrategie mit Streifenlichtscan und SFM bei den ersten Messungen der ältesten Eiszeitkunst im Urgeschichtlichen Museum in Blaubeuren und im Archäopark Vogelherd bestens bewährt. Die Ergebnisse konnten überzeugen, sowohl was die geometrische Genauigkeit als auch die Farbtexturen angeht. Damit stehen nun speziell für diese Aufgaben angepasste und nunmehr in der Praxis erprobte Verfahrensweisen für die zukünftigen Messreihen an Objekten der ältesten Eiszeitkunst zur Verfügung.

Nichtsdestotrotz werden Aufnahmetechnik und Ausstattung auch künftig stetig weiterentwickelt und optimiert werden. Stichworte in diesem Zusammenhang wären beispielsweise die Verwen-

dung von polarisierten Lichtquellen, um Spiegelungen beziehungsweise Glanz auf den Oberflächen vollständig vermeiden zu können, oder der Einsatz noch leistungsfähigerer Soft- und Hardwarelösungen, um das Filtern, Registrieren und Prozessieren der Daten weiter zu optimieren.

Es wird voraussichtlich noch bis Ende 2017 dauern, bis alle relevanten Objekte aus den Höhlen mit der ältesten Eiszeitkunst dokumentiert sind (Abb. 9). Dann wird nicht nur der derzeitige Zustand dieser bedeutenden Objektgruppe in Form und Farbe erfasst sein, sondern die 3-D-Modelle werden eine wichtige Basis für vielfältige Anwendungen im musealen Bereich wie auch für wissenschaftliche Untersuchungen bieten.

Literatur

Nicole Ebinger-Rist/Helmut Schlichtherle/Markus Steffen: 5000 Jahre alte Pfahlbaufunde. Dokumentation und Visualisierung von 3-D-Messdaten, in: Denkmalpflege in Baden-Württemberg 45/1, 2016, S. 33–36.
Bertram Jenisch/Stephan Heidenreich/Markus Steffen: Vom Schreibtisch in die Burg fliegen! Terrestrische Laservermessung auf der Hochburg bei Emmendingen, in: Denkmalpflege in Baden-Württemberg 44/3, 2015, S. 126–131.

Jörg Bofinger/Christoph Steffen: Die fliegende Kamera. Neue Methoden der archäologischen Fotodokumentation aus der Luft, in: Denkmalpflege in Baden-Württemberg 43/2, 2014, S. 108–112.

Stephan Heidenreich/Markus Steffen: Virtual Archaeology in Southwestern Germany – Processing and Online-Presentation of 3D-Models/Virtuelle Archäologie in Baden-Württemberg – Verarbeitung und Online-Präsentation von 3D-Modellen, in: Electronic Media and Visual Arts/Elektronische Medien & Kunst, Kultur und Historie, hg. v. A. Bienert/P. Santos, Konferenzband EVA Berlin 2014, S. 143–149.

Markus Steffen: 3D-Laserscanning – neue Methoden zur Dokumentation und Visualisierung am Landesamt für Denkmalpflege Baden-Württemberg. Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2014, S. 278–284.

Praktischer Hinweis

Die virtuellen Einblicke in die Höhlen der ältesten Eiszeitkunst finden Sie auch unter www.denkmalpflege-bw.de > Denkmale > Projekte archäologische Denkmalpflege > Virtuelle Archäologie – 3D-Computermodelle archäologischer Denkmale.

Dr. Christoph Steffen

Markus Steffen M. A.

Landesamt für Denkmalpflege im
Regierungspräsidium Stuttgart
Dienstsitz Esslingen