

# Mit Kamera, Maßstab und Laptop – Best Practice zur Erstellung von 3D-Modellen für eine Museumsausstellung am Beispiel vietnamesischer Kulturobjekte

THOMAS P. KERSTEN<sup>1</sup> & MAREN LINDSTAEDT<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: In diesem Beitrag werden Beispiele vietnamesischer Kulturgüter von unterschiedlicher Größe und Bedeutung vorgestellt, die aus Bildsequenzen 3D rekonstruiert wurden, um z.B. digitale foto-realistische Replikat für eine Ausstellung und/oder eine 3D-Visualisierung in virtuellen Museumsanwendungen herzustellen. Für die Ausstellung „Schätze der Archäologie und Kultur Vietnams“ wurden ausgewählte Kulturobjekte Vietnams durch das Labor für Photogrammetrie und Laserscanning der HafenCity Universität Hamburg, im September 2015 in verschiedenen Museen Vietnams durch Bildsequenzen mit einer digitalen Spiegelreflexkamera Nikon D800 aufgenommen und detailliert dokumentiert. Die Schätze Vietnams, die noch niemals außerhalb des Landes zu sehen waren, werden erstmals in Deutschland im Rahmen einer Ausstellung in den Städten Herne, Chemnitz und Mannheim im Zeitraum von Oktober 2016 bis Februar 2018 gezeigt wird. Der Arbeitsablauf von der 3D-Objektaufnahme über die Modellierung bis zur Visualisierung und dem 3D-Druck werden als Best Practice beschrieben. Die Ergebnisse der 3D-Modelle und deren Integration in virtuelle Touren werden präsentiert.*

## 1 Einleitung

Kulturgüter sind bedeutende Zeugnisse der menschlichen Vergangenheit. Dieses historische Erbe ist heute aufgrund zunehmender Zerstörung durch Krieg, Terrorismus und Vandalismus sowie durch schleichende Verwitterung weltweit in großer Gefahr. Eine erhebliche Anzahl von Kulturobjekten wurde bereits in der Vergangenheit verschleppt, verkauft oder zerstört. Beispiele für die sinnlose Zerstörung stellen die großen Buddha-Statuen von Bamiyan in Afghanistan (GRÜN et al. 2002) und die archäologisch bedeutsame Stätte Palmyra in Syrien dar (WAHBEH & NEBIKER 2016). Andererseits lagern viele Objekte nicht restauriert und konserviert in Magazinen und verlieren so nach Jahren ihre Verzierungen oder gar Form. Um den vollständigen Verlust aller Informationen dieses Kulturerbes zu vermeiden, ist die 3D-Aufnahme und Dokumentation mit modernen Messmethoden eine hervorragende Methode. Zur Hilfe kommt die stetig zunehmende Leistungsfähigkeit von Internet und Computertechnologie kombiniert mit einer rasanten Entwicklung der entsprechenden Rechenalgorithmen im Bereich der Computer Vision und Photogrammetrie. Dadurch wird eine effiziente und flexible Rekonstruktion der 3D-Geometrie von Kulturobjekten für deren Sicherung, für zukünftige Konservierungsaufgaben und für eine ortsunabhängige Präsentation möglich.

Da in den meisten Fällen die wertvollen und interessanten archäologischen Fundstücke und Exponate aufgrund ihrer hohen nationalen Bedeutung, aus rechtlichen Gründen oder auch wegen des Transportrisikos im Herkunftsland verbleiben, müssen Verfahren und Werkzeuge entwickelt

---

<sup>1</sup> HafenCity Universität Hamburg, Labor für Photogrammetrie & Laserscanning, Überseeallee 16, D-20457 Hamburg, E-Mail: [Thomas.Kersten, Maren.Lindstaedt]@hcu-hamburg.de

werden, um diese einmaligen Objekte dennoch einer interessierten Öffentlichkeit zu zeigen. So können Kulturgüter unterschiedlicher Größe (von der Münze bis zur großen Tempelanlage) mithilfe hochentwickelter Software aus Bildsequenzen kommerzieller digitaler Kameras 3D aufgenommen und modelliert werden. Kamera, Maßstab und Laptop (mit entsprechender Software) bilden damit Bestandteile sogenannter Low-Cost Systeme, die für eine Vielzahl von Anwendungsbereichen (Archäologie, Restauration, Denkmalpflege, Visualisierung, Analyse von Baukonstruktion und deren Beschädigung, etc.) eingesetzt werden können bzw. bereits eingesetzt wurden (REMONDINO et al. 2008, BARAZZETTI et al. 2009, KERSTEN & LINDSTAEDT 2012, KERSTEN & LINDSTAEDT 2014). Betrachtet man die Tatsache, dass der Mitnahme und Einführung eines Streifenprojektionssystems oder eines Laserscanners in ein fremdes Land oftmals diverse bürokratische und manchmal auch transporttechnische Hürden im Wege stehen, ist der Einsatz einer Kamera unkompliziert und ohne viel Aufwand zu realisieren. Wenn man in den vielseitigen Anwendungsbereichen bewährte Methoden einsetzt und den Workflow anhand der Aufgaben entsprechend optimiert, dann spricht man von Best Practice. Der Begriff stammt aus der angloamerikanischen Betriebswirtschaftslehre und bezeichnet bewährte, optimale bzw. vorbildliche Methoden, Praktiken oder Vorgehensweisen, die im Folgenden anhand der Aufnahme und Auswertung von vietnamesischer Kulturgüter gezeigt werden.

## 2 Photogrammetrische Aufnahme

In diesem Beitrag werden fünf Beispiele vietnamesischer Kulturgüter von unterschiedlicher Größe und Bedeutung (Abb. 1) vorgestellt, die aus Bildsequenzen zur Erstellung digitaler und analoger Replikate 3D rekonstruiert wurden. Für die Ausstellung «Schätze der Archäologie Vietnams» (REINECKE & MÜHLENBROCK 2016), die in Deutschland in den Städten Herne, Chemnitz und Mannheim im Zeitraum von Oktober 2016 bis Januar 2018 gezeigt wird, wurden durch das Labor für Photogrammetrie & Laserscanning der HafenCity Universität Hamburg ausgewählte Kulturobjekte Vietnams, die noch niemals außerhalb Vietnams zu sehen waren, im September 2015 in verschiedenen Museen Vietnams durch Bildreihen aufgenommen und detailliert dokumentiert. Die photogrammetrische Aufnahme der Objekte erfolgte aus verschiedenen Perspektiven und Höhen mit einer digitalen Spiegelreflexkamera Nikon D800, die einen Vollformatsensor von 36 mm × 24 mm mit einer Auflösung von 36 Mio. Pixeln aufweist. Durch eine stabile Kamerapositionierung auf einem Stativ konnten die Aufnahmen mit einer langen Brennweite (ca. 35 mm oder 80 mm) und der kleinen Blende (22) gemacht werden, die bei den teilweise ungünstigen Beleuchtungsverhältnissen eine optimale Tiefenschärfe und eine lange Belichtungszeit erlaubte. Durch die Aufnahme mit HDR (High Dynamic Range) in einer Belichtungsreihe von drei Fotos (über-, unter- und normal belichtet) konnte eine optimale Belichtung des Objektausschnittes garantiert werden, da die drei Fotos bereits in der Kamera zu einem Bild zusammengerechnet wurden. In den Objektraum wurden während der photogrammetrischen Aufnahme kalibrierte Maßstäbe mit einer Länge von 14 cm, 28 cm und 44 cm um das Objekt gelegt, um die aus den Fotos generierten 3D-Informationen präzise zu skalieren. Bei der Auswertung der verschiedenen Objekte konnte eine Genauigkeit der Maßstäbe von ca. 0,05 mm bestimmt werden.

Um ein Objekt wie z.B. den Schädel rundherum und komplett modellieren zu können, wurden in diesen Fällen zwei Bildverbände gemacht, einer der Ober- und einer der Unterseite. Bei dieser Vorgehensweise sollte beachtet werden, dass zwischen den beiden Bildverbänden ausreichend Überlappung besteht, um schließlich ein komplettes Modell berechnen zu können.



Abb. 1: Schätze der Archäologie Vietnams als Aufnahmeobjekte – v.l.n.r.: hölzerne Buddha-Figur, Schädel mit Ohrring, Goldmasken, Mukhalinga („Phallus mit Gesicht“) und Trommel

### 3 Bildauswertung und 3D-Modellierung

Im Folgenden werden die Auswertungen und 3D-Modellierungen der fünf wichtigsten Kulturobjekte kurz vorgestellt. Die Auswertung der Bilddaten erfolgte für alle Objekte mit der Software PhotoScan Professional Edition 1.2. von der Firma Agisoft aus St. Petersburg in folgenden Schritten. Nach dem Import der Fotos wurden die Bildorientierungen und die Kamerakalibrierung pro Bildverband berechnet, in dem alle Bilder durch automatische Bildpunktmessungen in Form einer dünnen Punktwolke miteinander zu einem Bildverband verknüpft wurden. Eine Skalierung der generierten 3D-Punktwolke erfolgte durch präzise manuelle Messung der Maßstäbe. Für den Fall mehrerer Bildverbände eines Objektes, gilt es zunächst diese Verbände alle in einem zu vereinen. Dafür wird in einer (niedrigen) Auflösung eine Vermaschung gerechnet und anhand dieser wird aus dem Objektraum zurück in den Bildraum eine Maskierung des Objektes berechnet, die nur das Objekt ohne störende Umgebung beinhaltet. Anschließend werden die Bilder der beiden Bildverbände unter der Berücksichtigung der Masken nochmals orientiert, um so alle Bilder in einem Verband vorliegen zu haben. Gelingt hierbei die Orientierung der Bilder nicht vollständig, so lassen sich zusätzlich manuelle Verknüpfungspunkte in den entsprechenden Bildern generieren. Nun lässt sich eine dichte Punktwolke des gesamten Objektes ohne fehlende Bereiche berechnen. Die Punktwolke lässt sich direkt in PhotoScan bereinigen, filtern, segmentieren und vermaschen. Oder man wählt für ausführlichere Editiermöglichkeiten den Export, um in Geomagic oder einem anderen Modellierungsprogramm weiterzuarbeiten. Als letzten Schritt wird das bereinigte Modell dann anhand der vorhandenen Bilder mit einer hochauflösenden Textur in PhotoScan versehen.

#### 3.1 Der hölzerne Buddha aus Südvietsnam

Das erste Objekt war aufnahmetechnisch auch das anspruchsvollste Projekt, da die hölzerne Buddha-Statue sehr fragil und relativ flach ist, was eine Verknüpfung der beiden Seiten (Vorder- und Rückseite) bei der späteren Modellierung erschwerte. Die im März 2004 entdeckte und 1.90 m große Buddha-Figur stammt aus Gò Tháp (Mekong-Delta, Provinz Đồng Tháp, Südvietsnam) und befindet sich im Museum Đồng Tháp in Cao Lãnh. Sie ist der Óc Eo-Kultur zu zurechnen und sie

wurde im 2. Jahrhundert n. Chr. hergestellt (REINECKE 2016). Ein senkrechter Aufbau der Figur für die Aufnahme war aus Sicherheitsgründen nicht möglich. Die Statue wurde in 378 Fotos (193 Vorder- und 185 Rückseite) mit der Nikon D800 ( $f=85\text{ mm}$ ) auf zwei Hocker liegend aufgenommen (Abb. 2), wobei aus Gründen der Belichtungsqualität von jedem Standpunkt jeweils eine HDR- und eine normale Belichtungsaufnahme gemacht wurde. Wegen der flachen Geometrie der Figur und der Aufnahmekonfiguration für die Vorder- und Rückseite gab es wenig überlappende Bereiche für die Verknüpfung der beiden Objektteile. Daher mussten korrespondierende Punkte in beiden Objektteilen manuell gemessen werden, um so eine geometrisch korrekte Verknüpfung der beiden Bildverbände zu gewährleisten. Das 3D-Modell der Figur (Abb. 2 rechts) wurde in vier verschiedenen Auflösungsstufen im Fileformat OBJ erstellt, um unterschiedlichen Anforderungen vom 3D-Druck bis zur Visualisierung gerecht zu werden: 5 Mio. Dreiecke (368 Mbyte), 2 Mio. Dreiecke (147 Mbyte), 600.000 Dreiecke (52 Mbyte) und 200.000 Dreiecke (23 Mbyte).



Abb. 2: Aufnahmeaufbau für den hölzernen Buddha (links) und 3D-Modell des Buddha-Kopfes (rechts)

### 3.2 Ein Schädel mit Ohrring aus Ho-Chi-Minh-Stadt

Das zweite vorgestellte Objekt ist ein Schädel mit Ohrring der Sa Huỳnh-Kultur (Abb. 1), aus dem 3.-1. Jahrhundert v. Chr. vom Gräberfeld Giồng Cá Vồ, der im Nationalmuseum in Ho-Chi-Minh-Stadt erfasst wurde. Es wurde die Ober- und Unterseite des Schädels durch zwei Bildsequenzen mit einer gesamten Anzahl von 193 Fotos um das Objekt herum und aus verschiedenen Höhen aufgenommen (Abb. 3 links). Leider waren Schädel und Unterkiefer nicht fest miteinander verbunden, sodass nach Drehung des Objektes auf die Unterseite der Unterkiefer und die Schädelunterseite nebeneinander liegend fotografiert werden mussten. Dieses Missgeschick erschwerte die Auswertung erheblich, da die exakte Position des Unterkiefers nun aus der ersten Bildserie der Oberseite auch mit rekonstruiert und eine aufgetretene Deformation im Unterkiefer korrigiert werden musste. Das texturierte 3D-Modell des Schädels (Abb. 3 rechts) besteht aus knapp 1 Mio. Dreiecken und es weist eine Datenmenge von 102 Mbyte auf.

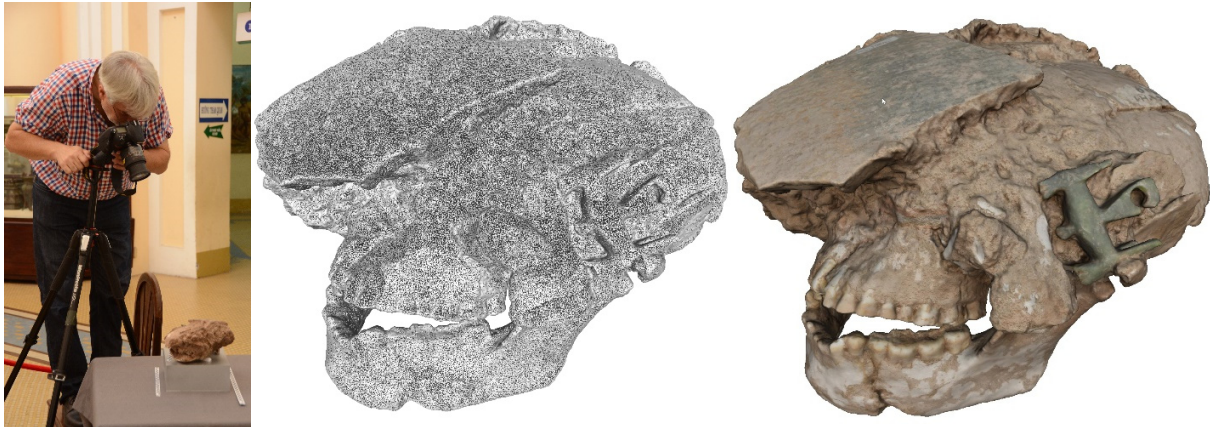


Abb. 3: Aufnahme des Schädels mit Ohrring (links), Schädel als Dreiecksvermaschung (Mitte) und als texturiertes 3D-Modell (rechts)

### 3.3 Goldmasken aus Südvietnam

Im Museum der Provinz Bà Rịa - Vũng Tàu wurden zwei Goldmasken (Größe –  $10,9 \times 4,5$  cm und  $9,7$  cm  $\times$   $6,0$  cm, Dicke – ca. 1 mm) aufgenommen (Abb. 4), die als Grabbeigaben in zwei verschiedenen Gräbern des 1. Jahrhunderts v. Chr. auf dem Fundplatz Giồng Lớn in Südvietnam gefunden wurden. Die zwei Seiten der Masken wurden mit 107 bzw. 60 Fotos aus verschiedenen Positionen rundherum so gut dokumentiert, dass man alle Bearbeitungsspuren detailliert sehen kann. Aus den Bildsequenzen wurden jeweils ein Oberflächenmodell für die Vorder- und Rückseite berechnet, die anschließend zu einem 3D-Modell mit einem Datenvolumen von 20 Mbyte (Goldmaske 1: 124.249 Punkte und 248.494 Dreiecke) zusammengesetzt wurden. Das Zusammenfügen der beiden Seiten erfolgte über vier Punkte, die als Löcher in der Ecken der Goldmasken gekennzeichnet waren.

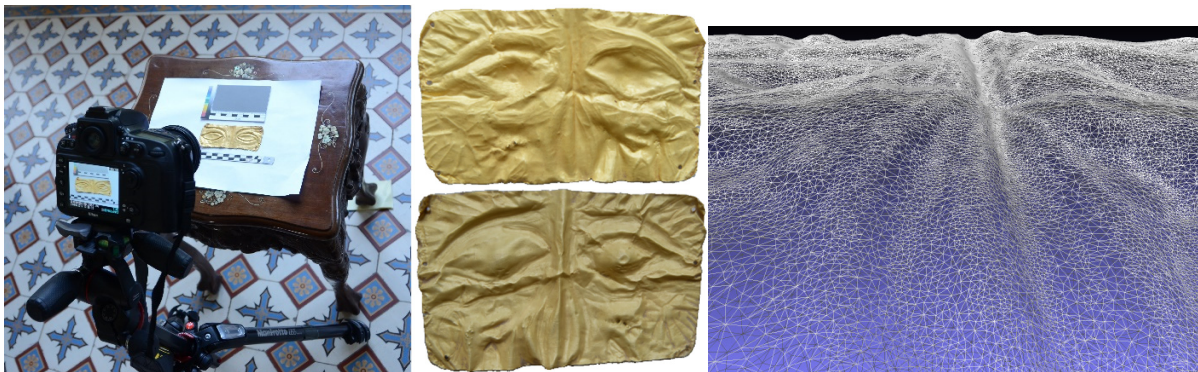


Abb. 4: Aufnahme-Setup für eine Goldmaske (links), 3D-Modell der Goldmaske in Vorder- und Rückansicht (Mitte) und detaillierter Ausschnitt der Dreiecksvermaschung (rechts)

### 3.4 Mukhalinga der Cham-Kultur

Im Museum Mỹ Sơn bei Đà Nẵng in Zentralvietnam (Provinz Quảng Nam), etwa 30 km südwestlich der ehemaligen Hafenstadt Hội An wurde eine Mukhalinga der Cham-Kultur (aus dem 8. Jahrhundert) mit 184 Fotos aus verschiedenen Höhen und Perspektiven aufgenommen. Die Mukhalinga („Phallus mit Gesicht“), eine frühe Erscheinungsform Shivas mit der Darstellung

seines Gesichts, hat die stattlichen Dimensionen von 1,26 m Höhe, 0,41 m Breite und 0,41 m Tiefe. Als zusätzliche Skalierung wurden zwei 2 m-Zollstöcke in horizontaler und vertikaler Aufstellung in den Objektraum platziert (Abb. 5 links). Aus den Bilddaten wurden 3D-Modelle (Abb. 5 rechts) in unterschiedlicher Auflösung erstellt, die die Grundlage für verschiedene Anwendungen, wie z. B. 3D-Druck (hohe Auflösung) und 3D-Visualisierung auf einem Standard-PC (niedrige bis sehr niedrige Auflösung), bilden.



Abb. 5: Foto (links) und 3D-Modell der Mukhalinga aus verschiedenen Blickrichtungen (rechts)

### 3.5 Die Bronzetrommel von Cồ Loa

Eine über 2000 Jahre alte Bronzetrommel von Cồ Loa wurde mit 165 Fotos im Museum der Stadt Hanoi aufgenommen. Die Aufnahmepositionen der Kamera und einer der beiden verwendeten Maßstäbe sind in Abb. 6 (links) dargestellt.

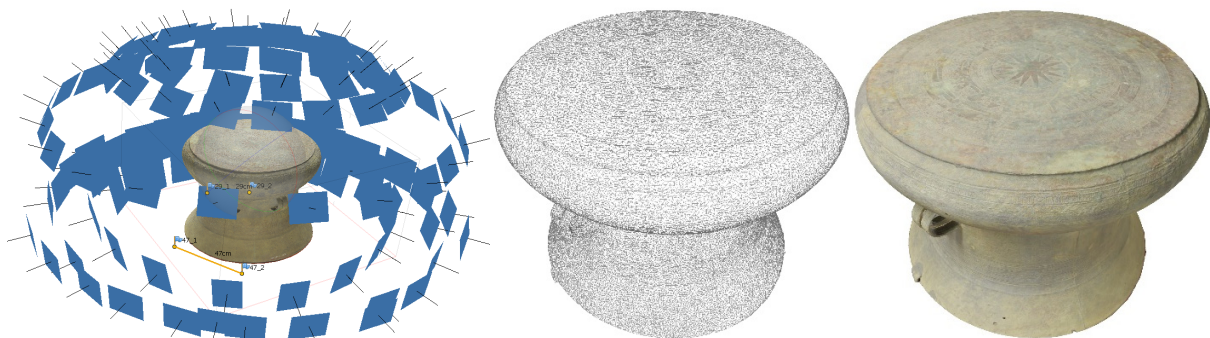


Abb. 6: Aufnahmeconfiguration für die Trommel (links), Dreiecksvermaschung (Mitte) und texturiertes 3D-Modell der Trommel (rechts)

Die Bildorientierungen und die Kamerakalibrierung wurden auf einem Notebook (Schenker XMG 64bit Betriebssystem, 32 GB RAM, 2 Nvidia Geforce GT780M, CPU Intel Core i7-4940MX CPU 3.1 GHz) in 37 Minuten berechnet, während die Erstellung einer dichten Punktwolke mit 42,5 Mio. Punkten fünf Stunden und 21 Minuten dauerte. Aus diesen Daten wurden ebenso 3D-Modelle (Abb. 6) in unterschiedlicher Auflösung erstellt: a) hohe Auflösung (100%) mit 8.501.538 Dreiecken und einer Filegröße von 940 Mbyte, b) niedrige Auflösung (11%) mit 945.093 Dreiecken und einer Filegröße von 99,7 Mbyte und c) sehr niedrige Auflösung (1,2%) mit 100.000

Dreiecken und einer Filegröße von nur 12,4 Mbyte, was in diesem Fall einer Datenreduktion um den Faktor 83 entspricht. Zur Beurteilung der erstellten 3D-Modelle wurde mit der Software Geomagic Studio ein 3D-Vergleich zwischen den drei Datensätzen berechnet, der nur geringe durchschnittliche Abweichungen von kleiner als 0,1 mm bestätigte (Abb. 7).

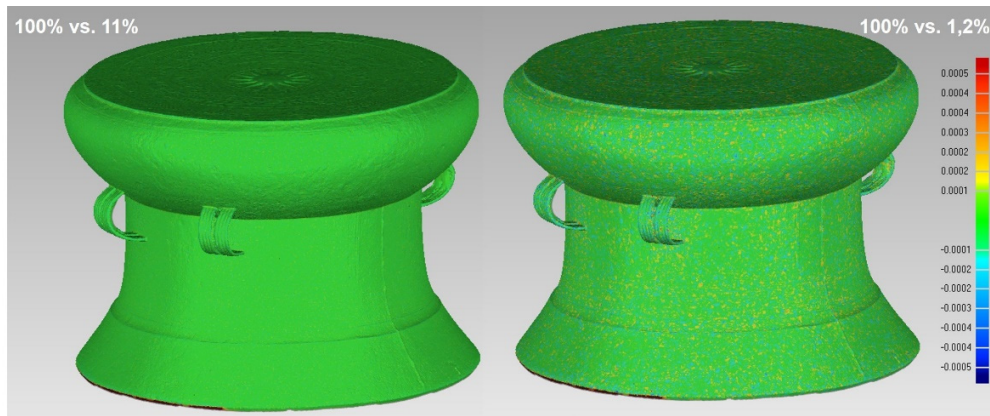


Abb. 7: 3D-Vergleich zwischen hochaufgelösten (100%) und reduzierten Datensätzen (11% und 1,2%) der Trommel (Einheit Farbskala in [m])

#### 4 Replikat durch 3D-Druck

Für die aktuelle Ausstellung «Schätze der Archäologie Vietnams» im LWL Museum für Archäologie in Herne hat die Firma ARC-TECH GbR (Birstein, Hessen) drei Exponate (Buddha, Schädel und Mukhalinga) als 3D-Replikat angefertigt (Abb. 8).



Abb. 8: 3D-Replikat als Ausstellungsexponate im LWL-Museum für Archäologie in Herne: v.l.n.r. Buddha, Schädel und Mukhalinga

Die Replikat wurden aus den photogrammetrisch erstellten 3D-Daten der Originale als 3D-Drucke 1:1 hergestellt. Der Schädel mit Ohrring wurde monochrom (Gipsfarbe) mit einer Schichtstärke von 0,1mm im ColorJet Printing Verfahren mit einem ZPrinter ProJet 660Pro 3D-Drucker in ca. 8-9 Stunden gedruckt, indem im generativen Schichtbauverfahren PU Harz

infiltriert wurde. Der Holzbuddha und der Mukhalinga wurden im Sanddruck (dunkelgrau) mit einer Schichtung von 0,3 mm in ca. 30-35 Stunden gefertigt, indem beide Objekte zusammen in einem Druckraum bzw. Druckvorgang verarbeitet wurden. Auch hier wurde in dem Druckvorgang PU Harz infiltriert, um die Repliken robuster und widerstandsfähiger zu machen. Die Oberflächen wurden sorgfältig überarbeitet und nachträglich von Hand koloriert, was insgesamt ca. 120 Stunden in Anspruch nahm.

## 5 Virtuelle Touren für Weltkulturerbestätten

Für eine museale Darstellung von Weltkulturerbestätten in Vietnam wurden von fünf verschiedenen Orten in Mittel- und Nordvietnam virtuelle Touren erstellt, die aus voll-sphärischen Panoramen (360-Grad-Blick) von unterschiedlichen Standpunkten generiert wurden. Beispielhaft wird hier die virtuelle Tour von Mỹ Sơn dargestellt (Abb. 9).

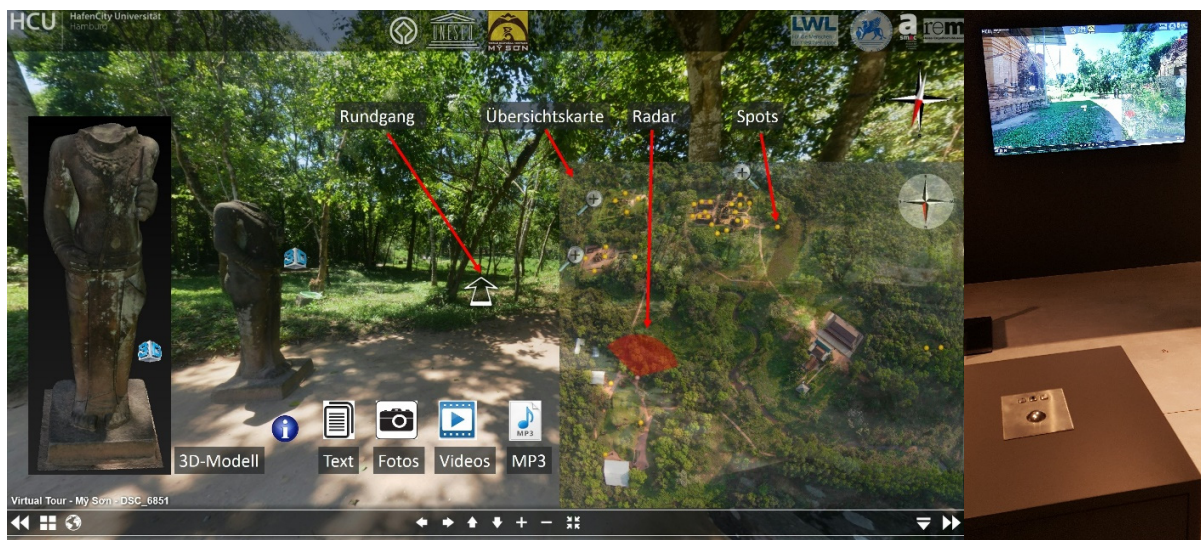


Abb. 9: Benutzeroberfläche der virtuellen Tour in Mỹ Sơn mit Erklärungen und potentiell integrierbaren Zusatzinformationen (links) und Betrachtung der virtuellen Tour in der Ausstellung (rechts)

Der interaktive Rundgang umfasst insgesamt 31 Panoramen (alle  $360^\circ \times 180^\circ$ ) und zeigt von jedem Standpunkt ein voll-sphärisches Panorama, das dem Betrachter eine  $360^\circ$  Rundumsicht ähnlich wie bei Google Street View bietet. Der Betrachter sieht zum Einstieg des virtuellen Rundgangs ein Panorama und eine Luftbildübersicht der Weltkulturerbestätte (ein- und ausschaltbar), in der alle verfügbaren Standpunkte eingezeichnet sind (Abb. 9). Das Panorama kann mithilfe der Maus um  $360^\circ$  gedreht und hinein- und herausgezoomt werden. Durch Klick auf entsprechende Richtungspfeile im Panorama kann man dem Rundgang folgen oder man wechselt den Standpunkt durch Anklicken eines Spots in der Übersichtskarte. Ein Radar in der Übersichtskarte (Abb. 9) zeigt die aktuell gewählte Blickrichtung an und ein Kompass mit Nordpfeil liefert die wichtige Orientierung. Zusätzlich sind Hotspots z. B. als Verlinkung von Fotos, Detailaufnahmen und Zeichnungen von z. B. Fundstücken sowie Texte als Erklärungen oder Beschreibungen, Musik, Videos und andere Anwenderaktionen wie 3D-Objekte über eine XML-basierte Programmiersprache integriert. Mit dieser neuen Technologie können dem interessierten



Museumsbesucher nicht nur entfernte Orte wie Weltkulturerbestätten informativ und interaktiv näher gebracht werden, sondern auf diese Weise können auch archäologische Fundstücke in 3D mit dem originären Fundort verknüpft werden. Für die Ausstellung «Schätze der Archäologie Vietnams» im LWL-Museum für Archäologie in Herne wurden weitere virtuellen Touren von der Zitadelle Hoa Lu bei Trường Yên (Ninh Binh), der Zitadelle der Hồ-Dynastie in Thanh Hóa sowie vom Literaturtempel und der Zitadelle Thăng Long in Hanoi zusammengestellt (Abb. 10), die über einen großen Bildschirm an der Wand durch Steuerung mit einer Konsole betrachtet werden können (Abb. 9 rechts).

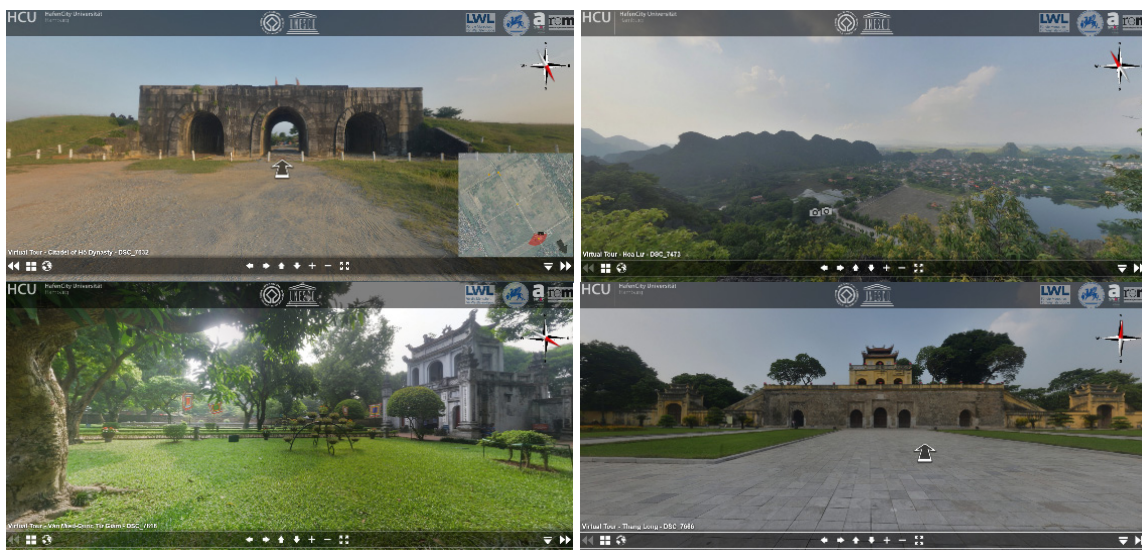


Abb. 10: Virtuelle Touren für die Weltkulturerbestätten in Nordvietnam - Zitadelle Hoa Lu bei Trường Yên (Ninh Binh) (oben links), Zitadelle der Hồ-Dynastie in Thanh Hóa (oben rechts) sowie für den Literaturtempel (unten links) und die Zitadelle Thăng Long (unten rechts) in Hanoi

## 6 Fazit & Ausblick

Die eingesetzten Methoden und Systeme haben sich im Sinne des Best Practice bei der Aufnahme und 3D-Modellierung vietnamesischer Kulturobjekte sehr bewährt, so dass die gewünschten Produkte in Form von gedruckten 3D-Replikaten und entsprechenden virtuellen Touren erstellt werden konnten. Eine hochauflösende digitale Spiegelreflexkamera mit der HDR-Funktion auf einem Stativ eingesetzt, bietet die entsprechend gute Ausstattung für Aufnahmen mit optimaler Beleuchtung und Tiefenschärfe für Projekte im Museumsbereich. Ergänzend dazu ermöglichen leistungsstarke tragbare Rechner (Notebooks) eine flexible und automatische Auswertung der erfassten Bildsequenzen auch schon vor Ort, was eine schnelle Qualitätskontrolle erlaubt. Durch die automatische Generierung von texturierten 3D-Modellen in unterschiedlichen Auflösungen können mehrere Anwendungen (z.B. Visualisierung, Internet, 3D-Druck) mit den entsprechenden Daten bedient werden. PhotoScan ist auch für Nicht-Photogrammeter leicht zu bedienen und es liefert in einem klar definierten Workflow automatisch Ergebnisse, allerdings ist bei der Beurteilung der Ergebnisse (Bildorientierungen, Kamerakalibrierung und Dreiecksvermaschung) Expertenwissen sinnvoll, wenn nicht sogar erforderlich.

Durch die Kombination von 3D-Modellen und virtuellen Rundgängen entstehen virtuelle Museen, die den Zugang zu entfernten Kulturen und Exponaten ermöglichen. Solche virtuelle Museen können als interaktive Lernplattformen aufgebaut werden, sodass sich interessierte Personen spielerisch Informationen erarbeiten können, um daraus einen entsprechenden Lerneffekt zu erhalten. Dabei bieten moderne Visualisierungswerkzeuge vom Smartphone und Tablet bis zu großen 3D-Leinwänden dem Betrachter eine interaktive und detaillierte Darstellung archäologischer Objekte und Exponate in 3D (TSCHIRSCHWITZ et al. 2014).

## 7 Literaturverzeichnis

- BARAZZETTI, L. REMONDINO, F. & SCAIONI, M., 2009: Combined use of photogrammetric and computer vision techniques for fully automated and accurate 3D modeling of terrestrial objects. *Proc. of SPIE Optics+Photonics*, Vol. 7447.
- GRÜN, A., REMONDINO, F. & ZHANG, L., 2002: Reconstruction of the great Buddha of Bamiyan, Afghanistan. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **34**(5), 363-368.
- KERSTEN, T. & LINDSTAEDT, M., 2012: Automatic 3D Object Reconstruction from Multiple Images for Architectural, Cultural Heritage and Archaeological Applications Using Open-Source Software and Web Services. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation*, Heft 6, 727-740.
- KERSTEN, T., MECHELKE, K., LINDSTAEDT, M., TSCHIRSCHWITZ, F., SCHREYER, K. & MAZIULL, L., 2014: Bildbasierte Low-Cost Systeme zur automatischen Generierung von 3D-Modellen archäologischer Fundstücke in Äthiopien und Katar. *Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2014*, Th. Luhmann/Ch. Müller (Hrsg.), Wichmann, VDE Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, 210-222.
- REINECKE, A., 2016: Tempel, Inschriften und frühe Buddha-Figuren aus Holz von Gò Tháp. Frühgeschichte in Südvietsnam – die Óc Eo-Kultur. *Schätze der Archäologie Vietnams*, Begleitband zur Sonderausstellung, Nünnerich-Asmus Verlag & Media, Mainz, 599 S.
- REINECKE, A. & MÜHLENBROCK, J., 2016: Schätze der Archäologie Vietnams – Die erste deutsche Vietnam-Ausstellung 2016/17. *Antike Welt – Zeitschrift für Archäologie und Kulturgeschichte*, Philipp von Zabern, WBG, Darmstadt, 5/2016, 8-11.
- REMONDINO, F., EL-HAKIM, S.F., GRUEN, A. & ZHANG, L., 2008: Turning images into 3-D models. *IEEE Signal Processing Magazine*, **25**(4), 55-65.
- TSCHIRSCHWITZ, F., KERSTEN, T. & ZOBEL, K., 2014: Interaktive Visualisierung und Steuerung von 3D-Modellen und Punktwolken mit Low-Cost Systemen. *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V.*, Band 23, Potsdam, Seyfert, E., Gülch, E., Heipke, C., Schiewe, J., Sester, M. (Hrsg.), Beitrag 173.
- WAHBEH, W. & NEBIKER, S., 2016: Kombination unterschiedlicher Photogrammetrischer Ansätze zur Rekonstruktion zerstörter Kulturdenkmäler. *Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V.*, Band 25, T. Kersten (Hrsg.), 36. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, Dreiländertagung vom 7.-9. Juni 2016 in Bern (auf CD), 338-350.