

# DIGITALISIERUNG FÜR KULTUR

Dr. Mona Hess<sup>1</sup>

## 1 Einführung

Ob sich Walter Benjamin im Jahr 1935 vorstellen konnte, dass wir heutzutage immer mehr die Möglichkeit haben werden mit der Aura der Objekte statt mit den realen Objekten und Umgebungen in der realen Welt in Berührung zu kommen? In seinem Aufsatz „Das Kunstwerk im Zeitalter seiner technischen Reproduzierbarkeit“ nimmt Benjamin eine Entwicklung vorweg, die heute zunehmend zur Digitalisierung unseres Leben führt (Benjamin, 1990). Virtuellen Welten selbst zu erfahren ist heute für jeden durch den Erwerb eines preiswerten marktüblichen Smartphones und eines passendes günstiges stereoskopisches Headset möglich, beispielsweise des Google Cardboards für etwa 20,00 Euro.

Um Inhalte für Anwendungen in virtuellen Welten darzustellen, können diese mittels dreidimensionaler (3D) digitaler Modelle von Grund auf neu modelliert werden, beispielsweise durch CAD (Computer Aided Design). Eine andere Option sind bildgebende Verfahren, mit deren Einsatz 3D-Modelle oder 3D-Datensätze von realen Objekten erstellt werden. Dafür kann professionelles Vermessungsgerät verwendet werde, aber selbst „Apps“ auf handelsüblichen Smartphones sind inzwischen erfolgreich im Einsatz. Die Modelle können virtuelle Umgebungen bereichern, in der sich der Benutzer durch intuitive Interaktion mittels Klicken, Blinzeln oder Handbewegungen bewegen oder auch Informationen abrufen kann.

Zusätzlich zur Funktion als Unterhaltungs-, Informations- oder Forschungsmedium von VR (Virtual Reality) und AR (Augmented Reality) nehmen digitale Informationen eine immer wichtigere Rolle bei der Dokumentation von Denkmälern, Museumsobjekten und somit unserem kulturellen Erbe ein. Insbesondere die neue Rolle und Vorteile von 3D Daten, die sogenannte Digitalisate, als archivarische Aufnahme eines Ist-Zustandes und als visuelles oder virtuelles Surrogat für die Kulturguterhaltung und Denkmalpflege in der neuen Disziplin *Digital Heritage* soll im Folgenden diskutiert werden.

## 2 Die Rolle der Dokumentation in Denkmalpflege und Kulturguterhaltung

### 2.1 Begriffsbestimmung

Der Denkmalbegriff und die Aufgabe der Erhalt und Konservierung von Denkmälern wurde im Jahr 1964 erstmals definiert durch die Charta von Venedig, publiziert durch das International Council of Museums (ICOM, 1964), (ICOMOS & Second International Congress of Architects and Technicians of Historic Buildings, 1964). Die Charta beschreibt das Ziel der Denkmalpflege wie folgt:

*„Konservierung und Restaurierung der Denkmäler bilden eine Disziplin, welche sich aller Wissenschaften und Techniken bedient, die zur Erforschung und Erhaltung des kulturellen Erbes beitragen können.“* (ICOM, 1964, Abs. 2).

In Deutschland werden die Belange der Denkmalpflege in jedem Bundesland unterschiedlich definiert und gesetzlich geregelt. Es wird zwischen Baudenkmalern und Bodendenkmalern unterschieden. Weiter

---

<sup>1</sup> Civil, Environmental and Geomatic Engineering, University College London, United Kingdom , und/ oder Digitale Denkmaltechnologien, Kompetenzzentrum für Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien, Otto-Friedrich Universität Bamberg

nach unbeweglichen Denkmälern und beweglichen Denkmälern. Letztere beinhalten unter anderem Museumsobjekte und Ausstattungsgegenstände (Bayerische Staatskanzlei, 1973).

Denkmäler werden vom Bayerischen Denkmalschutzgesetz wie folgt definiert:

*„Denkmäler sind von Menschen geschaffene Sachen oder Teile davon aus vergangener Zeit, deren Erhaltung wegen ihrer geschichtlichen, künstlerischen, städtebaulichen, wissenschaftlichen oder volkskundlichen Bedeutung im Interesse der Allgemeinheit liegt.“* (Bayerische Staatskanzlei, 1973, Abs. 1 Begriffsbestimmung).

Digitalisierung allgemein stellt Wissen direkt in digitaler Form bereit. Nach Hagedorn-Saupe versteht man unter der Digitalisierung eines Museumsobjekts die Erfassung der Informationen zum Objekt mithilfe eines Computers in Text und Bilddaten. Weiter: Ein Digitalisat ist ein computerlesbarer Datensatz, der entweder durch Digitalisierung entstanden ist oder von vorn herein digital erzeugt wurde (Hagedorn-Saupe & Deutscher Museumsbund, 2011, S. 15).

## 2.2 Dokumentation

Ergänzend zum Aufruf zu Erforschung und Erhalt mittels aller Wissenschaften und Techniken definiert die Charta von Venedig auch die Aufgabe der Dokumentation (ICOM, 1964, Abs. 16). Sie fordert eine maßnahmenbegleitende *“genaue Dokumentation in Form analytischer und kritischer Berichte, Zeichnungen und Fotografien“*, die alle Phasen von Bestandssicherung bis Restaurierung umfasst. Diese Informationen müssen außerdem öffentlich zugänglich gemacht werden.

Die Sammlung und Bewahrung von beweglichem Kulturgut ist vor allem die Aufgabe von Museen. Der Begriff eines Museums, dessen Aufgabe und Umgang mit Museumsobjekten werden vom International Council of Museums (ICOM, 2006) geregelt. Mit der Aufgabe von Standards in der digitalen Archivierung beschäftigt sich ICOMs International Council of Documentation (CIDOC) (ICOM, 2017) (ISO 21127, 2006).

Die Aufgabe zur Dokumentation unseres kulturellen Erbes betrifft vor allem unbewegliche und bewegliche Denkmäler. Die Dokumentation wird meist als Text und Beschreibung geliefert, mit Illustration und Fotografie. Weiterhin zählen auch analytische Testergebnisse (beispielsweise Pigmentanalyse), bildgebende Verfahren (beispielsweise Röntgen, Computertomographie) und Anwendung von Konservierungsmitteln zur aufzunehmenden Dokumentation. Diese Information ist zentral bei der Übertragung unseres Wissens, für das Einpflegen in Datenbanken die das Wissen über das Objekt bereichert und in Zukunft Auskunft gibt für Forschung und Lehre.

## 2.3 Digitalisierung des kulturellen Erbes

Die Aufgabe der Digitalisierung des kulturellen Erbes wurde von der EU und UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) als Basis für unsere kulturellen Identität, aber auch als Wirtschaftsfaktor benannt.

*“The Digital Agenda for Europe seeks to optimise the benefits of information technologies for economic growth, job creation and the quality of life of European citizens, as part of the Europe 2020 strategy. The digitisation and preservation of Europe’s cultural memory which includes print (books, journals and newspapers), photographs, museum objects, archival documents, sound and audiovisual material, monuments and archaeological sites (hereinafter ‘cultural material’) is one of the key areas tackled by the Digital Agenda.”* (European Commission, 2011, Abs. 1)

Die UNESCO und die Europäische Kommission stellen damit grundsätzliche Überlegungen für die Auswahl des zu digitalisierenden Kulturellen Erbes vor (European Commission, 2011) (UNESCO/PERSIST Content Task Force & UNESCO, 2016) und fördern die Forschung in der

Dr Mona Hess - Digitalisierung – Seite 2

sogenannten „Digitalen Agenda“ (European Commission, 2010) durch das Programm H2020 (European Commission, 2017).

Die Relevanz für die 3D-Digitalisierung von Museumsobjekten wird vor allem im Bericht zum Status der Digitalisierung in Europäischen Kulturinstitutionen von Projekt *Enumerate* im Jahr 2014 hervorgehoben: ein signifikanter Anteil aller Sammlungsgegenstände in Museen sind von dreidimensionaler Art (also beispielsweise Skulpturen, Gebrauchsgegenstände oder ähnliches und nicht Malerei oder Druck), aber zum Zeitpunkt der Umfrage waren von allen digital dokumentierten Objekten nur 0.1% als 3D, also als dreidimensionaler Datensatz, digitalisiert (Stroeker & Vogels, 2014). Eine wiederholte Umfrage würde wohl zeigen, dass Kulturinstitutionen immer mehr die 3D Digitalisierung beginnen.

In den letzten Jahren hat sich die neue Disziplin *Digital Heritage*, deutsch Digitale Denkmaltechnologien herausgebildet. Diese Disziplin strebt die wissenschaftlich geforderte Dokumentation und Digitalisierung von Museumsobjekten und historischen Stätten mit dem Ziel der Kulturguterhaltung und Denkmalpflege an, wobei die neuesten Techniken zum Einsatz kommen sollen. Die Interessen liegen an der Schnittmenge von Vermessungskunde und Ingenieurwissenschaften zu Museumskunde und Denkmalpflege. Zahlreiche Konferenzen und Workshops behandeln dieses Thema<sup>2</sup>. CIPA ICOMOS treibt neue Standards in diesem neuen Feld voran, mit dem Ziel: „*keeping up with technology and ensuring its usefulness for cultural heritage conservation, education and dissemination*“ (CIPA ICOMOS, 2017).

## 2.4 2D-Digitalisierung

Die Dokumentation von Sammlungen und Denkmälern wird in der Regel durch beschreibende Texte, Handzeichnungen, Illustrationen, verformungsgerechtes Aufmaße und Fotografie geleistet. Digitalisierung von archivalischen Dokumenten oder flachen Objekten durch Flachbettscannen oder Fotografie (hier 2D Digitalisierung) bereichert und ergänzt nun den bisherigen Dokumentationsprozess.

In den letzten Jahren wurden große Fortschritte bei der Umwandlung von Papierarchiven, Sammlungen, Museumskatalogen und handschriftlichen Karteikarten in indizierte, durchsuchbare digitale Datenbanken erzielt. Kulturinstitutionen haben die digitale Fotografie für die Sammlungsverwaltung in Archiven und Museen für Dokumentation und Präsentation des Kulturerbes in den letzten 30 Jahren eingeführt (Evans, 2006, S. 549). Heute ist das Erstellen einer digitalen Fotografie eines neu erworbenen Objektes und die Ablage der Fotografie in einer Museumsmanagementdatenbank Routine. Ein herausragendes Beispiel für ein umfangreiches Digitalisierungsprogramm ist die British Library, die sowohl eine Digitalisierungsstrategie als auch „digital preservation policies“ besitzt (Whitfield, 2014). Mittlerweile haben die meisten großen Archive und Sammlungen eine Dokumentations- und eine Fotografie Abteilung sowie eine IT-Abteilung, die für die digitalen Objektdatenbanken zuständig ist.

Die öffentlich zugänglichen Online-Sammlungen, oftmals mit hochauflösenden Fotografien, reduzieren den Suchaufwand, erhöhen das Informationsangebot für Forscher und demokratisieren den öffentlichen Zugang zu den Museumsbeständen. Durch die Veröffentlichung von online durchsuchbaren Datenbanken kann sich die Öffentlichkeit nun auch über Bestände eines Museums oder Archivs informieren, die sonst nicht zugänglich sind, beispielsweise zerbrechliche oder nicht ausgestellte Objekte (Hughes, 2012) (Terras, Ross & Motyckova, 2012).

Die Entwicklung von Strategien und Technologien für die effiziente 2D-Massendigitalisierung dauert an. Beispiele der Weiterentwicklung von Methoden für Digitalisierung großer Bestände finden sich am

---

<sup>2</sup> Konferenzen von Interesse für Digitale Denkmalpflege :beispielsweise #2and3D , ISPRS CIPA ICOMOS special session, Digital Heritage, VAST, EVA etc.

Natural History Museum in London, UK (Natural History Museum, 2017) oder am Smithsonian (Smithsonian Institution Archives, 2017).

Die intuitive und interaktive Navigation durch öffentliche und private Sammlungen ist jetzt schon möglich. Beispielsweise durch das Google Cultural Institute und das Art Project (Google Cultural Institute, 2017) (Google Cultural Institute, 2011). Die Navigation basiert auf Panoramabildern analog zu Google Street View in Verbindung mit Katalogdaten und hochauflösenden Bildern. Ein weiteres Produkt, Google Expeditions, erlaubt durch ein Stereo-Headset ein immersives Betrachten und Erforschen von Orten in der virtuellen Realität in Form von Panoramabildern oder 360-Grad-Videos. Diese Technologie kann im Klassenzimmer eingesetzt werden um beispielsweise virtuelle Ausflüge zu archäologischen Stätten virtuell zu erleben. Derselbe Inhalt wird auf mehreren Headsets gleichzeitig zur Verfügung gestellt und der Lehrer „führt“ den Ausflug durch Fragen und Hinweise (Google, 2017) .

## 2.5 Einschränkungen der 2D-Digitalisierung

Um den Mehrwert der digitalen 3D-Dokumentation (näher beschrieben in Abschnitt 3) für die Museumspraxis zu verdeutlichen, sollen hier einige Einschränkungen der 2D-Dokumentation herausgearbeitet werden.

Die Fotografie zur konservatorischen Dokumentations- und Bestandserfassung von Museumsobjekten, oft im Streiflicht mit Tageslichtlampe zusammen mit einem Maßstab im Bild aufgenommen, ermöglicht Oberflächendetails und Farbigkeit eines Objektes korrekt zu erfassen, jedoch jeweils nur aus einem Blickwinkel.

Um ein Objekt in seiner Gesamtheit zu erfassen, werden mehrere Fotografien von allen Seiten aufgenommen, um eine vollständige Dokumentation zu gewährleisten. Detaillierte Oberflächeneigenschaften werden zusätzlich durch analytische Bildgebung in den nicht sichtbaren Wellenlängen des Lichts (ultraviolett und infrarot) aufgenommen, wobei auch die Möglichkeit besteht mikroskopische Bilder aufzunehmen.

Die Angabe eines exaktes Volumen oder die Aufgabe geometrische Oberflächenveränderungen zu quantifizieren ist schwierig und erfordert nicht nur das geschulte Auge des Konservators oder Kurators, sondern auch eine identische Fotografie, um einen Vorher-Nachher-Vergleich herzustellen.

Für die Vermessung der Form können physische Repliken erstellt werden – beispielsweise Gipsabdrücke. Dieses Vorgehen kann invasiv sein und kann die Materialoberfläche und damit die „Biographie des Objekts“ stören. Mechanische Messungen können mit Messschiebern oder Profil-Messgerät (Konturenlehre) durchgeführt werden, die ebenfalls die fragile Objekt Oberfläche beschädigen könnten.

Die oben beschriebenen Einschränkungen können mit der 3D Digitalisierung behoben werden, und die so erhobenen Daten können zum Wissensgewinn über ein Museumsobjekt beitragen. Es wäre daher sinnvoll, die Digitalisierung der skulpturalen oder dreidimensionalen Bestände in den Kulturinstitutionen zu beginnen und öffentlich zugängliche 3D-Archive ihrer Sammlungen zu erstellen. Tatsächlich beginnen Museen und Sammlungen diese Dokumentation in ihre Arbeitsweise zu integrieren und Praxiserfahrungen untereinander auszutauschen, beispielsweise über geeignete Software-Werkzeuge und ihren sinnvollen Gebrauch.

## 3 Dreidimensionale Digitalisierung

### 3.1 Herkunft der Methoden

Frühe Projekte in der Denkmalpflege verwendeten traditionelle Vermessungsmethoden in Kombination mit digitalen Dokumentationsmethoden. Die Anwendung der photogrammetrischen Vermessung ist seit ca. 1840 in der Dokumentation von Baudenkmalern angewendet worden. In Deutschland wurde die Photogrammetrie vor allem durch Albrecht Meydenbauer als Methode eingeführt. Seine Aufnahmen auf Glasplatten und umgezeichneten Pläne vieler Denkmäler Deutschlands sind noch in der Messbildstelle (Land Brandenburg, 2017) zugänglich.

Seit etwa 20 Jahren profitieren Anwendungen in den Bereichen Denkmalpflege, Bauaufnahme und Museumskunde vom technischen Fortschritt und neuen High-Tech Entwicklungen auf diesem Gebiet.

Für die Bauforschung am Bauwerk und in der Archäologie sind Vermessung und verformungsgerechtes Handaufmaß die Grundlage für ein Verständnis der Bauphasen und der verwendeten Materialien. Besonders in Kombination mit der digitalen Dokumentation, die auf Tachymetrie, Photogrammetrie und anderen bildgebenden Verfahren basiert wird eine zusätzliche Datenerhebung für die Bauforschung ermöglichen (Schuller, 2002).

Die 3D-Digitalisierung von Oberflächen, Objekten und der vorhandenen Bebauung, also die Datenaufnahme und Übertragung von Informationen in ein digitales Format, wird bereits seit vielen Jahren routinemäßig in vielen Bereichen des Ingenieurwesens durchgeführt. Dies reicht von der Qualitätskontrolle in der industriellen Fertigung (z. B. in der Automobilindustrie), über Anwendungen in der Medizin, bis hin zur Vermessung von Planeten durch Satelliten.

### 3.2 Was ist ein 3D Digitalisat?

Die dreidimensionale Vermessung eines Gebäudes, Raumes oder Museumobjektes durch bildgebende optische Verfahren kann als die Erstellung eines digitalen Datensatzes als sogenanntes „Digitales Surrogat“, oder sogenanntes *Digitalisat*, des Objektes der realen Welt definiert werden, das aus den räumlichen Informationen in drei Dimensionen besteht. Die Daten werden von einem optoelektronischen Sensor erfasst und dann mit einem Rechner visualisiert. Die gewonnenen Daten sind "digital born", das heißt, sie sind, ohne weitere Übersetzung von einem Medium zum anderen, direkt auf einem Computer zugänglich und stellen ein virtuelles maßstabsgerechtes, also in drei Dimensionen messbares, Abbild der realen Welt dar. Der Begriff fasst alle Systemkomponenten zusammen, die bei der Erzeugung des digitalen Bildes beteiligt sind (Luhmann, Robson, Kyle & Boehm, 2013).

Erzeugt wird ein digitales, metrisches und dreidimensionales (3D) Modell, als Darstellung der Oberflächengeometrie, das von allen Seiten betrachtet werden kann. Der Datensatz kann neben den räumlichen Informationen auch weitere Informationen wie zum Beispiel die Oberflächeneigenschaften und deren Farbe enthalten. Die Methoden der Datenaufnahme sind vielfältig und nutzen die Eigenschaften des Lichtes. Sie reichen von der Photogrammetrie mit der Nutzung von digitaler Fotografie, über die Nutzung von Licht (z.B. strukturiertes Licht/Streifenprojektion) oder Triangulation (z.B. 3D Laser-Scanning) bis zur Vermessung durch Laser (Time of Flight, LiDAR, Phase-shift für terrestrische 3D Laserscanner Systeme). Die Auswahl der Methode ist abhängig von der gewünschten Auflösung und Genauigkeit sowie die Größe des Objektes, und sollte vor Beginn eines Projektes im Detail diskutiert und festgeschrieben werden.

Ein 3D Modell ist in unterschiedlichen Datenformaten gespeichert. Diese können von spezieller Software und immer mehr auch von online Webseite geöffnet werden. Die Daten können als Punktwolke, also eine Anzahl von Koordinatenmesspunkten, oder als geschlossenes Oberflächenmodell durch Dreiecke, dargestellt werden.

Ein Dreiecksnetz lässt sich dann auch physisch durch 3D Drucker reproduzieren, wenn das digitale 3D Modell „wasserdicht“ ist, d.h. eine geschlossene Oberflächengeometrie vorweist. Dies erfordert oft zusätzliches Modellieren am Computer, und kann unter Umständen eine Ergänzung und Abweichung von der Realität bedeuten. 3D-Druck ist mittlerweile in vielen Materialien und zu unterschiedlichen Genauigkeitsgraden möglich. Ein 3D Modell kann beliebig skaliert werden, beispielsweise kann ein „Replikat“ auch in kleinerem oder größerem Maßstab erstellt werden.

Die so erstellten 3D-Modelle von Museumsobjekten und Gebäuden, die sogenannten *Digitalisate*, können für verschiedenste Anwendungen, die unten in Abschnitt 3.4 ausgeführt werden genutzt werden.

### 3.3 Erstellen von 3D digitale Sammlungen

Der Zugang zu diesen neuen Technologien, den teuren technischen Geräten und der lizenzierten Software war bis vor einigen Jahren nur spezialisierten Vermessungsingenieuren und Forschungsinstituten vorbehalten. Das Einrichten der aufwändigen Infrastruktur für digitale Repositorien von 3D Datensätzen, die Aufgabe der Definition für die Standards von Ontologie und Metadaten und der Forschungsinhalt für diese Infrastrukturen, war zum Beispiel die europäische sammlungsübergreifende Datenbank Europeana (Europeana, 2012).

Weitere Forschungsinhalte sind das Bereitstellen technischer Lösungen für die dreidimensionale Digitalisierung von größeren Sammlungsbeständen und die automatisierte Aufnahme von Metadaten für eine Präsentation der gespeicherten Objekte im Netz (Santos, Pena Serna, Storck & Fellner, 2014) und (Santos et al., 2017). Das Fraunhofer IDG hat hier eine Lösung angeboten, die in einer seriellen 3D-Aufnahme auf einem Fertigungsband besteht, Cultlab3D (Fraunhofer Institute for Computer Graphics Research IGD, 2014).

In den letzten Jahren sind die Kosten für Kameras, 3D-Laserscanner und 3D Druckern gesunken und damit ist auch der allgemeine Zugang für Konsumenten deutlich angestiegen. Die damit vermehrte Produktion von Digitalisaten durch professionelle Serviceanbieter und Enthusiasten im Selbststudium (z.B. Design und Make-spaces) hat in allen Lebensbereichen zur Folge, dass die Akzeptanz der digitalen 3D Dokumentation in Kulturinstitutionen und der Museumswelt in den letzten Jahren ebenfalls stark gestiegen ist. Normale Kameras (Spiegelreflex, Telefonkameras) sind heute in der Lage hochauflösende Bilder aufzunehmen, die mit der passenden Software 3D-Modelle mit farbigen Oberflächen rekonstruieren können. Diese Software ist zunehmend auch frei und kostenlos über das Web verfügbar und die Berechnung des 3D Modelles erfolgt über „cloud computing“.

Neue web-basierte durchsuchbare Datenbanken, also Repositorien für 3D-Daten erlauben Museumsobjekte als 3D-Sammlung online verfügbar zu machen, inklusive der Einblendung von Kommentaren an bestimmten Stellen des dargestellten Objekts. Diese erlauben auch das Einbetten von 3D-Modellen in andere Webseiten oder das Herunterladen dieser Daten zum 3D Druck.

Als aktuelles Beispiel sei eine neue Plattform im Netz (die WebGL für die Darstellung von 3D Modellen direkt im Internetbrowser nutzt) genannt, auf der das British Museum und viele andere Sammlungen 3D Modelle einstellen. Man hat die Option diese Modelle auch in Stereo Virtual Reality zu betrachten, herunterzuladen und auch in 3D zu drucken (Sketchfab, 2017). Beim Hochladen auf eine Plattform wird hierbei die kritische Frage der gesetzlichen Regelung für die Übergabe von Copyright und Intellectual Property oft nur im Kleingedruckten erwähnt.

### 3.4 Vorteile von 3D Digitalisierung für Kultur

Die berührungsfreie 3D-Digitalisierung und die digitale Dokumentation von kulturellem Erbe und Museumsobjekten haben enormes Potenzial und viele Vorteile. Diese neuen Methoden ergänzen die bestehenden Methoden in der Museumpraxis und Konservierung (Hess & Robson, 2010) und

(LaPensée, Cooper & Parsons, 2006). Im folgenden Abschnitt werden die Vorteile der 3D-Bildgebung an Objekten in Kulturinstitutionen hervorgehoben.

#### 3.4.1 Archivarische 3D-Dokumentation für die Nachwelt

Katastrophen können unerwartet geschehen und den Verlust unseres kulturellen Erbes verursachen. Sie können Unfälle sein, die durch die Natur verursacht werden oder das Ergebnis einer absichtlichen Zerstörung. Ein Beispiele für Beschädigung einer UNESCO-Welterbe-Stätte ist das Feuer in der Anna-Amalia-Bibliothek in Weimar im Jahr 2004, bei dem ein elektrischer Fehler zur Beschädigung und zur Zerstörung von unbezahlbaren und unwiederbringlichen historischen Dokumenten führte (Deutsche Welle, 2007). Ein weiteres Beispiel ist das Feuer in der Glasgow-Bibliothek von C. R. Mackintosh (BBC, 2014).

In den letzten Jahren sind leider immer mehr vorsätzlicher Angriffe - meist aus religiösen Gründen - auf das kulturelle Erbe geschehen, wie z.B. die vollständige Zerstörung der Buddhas von Bamyian im Jahr 2001 (Nordland, 2014), eine UNESCO Welterbe-Landschaft mit großer Bedeutung (UNESCO World Heritage Centre, 2017). Um diese Stätte für die Nachwelt erlebbar zu machen, wurden die Statuen photogrammetrisch rekonstruiert und in eine 3D und immersive Erfahrung überführt (Jansen, Toubekis, Walther, Döring-Williams & Mayer, 2008).

ICOMOS und UNESCO richten die Aufmerksamkeit der Öffentlichkeit auf gefährdeten Kulturgüter und Kulturlandschaften durch die Publikation eines jährlichen Berichtes sowie durch eine aktuelle Liste von „Heritage@Risk“ (ICOMOS, 2017) und Bewegung „Unite4Heritage“, also Vereinigung für das Weltkulturerbe (UNESCO, 2015). Besonderes Augenmerk liegt auf den gefährdeten Kulturgütern in Syrien (UNESCO, 2017). Ein Beitrag zu diesen Bewegungen kann von der Öffentlichkeit geleistet werden durch vermehrte Verfügbarkeit kostengünstiger Sensoren (3D-Scannern und Kameras). Bürgerbeteiligung oder freiwilligen Helfern können sogenanntes „crowdsourcing“ und „citizen science“ zu betreiben, um ganze Bestände des existierenden Kulturerbes zu inventarisieren und bedrohtes Kulturerbes zu erfassen. Ein Beispiel dafür ist das Projekt Rekrei das sich mit der Rekonstruktion von verlorenerem Kulturgut aus Archivfotos und Fotografien aus dem Internet beschäftigt (Vincent & Coughenour, 2016). Die Datenbank enthält auch die Rekonstruktion von zerstörten Artefakten aus dem Museum in Mosul, Syrien. Weitere virtuelle Projekte die sich mit gefährdetem Weltkulturerbe beschäftigen, inklusive dem Projekt Rekrei, wurden in einer Ausstellung in Paris virtuell wieder erlebbar gemacht (Froidefond, 2016).

Ein Beispiel für ein aktives Projekt in der Digitalisierung und Inventarisierung von Kulturgütern in Bayern ist *bavarikon* das digital Kunst-, Kultur- und Wissensschätze aus Einrichtungen in Bayern präsentiert. *bavarikon* ist ein Modul des Bayerischen Kulturkonzepts (Bayerische Staatsbibliothek, 2017).

#### 3.4.2 Drei-Dimensionale Überwachung von Änderungen der Oberflächengeometrie

Hochauflösende 3D Digitalisierung, einschließlich Geometrie, Form und Farbaufnahme, kann einen digitalen „Fingerabdruck“ des Objekts erzeugen. Sie bietet die Möglichkeit, eine metrisch korrekte Dokumentation eines Objekts mit komplexer Geometrie, von allen äußeren Oberflächen zu einem bestimmten Zeitpunkt zu erstellen. Damit bietet die Digitalisierung genaue Nachweise und Geometrievermessung nicht nur in drei Dimensionen (3D) sondern auch 4D (Zeit).

Beobachtung und Messung zu verschiedenen Zeitpunkten (auch als *Monitoring* bezeichnet) erlauben eine objektive Bewertung der Veränderungen am Objekt. Eine 3D Dokumentation vor und nach Reisen einer Leihgabe kann für Sammlungen von großem Nutzen sein, wo bisher visuelle Beobachtungen des Kurators und Vergleich von photographischen Aufnahmen genutzt wurden. Dreidimensionale

quantitative Messungen können ohne physischen Kontakt mit dem Objekt durch bildgebende Verfahren geliefert werden. Hiermit können Oberflächenveränderung, Volumenänderungen und das Entstehen von Rissen wissenschaftlich nachgewiesen werden. Eine Deformationsanalyse kann mit Klimamessungen (Temperatur und Luftfeuchtigkeit) korreliert werden. Die Auflösung und Genauigkeit dieser digitalen Messungen ist individuell vom gewählten Sensor abhängig und Erwartungen über die Messgenauigkeit müssen vorher abgesprochen werden (Hess, Korenberg, Robson, Entwistle & Ward, 2015). In der weiteren Bearbeitung können Querschnitte, Höhenmodelle und Profile aus dem 3D Datensatz extrahiert werden. Ein Beispiel dieser Anwendung von 3D-Monitoring ist die Dokumentation und Bewegungsanalyse des Westminster Retable in Westminster Abbey, London, vorangetrieben durch die Verwendung von Photogrammetrie und einer verwandten Konservierungsdatenbank (Robson, Bucklow, Woodhouse & Papadaki, 2004).

Ein Beispiel für einen ganzheitlichen Ansatz einer gesamtheitlichen Objektgeometrieanalyse für eine detaillierte archivarische digitale Dokumentation war die detaillierte 3D- und multispektrale fotografische Dokumentation der Mona Lisa, eine Kooperation zwischen dem Louvre und dem National Canadian Research Centre, (Mohen, Menu, Mottin & Beraldin, 2006) und (Blais, Cournoyer, Beraldin, Picard & National Canadian Research Council, 2008).

### 3.4.3 Entscheidungsfindung in der Konservierung

Dreidimensionale Informationen zu Objekten und deren Restaurierungsgeschichte, zusammen mit einer 3D Dokumentation vor und nach Arbeiten am Objekt, bereichern die museologische Datenhaltung. 3D Digitalisate ermöglichen auch die virtuelle Wiederherstellung von Geometrie (Rekonstruktion). Visualisierungen am Bildschirm oder in Virtueller Realität ermöglichen die Diskussion über Restaurierungs- und Konservierungsmöglichkeiten in der Praxis. Besondere Vorteile der 3D-Bildgebung für die Konservierung - und ihre Risiken - sind in (Payne, 2013) skizziert.

Neue Ansätze zur digitalen Bildgebung ergänzen traditionelle Techniken (Getty Conservation Institute, 2013) um bei der ganzheitlichen Forschung am Museumsobjekt zu weiteren Aspekten, zum Beispiel der Materialität, der chemischen Zusammensetzung, den verwendeten Pigmenten und der Herstellungsgenese, neue Informationen zu liefern.

### 3.4.4 Virtueller Wiederaufbau und Rekonstruktion

3D Vermessung und -Visualisierung kann bei der Rekonstruktion und Zusammenführung von Teilen desselben Objektes behilflich sein. Die digitale Verbindung von Fragmenten oder die Rekonstruktion von Objekten erhöht deren Wertschätzung und tragen zum Wissensgewinn in der wissenschaftlichen Forschung bei. Dies gilt besonders auch für Fragmente, die in der Realität nicht zusammengesetzt werden können, und für Fragmente, die an verschiedenen Institutionen lokalisiert sind.

Zu den sehr frühen Projekten, die die 3D-Objektdigitalisierung nutzten, gehören das Adamsportal am Bamberger Dom, Deutschland. Die Portalfiguren waren von Wind und Wetter angegriffen und sind in das Dommuseum verbracht worden. Um den originalen Aspekt des Portals wiederherzustellen, wurde das Projekt 2002 von der Staatlichen Dombauhütte Bamberg zusammen mit der Hochschule Coburg realisiert. Mit dem Ziel mehrere mittelalterliche Skulpturen in ihrer ursprünglichen Lage neu zu installieren, wurden 3D-Modelle hergestellt, mit 3D Streifenprojektion vermessen und anschließend mit einer CNC Fräse in Schaumstoff erstellt. Eine Negativ-Form vom 3D-Druck wurde gegossen und ein Guss mit Stein-Ersatzmaterial erstellt (Bellendorf, 2011).

Ein praktischer Ansatz für die Rekonstruktion von Fresken, die durch ein Erdbeben zerstört wurden, wurde von (Brown et al., 2008) gegeben. Ein Beispiel für eine virtuelle Rekonstruktion und seine anschließende digitale Repatriierung ist die Vermessung eines großen Kanus (Hess et al., 2009). Ein ausgezeichnetes Beispiel für die wissenschaftliche Rekonstruktion von Bilddaten von verlorenem

Kulturgut, dem Tempel von Baal in Palmyra, ist die Kombination von Touristenbildern aus dem Internet und Panoramabildern für eine photogrammetrische Rekonstruktion durch Wahbeh (Wahbeh, Nebiker & Fangi, 2016).

### 3.4.5 Zugriff, Virtuelle und interaktive Ausstellung

Digitale Modelle haben den Vorteil das Berühren und die physische Handhabung des Objekts teilweise zu ersetzen zu können. Die Handhabung von zerbrechlichen Objekten, oder oftmals angeforderten Objekten, könnten durch Darstellung und Analyse des 3D-Modells auf dem Bildschirm reduziert werden. Indem den Forschern der Zugang zu einem 3D-Modell ermöglicht wird, könnte im Vorfeld festgestellt werden, ob der Zugang zum realen Artefakt tatsächlich benötigt wird.

Lehren und Lernen, insbesondere *Object Based Learning (OBL) Sessions* nutzen oft Museumsobjekte. Objektbasierte Lehre mit Herumreichen des Objektes ist sehr wertvoll, aber das Objekt kann nur von je einer Person zu jeweiligen Zeitpunkt in der Klasse begutachtet werden. Dabei kann jede Handhabung möglicherweise Schäden verursachen. OBL integriert zunehmend 3D-Objekte, um die Interaktion von Studenten mit dem Objekt zu verbessern (Hannan, Chatterjee & Duhs, 2013).

Virtuelle Ausstellungen, Ausstellungen mit virtuellen Objekten und interaktiven Anwendungen können Leihgaben ersetzen. Digitale und physikalische Reproduktionen können gezeigt und zur Verfügung gestellt werden. Zusätzlich kann dadurch das gleiche Objekt gleichzeitig an verschiedenen Orten, unabhängig und mehr Besuchern auf einer großen Leinwand interaktiv gezeigt werden (3DPetrie, 2014).

Sehr große Objekte, wie Dinosaurierskelette können im kleineren Maßstab erfasst und dadurch auf einem mobilen Gerät in der Größe einer Handfläche dargestellt werden. Ein Beispiel für eine frühzeitige Verwendung der 3D-Bildgebung in der Paläontologie ist die photogrammetrische Dinosaurier-Umfrage von (Wiedemann, Suthau & Albertz, 1999). Für die Anthropologie und die Studien der materiellen Kultur ermöglicht die Darstellung von digitalen Surrogaten auf dem Bildschirm einen Diskurs über die Echtheit des Objekts (Robson, MacDonald, Were & Hess, 2012).

### 3.4.6 3D Reproduktion

3D Reproduktionen sind heute in vielen Materialien möglich und auch preisgünstig zur erstellen. Man unterscheidet additive Verfahren (beispielsweise Fused Deposition Modelling/ FDM mit Plastikfilament, aber auch Laser Sinter Drucken in Nylon oder Metall usw.) oder subtraktive Verfahren (beispielsweise CNC-Fräse mit Stein oder Hartschaum). Eine 3D Reproduktion ermöglicht die haptische Erfahrung eines Museumsobjektes, zum Beispiel auch für Menschen mit vermindertem Sehvermögen.

In der Konservierung erlauben 3D-Daten eines Objekts die angepasste Erstellung einer perfekt passenden Halterung oder Ergänzung von fehlenden Teilen. Fehlende Teile können vermessen werden um ein metrisch korrektes Reparaturteil in verschiedenen Materialien herzustellen.

3D Reproduktionen durch 3D Druck können im Maßstab variieren, also grösser oder kleiner sein, wobei gleichzeitiger die Proportionen beibehalten werden. Dies eröffnet für Museums-Souvenirläden eine neue Möglichkeit Reproduktionen zu verkaufen (Pett & British Museum, 2017).

Ein Beispiel für eine großformatige 3D Reproduktion ist die Replika des von ISIS zerstörten Triumphbogens von Palmyra dar, der im Februar 2017 auf dem Trafalgar Square in London aufgestellt wurde. Obwohl die Rekonstruktion als nicht komplett und nicht detailgetreu kritisiert wurde (Factum Arte, 2017), hat diese Aktion doch die Aufmerksamkeit für die Methoden der Digitalisierung und 3D Reproduktion auf sich gezogen.

## 3.5 Einschränkungen der 3D Digitalisierung von Museumsobjekten

### 3.5.1 Technische Einschränkungen

Trotz seiner breiten Anwendbarkeit haben 3D bildgebende Verfahren auch Einschränkungen. Durchsichtige, transparente, glänzende, sehr dunkle Oberflächen oder Gegenstände mit einer komplexen Oberflächengeometrie, z.B. mit Hinterschneidungen, sind sehr problematisch zu vermessen. Flexible oder bewegliche Objekte wie Textilien oder Schmuck sind auch schwierig zu erfassen. Normalerweise gilt die Faustregel: wenn etwas nur schwer zu fotografieren ist, wird es herausfordernd sein davon ein 3D Modell zu erstellen.

### 3.5.2 Sicherheit und Raumklima

Digitalisierung bei Kulturgütern bietet viele Vorteile, aber es gibt auch Einschränkungen. Meist muss die Digitalisierung lange vorher koordiniert werden, insbesondere dann, wenn es sich um ein Ausstellungsobjekt handelt. Kuratoren und Konservatoren haben Bedenken bezüglich der Sicherheit des Objekts, wenn dieses das Museum verlassen und in ein anderes Labor oder Gebäude transportiert werden muss. Eine Versicherung sollte abgeschlossen werden, wie das auch routinemäßig bei Transporten von Museumsobjekten der Fall ist.

In den meisten Fällen kann die 3D Digitalisierung nur in Gegenwart von Museumsmitarbeitern und in einem klimatisierten Raum geschehen. Um die Sicherheit des Objektes während der 3D Vermessung zu gewährleisten, sollten zerbrechliche und einzigartige Objekte anstatt durch den Techniker nur von erfahrenen und trainierten Mitarbeitern oder dem Konservator persönlich bewegt werden.

Falls erwünscht und möglich, sollte rechtzeitig ein spezifisches Raumklima in Vorfeld eingestellt werden. So sollte für Holzobjekte beispielsweise eine relative Feuchtigkeit (RH) von ca. 55% und für Metallgegenstände ca. 20% eingestellt werden. Kostbare oder einzigartige Objekte, insbesondere organische Objekte, könnten Schäden durch Transport, Handhabung und die langfristige Auswirkungen der Belichtung der Objektoberfläche durch Licht und Laserstrahlung erleiden, weil diese den Zerfall beschleunigen könnten.

### 3.5.3 Zeit und Kosten

Bei Managern und Kuratoren in Kulturinstitutionen hat die 3D Digitalisierung das Label „teuer und zeitintensiv“, mit unsicheren Ergebnissen und geringer Wirksamkeit gegenüber bewährten konventionellen Dokumentations- und Bewertungsmethoden von Museumsobjekten. Konservatoren und Bauforscher argumentieren, dass bildgebende Verfahren - und insbesondere die 3D Dokumentation - nicht die genaue visuelle Inspektion und Untersuchung des Objektes oder des Bauwerkes ersetzen können, und man dabei Gefahr läuft Details nicht zu erfassen und zu übersehen. Weiterhin kostet die Ausbildung der Mitarbeiter, oder die Betreuung des Digitalisier-Vorganges ebenfalls Zeit und Geld. Da Simplifizierung und Automatisierung der Verfahren noch entwickelt werden müssen und auch die Langzeit-Aufbewahrung und Verschlagwortung der Daten noch unklar ist, handelt es sich um eine Investition in unsichere Ergebnisse.

Sicherlich kann man heute beobachten, dass sich mehr und mehr Mitarbeiter von Kulturinstitutionen in Kursen ausbilden lassen, um selbst die Digitalisierung durchzuführen, aber eine Einbettung in die Arbeitsabläufe von Sammlungen oder von Landesämtern für Denkmalpflege für die Erstellung digitaler Daten und die Einbettung in bestehende Systeme muss noch geleistet werden.

Das Teilen von vorhandenen Ressourcen, wie Kameras oder 3D-Laserscannern auf Landesebene, wie im Projekt Agora3D in den staatlichen Museen in Belgien, ist anzustreben (Semal, Mathys, Brecko & RBINS, 2013). Jedoch müssten vor der Anschaffung die Kosten für Updates, Wartung und regelmäßige Kalibrierung geklärt werden.

## 4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die 3D Digitalisierung von Kulturobjekten, also die berührungslose und zerstörungsfreie dreidimensionale Oberflächenaufnahme durch bildgebende Verfahren, bietet die Möglichkeit, die so erhobenen Daten für Konservierung, Forschung und Wissensdistribution zu nutzen. Ein digitales 3D-Objekt bietet somit viele Vorteile gegenüber traditionellen 2D-Bildern. Die erhobenen 3D-Daten können zum effizienten digitalen Management für Museumsobjekte, aber auch für Denkmal-Stätten oder bei Denkmalinventaren beitragen (Myers, Dalgity & Avramides, 2016). Standards für austauschbare Metadatensätze werden gerade etabliert (Hagedorn-Saupe & Deutscher Museumsbund, 2011, S. 14). Eine allgemeine Infrastruktur für Langzeit-Speicherung, Kommentierung und Wiederauffindbarkeit, sowie Standards sind noch in Entwicklung.

Eine zentrale Frage bei der qualitätsvollen archivarischen Digitalisierung von Kulturgütern und Beitrag zur systematischen Inventarisierung ist nicht nur das Verständnis der Anforderungen an die 3D-Digitalisierung, die von den Museen, Sammlungen und Denkmälern gestellt werden (Hess, 2015). Es kommt nicht nur auf die Integration in einen bestehenden Arbeitsablauf in den Institutionen an, sondern immer auch auf die Planung und das Management der angestrebten Daten sowie die metrische Qualitätskontrolle der 3D-Datenerfassung (Toschi et al., 2015) (Hess, Robson, et al., 2015).

Denkmalwissenschaftler und Denkmalpfleger haben die Chancen erkannt und sind motiviert, 3D-Technologien einzusetzen, in Konservierung, Forschung und Öffentlichkeitsarbeit. Sicherlich erfordert das Erstellen von 3D Digitalisaten die Investition in Ressourcen, jedoch ermöglicht dies auch neue Angebote der Kulturinstitutionen an Besucher. Neuen interaktive Medien mit VR erlauben beispielsweise eine Kombination von Objekten in einer neuen aufregenden Lehrumgebung.

Die Digitalisierung für Kulturgüter wird auch zunehmend in der Hochschullehre angeboten. Bisherige Studiengänge behandeln das Fach der Digitalisierung in der Kulturguterhaltung bisher nur als auxiliar. Derzeit sind die meisten Studien im Zusammenhang mit Denkmalpflege und Kulturguterhaltung innerhalb der Universitätsfakultäten der Geisteswissenschaften, Archäologie, Architektur bzw. Ingenieurwesen, sowie in Ingenieur- und Geomatikabteilungen unter Fernerkundungs- und Reality-Capture-Kursen angelagert.

Im Rahmen des Digitalen Campus Bayern wurde das neue Kompetenzzentrum für Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien an der Otto-Friedrich-Universität im Jahr 2016 eingerichtet (Hochschule Coburg, 2016) (Otto-Friedrich Universität Bamberg, 2016) (Otto-Friedrich Universität Bamberg, 2017). Mit Förderung der Freistaates Bayern wird nun ab Wintersemester 2017 erstmals der neue Studiengang Digital Denkmaltechnologien angeboten, der alle Aspekte der Digitalisierung für Kultur und Denkmalpflege abdecken wird.

## 5 Danksagung

Ich möchte mich bei Dr. Ivar Hess und Prof. Dr. Ralf Reissing für das Lesen und Ihre Vorschläge zu diesem Artikel bedanken.

## 6 Literaturverzeichnis

- 3DPetrie. (2014, März). 3DPetrie Museum: 3D image gallery of Artefacts from the Petrie Museum of Egyptian Archaeology (WebGL 3D image viewer and object information). Zugriff am 20.5.2014. Verfügbar unter: <http://www.ucl.ac.uk/3dpetriemuseum>
- Bayerische Staatsbibliothek. (2017). bavarikon | Kultur und Wissensschätze Bayerns. Zugriff am 10.4.2017. Verfügbar unter: <http://www.bavarikon.de/>

- Bayerische Staatskanzlei. (1973, Juni 25). *DSchG: Gesetz zum Schutz und zur Pflege der Denkmäler (Denkmalschutzgesetz – DSchG) Vom 25. Juni 1973 (BayRS IV S. 354) BayRS 2242-1-K (Art. 1–28) - Bürgerservice*. Zugriff am 7.1.2017. Verfügbar unter: <http://www.gesetze-bayern.de/Content/Document/BayDSchG>
- BBC. (2014, Mai 25). Art school library destroyed in fire. *BBC*.
- Bellendorf, P. (2011). Hoch aufgelöste 3D—Dokumentation mittelalterlicher Oberflächen. *Farbe im Mittelalter: Materialität–Medialität–Semantik*, 2, 95.
- Benjamin, W. (1990). *Das Kunstwerk im Zeitalter seiner technischen Reproduzierbarkeit (erste deutsche Fassung, 1935) in: Gesammelte Schriften / Bd.1, Abhandlungen / Walter Benjamin* (3. Aufl.). Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Blais, F., Cournoyer, L., Beraldin, J.-A., Picard, M. & National Canadian Research Council. (2008). 3D Imaging from Theory to Practice: The Mona Lisa Story (NRC 50400, National Canadian Research Council). Gehalten auf der SPIE Symposium on Optical Engineering & Applications 2008, NRCC.
- Brown, B. J., Toler-Franklin, C., Nehab, D., Burns, M., Dobkin, D., Vlachopoulos, A. et al. (2008). A System for High-Volume Acquisition and Matching of Fresco Fragments: Reassembling Thera Wall Paintings. *ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH 2008)*. Los Angeles. Verfügbar unter: <http://web4.cs.ucl.ac.uk/staff/t.veyrich/projects/thera/thera-acquisition.pdf>
- CIPA ICOMOS. (2017, April). The International Committee for Documentation of Cultural Heritage (CIPA) – CIPA’s website. Zugriff am 19.4.2017. Verfügbar unter: <http://cipa.icomos.org/>
- Deutsche Welle. (2007, Oktober 19). Germany’s Historic Anna Amalia Library Reopens After Fire | Culture | DW.DE | 19.10.2007. *DW.DE*.
- European Commission. (2010, Mai 19). A Digital Agenda for Europe . EUR-Lex - 52010DC0245 - EN - EUR-Lex. (No longer in force. ). Zugriff am 16.8.2017. Verfügbar unter: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1502889462112&uri=CELEX:52010DC0245>
- European Commission. (2011). Commission Recommendation of 27 October 2011 on the digitisation and online accessibility of cultural material and digital preservation. *Official Journal of the European Union*, L 283, 39–45.
- European Commission. (2017). Horizon 2020. The EU Framework Programme for Research and Innovation. *Horizon 2020*. Zugriff am 29.8.2017. Verfügbar unter: <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/>
- Europeana. (2012). Europeana Professional - New ways of searching and browsing: Europeana 4D and Assets 3D search. Zugriff am 29.4.2012. Verfügbar unter: <http://pro.europeana.eu/web/guest/thoughtlab/new-ways-of-searching-and-browsing>
- Evans, T. (2006). Research Policy and Directions. In L. MacDonald (Hrsg.), *Digital Heritage: Applying Digital Imaging to Cultural Heritage* (S. 549–574). Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Factum Arte. (2017, Februar). IDA Palmyra Arch copy. *Factum Foundation*. Zugriff am 23.2.2017. Verfügbar unter: <http://www.factumfoundation.org/pag/236/>
- Fraunhofer Institute for Computer Graphics Research IGD. (2014). Cultlab3D Project. Zugriff am 23.11.2013. Verfügbar unter: <http://www.cultlab3d.de/>
- Froidefond, A. (2016, Dezember 13). „Eternal Sites: From Bamiyan to Palmyra“ at the Grand Palais, Paris - The Archaeology News Network. *Archaeology News Network*. Zugriff am 23.2.2017. Verfügbar unter: <https://archaeologynewsnetwork.blogspot.co.uk/2016/12/eternal-sites-from-bamiyan-to-palmyra.html#Zig3soKVg3m5OAJh.97>
- Getty Conservation Institute. (2013, September). Integrating Imaging and Analytical Technologies for Conservation Practice / Expert’s Meeting. Verfügbar unter: [http://www.getty.edu/conservation/our\\_projects/integrating\\_imaging.html](http://www.getty.edu/conservation/our_projects/integrating_imaging.html)
- Google. (2017). Google Expeditions. Bring your Lessons to Life. Field trips to virtually anywhere. Zugriff am 9.2.2017. Verfügbar unter: <https://www.google.com/edu/expeditions/>
- Google Cultural Institute. (2011, Februar 1). Google Art Project. Zugriff am 5.11.2014. Verfügbar unter: <http://www.google.com/intl/en/culturalinstitute/about/>
- Google Cultural Institute. (2017). The British Museum with Google. Including: #TheMuseumOfTheWorld , Exhibits, Google Street View. *British Museum*. Zugriff am 9.2.2017. Verfügbar unter: [http://www.britishmuseum.org/with\\_google.aspx](http://www.britishmuseum.org/with_google.aspx)

- Hagedorn-Saupe, M. & Deutscher Museumsbund (Hrsg.). (2011). *Leitfaden für die Dokumentation von Museumsobjekten: [von der Eingangsdokumentation bis zur wissenschaftlichen Erschließung]*. Berlin.
- Hannan, L., Chatterjee, H. J. & Duhs, R. (2013). Object Based Learning: A Powerful Pedagogy for Higher Education. In A. Boddington, J. Boys & C. Speight (Hrsg.), *Museums and Higher Education Working Together* (S. 159–168). Farnham: Ashgate.
- Hess, M. (2015). Online survey about current use of 3D imaging and its user requirements in cultural heritage institutions. *2015 Digital Heritage (Volume:2)* (S. 333–338). Gehalten auf der Digital Heritage International Congress, Granada, Spain: IEEE Xplore Digital Library. doi:10.1109/DigitalHeritage.2015.7419517
- Hess, M., Korenberg, C., Robson, S., Entwistle, C. & Ward, C. (2015). Use of 3D laser scanning for monitoring of dimensional stability of a Byzantine ivory panel. *Studies in Conservation Journal*, 60 (S1 Special Volume: Lacona X Laser in Conservation of Artworks), 126–133. doi:http://dx.doi.org/10.1179/0039363015Z.000000000217
- Hess, M. & Robson, S. (2010). 3D colour imaging for cultural heritage artefacts. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII, Part 5*, 288–292.
- Hess, M., Robson, S., Serpico, M., Amati, G., Pridden, I. & Nelson, T. (2015). Developing 3D Imaging Programmes—Workflow and Quality Control. *J. Comput. Cult. Herit.*, 9 (1), 1:1–1:11. doi:10.1145/2786760
- Hess, M., Robson, S., Simon Millar, F., Were, G., Hviding, E. & Berg, A. C. (2009). Niabara - The Western Solomon Islands War Canoe at the British Museum - 3D Documentation, Virtual Reconstruction and Digital Repatriation. *IEEE Computer Society* (S. 41–46). Gehalten auf der Virtual Systems and MultiMedia, International Conference, Vienna, Austria: IEEE Computer Society. doi:10.1109/VSM.2009.12
- Hochschule Coburg. (2016, Januar). Digitale Denkmaltechnologien in Coburg und Bamberg studieren. Zugriff am 10.4.2017. Verfügbar unter: [https://www.hs-coburg.de/index.php?id=47&tx\\_news\\_pi1%5Baction%5D=detail&tx\\_news\\_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx\\_news\\_pi1%5Bnews%5D=2966&cHash=75205a992ccdee7036dea9f7d7339007](https://www.hs-coburg.de/index.php?id=47&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Bnews%5D=2966&cHash=75205a992ccdee7036dea9f7d7339007)
- Hughes, L. M. (2012). *Evaluating and Measuring the Value, Use and Impact of Digital Collections*. London: Facet Publishing. Verfügbar unter: <http://www.facetpublishing.co.uk/title.php?id=7203>
- ICOM. (1964, 2014). 50 Jahre Charta von Venedig – „Magna Carta“ der Denkmalpflege - Charta von Venedig. Zugriff am 11.1.2017. Verfügbar unter: [http://www.charta-von-venedig.de/konservierung-restaurierung\\_schirmmodell.html](http://www.charta-von-venedig.de/konservierung-restaurierung_schirmmodell.html)
- ICOM. (2006, revised). *Statues and Code of Professional Ethics International Council for Museums, first published 1996*. Zugriff am 9.7.2008. Verfügbar unter: <http://icom.museum/ethics.html#intro>
- ICOM. (2017). ICOM International Committee for Documentation (CIDOC). Zugriff am 19.8.2017. Verfügbar unter: <http://network.icom.museum/cidoc/>
- ICOMOS. (2017). Heritage at risk reports - International Council on Monuments and Sites. Zugriff am 31.8.2017. Verfügbar unter: <http://www.icomos.org/en/get-involved/inform-us/heritage-alert/heritage-at-risk-reports>
- ICOMOS & Second International Congress of Architects and Technicians of Historic Buildings. (1964). The Venice Charter: International Charter for the Conservation and...(1964). *Cultural Heritage Policy Documents*. Zugriff am 19.4.2017. Verfügbar unter: [http://www.getty.edu/conservation/publications\\_resources/research\\_resources/charters/charter12.html](http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/research_resources/charters/charter12.html)
- ISO 21127. (2006). ISO 21127:2006 - Information and documentation -- A reference ontology for the interchange of cultural heritage information. (ICOM, CIDOC CRM Special Interest Group & ISO, Hrsg.).
- Jansen, M., Toubekis, G., Walther, A., Döring-Williams, M. & Mayer, I. (2008). Laser scan measurement of the niche and virtual 3D representation of the small Buddha in Bamiyan. *Layers of Perception. Proceedings of the 35th International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA), Berlin, 2.-6. April 2007. Koll. Vor- u. Frühgesch.*

10. Zugriff am 1.11.2014. Verfügbar unter: <http://archiv.ub.uni-heidelberg.de/propylaeumdok/531/>
- Land Brandenburg. (2017). Geschichte des Messbildarchivs. Zugriff am 19.8.2017. Verfügbar unter: <http://www.bldam-brandenburg.de/messbildarchiv/17-geschichte-des-messbildarchivs>
- LaPensée, A. A., Cooper, M. J. & Parsons, J. B. (2006). Applications in the field of cultural heritage using “off-the-shelf” 3D laser scanning technology in novel ways. In M. Ioannides (Hrsg.), *The e-volution of Information Communication Technology in Cultural Heritage*. Gehalten auf der Joint event CIPA / VAST / EG / EuroMed 2006, Nicosia, Cyprus: EPOCH.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S. & Boehm, J. (2013). *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging* (2nd ed.). Berlin, Boston: De Gruyter. doi:10.1515/9783110302783
- Mohen, J.-P., Menu, M., Mottin, B. & Beraldin, J.-A. (2006). „Mona Lisa“: *Inside the Painting*. Harry N. Abrams, Inc.
- Myers, D., Dalgity, A. & Avramides, Y. (2016). Arches: A Free Software Platform Purpose-Built for Cultural Resource Inventories. *The Alliance Review* (S. 22–27). Gehalten auf der National Alliance of Preservation Commissions. Zugriff am 14.4.2017. Verfügbar unter: [http://archesproject.org/wp-content/uploads/2016/08/AllianceReview\\_Summer2016\\_arches-3.pdf](http://archesproject.org/wp-content/uploads/2016/08/AllianceReview_Summer2016_arches-3.pdf)
- Natural History Museum. (2017). NHS Digital collections programme. Zugriff am 15.5.2017. Verfügbar unter: <http://www.nhm.ac.uk/our-science/our-work/digital-museum/digital-collections-programme.html>
- Nordland, R. (2014, März 22). Countries Divided on Future of Ancient Buddhas. *The New York Times*.
- Otto-Friedrich Universitaet Bamberg. (2016, Januar 25). Neuer Masterstudiengang „Digitale Denkmaltechnologien“. *Pressemitteilungen der Universität Bamberg*. Zugriff am 10.4.2017. Verfügbar unter: <http://www.uni-bamberg.de/presse/pm/artikel/neuer-masterstudiengang-digitale-denkmaltechnologien/>
- Otto-Friedrich Universitaet Bamberg. (2017, August). Masterstudiengang „Digitale Denkmaltechnologien“ - Otto-Friedrich-Universität Bamberg. Zugriff am 16.8.2017. Verfügbar unter: <https://www.uni-bamberg.de/iadk/denkmalwissenschaften/studium/ma-digitale-denkmaltechnologien/>
- Payne, E. M. (2013). Imaging Techniques in Conservation. *Journal of Conservation and Museum Studies*, 10 (2). doi:10.5334/jcms.1021201
- Pett, D. & British Museum. (2017, Juli 31). A new dimension in home shopping. 3D printing technology to produce replicas of some of its most iconic objects. *The British Museum Blog*. Zugriff am 19.8.2017. Verfügbar unter: <http://blog.britishmuseum.org/a-new-dimension-in-home-shopping/>
- Robson, S., Bucklow, S., Woodhouse, N. & Papadaki, H. (2004). Periodic photogrammetric monitoring and surface reconstruction of a historical wood panel painting for restoration purposes (5). *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* (Band 35, S. 395–400). Gehalten auf der ISPRS, Istanbul.
- Robson, S., MacDonald, S., Were, G. & Hess, M. (2012). 3D Recording and Museums. In C. Warwick, M. Terras & J. Nyhan (Hrsg.), *Digital Humanities in Practice* (1. Auflage, S. 91–115). London, UK: Facet Publishing.
- Santos, P., Pena Serna, S., Storck, A. & Fellner, D. (2014). The potential of 3D internet in the Cultural Heritage Domain. *3D Research Challenges in Cultural Heritage: A Roadmap in Digital Heritage Preservation*. Springer.
- Santos, P., Ritz, M., Fuhrmann, C., Monroy, R., Schmedt, H., Tausch, R. et al. (2017). Acceleration of 3D Mass Digitization Processes: Recent Advances and Challenges. In M. Ioannides, N. Magnenat-Thalmann & G. Papagiannakis (Hrsg.), *Mixed Reality and Gamification for Cultural Heritage* (S. 99–128). Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-49607-8\_4
- Schuller, M. (2002). *Building archaeology* (Monuments and sites). München: Lipp.
- Semal, P., Mathys, A., Brecko, J. & RBINS. (2013, Oktober). Agora3D aims to establish protocols of digitization of the natural and cultural heritage (project website). *Agora3D project*. Zugriff am 29.10.2014. Verfügbar unter: <http://agora3d.africamuseum.be/english/index.php>
- Sketchfab. (2017). Virtual Reality & 3D for Cultural Heritage. *Sketchfab*. Zugriff am 10.4.2017. Verfügbar unter: <https://sketchfab.com/museums>

- Smithsonian Institution Archives. (2017). Mass Digitization Program by the Digitization Program Office. Zugriff am 15.5.2017. Verfügbar unter: <https://dpo.si.edu/mass-digitization-program>
- Stroeker, N. & Vogels, R. (2014, Januar). ENUMERATE - Survey Report on Digitisation in European Cultural Heritage Institutions 201 4. Enumerate Thematic Network. Verfügbar unter: <http://www.enumerate.eu>
- Terras, M., Ross, C. & Motyckova, V. (2012). Measuring impact and use: scholarly information-seeking behaviour. In L.M. Hughes (Hrsg.), *Evaluating and Measuring the Value, Use and Impact of Digital Collections*. London: Facet Publishing. Verfügbar unter: <http://www.facetpublishing.co.uk/title.php?id=7203>
- Toschi, I., Nocerino, E., Hess, M., Menna, F., Sargeant, B., Macdonald, L. et al. (2015). Improving automated 3D reconstruction methods via vision metrology. *SPIE Optical Metrology, Videometrics, Range Imaging, and Applications XIII* (Band 9528, S. 95280H–95280H–15). doi:10.1117/12.2184974
- UNESCO. (2015, Dezember). #Unite4Heritage – Celebrating & Safeguarding Cultural Heritage. Zugriff am 31.8.2017. Verfügbar unter: <http://www.unite4heritage.org/en/unite4heritage-celebrating-safeguarding-cultural-heritage>
- UNESCO. (2017). Safeguarding Syrian Cultural Heritage | United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Zugriff am 31.8.2017. Verfügbar unter: <http://www.unesco.org/new/en/safeguarding-syrian-cultural-heritage/>
- UNESCO World Heritage Centre. (2017). Cultural Landscape and Archaeological Remains of the Bamiyan Valley. *UNESCO World Heritage Centre*. Zugriff am 15.5.2017. Verfügbar unter: <http://whc.unesco.org/en/list/208/>
- UNESCO/PERSIST Content Task Force & UNESCO. (2016, März). The UNESCO/PERSIST Guidelines for the selection of digital heritage for long-term preservation. *International Federation of Library Associations and Institutions (IFLA)*. Zugriff am 3.1.2017. Verfügbar unter: <http://www.ifla.org/files/assets/hq/topics/cultural-heritage/documents/persist-content-guidelines.pdf>
- Vincent, M. & Coughenour, C. (2016). *Rekrei / Project Mosul*. Zugriff am 10.5.2016. Verfügbar unter: <http://projectmosul.org/>
- Wahbeh, W., Nebiker, S. & Fangi, G. (2016). Combining public domain and professional panoramic imagery for the accurate and dense 3D reconstruction of the destroyed Bel Temple in Palmyra. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (Band III-5, S. 81–88). Gehalten auf der XXIII ISPRS Congress, Commission V (Volume III-5) - 12&ndash;19 July 2016, Prague, Czech Republic, Copernicus GmbH. doi:10.5194/isprs-annals-III-5-81-2016
- Whitfield, C. W. / S. (2014). Digitisation at the British Library. *British Library Digitisation*. Zugriff am 29.7.2014. Verfügbar unter: <http://www.bl.uk/aboutus/stratpolprog/digi/digitisation/>
- Wiedemann, A., Suthau, T. & Albertz, J. (1999). Photogrammetric survey of dinosaur skeletons. *Fossil Record*, 2 (1), 113–119. doi:10.1002/mmng.1999.4860020108