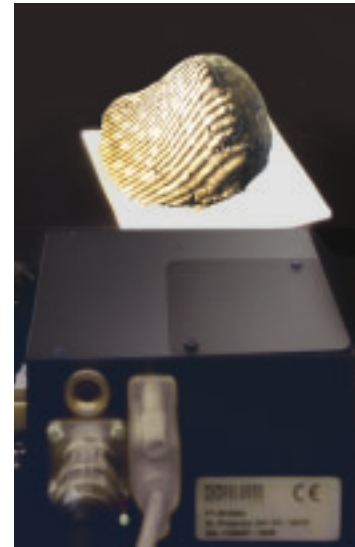


# 5000 Jahre alte Pfahlbaufunde

## Dokumentation und Visualisierung von 3-D-Messdaten

*Visualisierungen von Funden und Befunden, von Rekonstruktionen oder Szenen prähistorischer Alltagskultur sind integraler Bestandteil einer musealen Aufarbeitung und Präsentation und aus modernen Ausstellungskonzepten nicht mehr wegzudenken. In der heutigen Zeit gehören ganz selbstverständlich digitale Ausstellungsmedien und interaktive Inhalte zum Grundrepertoire, da sie ein breites Spektrum didaktischer Möglichkeiten bieten, die in herkömmlicher Form so nicht zur Verfügung stehen würden. Um dem Besucher digitale Medien anbieten zu können, müssen natürlich auch die Inhalte in digitaler Form vorliegen. Das bedeutet, dass archäologische Objekte in geeigneter Art und Weise digitalisiert werden müssen.*

Nicole Ebinger-Rist/Helmut Schlichtherle/Markus Steffen



### Von 2-D zu 3-D

Die einfachste Form der Digitalisierung ist die Digitalfotografie. Im Gegensatz zu früheren Zeiten kann man heute Fotografien nicht nur als zweidimensionale Abbildungsmedien verwenden, sondern Digitalfotos bilden die Datenbasis, aus der sich zum Beispiel Stereo-Abbildungen, verzerrungsfreie Orthoansichten, 360-Grad-Panoramaansichten und sogar hochpräzise 3-D-Modelle errechnen lassen. Sie verfügen damit über ein enorm breit gefächertes Potenzial unterschiedlicher Visualisierungsmöglichkeiten.

Als spezialisiertere Methoden zur Digitalisierung von Objekten sind verschiedene 3-D-Scanning-Verfahren oder die Röntgen-Computertomografie zu nennen. Diese Messtechniken ermöglichen nicht nur die dreidimensionale mikrometergenaue Erfassung der Oberflächenstrukturen, sondern auch den Blick ins verborgene Innere der Fundobjekte und können somit Auskunft über Aufbau, Materialbeschaffenheit und Herstellungstechniken geben.

### 3-D-Scanning-Verfahren

Das 3-D-Scanning wird von der Landesdenkmalpflege in Baden-Württemberg inzwischen standardmäßig zur Dokumentation archäologischer Funde und Strukturen eingesetzt. Von filigranen Schmuckstücken bis hin zu römischen Mauerresten oder historischen Bergwerken lassen sich fast alle Objekte, unabhängig von ihrer Größe, in hochaufgelöste 3-D-Modelle umsetzen, die nicht nur eine sehr präzise Vermessung und Verortung ga-

rantieren, sondern auch in unterschiedlicher Form für die museale Vermittlung eingesetzt werden können. Es lassen sich aus beliebigen Blickwinkeln Abbildungen rendern, man kann interaktive 3-D-Visualisierungen erstellen oder in Form von Animationen bedeutende Objekte stimmungsvoll in Szene setzen. Auch Ergänzungen beschädigter oder schlecht erhaltener Fundobjekte oder Rekonstruktionen lassen sich virtuell schnell erzeugen und können auf Bildschirmen, zum Beispiel Audio-/Video-Guides oder auch über das Internet, auf beliebigen Endgeräten wie Smartphones oder Tablets verfügbar gemacht werden.

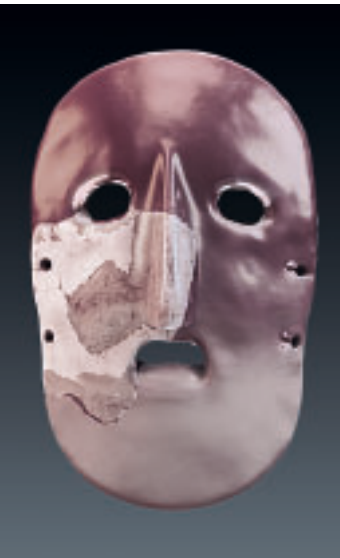
### Rekonstruktion der Maske

Für die große Landesausstellung „4000 Jahre Pfahlbauten“ wurde das Fragment einer jungsteinzeitlichen Tonmaske aus der Moorsiedlung „Riedschachen“ am Federsee [vgl. Beitrag Schlichtherle, Jungsteinzeitliche Maske aus Bad Schussenried „Riedschachen“ am südlichen Federsee. Ein sensa-

*1 Im 3-D-Drucker entsteht in wenigen Stunden eine originalgetreue Kopie des Maskenfragments aus Kunststoff.*



2 *Dreidimensionale RCT-Abbildung des verzierten Holzfragments.*



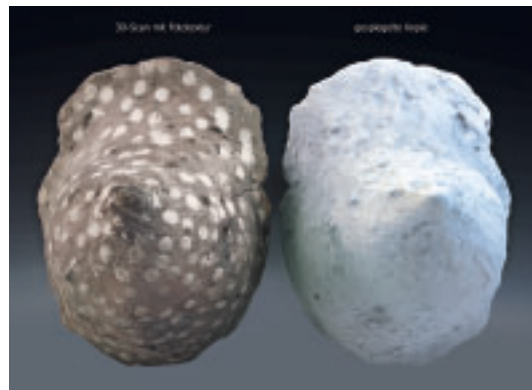
tioneller Fund, S. 28] mithilfe der angesprochenen Verfahren für die museale Präsentation aufbereitet. Zunächst wurde am Landesamt für Denkmalpflege in Esslingen ein 3-D-Scan des Fragments durchgeführt. Der dabei eingesetzte Streifenlichtscanner (Polygon PTM1600) ermöglicht eine berührungsfreie, hochdetaillierte und extrem genaue Vermessung der Oberflächengeometrie mit einer Tiefenauflösung im Bereich von etwa 10 µm. Das fertige 3-D-Modell wurde anschließend im PC kopiert und gespiegelt, um die nicht erhaltene rechte Partie der Maske symmetrisch zu rekonstruieren. Anschließend wurde das virtuell ergänzte Fragment auf einem 3-D-Drucker (Maker-Bot 2X) im so genannten „Fused-Deposition-Modeling-Verfahren“ im Maßstab 1:1 ausgedruckt. Als Druckmaterial kam ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol) zur Verwendung: ein Terpolymer (Kunststoff), das bei etwa 210 °C aufgeschmolzen und anschließend in 200 µm dicken Schichten aufeinandergedruckt wird und so das Modell Schicht für Schicht aufbaut (Abb. 1).

Das Kunststoffmodell ist beliebig oft reproduzierbar und eignet sich dadurch besser für eine Ergänzung und verschiedene Rekonstruktionsversuche als das wertvolle und fragile Original. Der 3-D-Scan inklusive des Postprocessings (Nachbearbeitung) bis zum fertigen Computermodell nahm dabei etwa zwei Stunden in Anspruch, der anschließende Ausdruck weitere vier Stunden. In einem zweiten Schritt wurden die noch fehlenden oberen und unteren Partien der Maske von Hand aus Gips an den 3-D-Druck modelliert. Die

3 *Die Position des Originalfragments innerhalb der rekonstruierten Tonmaske kann mithilfe der Computermodelle verdeutlicht werden.*

4 *Das Rendering zeigt die Originalbrust mit und die gespiegelte Kopie ohne Fototextur.*

5 *Der Streifenlichtscanner während der Messungen der Tonbrüste in Hemmenhofen.*



fertige Gesamtrekonstruktion wurde dann wieder gescannt, um auch dieses Modell virtuell zur Verfügung zu haben. Für den Scan wurde der Artec „EVA“ eingesetzt. Ein handgeführter Strukturlichtscanner, der zwar nicht die extremen Genauigkeiten des Streifenlichtscanners erreichen kann, aber sehr schnell und flexibel in der Anwendung ist. Der Messvorgang an sich hat dabei höchstens fünf Minuten in Anspruch genommen, das Berechnen des Modells weitere 35 Minuten.

Als Endergebnis verfügt man jetzt über mehrere 3-D-Modelle des Objekts in verschiedenen Rekonstruktionsstadien: das Original, eine gespiegelte Kopie, eine ergänzte Kopie und eine Komplettrekonstruktion. Diese lassen sich für eine Vielzahl medialer und natürlich auch nicht-medialer Darstellungsformen und Inhalte weiter verarbeiten (Abb. 3).

## Die Wandmalereien von Ludwigshafen

Ein weiteres ganz ähnliches Beispiel sind die Brüste von Ludwigshafen am Bodensee, die von jungsteinzeitlichen Siedlern um 3860 v. Chr. auf die Innenwand eines Kulthauses modelliert wurden [vgl. Beitrag Schlichtherle, Älteste Wandmalereien nördlich der Alpen. Zur Rekonstruktion der Bilder für die Präsentation auf der Großen Landesausstellung 2016, S. 11]. Zwei fast komplett erhaltene und zwei fragmentierte Tonbrüste wurden mit dem Streifenlichtscanner dokumentiert (Abb. 4). Da die Brüste bemalt waren, wurden zusätzlich zur Erfassung der Objektgeometrie Digitalfotos mit einer auf den Scanner kalibrierten Videokamera aufgenommen, um auch die Farbigkeit der Oberfläche zu erfassen. Digitalfotos und Oberflächenmodell wurden im PC kombiniert, wodurch eine fotorealistische virtuelle Kopie des Originals entstand, das digital „konserviert“ wurde. Nicht nur, dass man das Objekt am PC zum Beispiel auch stereoskopisch (mit 3-D-Brille) betrachten und ohne die Originalsubstanz zu gefährden optisch analysieren kann, sondern auch die Möglichkeit, es welt-

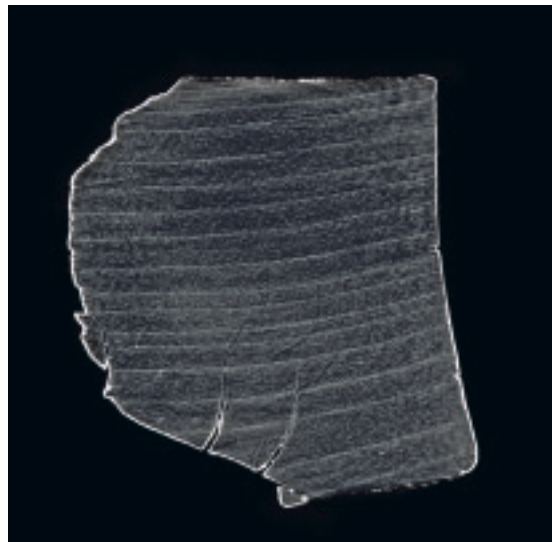
weit per Internet zu verschicken, eröffnet fantastische Möglichkeiten für wissenschaftliche Untersuchungen und Präsentationen.

Auch die Ludwigshafener Brüste wurden jeweils gespiegelt, um eine Paarigkeit zu ergänzen (Abb. 5) und anschließend mit dem 3-D-Drucker repliziert. Die Ausdrücke dienen als Positiv für Silikonabformungen, sodass für die Gesamtrekonstruktion der Hauswand alle nötigen Repliken in kurzer Zeit hergestellt werden konnten.

### Röntgen-Computertomografie (RCT) für den Blick ins „Innere“

In den letzten Jahren hat sich die RCT in der Archäologie und in der archäologischen Restaurierung etabliert. Zahlreiche Anwendungsbeispiele dieser 3-D-Röntgentechnik haben gezeigt, dass die Methode, vor allem aufgrund der Möglichkeit, unterschiedlichste Materialien wie Metalle oder auch Organik zu durchdringen und somit den Blick in das Innere der Objekte zu eröffnen, wertvolle Einsichten und Ergebnisse erzielen kann.

Gerade Gegenstände aus organischem Material mit Feuchtbodenerhaltung sind oft auch nach einer erfolgreichen Konservierung noch sehr fragil und nicht beliebig handhabbar. Herstellungstechniken und Materialstrukturen lassen sich bei organischem Material ohne diese modernen Verfahren oftmals schlecht oder gar nicht auswerten. Durch die jahrtausendelange Bodenlagerung der Funde liegen diese in dicht gepressten Schichten vor, die oft auf wenige Zentimeter Mächtigkeit komprimiert worden sind. Eine physikalische Trennung und Untersuchung dieser Straten mittels herkömmlicher archäologischer oder restauratorischer Freilegungstechniken hätte unweigerlich die Zerstörung der Objekte zur Folge. Hier bietet die RTC ideale Möglichkeiten. Aufgrund der verschiedenen Materialzusammensetzungen und damit unterschiedlicher Dichten lassen sich die einzelnen Schichten im CT-Modell unterscheiden und virtuell, also zerstörungsfrei, separieren und analysieren. Um organische Strukturen zu visualisieren, müssen allerdings die spezifischen Merkmale wie beispielsweise die Holzmaserung noch erhalten sein.



### Anwendungsbeispiele der RCT für die Große Landesausstellung

Derzeit werden in der archäologischen Restaurierung verstärkt Hölzer computertomografisch vermessen, um die Holzart sowie die Jahresringe zu bestimmen. Sehr gute Ergebnisse konnten bisher bei einer geringen Objektgröße und bereits verkohlten beziehungsweise konservierten Hölzern erzielt werden.

So wurden für die Große Landesausstellung drei Holzfragmente einer einzigartig verzierten Holzschale aus der jungneolithischen Siedlung Hornstaad (um 3910 v. Chr.) mittels RCT erfasst. Anhand der hochauflösenden dreidimensionalen Bilder ließen sich die Jahrringstellung, die Maserrichtung sowie die Jahrringdichte erkennen (Abb. 6).

Da die Schale nur noch aus nicht anpassenden Fragmenten besteht, ist es zunächst wichtig, herauszufinden, wie die einzelnen Stücke zueinander in Beziehung stehen (Abb. 2). Anhand signifikanter Merkmale der inneren Strukturen kann auf die Orientierung der einzelnen Fragmente im gewachsenen Holz beziehungsweise Baum geschlossen werden. Damit lässt sich die gesamte Schale virtuell rekonstruieren und – wenn gewünscht – mittels unterschiedlicher Verfahren reproduzieren. Aus der jungneolithischen Pfahlbausiedlung Hornstaad am Bodensee liegt eine Silexpfeilspitze mit

6 Der Blick ins „Innere“ des verzierten Holzfragments der Schale in zwei Schnittrichtungen:  
a) Frontalschnitt und  
b) Längsschnitt.



7 Die freigestellte Silexpfeilspitze in a) Vorder- und b) Rückansicht. Mittels RCT konnte der gesamte Teermantel virtuell ausgeblendet werden.

8 Die Silexpfeilspitze mit Teerschäftung in der a) Vorder- und b) Rückansicht sowie c) Seitenansicht.





9 Zu sehen sind das Negativ und die Umwicklung der Schäftung im Teermantel. a) und b) Kreisrunder Ausschnitt der nicht mehr erhaltenen Schäftung aus Holz.

10 Siplinger Sandale im RCT-Modell.

vollständig erhaltener Teerschäftung vor, die um 3910 v. Chr. datiert wird. Das Holz des Schafts ist allerdings nicht mehr erhalten (Abb. 8).

Auf Basis der dreidimensionalen Bildgebung konnte zunächst die Form der Pfeilspitze im Inneren des Teermantels dokumentiert werden, was für deren typologische Einordnung entscheidend war (Abb. 7). Vor allem aber wurde eine detaillierte Rekonstruktion des vergangenen Holzschäfts möglich, dessen Abdruck sich im Inneren des Teermantels erhalten hatte. Sein Negativ ist im CT zu sehen. Der Schaft war sorgfältig gespalten und hatte unmittelbar hinter der eingesetzten Pfeilspitze eine Schnurumwicklung (Abb. 9). Somit kann die Herstellung des Pfeils exakt nachvollzogen werden.

Auch der Textilarchäologie werden die Messdaten der RCT zur Verfügung gestellt, um textiltechnologische Analysen hinsichtlich Bindungsart, Textiltypen und funktioneller Zuordnung durchzuführen. Aufschlussreiche Ergebnisse konnten mittels RCT auch anhand der „Siplinger Sandale“ erzielt werden (Abb. 10). Im Frühjahr 2008 wurde der Schuh aus partiell verkohltem Gehölzbast aus einer Brandschicht aus der Pfahlbausiedlung von Sippingen-Osthafen am Bodensee geborgen. Er datiert nach dendrochronologischen Untersuchungen um 2900 v. Chr. Die RCT-Aufnahmen des Schuhs zeigten im Querschnitt, dass die Baststreifen nicht gedreht und nicht in Zwirnbindung, sondern in Ripsbindung (eine Art Leinwandbindung) geflochten wurden. Der Schuh besteht aus drei Fragmenten und konnte aufgrund der fehlenden Anschlüsse nicht zusammengesetzt werden. Virtuell jedoch lassen sich Rekonstruktionsvorschläge für ein geschlossenes Gesamtbild des außergewöhnlichen Fundstücks machen.

### Zusammenfassung

Die oben genannten Beispiele verdeutlichen, dass das moderne 3-D-Messverfahren aus dem wissenschaftlichen Alltag nicht mehr wegzudenken ist und bei der Dokumentation und Auswertung von archäologischem Fundmaterial zu einem enormen Erkenntnisgewinn führt. Die 3-D-Modelle können archiviert und der Istzustand des Objekts gleichsam eingefroren werden. Auch können anhand der so gewonnenen Daten und Darstellungen viele Fragen beantwortet werden, ohne das Original überhaupt in die Hand nehmen zu müssen. Sowohl aus den Scanning-, als auch aus den RCT-Datensätzen lassen sich mit unterschiedlichsten Reproduktionsverfahren berührungsfrei Repliken erstellen. Konventionelle nicht-berührungsfreie Abformungsverfahren bergen dagegen immer ein Risiko für das sehr wertvolle und oft fragile Original.

Erfasste Daten zu spiegeln und damit Fehlendes zu ergänzen, schlecht Erhaltenes wieder sichtbar zu machen oder im Inneren Verborgenes zerstörungsfrei zu visualisieren sind neue Möglichkeiten, die sich durch die beschriebenen Methoden eröffnen.

Die Wissenschaft nutzt dies inzwischen als selbstverständliches Mittel der Erfassung und Auswertung, und daher bedient man sich auch bei der Vermittlung der Objekte und der Ergebnisse der virtuellen Welt. Frei drehbare 3-D-Modelle, interaktiv aufbereitete Lerninhalte, Animationen und Inszenierungen bieten die Option, auf den ersten Blick unspektakuläre Funde klar und verständlich aufzubereiten, zu ergänzen, zu rekonstruieren und in ihrem kulturhistorischen Kontext darzustellen. Somit wird ein Erleben prähistorischer Relikte über eine reine Objektschau hinaus möglich, und der Ausstellungsbesucher erhält direkten Zugang zu den teils komplexen Ergebnissen der modernen archäologischen Forschung.

### Literatur

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.  
Ingrid Wiesner/Jörg Stelzner/Nicole Ebinger-Rist: Virtual Analyses of Neolithic Textiles, in NESAT XI, The North European Symposium for Archaeological Textiles XI; 10–13 Mai 2011 in Esslingen am Neckar/hg. v. Johanna Banck-Burgess/Carla Nübold, Rahden/Westf., 2013, S. 109–119.

### Glossar

#### Leinwandbindung

Die einfachste von drei Grundbindungen beim Weben. Kett- (in Längsrichtung aufgespannt) und Schussfaden (verläuft quer) wechseln sich ab, wobei jeder Kettfaden abwechselnd über oder unter einem Schussfaden zum Liegen kommt.

**Dipl.-Rest. Nicole Ebinger-Rist**  
**Dr. Helmut Schlichtherle**  
**Markus Steffen M.A.**  
Landesamt für Denkmalpflege im  
Regierungspräsidium Stuttgart  
Dienstszitz Esslingen