

KOPIEN BERÜHRUNGSLOS ERSTELLEN – VIRTUELL UND ZUM ANFASSEN

Das Erstellen von Kopien bedeutender archäologischer Fundstücke hat eine lange Tradition am Römisch-Germanischen Zentralmuseum (RGZM) in Mainz. Viele der Kopien stehen in den Ausstellungen des Hauses und sind wichtige Bestandteile der wissenschaftlichen Sammlungen. Neben den traditionell hergestellten Kopien entstehen inzwischen gelegentlich auch Kopien auf virtueller Basis. Bei Letzteren ermöglichen berührungslose Vermessungsverfahren die Erstellung von virtuellen Modellen, die dann mittels computergesteuerter Geräte in reale Kopien umgesetzt werden können. Die Fortschritte bei digitalen Aufnahmesensoren, in der

Datenverarbeitung, Visualisierung und den Möglichkeiten zur Ausgabe virtueller Modelle in den vergangenen Jahren machen diese neue Art, Kopien zu erstellen, in Restaurierung und Archäologie zu einer interessanten Ergänzung der klassischen Verfahren.

Klassische Verfahren zum Herstellen realer Kopien

Von großer Bedeutung sind die Verfahren, bei denen ein Abdruck der Oberfläche des Originals

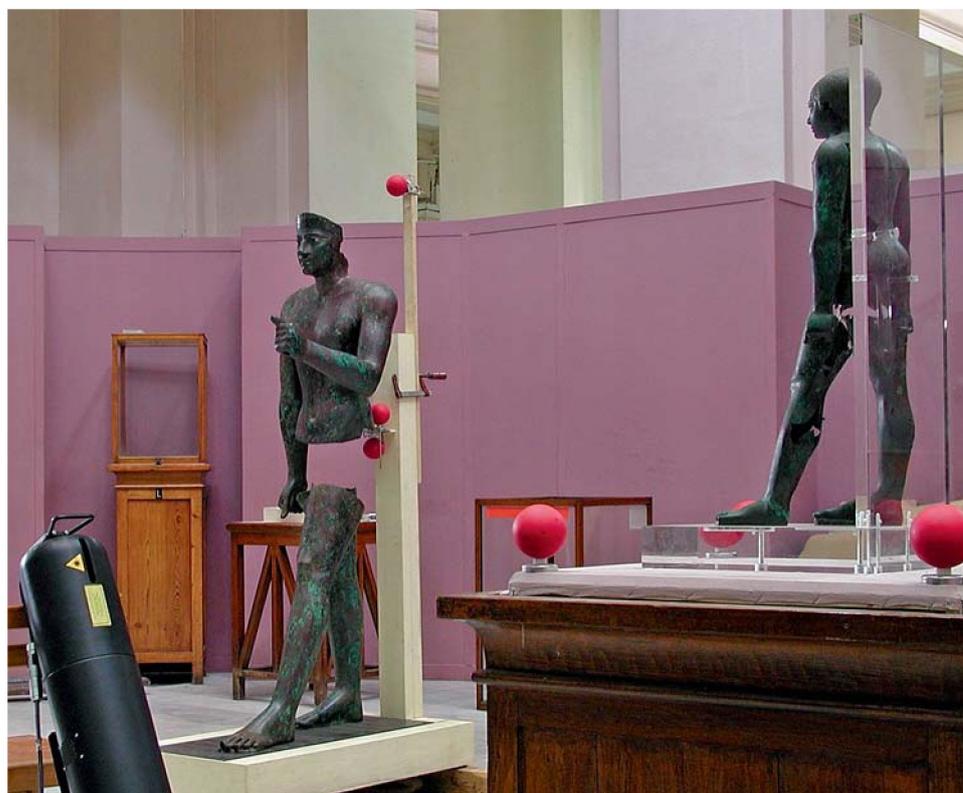


Abb. 1 Aufnahmearbeiten an den beiden Statuen des Pharao Pepi I. mit einem 3D-Scanner (Foto Ch. Eckmann / G. Heinz, RGZM).

mittels Silikonkautschuk sowie Stützkapsel erstellt und mit dieser Negativform dann in Kunstharz ausgeformt die eigentliche Kopie erzeugt wird. Nach diesem gängigen Verfahren entstand am RGZM beispielsweise die Kopie des Ludovisischen Schlachten-sarkophages aus Rom¹. Insbesondere die sehr hohe Detailgenauigkeit in der Wiedergabe auch feinsten Strukturen der Originaloberfläche ist bei diesem Verfahren hervorzuheben. Die Kopien werden in der Regel anschließend von Hand nachbearbeitet und koloriert.

Allerdings ist eine derartige Abformung des Originals nicht immer möglich. Einschränkungen können sich beispielsweise durch die im Silikonkautschuk vorhandenen Öle ergeben, die in das Original nicht eindringen dürfen, oder durch die Empfindlichkeit des Objektes bzw. der Oberfläche gegen mechanische Beanspruchung. Letzteres kann insbesondere bei sehr filigranen Objekten oder empfindlichen Farbfassungen gegeben sein.

Neben solchen Abgüssen stehen noch die in handwerklicher Tradition angefertigten »Kopien«, bei denen mit gleichen oder ähnlichen Techniken und Materialien, wie sie das Original aufweist, sowie in Anlehnung an dieses eine Nachbildung des Objektes hergestellt wird.

Berührungslose Aufnahmeverfahren

Zur berührungslosen dreidimensionalen Vermessung und Erfassung von Oberflächen gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Systeme, die nach verschiedenen Verfahren arbeiten. Sie basieren häufig auf der Verwendung elektromagnetischer Strahlung wie sichtbarem Licht bei bildgestützten Methoden oder Laserlicht bei 3D-Laserscannern. Klassische fotogrammetrische Verfahren mit Stereomodellen für die 3D-Messung werden für die vollständige Erfassung von Objekten seltener eingesetzt.

Durch die Entwicklungen innerhalb der Vermessungsverfahren, verschiedener Sensoren und insbesondere auch in der Datenprozessierung finden diese Verfahren in der Dokumentation immer mehr

Verwendung. Viele der eingesetzten Geräte kommen aus der industriellen Messtechnik und basieren auf Triangulationsverfahren². Bei bildgestützten Systemen wird häufig ein Muster auf die Oberfläche projiziert, das dann mit Messkameras aufgenommen wird und aus dessen Abbildung durch Triangulation einzelne Punkte auf der Oberfläche bestimmt werden können. Eine Reihe von Systemen lässt sich durch die Wahl der Objektive sowie der Triangulationsbasis in der Auflösung und der aufgenommenen Fläche anpassen.

Systeme mit Laserlicht projizieren ebenfalls ein Muster (z.B. eine Linie) und berechnen dann in ähnlicher Weise die Oberflächenform. Bei komplexen Objekten sind Aufnahmen aus verschiedenen Positionen erforderlich, die anschließend zusammengefügt werden müssen. Dies kann je nach System durch Referenzpunkte, die genaue Erfassung der Sensorposition oder die halb- sowie vollautomatische Kombination der Einzelaufnahmen erfolgen. Bei kleineren Objekten ist die Verwendung eines rechnergesteuerten motorisierten Drehtisches möglich und hilfreich. Damit können eine Reihe von Aufnahmen aus verschiedenen Richtungen gemacht und dann automatisch miteinander verknüpft werden. Einige Systeme sind zudem in der Lage, direkt Farbinformationen bei den Scans zu registrieren, so dass ein virtuelles 3D-Modell in Farbe entsteht.

Bei den angegebenen Verfahren werden einzelne Punkte auf dem Objekt gemessen, häufig in regelmäßigen Rastern, die im Anschluss die Grundlage für die virtuelle Rekonstruktion der Oberfläche bilden. Diese erfolgt meist durch eine Dreiecksvermaschung der Punkte, die somit eine Approximation der wirklichen Form darstellen. Die geometrische Genauigkeit und Auflösung dieser Punkte ist dabei wesentlich für die Qualität des zu erstellenden Modells. Oberflächenbeschreibungen mithilfe mathematischer Funktionen, die in technischen Anwendungen häufig Verwendung finden, kommen bei archäologischen Objekten kaum zum Einsatz, da hier selten regelmäßige Formen vorliegen.

Die Verarbeitung der Einzelmessungen, bis hin zum komplett geschlossenen Oberflächenmodell, kann je nach Komplexität des Objektes, Anzahl der Auf-



Abb. 2 Aufnahmearbeiten an einer der Königstatuen aus dem Jemen mit einem Streifenlichtprojektionsscanner (Foto F. Roth).

nahmen und Auflösung sehr aufwändig sein und durchaus bis hin zum 10- oder 20-fachen der Aufnahmezeit in Anspruch nehmen. Ein bedeutendes und frühes Projekt zur hochauflösenden dreidimensionalen Erfassung einer Skulptur war »The Digital Michelangelo Project«³. Hier hat in den Jahren 1998 und 1999 ein Team der Universitäten Stanford und Washington die berühmte Skulptur des David vermessen. Es entstand ein hochauflösendes virtuelles 3D-Modell mit 1/4 mm Auflösung, das dann unter anderem auch bei der Planung von Konservierungsarbeiten eingesetzt wurde.

Neben Systemen, die ausschließlich die Oberfläche aufnehmen können, ist hier auch die industrielle Computertomografie zu nennen, mit deren Hilfe Objekte hochauflösend tomografisch erfasst werden. Diese Modelle enthalten außerdem Informationen aus dem Inneren des Objektes; Oberflächenmodelle können daraus abgeleitet werden.

Virtuelle Kopien

Virtuelle 3D-Modelle oder virtuelle Kopien erlauben einige Anwendungen, die bei realen Objekten nicht ohne Weiteres möglich sind. Zunächst lassen sich die rein digitalen Modelle z.B. via Datenträger oder Internet als 3D-Datensatz, der mithilfe einer entsprechenden Software interaktiv betrachtet werden kann, problemlos einer großen Anzahl von Betrachtern zugänglich machen.

Die Darstellung kann dabei manipuliert/verändert werden, indem beispielsweise Teile ausgeblendet oder halb-transparent dargestellt werden (siehe auch die Anwendungsbeispiele unten). Daneben ist es zudem möglich, im 3D-Modell Messungen der Entfernung verschiedener Punkte zueinander durchzuführen, Schnitte anzulegen etc. Darüber hinaus lassen sich die Betrachtungsrichtung sowie Beleuchtungsparameter des Modells recht einfach variieren.

ren. Durch neue Hardwareentwicklungen, aktuelle Filme und 3D-Spiele ist die 3D-Betrachtung mittels Shutterbrillen am PC oder Fernseher auf dem Vormarsch und erlaubt dreidimensionale Szenarien zunehmend einfacher und günstiger darzustellen. Unter Verwendung der beschriebenen Techniken können auch fertig berechnete Ansichten als Abbildungen oder Videosequenzen generiert und weitergegeben werden.

Erstellung von realen Modellen

Für die Erstellung von realen Modellen aus digitalen 3D-Datensätzen kann man zwischen Verfahren unterscheiden, bei denen aus einem bestehenden Block Material abgetragen wird, bis das Objekt übrig bleibt, und solchen, bei denen das Werkstück schichtweise aus formlosem Material (z.B. einem Pulver oder Epoxydharz) aufgebaut wird. Letztere werden auch mit dem Begriff Rapid Prototyping bezeichnet.

Computerized Numerical Control-Fräsen (CNC) arbeiten computergesteuert aus einem Materialblock die Form des Objektes heraus. Durch die Führung des Fräswerkzeuges gibt es Einschränkungen in der Form der realisierbaren Objekte. Die Auflösung von Strukturen auf der Oberfläche ist begrenzt durch die Spitze des Fräskopfes. Ein eindrucksvolles Beispiel für den Einsatz dieser Technik sind die Kopien von Fragmenten der Statue Konstantins des Großen aus den Kapitolinischen Museen in Rom, die in der Konstantinausstellung in Trier 2007⁴ zu sehen waren⁵. Zum Rapid Prototyping gehört die Stereolithografie, bei der lichtaushärtender Kunststoff mittels eines beweglichen Laserpunktes polymerisiert wird. In jeder Ebene werden alle zum Objekt gehörigen Teile fixiert und das Modell somit aus einer Vielzahl von Schichten aufgebaut. Ein frühes Beispiel für die Anwendung dieser Technik in der Archäologie ist die Kopie des Schädels der berühmten Gletschermumie aus den Ötztaler Alpen in Südtirol⁶.

Relativ neu beim Rapid Prototyping sind 3D-Drucker, die als Material ein Pulver benutzen, mittels

Druckköpfen Binder auftragen und so nach und nach einzelne Schichten des Objektes erstellen. Aktuelle Geräte sind für Büroumgebungen geeignet und können direkt Modelle in Farbe erstellen (siehe z.B. **Abb. 7**). Die Dicke der einzelnen Schichten beträgt dabei etwa 0,1 mm; das Volumen des Gesamtobjektes ist bei dem in den im Folgenden beschriebenen Anwendungsbeispielen verwendeten Gerät auf etwa 250 mm × 380 mm × 200 mm begrenzt. Größere Objekte müssen gegebenenfalls aus mehreren Teilen zusammengesetzt werden.

Weitere Verfahren, die dem Rapid Prototyping zuzuordnen sind, unterscheiden sich unter anderem im verwendeten Material, den physikalischen Eigenschaften wie Festigkeit und Leitfähigkeit sowie der Art der Fixierung⁷.

Anwendungen am RGZM

Die im Folgenden beschriebenen Beispiele von Anwendungen am RGZM sind im Rahmen der langjährigen Kooperation mit der Fachrichtung Geoinformatik und Vermessung sowie dem i3mainz, Institut für raumbezogene Informations- und Messtechnik der Fachhochschule Mainz, entstanden. Sie zeigen unterschiedliche Projekte, in denen virtuelle 3D-Modelle von Skulpturen und Objekten sowohl in der Dokumentation als auch Präsentation angewendet wurden.

Rein virtuelle Modelle

Die Statuen Pharaos Pepi I.

In den Jahren 1996-2001 wurden vom RGZM in Kooperation mit dem DAI Kairo und dem Ägyptischen Museum in Kairo zwei antike Kupferstatuen Pharaos Pepi I. (VI. Dynastie – ca. 2300 v. Chr.) restauriert und auf ihre Herstellungstechnik untersucht⁸. Eingesetzt wurden hierzu ein 3D-Laserscanner zur Erfassung der Objektform sowie Nahbereichsfoto-



Abb. 3 Nagelplan der großen Statue mit halbdurchsichtiger Darstellung der Oberfläche (Visualisierung G. Heinz, RGZM).



Abb. 4 Virtuelle Rekonstruktion der großen Statue (Visualisierung G. Heinz, RGZM).

grammetrie zur Vermessung technologischer Details wie beispielsweise der Nägel und Niete, welche die einzelnen Teile der Skulpturen verbinden (Abb. 1). Aus diesen Vermessungsdaten wurden metrische

Pläne in verschiedenen Ansichten erstellt. Ein rein zeichnerisches Vorgehen wäre bei den komplexen Skulpturen sehr schwierig sowie zeitaufwändig gewesen und hätte jeweils nur diesen einen Plan

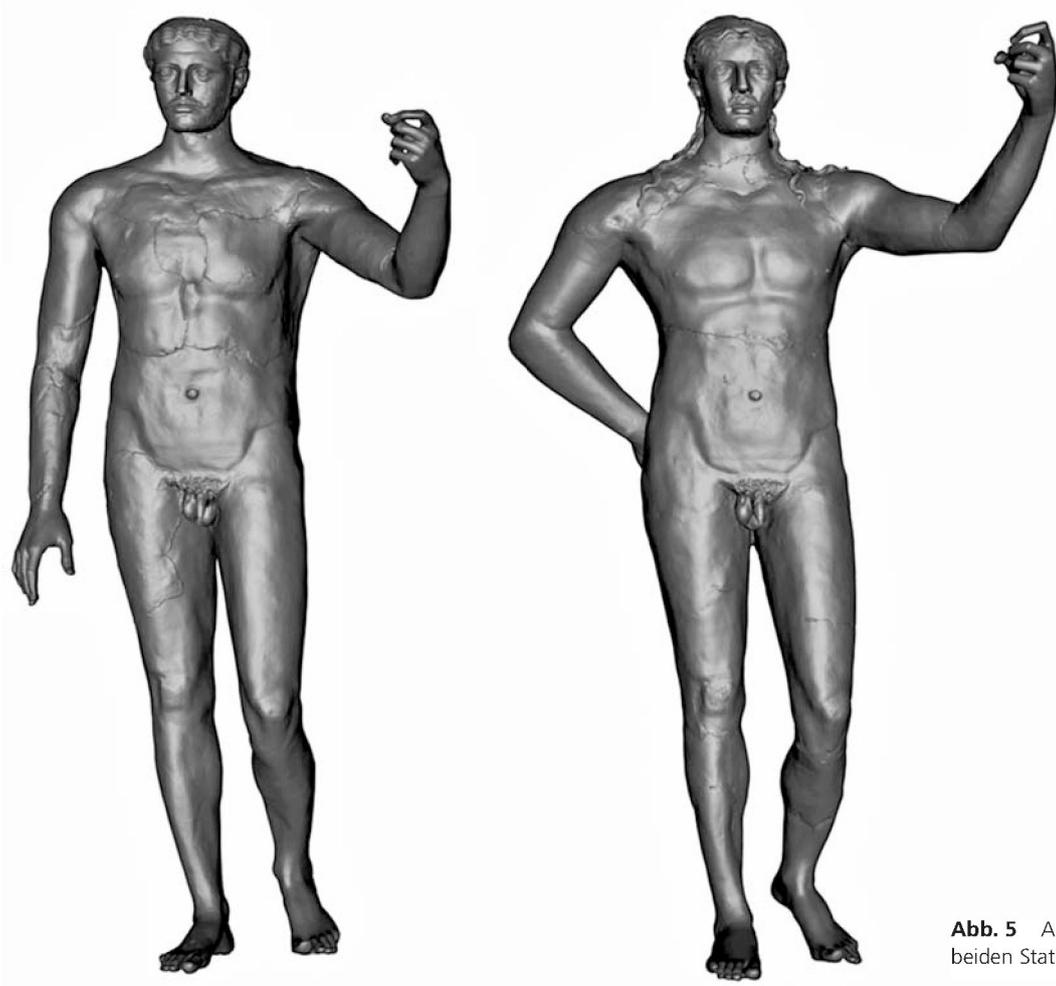


Abb. 5 Ausschnitt aus der Visualisierung der beiden Statuen (Visualisierung C. Schumann).

ergeben. Die Verwendung des 3D-Modells hingegen erlaubt das einfache Ableiten von Plänen in variablen Ansichten. Neben der Erstellung von »Nagelplänen« dienten die Daten und virtuellen Modelle auch als geometrische Grundlage für die virtuelle Rekonstruktion nicht mehr vorhandener Teile der Statuen wie Lendenschurz oder Krone (Abb. 3-4). Animationen mit halbtransparenten Materialien verdeutlichen dabei die räumliche Struktur der Statuen.

Die Königstatuen aus dem Jemen

Die römische Abteilung des RGZM besitzt Rekonstruktionen zweier spätantiker Königsfiguren aus Nakhl al-Hamra im Jemen⁹. Da diese für den Leihverkehr nicht geeignet sind, wurden mittels 3D-Scanning virtuelle Modelle der Skulpturen erzeugt.



Abb. 6 Detailansicht einer der Statuen aus der Visualisierung (Visualisierung C. Schumann).

Aktuell wird aus diesen eine Visualisierung generiert, die für Präsentationen und Ausstellungen verwendet werden sollen. Die Aufnahme erfolgte im Rahmen einer Abschlussarbeit an der FH Mainz¹⁰. Für die Digitalisierung der beiden ca. 2,4 m großen Statuen wurden ein Streifenlicht-Projektionscanner GOM ATOS III verwendet und eine Auflösung von etwa 0,3 mm gewählt; für einzelne Bereiche mit Inschriften ein kleineres Messvolumen sowie eine entsprechend höhere Auflösung. Zur kompletten Erfassung der Statuen wurde jeweils ein Gerüst erstellt, an dem Referenzpunkte zur Verknüpfung der Einzelscans befestigt waren (Abb. 2; 5-6). Dieses Vorgehen bietet sich an, wenn auf der Original-

oberfläche keinerlei Markierungen angebracht werden können. Die Referenzpunkte wurden mittels digitaler Nahbereichsfotogrammetrie vermessen.

Modelle, von denen reale Kopien erstellt wurden

Ein altsteinzeitliches Elfenbeinobjekt

2009 wurde in den Werkstätten des RGZM ein altsteinzeitliches Elfenbeinfragment (Größe: 200 mm x 40 mm x 6 mm) aus Krems-Wachtberg restauriert,



Abb. 7 Elfenbein-Artefakt: **a** Foto des restaurierten Originals (Foto R. Müller, RGZM). – **b** Ansicht des virtuellen Modells ohne Textur (Visualisierung G. Heinz, RGZM). – **c** Farbige gedruckte Kopie aus dem 3D-Drucker (Fotos V. Iserhardt, RGZM).



Abb. 8 Foto des Lamellenhelmes aus Rupkite nach der Restaurierung (Foto R. Müller, RGZM).

das von der Österreichischen Akademie der Wissenschaften ausgegraben worden war¹¹. Wegen der empfindlichen Farbfassung war eine klassische Abformung mit Siliconkautschuk unmöglich, das Objekt wurde daher ebenfalls mit einem GOM ATOS III eingescannt. Die Aufnahme erfolgte mit einer Auflösung an der Objektoberfläche von ca. 0,1 mm. Durch die Verwendung eines Drehtisches konnte die

Vermessung des Objektes in weniger als einer Stunde durchgeführt werden. Auf das 3D-Modell wurden zusätzlich Fotografien des Originals projiziert, sodass ein koloriertes virtuelles Modell entstand. Dieses wurde anschließend mit einem 3D-Drucker ausgegeben (Abb. 7a-c). Die Drucke erfolgten sowohl in Farbe als auch in Weiß – Letztere um »händisch« kolorierte Kopien zu erzeugen und beide Verfahren miteinander zu vergleichen.

Ein byzantinischer Lamellenhelm

Nach Abschluss der im RGZM durchgeführten Restaurierung eines Lamellenhelmes sowie zugehörigen Lamellenpanzers aus einem frühmittelalterlichen Kriegergrab in Rupkite, Bulgarien, wurden die Einzelteile des Helms eingescannt¹². Die eingesetzte Technik entsprach jener oben beschriebenen Vermessung des Elfenbeinartefaktes. Neben der Kuppel besteht der Helm aus einer Kuppel, einem Stirn- und Nackenschutz sowie zweier Wangenklappen (Abb. 8). Eine »klassische« Abformung war aufgrund der filigranen Einzelteile nicht möglich. Die Aufnahmen konnten unter Verwendung eines Drehtisches innerhalb eines Tages abgeschlossen werden. Dabei wurden sämtliche Einzelteile des Helmes mit Ausnahme der Kalotte komplett von allen Seiten aufgenommen. Diese ist auf einen Träger montiert, weshalb nur die äußere Seite eingescannt werden konnte. Für die Erstellung von Kopien sind geschlossene virtuelle Modelle mit ausreichender Wandstärke erforderlich. Daher wurde bei den Daten der Kuppel und der Kalotte aus der einen Schale virtuell ein zum Druck geeignetes Modell erstellt. Der Ausdruck der Einzelbestandteile erfolgte im Anschluss mittels eines 3D-Druckers (Abb. 9). Die hoch aufgelösten digitalen Datensätze (allein das Modell der Kalotte besteht aus über 27 Millionen Dreiecken) mussten für den Druck reduziert werden, um sie bei dem hier verwendeten Gerät weiter verarbeiten zu können.

Da der in diesem Projekt eingesetzte Scanner keine Objektfarbe erfasst und das nachträgliche Texturieren bei derart komplexen Modellen mit den uns zur



Abb. 9 Foto der gedruckten, uncolorierten Kopie der Teile des Lamellenhelmes (Foto V. Iserhardt, RGZM).

Verfügung stehenden Geräten nicht möglich ist, müssen die Ausdrücke noch von Hand koloriert werden.

Die Rekonstruktion eines verlorenen Kopfes einer tangzeitlichen Skulptur aus Ci Shansi, China

Einen anderen Hintergrund hat die Rekonstruktion des Kopfes einer tangzeitlichen Skulptur aus dem buddhistischen Felsentempel Ci Shansi bei Linyou (Provinz Shaanxi), V. R. China. Bei Arbeiten des RGZM in den Jahren 1993 und 1994 wurden mittels analoger stereofotogrammetrischer Aufnahmen Pläne einer Reihe von Skulpturen aus dem Tempel

erstellt. Der Kopf einer der Skulpturen wurde später herausgebrochen und gestohlen (**Abb. 10**)¹³. Aus den in den 1990iger-Jahren gewonnenen analogen Bilddaten wurde der Kopf kürzlich rekonstruiert. Die damals angefertigten Aufnahmen waren mit einer analogen Mittelformat-Teilmesskamera (Rollei 6006 metric) gemacht worden. Die Daten zur Kalibrierung der Kamera sowie Passpunkte waren noch vorhanden. Von der Skulpturenvorderseite gibt es Messbilder für mehrere Stereomodelle in verschiedenen Maßstäben. Leider sind die Seitenflächen der Skulptur und des Kopfes nicht in Stereomodellen erfasst, es liegen hierfür demnach keine verwertbaren Daten vor. Die infrage kommenden analogen Messbilder wurden mit einem fotogrammetrischen Flachbettscanner digitalisiert (**Abb. 11**). Mit speziel-



Abb. 10 Zustandaufnahme der Statue aus Linyou ohne Kopf (Foto aus Anm. 13).

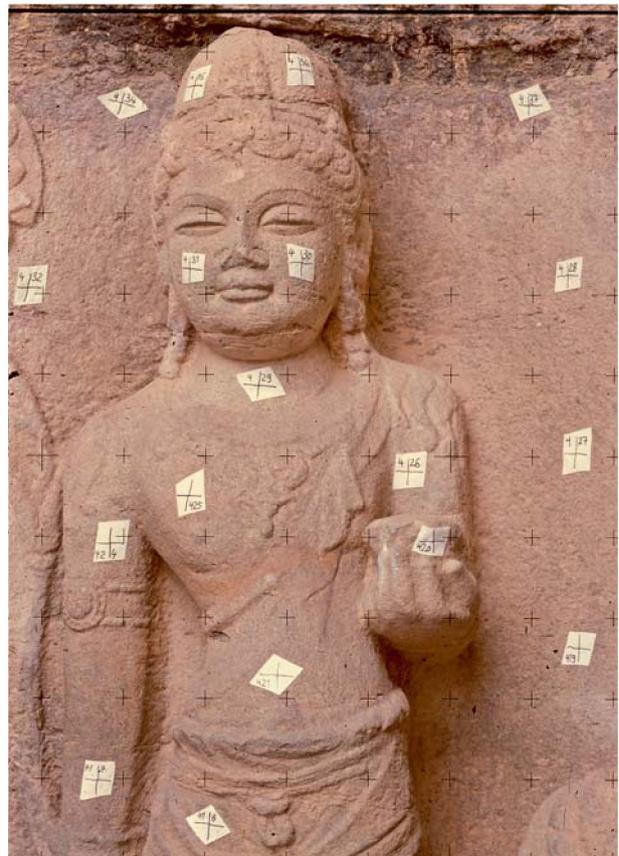


Abb. 11 Fotogrammetrisches Messbild vom Kopf der Statue aus Linyou (Original: 60 mm x 60 mm Dia) (Foto G. Heinz, RGZM).

ler Software wurden Oberflächenpunkte auf der Skulptur bestimmt und weiter zu einem Modell prozessiert¹⁴. Die Bildmaßstäbe der vorliegenden fotogrammetrischen Aufnahmen begrenzen die Dichte und Genauigkeit der Punkte sowie damit auch der modellierten Oberfläche. Anstelle der fehlenden Seitenflächen wurden virtuelle Stützkonstruktionen modelliert. Anschließend wurde die komplette Skulptur verkleinert ausgedruckt, der Kopf im Maßstab 1:1 (Abb. 12-14). Auf Basis weiterer Fotos der Skulptur sollen die fehlenden Teile später händisch am Ausdruck ergänzt werden. Das so entstandene Modell des Kopfes kann anschließend »klassisch« als Kopie abgeformt werden und ließe sich anstelle des fehlenden auf der Originalskulptur im Felsentempel anbringen.

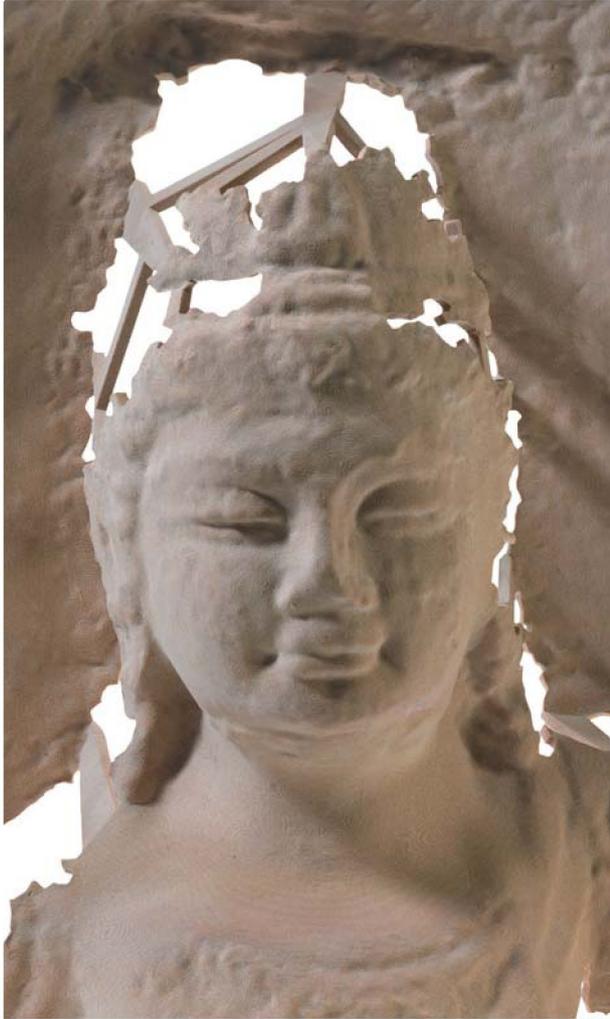


Abb. 12 Foto des 3D-Druckes des Kopfes der Statue von Linyou (Foto V. Iserhardt, RGZM).



Abb. 13 Foto des verkleinerten 3D-Druckes des rekonstruierten Modells (Foto V. Iserhardt, RGZM).

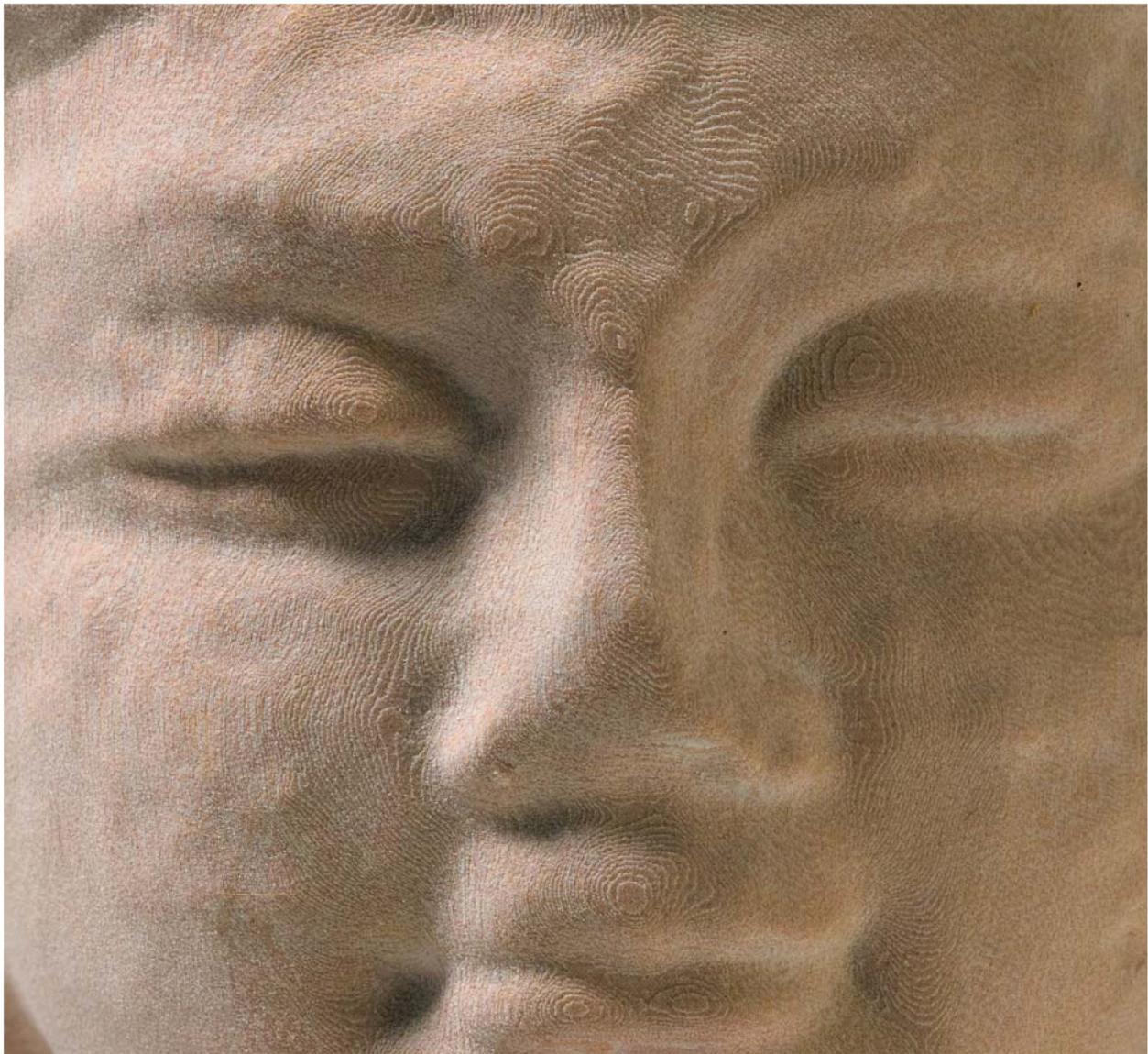


Abb. 14 Detailansicht des 3D-Druckes des Kopfes. Erkennbar ist der schichtweise Aufbau des Materials (Foto V. Iserhardt, RGZM).

Qualität der Modelle

Virtuelle Modelle bieten einige Optionen, die bei klassischen Verfahren so nicht möglich sind. Insbesondere in Rekonstruktionen und Präsentationen sind unterschiedliche Varianten sowie Darstellungseffekte von Vorteil. Begrenzungen bestehen aktuell noch in den Systemen zum Digitalisieren der 3D-Objekte, in der Verarbeitung der hochauflösenden Daten und bei der Visualisierung. In der Auflösung von sehr feinen Details können virtuell Modelle häufig

noch nicht mit den durch klassische Verfahren erstellten Kopien mithalten. Die hier beschriebenen, mittels 3D-Druck gewonnenen Kopien hätten jedoch mit »direkt« abformenden Methoden aus konservatorischen Gründen keinesfalls erstellt werden können.

Langzeiterfahrungen mit den verwendeten Materialien hinsichtlich der geometrischen Stabilität der gedruckten Objekte, wie auch ihrer Farbstabilität fehlen noch. Die Haltbarkeit der im RGZM erstellten Modelle wird derzeit beobachtet.

Ausblick

Die zu erwartenden Fortschritte bei Werkzeugen zur Erfassung, Verarbeitung und Ausgabe von virtuellen Kopien werden die Anwendungsmöglichkeiten in Restaurierung und Archäologie erweitern. Die Verwendung von virtuellen Modellen in Präsentationen

und Ausstellungen eröffnet dabei neue Möglichkeiten, Objekte interaktiv und in verschiedenen Varianten vorzuführen. Die Qualität der Ausdrucke wird im Vergleich zu den traditionell hergestellten Kopien zunehmen. Aktuell ist diese Methode vor allem dann besonders interessant, wenn andere Verfahren nicht möglich sind.

Anmerkungen

- 1) U. Froberg, Die Anfertigung einer Kopie des großen Ludovisischen Schlachtensarkophags. Restaurierung und Archäologie. Konservierung – Restaurierung – Technologie – Archäometrie 1, 2008, 69-87.
- 2) Bei Triangulationsverfahren wird der zu bestimmende Punkt von zwei unterschiedlichen bekannten Positionen aus angemessen oder betrachtet. In dem sich so ergebenden Dreieck kann dann die Position des Neupunktes berechnet werden.
- 3) The Digital Michelangelo Project. www.graphics.stanford.edu/projects/mich/ (Stand: 15. November 2010).
- 4) Impertor Caesar Flavius. Ausstellungskat. Trier (Trier, Mainz 2007) 117ff.
- 5) ArcTron: Der Koloss des Konstantin. 3D HighTech Verfahren in der Archäologie. Siehe www.arctrone.de/3D-Vermessung/3D-Laserscanning/Beispiele/Konstantin/PresseArcTron3D.pdf (Zugriff: 15. November 2010).
- 6) A. Fleckinger / H. Steiner, Der Mann aus dem Eis (Bozen 1999) 45-47.
- 7) Weitere Verfahren sind z.B. Selektives Laser-Sintern (SLS), Selektives Laser-Schmelzen (SLM), Laminated Object Manufacturing (LOM) oder Fused Deposition Modeling (FDM).
- 8) Ch. Eckmann / S. Shafik, »Leben dem Horus Pepi«. Restaurierung, Konservierung und technologische Untersuchung der Metallsulpturen aus dem Tempel von Hierakonpolis (Mainz 2005).
- 9) K. Weidemann, Könige aus dem Yemen (Mainz 1983).
- 10) F. Roth, Scanning antiker Skulpturen [unveröffentl. BA-Arbeit, Fachrichtung Geoinformatik und Vermessung, Fachhochschule Mainz 2010].
- 11) Siehe auch: www.oeaw.ac.at/praehist/projekte/projekte.html (Zugriff: 15. November 2010).
- 12) Byzanz – Pracht und Alltag. Ausstellungskat. Bonn (Bonn 2010) Kat.-Nr. 348-349, 291.
- 13) Fachbereich Archäologie der Nordwest-Universität (Hrsg.), Der Tempel Ci Shan und die Brücke Linxi – Ein Forschungsbericht über Grube und Nische mit einer Buddhastatue (Peking 2002).
- 14) Die Erstellung des virtuellen Modells aus den Messbildern erfolgte an der FH Mainz durch Carsten Krämer.

Zusammenfassung / Abstract / Résumé

Kopien berührungslos erstellen – virtuell und zum Anfassen

Das Herstellen von Kopien bedeutender archäologischer Fundstücke hat eine lange Tradition am Römisch-Germanischen Zentralmuseum (RGZM) in Mainz. Der Artikel beschreibt kurz einige Verfahren und Möglichkeiten zur berührungslosen Erstellung von virtuellen Modellen sowie Kopien als Ergänzung zu den etablierten Verfahren. Anhand mehrerer Beispiele aus dem RGZM werden verschiedene Vorgehensweisen gezeigt. Die beschriebenen Beispiele sind mit den klassischen Methoden der Kopienherstellung nicht möglich. Beschränkungen bestehen noch in der Oberflächenqualität der 3D-Drucke, teilweise in der geometrischen Auflösung feiner Strukturen sowie der Farbe der Drucke.

Non-contact generating of replicas – virtual and tangible

Generating copies of important archaeological findings has a long tradition at the Römisch-Germanisches Zentralmuseum Mainz (RGZM). This paper briefly describes non-contact methods and procedures to generate virtual models and copies in addition to established procedures. Several approaches are presented. These examples from the RGZM collections would have been impossible using classical moulding techniques. Limitations are still present in the quality of the surfaces, the geometric resolutions of very fine structures and the colour reproduction of the 3D-prints.

Fabriquer des copies sans contact – virtuel et à toucher

La fabrication de copies de trouvailles archéologiques significatives a une longue tradition au Römisch-Germanisches Zentralmuseum de Mayence (RGZM). L'article décrit brièvement quelques procédés et possibilités pour la réalisation sans contact de modèles virtuels et de copies com-

me complément aux procédés établis. A l'aide de plusieurs exemples du RGZM sont montrées différentes approches. Les exemples décrits ne sont pas réalisables avec les méthodes classiques de la fabrication de copies. Il existe encore des limites dans la qualité des surfaces des impressions en 3D, partiellement dans la résolution géométrique de structures fines ainsi que dans la couleur des impressions.

Schlagworte

Kopie / virtuelle Kopie / 3D-Scanning / virtuelles Modell / 3D-Drucker