

Stadt Erding (Hrsg.)

Spangenbarrenhort Oberding



Gebündelt und vergraben -
ein rätselhaftes Kupferdepot
der Frühbronzezeit

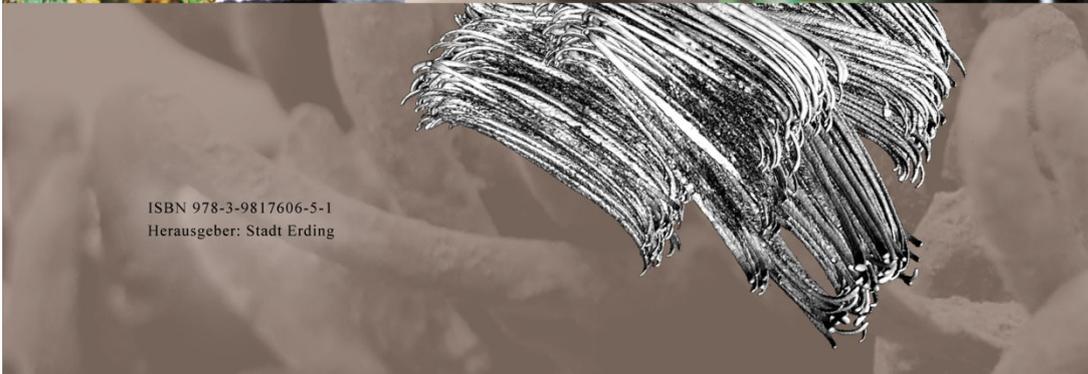


Mit einem Gewicht von über 80 kg Kupfer wurde 2014 in Oberding, Landkreis Erding, im Rahmen einer bauvorgreifenden archäologischen Ausgrabung der umfangreichste, bisher bekannt gewordene Spangenbarrenhort Europas entdeckt. Der Hortfund aus der Frühbronzezeit umfasst 796 Barren. Er wurde vor 3.700 Jahren am Rande einer zeitgleichen, mit Keramik und Tierknochen verfüllten Abfallgrube in einer separaten Erdhöhle zu 10er-Bündeln verschnürt deponiert.

War es ein Versteck, das Depot eines Wanderhandwerkers oder möglicherweise eine rituelle „Gabe an die Götter“?

Die Stadt Erding konnte den Sensationsfund für ihr Museum Erding erwerben, gemeinsam mit dem Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege restaurieren und in enger Zusammenarbeit mit der LMU München und weiteren Kooperationspartnern erforschen. 2017 wurde er in die Dauerausstellung integriert.

Das mit über 240 brillanten Abbildungen gespickte Buch fasst sämtliche Forschungsergebnisse in 20 Einzelbeiträgen zusammen und lädt zum intensiven Studium ein.



ISBN 978-3-9817606-5-1
Herausgeber: Stadt Erding



Museum Erding - Schriften 2

Spangenbarrenhort Oberding

**Gebündelt und vergraben -
ein rätselhaftes Kupferdepot der Frühbronzezeit**

Herausgegeben von der Stadt Erding
Erding 2017

Inhalt

- 6 **Grußwort**
Max Gotz
- 8 **Vorwort**
C. Sebastian Sommer
- 11 **Vorwort**
Carola Metzner-Nebelsick
- 14 **Der frühbronzezeitliche Spangenbarrenhort von Oberding – Ein Erfolgsprojekt stellt sich vor**
Stephanie Gasteiger, Harald Krause & Wilhelm Wagner
- 24 **Spangenbarren können viel erzählen - Archäologische Zielsetzungen und Fragestellungen**
Sabrina Kutscher
- 32 **Aus dem Grabungstagebuch: Notizen zur Ausgrabung und Blockbergung in Oberding**
Birgit Anzenberger, Jakob Leicht & Thomas Stöckl
- 38 **EXKURS: Begriffe zur archäologischen Ausgrabung**
Birgit Anzenberger
- 42 **Von Gruben und Pfostenlöchern –
Einblick in die Siedlungsgeschichte der Frühen Bronzezeit im Landkreis Erding**
Sabrina Kutscher
- 50 **EXKURS: Die Frühbronzezeit (2200/2150 – 1650/1600 v. Chr.)**
Carola Metzner-Nebelsick
- 54 **Vier Gruben und ein Pfostenloch – Die Befunde von Oberding**
Sabrina Kutscher
- 64 **Geoarchäologische Spurensuche im Hortfund von Oberding – Bodenkunde auf kleinstem Raum**
Britta Kopecky-Hermanns & Harald Krause
- 78 **EXKURS: Was ist Geoarchäologie?**
Britta Kopecky-Hermanns
- 80 **Restaurierung, Konservierung und Dokumentation des Spangenbarrenhortes von Oberding**
Jörg Stolz
- 94 **Archäologische Blockbergungen durchleuchtet:
Möglichkeiten der Computer-Tomographie am Fraunhofer EZRT**
Nils Reims & Michael Böhnel
- 102 **3D Fotogrammetrie und 3D Druck des Spangenbarrenhortes von Oberding**
Eik Jagemann
- 112 **Ein Spangenbarren kommt selten allein – 796 Spangenbarren aus Oberding**
Sabrina Kutscher
- 147 **EXKURS: Was sind Horte und Deponierungen?**
Christoph Huth
- 148 **Ungewöhnlich aber nicht unsinnig – die Herstellungstechnik von Spangenbarren**
Jörg Stolz

- 158 **Das Zentrallabor auf der Überholspur: 611 Spangenbarren in 8 Tagen analysiert!
Metalluntersuchungen mittels mobiler Röntgenfluoreszenzanalyse**
Björn Seewald
- 166 **EXKURS: Röntgenfluoreszenzspektroskopie (RFA oder XRF)**
Björn Seewald
- 168 **Untersuchungen zur Klassifikation und Herkunft der Spangenbarren von Oberding**
Ernst Pernicka
- 180 **EXKURS: Isotopenanalyse**
Ernst Pernicka
- 182 **Bronzezeitliche Hortfunde. Deutung und Bedeutung einer rätselhaften Fundgattung**
Christoph Huth
- 194 **Die frühbronzezeitliche Töpferware von Oberding**
Sabrina Kutscher
- 208 **Säen, Ernten, Kochen: Die verkohlten Pflanzenreste von Oberding**
Barbara Zach & Sabrina Kutscher
- 214 **EXKURS: Die archäobotanische Makrorestanalyse**
Sabrina Kutscher & Barbara Zach
- 216 **Die Tierknochen aus den frühbronzezeitlichen Abfallgruben von Oberding**
Silvia Eccher & Umberto Tecchiati
- 224 **Zu krankhaften Veränderungen an frühbronzezeitlichen Tierknochen und -zähnen aus den
frühbronzezeitlichen Siedlungsgruben neben dem Spangenbarrendepot von Oberding**
Wolf-Rüdiger Teegen
- 228 **EXKURS: Die Methode der Archäozoologie**
Silvia Eccher
- 232 **Die Form ist entscheidend. Relative und absolute Datierung der Funde und Befunde.**
Sabrina Kutscher
- 236 **EXKURS: Relative und Absolute Datierung von archäologischen Funden und Befunden**
Sabrina Kutscher
- 238 **Spangenbarrenhort Oberding: Zusammenfassung und Ausblick**
Harald Krause & Sabrina Kutscher
- 244 **Dank & Widmung**
Harald Krause
- 246 **Autorenverzeichnis & weiterführende Internetadressen**
- 248 **Das Kooperationsprojekt - Die Projektbeteiligten und ihre Aufgaben**
- 252 **Impressum**

Autorenverzeichnis & weiterführende Internetadressen

Birgit Anzenberger M.A. & Dr. Jakob Leicht

Archäologisches Büro Anzenberger & Leicht
Bergmannstraße 3
80339 München
info@archaeologisches-buero.de

Silvia Eccher M.A.

Ludwig-Maximilians-Universität München
Institut für Vor- u. Frühgeschichtliche Archäologie u.
Provinzialrömische Archäologie
Geschwister-Scholl-Platz 1
80539 München
silviaeccher@libero.it

Dipl.-Rest. Stephanie Gasteiger

Stellvertretende Referatsleitung B V
Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege
Referat B V – Restaurierung Archäologie und
Dendrolabor
Hofgraben 4
80539 München
Stephanie.Gasteiger@blfd.bayern.de

Prof. Dr. Christoph Huth

Universität Freiburg
Institut für Archäologische Wissenschaften
Abteilung Urgeschichtliche Archäologie
Belfortstrasse 22
79085 Freiburg im Breisgau
christoph.huth@archaeologie.uni-freiburg.de

Eik Jagemann M.A.

Formwerk3D Hannover und Archäologische
Illustrationen
Marienstraße 4
30171 Hannover
jagemann@praehist3d.de

Dipl.-Geogr. Britta Kopecky-Hermanns

Büro für Bodenkunde und Geoarchäologie
Obere Achstraße 46
86668 Karlshuld
hermanns.kopecky@t-online.de

Harald Krause M.A.

Museumsleitung
Museum Erding
Prielmayerstraße 1
85435 Erding
harald.krause@erding.de

Sabrina Kutscher MA

Ludwig-Maximilians-Universität München
Institut für Vor- u. Frühgeschichtliche Archäologie u.
Provinzialrömische Archäologie
Geschwister-Scholl-Platz 1
80539 München
sabrina.kutscher@campus.lmu.de

Univ.-Prof. Dr. Carola Metzner-Nebelsick

Institutsleitung
Ludwig-Maximilians-Universität München
Institut für Vor- u. Frühgeschichtliche Archäologie u.
Provinzialrömische Archäologie
Geschwister-Scholl-Platz 1
80539 München
Metzner-Nebelsick@vfpa.fak12.uni-muenchen.de

Prof. Dr. Ernst Pernicka

Curt-Engelhorn-Zentrum Archäometrie gGmbH
an der Universität Heidelberg, D 6,3
68159 Mannheim
ernst.pernicka@cez-archaeometrie.de
Ernst.Pernicka@geow.uni-heidelberg.de

Nils Reims & Michael Böhnel

Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS
Anwendungsspezifische Methoden und Systeme
Flugplatzstraße 75
D-90768 Fürth
nils.reims@iis.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. Björn Seewald

Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege
Referat Z V: Zentrallabor
Hofgraben 4
80539 München
Bjoern.Seewald@blfd.bayern.de

Prof. Dr. C. Sebastian Sommer

Landeskonservator
Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege
Praktische Denkmalpflege: Bodendenkmäler
Hofgraben 4
80539 München
Sebastian.Sommer@blfd.bayern.de

Dipl.-Rest. (FH) Thomas Stöckl

Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege
Referat B V: Restaurierung Archäologie und
Dendrolabor
Hofgraben 4
80539 München
Thomas.Stoeckl@blfd.bayern.de

Dipl.-Rest. (Univ.) Jörg Stolz

Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege
Referat B V: Restaurierung Archäologie und
Dendrolabor
Hofgraben 4
80539 München
Joerg.Stolz@blfd.bayern.de

Prof. Dr. Wolf-Rüdiger Teegen

Studiengangskoordinator „MA Vor- und
Frühgeschichtliche Archäologie“
Ludwig-Maximilians-Universität München
Institut für Vor- u. Frühgeschichtliche Archäologie u.
Provinzialrömische Archäologie/ ArchäoBioCenter
Geschwister-Scholl-Platz 1
80539 München
Teegen@vfpa.fak12.uni-muenchen.de

Dr. Umberto Tecchiati

Landesamt Bozen-Südtirol
Amt für Bodendenkmäler
Armando-Diaz-Straße 8
39100 Bozen
umberto.tecchiati@provinz.bz.it

Dipl.-Ing. Wilhelm Wagner

Stadttheimatpfleger-Archäologie für das Gebiet der
Großen Kreisstadt Erding
Prielmayerstr. 1
85435 Erding
stadtheimatpfleger@erding.de

Dipl. Biol. Barbara Zach

Archäobotanik Labor Zach
Weidachring 4
86975 Berbeuren
B.Zach@uni-hohenheim.de

Weiterführende Internetadressen

www.museum-erding.de

www.blfd.bayern.de

www.vfp-archaeologie.uni-muenchen.de

www.cez-archaeometrie.de

[www.geow.uni-heidelberg.de/forschungsgruppen/
pernicka](http://www.geow.uni-heidelberg.de/forschungsgruppen/pernicka)

www.archaeobotanik-labor-zach.de

www.iis.fraunhofer.de

www.archaeologisches-buero.de

www.formwerk3d.com

www.archaeologische-illustrationen.de

www.tidobrussig.com

www.mobileslandschaftsmuseum.de

Finis:
Von seiner
Geschichte
befreit: Das
Baugrundstück
in Oberding-Son-
nenstraße nach
der erfolgreichen
Blockbergung
am Abend des
16. April 2014.
Foto:
Harald Krause



Impressum

Herausgeber: *Stadt Erding, Landshuter Straße 1, 85435 Erding,
www.erding.de*

Konzeption: *Harald Krause & Sabrina Kutscher*

Redaktion: *Harald Krause & Sabrina Kutscher*

Gestaltung, Satz, Herstellung: *Peter Cronauer*

Druck: *Präbst Satz & Druck GmbH, Dorfen*

Umschlag- und Vorsatzabbildungen: *BLfD, Fraunhofer EZRT und Harald Krause*

Anschrift: *Prielmayerstraße 1
85435 Erding
www.museum-erding.de*

ISBN 978-3-9817606-5-1

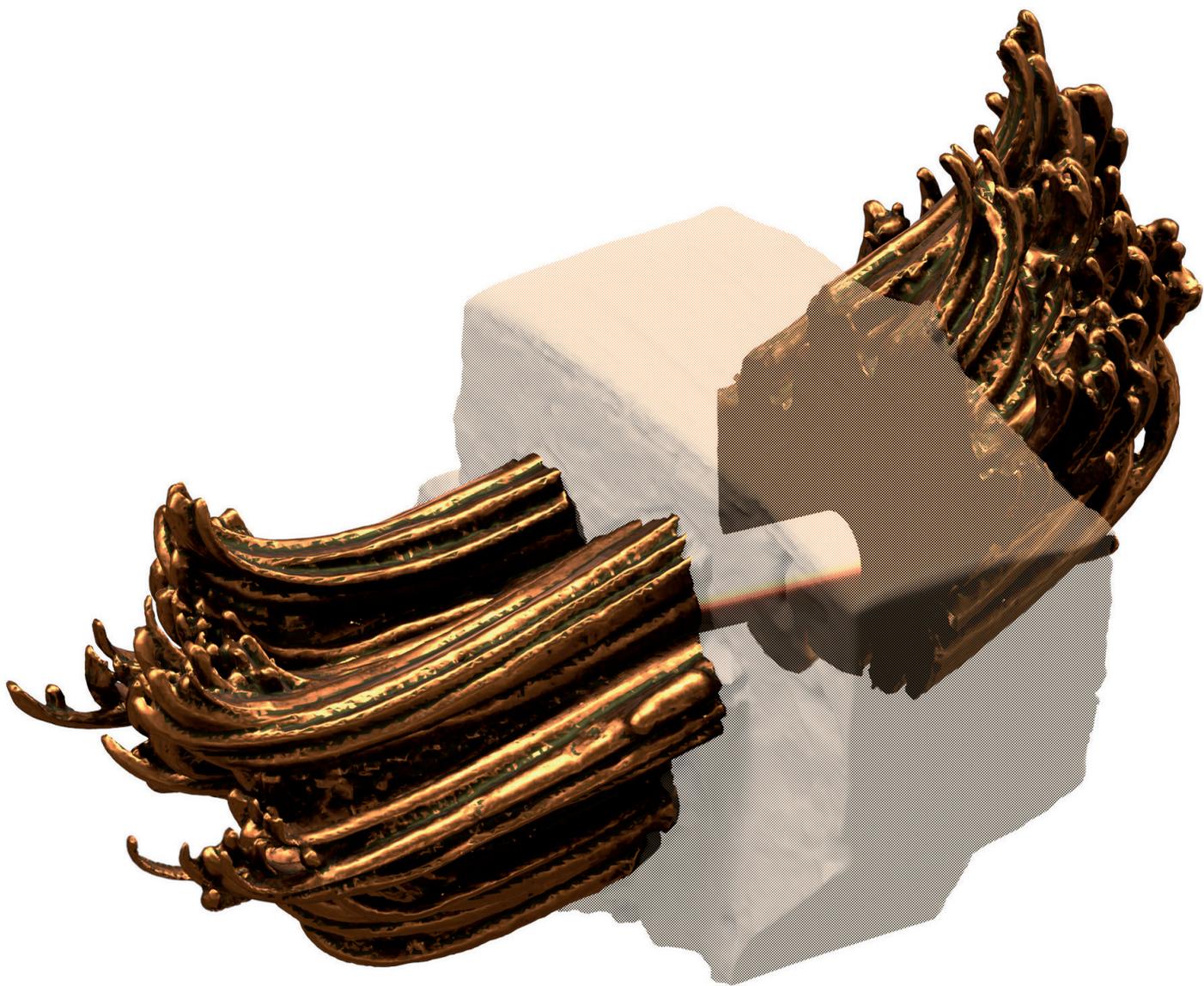
Printed in Germany

© Museum Erding, Juli 2017

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter dnb.dnb.de abrufbar.

Alle Rechte, auch diejenigen der Übersetzung, der Digitalisierung, der fotomechanischen Wiedergabe
und des auszugsweisen Abdrucks, vorbehalten.



3D Fotogrammetrie und 3D Druck des Spangenbarrenhortes von Oberding

Eik Jagemann

Formwerk3D und Archäologische Illustrationen

Als im April 2014 während des Baus einer Doppelhaushälfte ein umfangreicher Hort mit frühbronzezeitlichen Spangenbarren gefunden wurde, war dies ein seltener Glücksfall. Die Kupferartefakte konnten im Block für eine spätere Bearbeitung geborgen und im Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege (BLfD) in München, ohne den Zeitdruck einer Notbergung, freigelegt werden. Nach einer Ersten 3D Tomografie wurde entschieden einzelne Zwischenstände nicht nur zeichnerisch und fotografisch zu dokumentieren, sondern diese auch als Fotorealistic 3D Modelle zu "konservieren".¹ Da während einer Ausgrabung die Befundstrukturen während des Freilegens zwar dokumentiert aber im selben Arbeitszug zerstört werden, ist es von entscheidender Wichtigkeit möglichst viele Informationen in einem Arbeitsschritt festzuhalten. Immer häufiger werden bei der archäologischen Feldarbeit neben Zeichnungen und Fotografien auch dreidimensionale Scantechniken genutzt. Je nach verwendeter Technik wird die Form und Farbe des zu dokumentierenden Objektes dabei von Lasern abgetastet, mittels strukturierten Lichtmustern erfasst oder durch die Ausrichtung von Fotos (Fotogrammetrie) rekonstruiert. Alle diese Techniken besitzen eigene Vor- und Nachteile und müssen auf die Fragestellung sowie die finanziellen Möglichkeiten angepasst werden. Eine der am weitesten Anwendung findenden Techniken stellt dabei die hier vorgestellte Fotogrammetrie, auch als Structure From Motion bezeichnet, dar.

Im Kern handelt es sich dabei nicht um eine neue Erfindung, sondern um eine Weiterentwicklung eines technischen Prinzips aus dem 19. Jahrhundert. Bereits wenige Jahre nach Erfindung der Fotografie durch Niepce, Daguerre, Fox, Talbot und anderen, zwischen 1830 und 1840, wird der Messtechni-

sche Fotografieinsatz unabhängig voneinander durch den französischen Offizier Laussedat (1848, Métrophotographie) und den deutschen Architekten Meydenbauer (1858, Messbildverfahren, Photometrographie) vorgenommen. Erstmals publiziert wird der Begriff „Photogrammetrie“ jedoch 1867 durch Meydenbauer. Dieser stürzte während einer Erkletterung zur Schadensfeststellung an einer Fassade Ende des 19. Jahrhunderts schwer und wurde lebensgefährlich verletzt. Sein Unfall inspirierte Meydenbauer zur Verwendung von verzerrungsfreien Fotografien um etwaige Beschädigungen sicher vom Boden aus zu kartieren. Dies senkte die Gefahr tödlicher Unfälle, jedenfalls für Ingenieure und Architekten, beträchtlich. Zur Bildaufnahme entwickelte der deutsche Architekt eigene Aufnahmekameras in denen Glasplatten als Emulsionsträger genutzt wurden.

Die Entwicklung der modernen 3D Fotogrammetrie

Das fotogrammetrische Messverfahren wurde im Verlauf des 20. Jahrhunderts bis heute kontinuierlich weiterentwickelt und neue Anwendungsbereiche erprobt. Eine erhebliche Verbesserung stellte der Stereokomparator von 1901 dar. Dieser ermöglichte eine Auswertung von Bildkoordinaten auf Basis zweier versetzt aufgenommener Bilder (Stereoskopie). Diese Technik wurde vor allem im Verlauf der Weltkriege zur Luftaufklärung verwendet, fand aber auch im zivilen Bauwesen und der Landvermessung Anwendung.

Durch das Aufkommen elektronischer Rechenmaschinen ab den 1960er Jahren wurde die Verarbeitung fotogrammetrischer Aufnahmen erheblich beschleunigt und um eine theoretisch beliebige Menge an Basisbildern erweitert. Nun konnten nicht nur zwei Einzelbilder verwendet werden,

sondern auch ein Mehrbildsatz. Dieser konnte mit Hilfe der sogenannten Bündelausgleichgleichung im Raum korrekt angeordnet werden. Der Bündelausgleich bestimmt anhand einer komplexen Formel, die Lage eines Punktes, der auf mehreren Bildern aus verschiedenen Positionen aufgenommen wurde. Dabei werden die intrinsischen Kameraparameter, wie zum Beispiel Brennweite und Perspektivverzerrung einbezogen und anhand dieser die Kamerapositionen zum Aufnahmezeitpunkt bestimmt. Mittels dieses Modells können im Anschluss weitere Raumkoordinaten der vermessenen Fläche bestimmt werden.

Der Nutzen moderner 3D Fotogrammetrie

Mittels moderner 3D Fotogrammetrie lassen sich beliebige Digitalbilder im Raum anordnen, um daraus eine Punktwolke des erfassten Objektes zu generieren. Dabei sollte eine Überlappung von mindestens 50% zwischen zwei Bildern gewahrt werden. Diese primäre Punktwolke besteht aus den am häufigsten auf Basisbildern erkannten Punkten und bildet die "dünne Punktwolke". Je nach Auflösung, Qualität und Anzahl der Basisbilder, enthält diese zwischen 5.000 und 2.000.000 Einzelpunkten, welche zu einer weiteren "dichten Punktwolke" verdichtet werden können oder direkt in ein 3D Gittermodell umgerechnet werden.

Das Verdichten der Punktwolke geschieht auf Basis sogenannter Tiefenbilder die eine Kombination der Ergebnisse der "dünnen Punktwolke" und den ursprünglichen Basisbildern darstellt. Diese zweite Punktwolke enthält meist eine exponentiell höhere Punktzahl. Dadurch kann die Genauigkeit der vermessenen Oberfläche, um zum Teil kleinste Details, ergänzt werden. Auch werden in diesem Schritt ausreißende Punktgruppen, wie sie durch Lichtreflexe entstehen können, herausgeglättet. Um ein Relief bzw. die Oberfläche eines Objektes als "solide" Form digital darstellen zu können, wird die beste verfügbare Punktwolke zu einem Gittermodell vermascht. Während dieses Arbeitsschrittes werden die am nächsten beieinanderliegenden Punkte untereinander mit Kanten verbunden und das entstandene Dreieck zu einer Fläche umge-

wandelt. Die Summe dieser Dreiecksflächen bildet im Idealfall ein wasserdichtes Abbild des erfassten Objektes. Einziger Nachteil dieser Form der Flächenerfassung besteht an der zum Teil immer noch recht hohen Berechnungszeit der Modelle. So kann die Erstellungszeit je nach Anzahl, Auflösung und Qualität der Bilder zwischen wenigen Minuten und mehreren Tagen dauern.

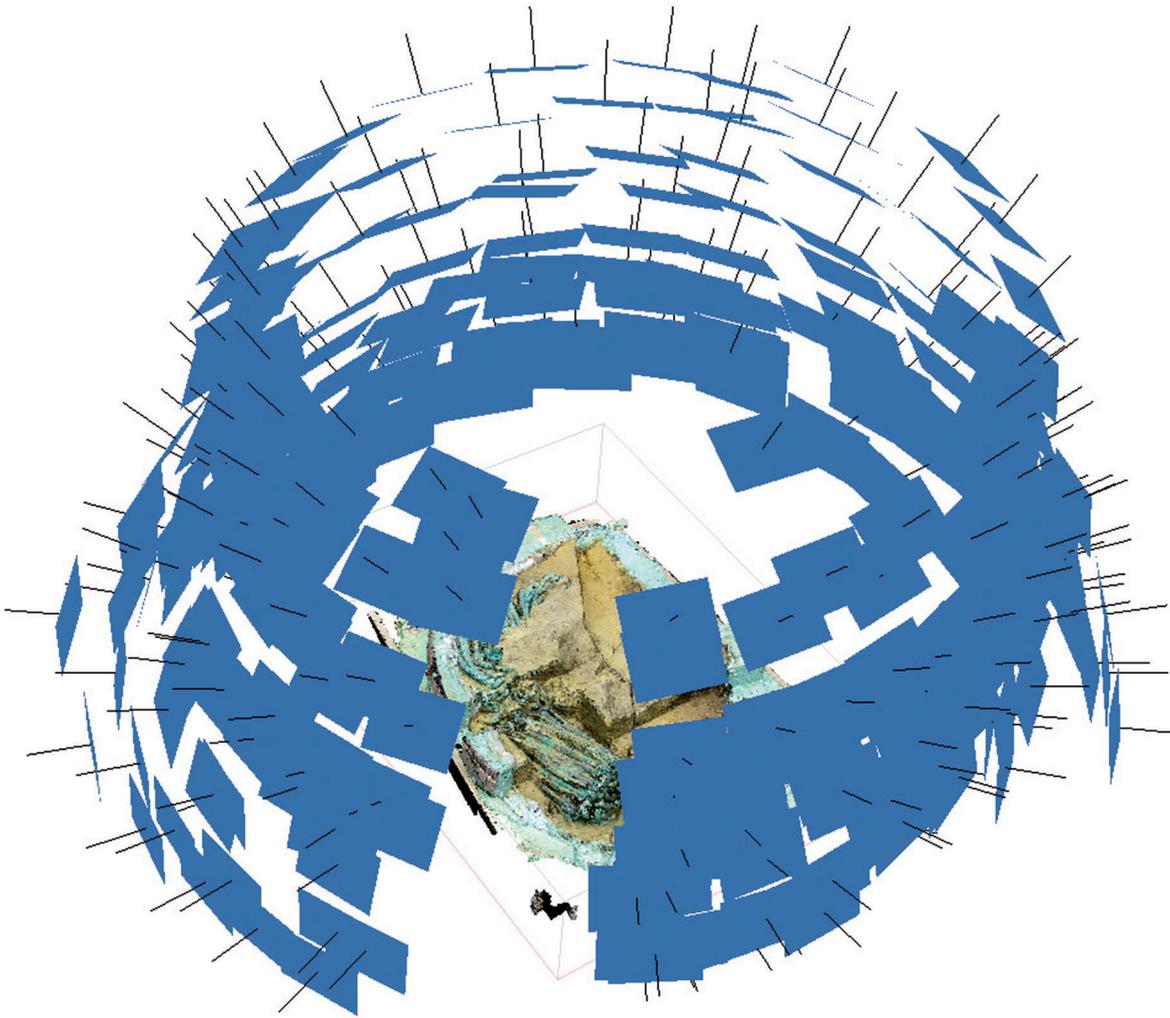
Die moderne 3D Fotogrammetrie ist aufgrund ihrer robusten Anwendbarkeit und leichten Integrierbarkeit in bestehende Abläufe ideal für eine Nutzung in der Archäologie geeignet. So können präparierte Flächen während der obligaten Grabungsaufnahmen, durch eine erhöhte Zahl gemachter Bilder, für eine spätere Verarbeitung zu einem 3D Modell vorbereitet werden, ohne den Arbeitsablauf der Ausgrabung durch langwieriges Aufbauen komplexer Technik zu behindern. Die Aufnahmen sollten mit einer höchstmöglichen Tiefenschärfe bei einem möglichst geringen ISO Wert erfolgen. Auch sollte eine Überlappung von mindestens 50% zwischen zwei Bildern bewahrt werden.

Die Modelle des Spangenbarrenhorts von Oberding

Die hier vorgestellten Modelle wurden während der Freilegung des Spangenbarrenhortes von Oberding erstellt. Für die Berechnung der Modelle werden außer adäquater Soft- und Hardware nur noch die erstellten Fotos benötigt. Dadurch kann die Bearbeitung der 3D Daten örtlich getrennt von den eigentlichen Freilegungsarbeiten stattfinden. Einzelne Arbeitsschritte können so unter mehreren Personen aufgeteilt werden. Mittels einer ausführlichen schriftlichen Anleitung und eines kurzen Telefonats wurden die erforderlichen Bilder, in München, durch den bearbeitenden Restaurator Jörg Stolz während der Freilegung zu einem für ihn passenden Zeitpunkt aufgenommen und nach Berlin gesendet.

Für jedes 3D Modell wurden rund 250 Einzelbilder mit einer Canon EOS 6D Vollformatkamera aufgenommen und als RAW Datei (in diesem Fall .cr2) in zwei bis drei, zwei Gigabyte großen Blöcken

Abb. 1:
Rekonstruierte
Kameraposi-
tionen (blau)
angeordnet um
das rekonstru-
ierte Modell der
Großen Block-
bergung.
Grafiken:
Eik Jagemann,
2017



versendet. Es bietet sich an nur die RAW Daten zu verwenden, da diese etwa 75% weniger Speicherplatz einnehmen und zum anderen garantieren das keinerlei Manipulationen an der Bildgeometrie vorgenommen wurden. Da für den Bündelausgleich die intrinsischen Parameter der Kamera verwendet werden, darf auf keinen Fall eine Objektiv- und Perspektivkorrektur oder Zuschneidung vorgenommen werden, wie einige Bildverarbeitungsprogramme sie zum Teil automatisch während der "Entwicklung" durchführen.

Die Aufnahmen selbst wurden in der Restaurierungswerkstatt des Landesamtes für Denkmalpflege aufgenommen. Hier wurden mehrere Umkreisungen um die Blockbergung angelegt in denen etwa alle 15 bis 20 Grad versetzt Bilder aufgenommen wurden (Abb. 1). Wichtig während der Bildaufnahme war vor allem eine möglichst große Tiefenschärfe zu wahren, einen geringen ISO Wert zu verwenden und gleichzeitig die Bilder verwacklungsfrei zu halten, um später möglichst saubere Objekttexturen zu erhalten und die Basis für eine

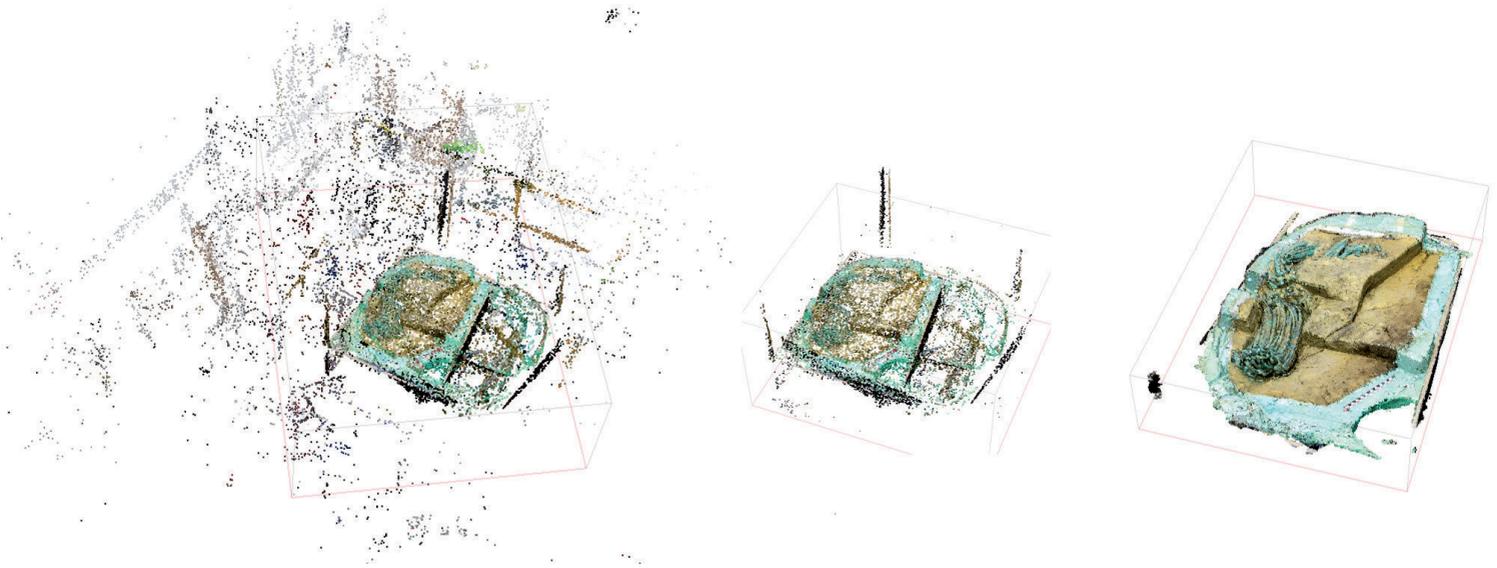


Abb. 2:
Erstellte
Punktwolken
(von links) ohne
Freistellen der
Basisbilder, als
freigestellte
„dünne Punkt-
wolke“
(94.492 Punkte)
und als „dichte
Punktwolke“
(21 Millionen
Punkte).
Grafiken:
Eik Jagemann,
2017

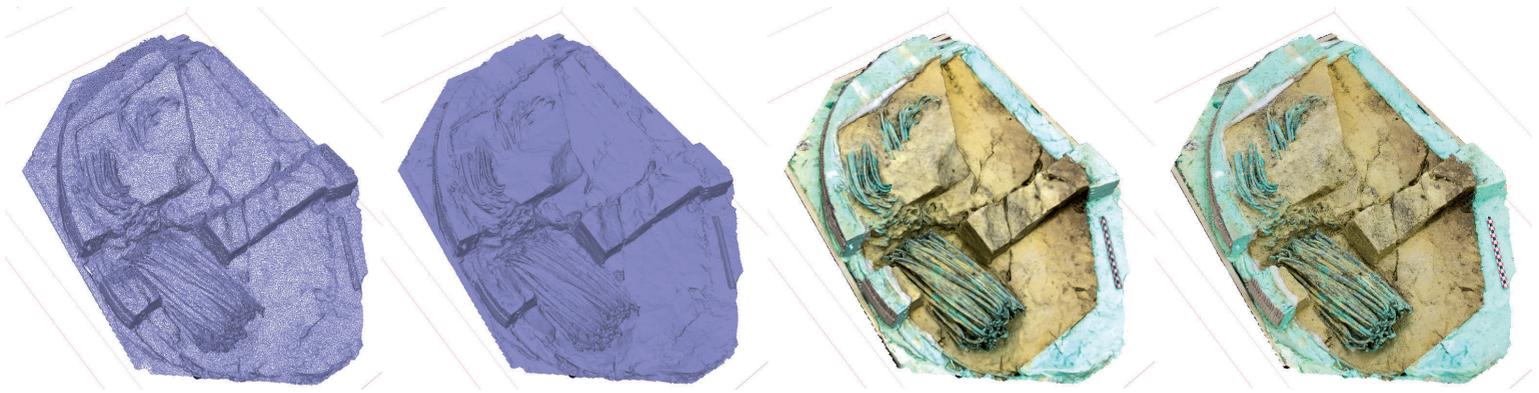
maximale Detailtreue zu ermöglichen. Zwar ließen sich auch relativ unscharfe Bilder zu einem 3D Modell umwandeln, allerdings weisen diese später meist fleckige Farben und detailarme Oberflächen auf.

Da auf den Bildern nicht nur der Block selbst, sondern auch die umgebenden Räumlichkeiten abgebildet waren, wurden diese freigestellt. Dadurch wurde nur das archäologische Objekt und nicht auch noch der umgebene Arbeitsraum rekonstruiert. Durch das Auslassen unwichtiger Bildbereiche wird die Gesamtrechenzeit zwar gesenkt, allerdings reduziert sich auch die zur Modellrekonstruktion zur Verfügung stehende Bildpunktzahl. Dieser "Verlust" durch Freistellen betrug im Fall der Blockbergungsplana jeweils etwa 20-50%. Da die verwendeten Bilder mit 20 Megapixel Auflösung über eine ausreichende Ausgangspunktzahl verfügten, konnte dieser ohne negative Auswirkungen aufgefangen werden. Aufgrund der Komplexität des zu erfassenden Objektes und seiner heterogenen Farbgebung war es nicht möglich die komplexen Freistellungsmasken automatisch erstellen zu lassen. Dadurch wurde ein manuelles Freistellen nötig. Je nach Bild nahm dieses Freistellen zwischen 30 Sekunden und vier Minuten in Anspruch. Die freigestellten Bilder wurden, für jedes erstellte Einzelmodell, anhand ihrer Parameter im virtuellen

Raum orientiert und zu einer Punktwolke umgerechnet. In dieser "dünnen Punktwolke" befinden sich nur noch zum archäologischen Objekt gehörende Punkte, die nach kurzer manueller Bereinigung zu einer extrem detaillierten „dichten Punktwolke“ hoch gerechnet wurden (Abb. 2). Dieser Vorgang benötigte im Durchschnitt etwa zwölf Stunden Rechenzeit, wobei die zugrunde liegenden 70.000 bis 100.000 Punkte auf 1.350.000 bis zu 21.000.000 Punkte verdichtet werden konnten.

Mittels dieser "dichten Punktwolke" lassen sich bereits erste Untersuchungen am Modell durchführen. Neben Flächen- und Volumenmessungen ist es möglich das rekonstruierte Objekt in all seinen Feinheiten zu studieren. Auch die Farbigekeit des Modells ist gewährleistet, da jedem der Punkte ein durchschnittlicher Farbwert zugewiesen wird, der aus den zugrundeliegenden Basisbildern berechnet wird. Sollten während der Bildaufnahme relativ gleichmäßige Lichtbedingungen geherrscht haben, entsteht so ein absolut Schatten freies Modell.

Dieses Modell lässt sich auch auf langsameren Computern gut betrachten, ohne Qualitätseinbußen in Kauf nehmen zu müssen. Allerdings muss genügend Arbeitsspeicher vorhanden sein. Um ein "echtes" 3D Modell zu erhalten, musste aus diesen Millionen Einzelpunkten ein Oberflä-



chenmodell rekonstruiert werden (Abb. 3). Dies geschieht durch das Vermaschen von jeweils drei Einzelpunkten zu einem Dreiecksgittermodell. Da theoretisch schon bei 1,3 Millionen Punkten ein etwa vier Millionen Dreiecke (Polygone) enthaltene Netz erstellt werden kann, wird dieses nach der Berechnung seiner maximalen Dreiecksanzahl wieder reduziert. Neben einer beträchtlichen Schonung der Computerressourcen, werden viele dieser ursprünglich kalkulierten Flächen nicht benötigt, da sie zusammengefasst werden können. Die Geometrie des entstehenden 3D Modells wird dadurch nicht beeinträchtigt.

Das durch diese Berechnung entstandene Netz ist farblos und würde während der Betrachtung am Monitor nur einen Umriss und eine gefüllte Fläche des Objektes darstellen. Um die feinen Strukturen und Details sichtbar zu machen arbeiten moderne 3D Betrachter daher mit mehreren Tricks.

Ein Polygon besteht aus drei oder mehr Punkten, drei verbindenden Kanten und der umschlossenen Fläche zwischen den Kanten. Neben diesen sichtbaren Bestandteilen verfügt ein Polygon zusätzlich über einen normalen Vektor. Dies ist ein senkrecht auf der Fläche stehender Strahl, der die Außenseite der Fläche markiert. Durch das Verhältnis dieser Normalen zueinander kann das Verhalten einer standardisierten Lichtquelle simu-

liert und die Details der Oberfläche für den Nutzer sichtbar gemacht werden. Häufig kommt zum Normalenvektor eine leichte Glanzfläche hinzu, die das gewohnte leicht glänzende Aussehen von 3D Objekten ermöglicht. Das Erkennen, auch kleinster Höhenunterschiede am 3D Objekt wird dadurch im Gegensatz zum Originalobjekt erleichtert.

Zwar ist es möglich den einzelnen Flächen, auf Basis der Punktwolke auch Farben zuzuweisen (Vertex Farben) jedoch sind diese häufig zu verwaschen um für eine genaue Abbildung der Wirklichkeit zu dienen. Stattdessen wird eine Textur aus einzelnen Stücken der Basisbilder berechnet, die später als einzelne Bilddatei auf die Gitteroberfläche projiziert wird. Die Textur besteht aus farblich aneinander angeglichenen Mosaiken der ursprünglichen Basisbilder und ergeben eine fotorealistische Abbildung des Originalmodells. Durch die Kombination von hoch aufgelöster Objektgeometrie und realistischer Textur, können auch nach Jahren noch, hoch aufgelöste Rendraufnahmen (virtuelle Fotografien des 3D Modell) angefertigt werden, ohne das reale Original zu benötigen.

Die 3D Modelle des Spangenbarrenhortes in seinen unterschiedlichen Freilegungszuständen, wurden für verschiedene Formen der Weiterverwendung, angepasst exportiert. Neben dem direk-

Abb. 3:
Gitternetze
(von links) als
Drahtgittermodell,
normal
schattiertes
Modell, Vertex
Farben Modell
und texturiertes
Modell.

Grafiken:
Eik Jagemann,
2017

Abb. 4:
Aufteilung der
einzelnen zu
druckenden
Elemente als
Renderbild.
Grafiken:
Eik Jagemann,
2017



ten plattformunabhängigen Zugriff auf die Modelle wurden auch Dateien zur hoch aufgelösten Erstellung von Rendraufnahmen sowie zur Langzeitarchivierung erstellt.

Aufgrund relativ hoher Kosten und schneller Obsoleszenz von 3D Programmen, fiel die Entscheidung auf 3D PDF Dateien für den direkten Zugriff. Diese können verschlagwortet in Datenbanken gespeichert, abgerufen werden und leicht per Mail anderen Forschern oder Interessierten zur Verfügung gestellt werden. Dabei ist das verwendete Betriebssystem irrelevant. Es wird lediglich ein relativ aktueller PDF Betrachter (alle Adobe Reader Versionen seit v.6 2004) benötigt. Leider können nicht die originalen hoch aufgelösten Daten für diesen Zweck verwendet werden, ohne ältere Rechner an

ihre Grenzen zu bringen. Daher wurden die Millionen Polygone zählenden 3D Modelle auf jeweils etwa 250.000 Polygone heruntergerechnet und mit einer fotorealistischen Textur versehen. Dank des PDF Standards können verschiedene Darstellungsmodi vom Betrachter ausgewählt, Schnitte durch das Objekt angelegt sowie einfach Messungen vorgenommen werden.

Für die Erstellung weiterer hoch aufgelöster Renderbilder wurden Objektdateien im offenen obj Standard erstellt, die in der Originalauflösung exportiert und mit einer Fototextur versehen in jedem handelsüblichen 3D Programm weiterverarbeitet werden können. Der obj Standard existiert in seiner Form seit über 20 Jahren und bildet das all-

gemeinste Format für 3D Objekte. Auf diese kann zurückgegriffen werden, wenn für Publikationen neue Abbildungen aus einer bisher nicht aufgenommenen Perspektive benötigt werden oder Modelle für den 3D Druck aufbereitet werden sollen.

Die Langzeitarchivierung digitaler Informationen stellt bis heute ein großes Problem dar. Im Gegensatz zu schriftlichen Aufzeichnungen oder fotografischen Abbildungen benötigen Dateien ein Programm, das die in Ihnen gespeicherten Daten für den Menschen wieder lesbar macht. Da niemand die weiteren Entwicklungen aktueller Software abschätzen kann oder garantieren kann wie lange ein Datenformat noch nutzbar bleibt, musste eine Lösung gefunden werden, die mit möglichst wenig Aufwand auch in 30 oder 50 Jahren verwendbar ist. Das gesuchte Datenformat musste nicht nur einfach sein, sondern auch als 3D Objekt ohne weitere Daten identifizierbar sein.

Die derzeit beste Lösung dieses Problems stellen Punktlisten dar. In Ihrem Kern handelt es sich bei diesen, um einfache Textdateien, deren Inhalt auch ohne spezielle Software vom Menschen lesbar ist. In ihnen wird jeder Punkt der dichten Punktwolke als Koordinatenfolge abgebildet. Dabei entspricht jede Zeile einem Punkt, seiner x, y und z Koordinate sowie in diesem Fall seiner Farbe als RGB Farbwert. Sollte diese Datei ohne Beschriftung und Zusammenhang später in einem Archiv gefunden werden, kann mit sehr wenig Aufwand die dichte Punktwolke aus dieser wiederhergestellt und zu einem Gittermodell zusammengesetzt werden.

Auch die Farben (Vertex-Farben) lassen sich aus ihr wieder auslesen. Leider geht die ursprüngliche, aus dem Fotomosaik erstellte Textur verloren. Einen weiteren Vorteil stellen die relativ kleine Dateigröße sowie ihre Robustheit dar. Durch wiederholte Kopiervorgänge entstehen potenziell Les- und Schreibfehler im Datensatz, welche sich aber leicht während der Rekonstruktion der Punktwolke als Ausreißer eliminieren lassen.

Der 3D Druck der kleinen Blockbergung von Oberding

3D erfasste Objekte lassen sich auf digitalem Weg nicht nur schnell und einfach versenden oder publizieren, sondern eignen sich auch für die Erstellung von 3D Drucken. So sollte ein Teil der 2014 geborgenen Blockbergung als 3D gedruckte Kopie den Besuchern der Ausstellung in Erding zugänglich gemacht werden. Dies erweitert den Museumsbesuch um eine weitere Sinneswahrnehmung und bringt den Besuchern gleichzeitig die ihnen gezeigten Stücke näher.

Als Grundlage für den Ausdruck dient das Modell des letzten Freilegungszustandes des kleineren Blockes, das für einen Ausdruck seiner einzelnen Komponenten in mehreren verschiedenen Verfahren aufgearbeitet wurde (Abb. 4). Dabei wird das Objekt in drei einzelne Objekte zerlegt, zwei Hälften des Spangenbarrenbündels (Abb. 5a) sowie dem Sedimentblock, der sie im späteren Objekt verbinden wird. Um die Stabilität des späteren Ausstellungsstückes zu verbessern werden die kupfernen Bereiche durch eine Querstange, die den Sedimentteil durchdringt, verbunden (Abb. 5b). Die fertiggestellten digitalen Daten der Einzelobjekte werden für den Ausdruck in einzelne Schichten umgerechnet, um auf den für Ihre Materialien passenden Druckern, gedruckt werden zu können.

Die Kupferbarren werden am späteren Modell aus einem PLA(Polyactide)-Kupfer Gemisch im FDM (Fused Deposition Modeling) Verfahren hergestellt. Dieses Verfahren ist die am weitesten verbreitete Methode im 3D Druck. Dabei werden einzelne Schichten aus Kunststoffen aufeinander aufgeschmolzen, um so ein dreidimensionales, stabiles Modell zu erzeugen. Standardmäßig werden dafür PLA basierte monochrome Kunststoffe eingesetzt. Für die hier zu druckenden Spangenbarren war ursprünglich ein Metall/PLA Verbundmaterial der Firma Colorfab geplant. Dieses besteht neben einem Standard PLA zu 40 % aus feinen Kupferpartikeln, die nach dem Druck durch anschleifen und polieren der Objektoberfläche sichtbar gemacht werden und den visuellen wie auch haptischen Eindruck von

Abb. 5:
Arbeitsschritte
der Herstellung
des 3D Drucks
des Kleinen
Blocks (Bündel-
Gruppe 1) für die
Ausstellung im
Museum Erding:

a)
Ausgedruckte
Bündel-Hälften,
jede der Hälften
benötigte etwa
62 Stunden
Druckzeit. Noch
sind die Stütz-
strukturen zu
sehen, die wäh-
rend des Drucks
der Stabilität
dienten.

b)
Bündel-Hälften
kurz vor der
Lackierung. Die
Stützstreben
sind bereits ent-
fernt worden.



echtem Kupfer aufweisen. Dieses experimentelle Material führte leider aufgrund der enthaltenen Kupferpartikel immer wieder zu Druckabbrüchen und Verstopfungen der feinen Druckerdüse. Daher wechselten wir für den Ausdruck der beiden Seiten des Spangenzbündels zu einem weißen PLA welches nach Entfernung der Stützstrukturen mit Epoxidharz gehärtet und im Anschluss lackiert wurde (Abb. 5c). Als Drucker kam ein Ultimaker 3 zum Einsatz, der die Objekte in einer Auflösung von 0,1 Millimeter innerhalb von 50 Stunden pro Barrenseite fertigte.

Der mittlere Bereich des Objektes umfasst den noch vorhandenen Sedimentsteg. Dieser wird im Polymergipsdruckverfahren in Vollfarbe hergestellt. Zum Einsatz kommt dabei ein ProJet 660pro, der ebenfalls in einer Auflösung von 0,1 Millimeter arbeitet. Statt Kunststoffschichten aufeinander aufzuschmelzen, wird in diesem eine plane Gipsfläche hergestellt und im Anschluss mit fünf Druckköpfen, der Bereich des Modells, in den Originalfarben verfestigt. Nach dem Abschluss einer Fläche schiebt der Drucker eine weitere 0,1 Millimeter hohe Gipslage auf die vorhergehende und verfestigt auch diese nur im Bereich des Modells. Dies wird fortgesetzt, bis das komplette Modell im Bauraum des Druckers in einem Bett aus losem Gips fertiggestellt ist. Das umgebende Material wird nach Fertigstellung des Drucks abgesaugt und für weitere Drucke zurück in den Speicherbehälter geblasen.

Diese Methode ermöglicht sehr feine Details ohne Stützstrukturen verwenden zu müssen, da der nicht verfestigte Bereich im Bauraum die gedruckten Strukturen stützt.

Das Rohdruckobjekt wird nach dem Ausgraben nur von der Druckerfarbe zusammengehalten und ist noch extrem empfindlich. Um den noch anhaftenden Gips zu entfernen wird in einer Ausblaskammer der größere Teil dieses Materials entfernt. Um auch die feinsten Oberflächenstrukturen zu reinigen wird im Anschluss das Objekt mittels Glasperlen bestrahlt, bis auch der letzte Rest überschüssigen Materials entfernt ist. Dieses würde später wie ein grauer Schleier auf dem Objekt liegen oder als weiße Rückstände die Oberfläche unansehnlich machen.

Haltbar gemacht wird der Polymergipsdruck durch Eintränken, des gedruckten Objektes in Cyanacrylat oder Bestreichen mit einem speziellen Epoxidharz (Abb. 5d). Nach dem Aushärten besitzt der Druck eine fast sandsteinartige Oberfläche, weswegen dieses Material auch als Sandstone geführt wird. Aus den beiden in Kupferfilament gedruckten Barrenhälften und dem Sedimentblock wird die Originalform des Objektes wieder zusammengesetzt, wobei die Kupferobjekte durch den Mittelblock mit einer Querstange verbunden werden.



Der Spangenbarrenhort von Oberding zeigt, dass sich die 3D Erfassung gut in bestehende Arbeitsabläufe integrieren lässt, ohne erheblichen Mehraufwand für den Bearbeiter vor Ort zu erzeugen. Es bietet sich gerade für Blockbergungen an, die für einen fotogrammetrischen Scan erforderlichen Daten aufzunehmen, um so später die Auswahl zu haben, welcher Freilegungszustand als 3D Modell berechnet werden soll. Diese Technik ermöglicht es, mit relativ geringem Aufwand komplette Arbeitsstände zu konservieren.

Die eigentliche Berechnung der 3D Daten kann von der Ausgrabung zeitunabhängig an einem beliebigen Ort erfolgen, wodurch das Anschaffen und Unterhalten aufwendiger 3D Arbeitsplätze nicht zwangsläufig benötigt wird. Da für ein Modell lediglich Bilder benötigt werden, kann diese 3D Erfassungstechnik beliebig skaliert werden. Es spielt daher keine Rolle, ob es sich um eine räumlich kleine Blockbergung, die Freilegung des Inneren einer Urne oder eine hektargroße Flächengrabung handelt.

Neben ausführlichen 3D Modellen, die sich schnell für neue Untersuchungen heranziehen lassen, können die erstellten Daten schnell und einfach einem breiten Publikum zur Verfügung gestellt oder gezielt in internationalen Forschergruppen ausgetauscht werden. Im musealen Bereich steht der Einsatz von 3D gedruckten Objekten erst am



Beginn seiner Einsatzmöglichkeiten. Mittels günstiger, dem Besucher zugänglicher Duplikate kann auch, Blinden und Sehbehinderten Menschen die Vorgeschichte haptisch erfahrbar gemacht werden. Da es so ermöglicht wird auch fragilste Funde, für den Besucher als fühlbare Form erlebbar zu machen (Abb. 5d).

Anmerkungen

- 1 Die erstellten 3D-Modelle wurden vom Autor in Zusammenarbeit mit Archäologische Illustrationen in Berlin gefertigt.
Der Ausdruck der Blockbergung erfolgt in Zusammenarbeit mit Formwerk3D aus Hannover.

Literaturnachweis

- E. Jagemann**, Nahbereichsfotogrammetrie als Methode zur archäologischen Funddokumentation und –analyse (unpubl. **2015**). DOI 10.13140/RG.2.1.3233.4804
- K. Kraus**, Photogrammetry: Geometry from images and laser scans (Berlin – New York **2007**).
- A. Magnoni/D. Hixson**, From Pencil to Pentium: Digitizing the Classic Period Maya City of Chunchucmil, Yucatán (Mexico **2009**).
- P. Moscati**, Virtual museums and archaeology: The contribution of the Italian National Research Council (Firenze **2007**).
- J. C. Torres/G. Arroyo/C. Romo/J. De Haro**, 3D Digitization using Structure from Motion. In: I. Navazo/G. Patow (Hrsg.), Spanish Computer Graphics Conference (Granada **2012**).

Abb. 5:

c) Die Lackierung erfolgte nach Härtung des Drucks mittels Epoxidharz. Danach wurde ein Schutzlack aufgebracht.

d) Fertig ist das täuschend echte Duplikat: der ausstellungsreife Kleine Block „zum Anfassen“. Bewusst wurde für die Besucher Kupfer als Farbe der Spangenbarren gewählt. Sie stehen damit im deutlichen Kontrast zum Fundzustand und bieten zugleich ein authentisches, gussfrisches (also frühbronzezeitliches) Aussehen.

Fotos:
Eik Jagemann
Mai/Juni 2017