



**Mona Hess &
Thomas Luhmann**
**3D-Erfassung in der Denkmalpflege
– Anforderungen und Perspektiven**

1. Einleitung

Der vorliegende Beitrag wurde anlässlich des 100. Todestages von Albrecht Meydenbauer für die von Dr. Bettina Götze herausgegebene Festschrift verfasst. Wir beleuchten die Nutzung von bildgebenden 3D-Verfahren und 3D-Erfassung in der Denkmalpflege aus der Sicht einer Denkmalpflegerin mit Kenntnissen in bildgebenden Verfahren und aus der Sicht eines Photogrammeters mit Erfahrungen in der Erfassung von Objekten des Kulturerbes.

Die berührungslose 3D-Digitalisierung und digitale Dokumentation von kulturellem Erbe und Museumsobjekten haben enormes Potenzial und viele Vorteile. Neue Technologien ergänzen die bestehenden Methoden in Denkmalpflege, Kulturgüterschutz und Konservierung. Zunehmender Automatisierungsgrad und Qualität aktueller digitaler Messverfahren haben dazu geführt, dass auch Nicht-Spezialisten die Messtechniken erfolgreich einsetzen und damit zu einer weiten Verbreitung dieser Technologien im Sinne der baulichen Überwachung zum Wohle des Kulturerbe-Erhaltes beitragen können.

2. Die Dokumentationsaufgabe und Erfassung in der Denkmalpflege seit dem 19. Jahrhundert

Die Ziele und Handlungsgrundsätze der Denkmalpflege wurden erstmals in der Charta von Venedig im Jahr 1964 schriftlich definiert und werden bis in die heutige Zeit respektiert. Sie enthält Definitionen des Denkmalbegriffes und Aufgaben der architektonischen Sicherung und Konservierung. Ergänzend zum Aufruf zu Erforschung und Erhalt „mittels aller Wissenschaften und Techniken“ definiert sie auch die Aufgabe der Dokumentation¹. 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 Aufgabe zur Dokumentation unseres kulturellen Erbes betrifft unsere gebaute Umwelt, also Gebäude oder auch Gärten mit Architekturelementen oder archäologischen Stätten. Auch bewegliche Ausstattungsgegenstände zählen dazu. Die denkmalgerechte Dokumentation und Inventarisierung wird meist durch Beschreibung, mit Fotografie und standardisierten Darstellungen wie maßstäbliche Pläne auf allen Ebenen, mit Querschnitten und Längsschnitten sowie axonometrischen Detailzeichnungen geliefert. Eine der ersten Standardisierungen dieser grafischen Darstellung wurde Anfang des 19. Jh. durch die Ausgrabungsdokumentationen von Robert Koldewey geprägt, der verformungsgerechte Aufmaße der Ausgrabungen zu Babylon lieferte und in ausführlichen Bänden der deutschen Orientgesellschaft der Öffentlichkeit zugänglich machte². In Deutschland wurden 2003 die Anforderungen der Detailtreue für die praktische Denkmalpflege von G. Eckstein formalisiert und vier Genauigkeitsstufen in Relation zur Darstellungstreue definiert³.

Eine Ableitung von informativen Plänen aus fotografischer Erfassung, z. B. als steingerechtes Aufmaß (d. h. alle Fugen sind erkennbar), wurden auch Endes des 19. Jh. von Albrecht Meydenbauer durch seine systematischen Aufnahmen von Monumenten erreicht. Er entwickelte eigens das Messbild-Verfahren mit einer mobilen Messbildkammer, die ihm Standortwahl bzw. Aufstellung um das Gebäude erleichterte⁴. Dieses photogrammetrische Verfahren brachte ihn bis zu archäologischen Stätten in Baalbeck, um dort Aufnahmen zu tätigen⁵. Seine Original-Aufnahmen auf Glasplatten und umgezeichneten Pläne vieler Denkmäler Deutschlands sind heute noch in der 1885 gegründeten Messbildstelle⁶ zugänglich, der ehemals Königlich Preussischen Messbildanstalt. Meydenbauer wurde von der Motivation eines „umfassenden Denkmälerarchives“ angetrieben, um hierin die wichtigsten Bauwerke in Deutschland zu dokumentieren und um diese im Falle einer Zerstörung zu rekonstruieren. Diese Zielsetzung ist in der Intention tatsächlich nicht sehr weit von der heutigen Anwendung der Dokumentationsmethoden für Baudenkmäler entfernt, allerdings mit nachfolgender digitaler Rekonstruktion. Meydenbauers Methode brachte grafische Ergebnisse, die den noch immer geltenden

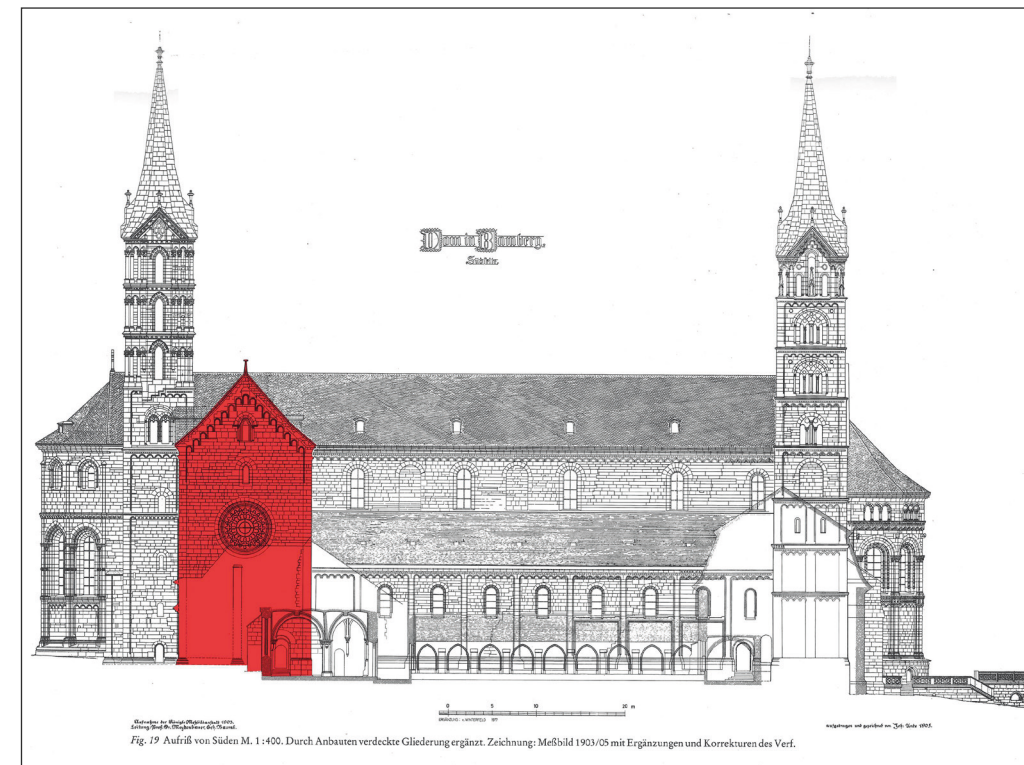


Fig. 19 Aufriss von Süden M. 1:400. Durch Anbauten verdeckte Gliederung ergänzt. Zeichnung: Messbild 1903/05 mit Ergänzungen und Korrekturen des Verf.

Anforderungen in der Denkmalpflege entsprechen: maßstabsgetreue und verformungsgerechte Darstellung durch eine objektive Aufnahmeart mit einem angemessenen Detailgrad, um die Konstruktion, das Material und die Herstellungsart beurteilen zu können. Weiterhin sind die Messbildaufnahmen auch heute noch als Vergleich für Veränderungen am Bauwerk zu verwenden. Nach wie vor stellen die angefertigten Fotografien eine reiche Quelle der Information dar, auf die gern zurückgegriffen wird. Beispielsweise kann die Bamberger Dombauhütte hier den Zustand und das Fugenbild der Steine vor den zahlreichen nötigen Austauschmaßnahmen von neu geschlage-

nen und versetzten Steinen seit 1903 beurteilen. Bei der Einrichtung des dortigen ‚Digitalen Dombauarchives‘ in der Dombauhütte Bamberg (erstmalig erstellt 2004 durch die Autorin, als Teil eines von der DBU geförderten Projektes) wurden zunächst die vorliegenden Meydenbauer-Pläne digitalisiert, dann archivwürdig abgelegt und ausgewertet bzw. vektorisiert, bevor ein zunächst gezieltes, später komplettes digitales Neuaufmaß durch 3D-Laserscanning und Photogrammetrie angefertigt wurde. Die ständig tätige Dom-Baustelle kann so durch eine Datenbank immer wieder auf in einer Zeitschiene angeordnete Informationen zu einzelnen Bauteilen zurückgreifen. Dieses

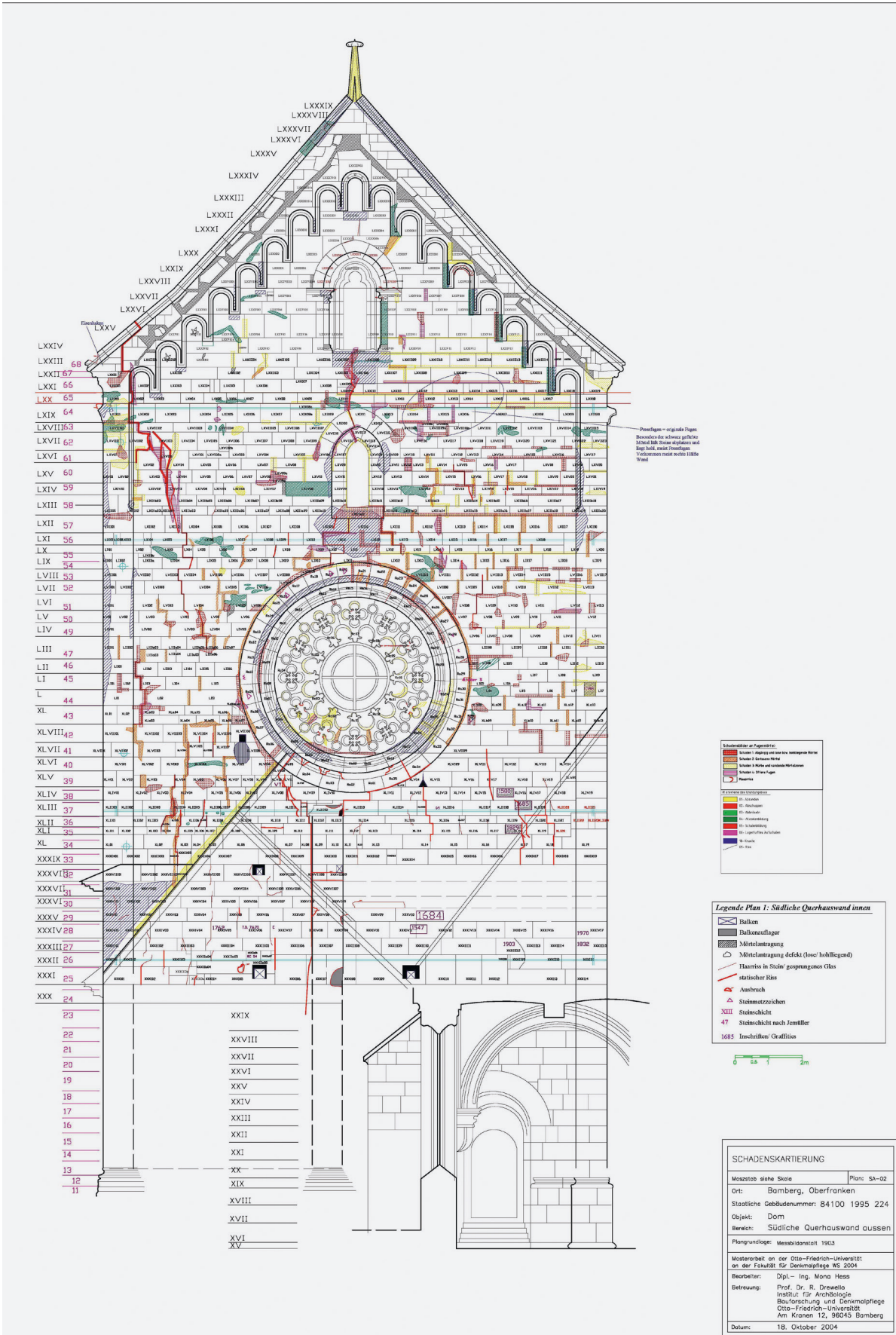


Aufriss des Bamberger Doms von Süden, abgeleitet aus einem Meydenbauerschen Messbild von 1903. Zeichnung: Messbild mit Ergänzungen und Korrekturen von Dethard v. Winterfeld und durch Anbauten verdeckte Gliederung ergänzt. (1979). Rote Markierung durch Mona Hess zur Kennzeichnung des Südlichen Querhauses (2004).

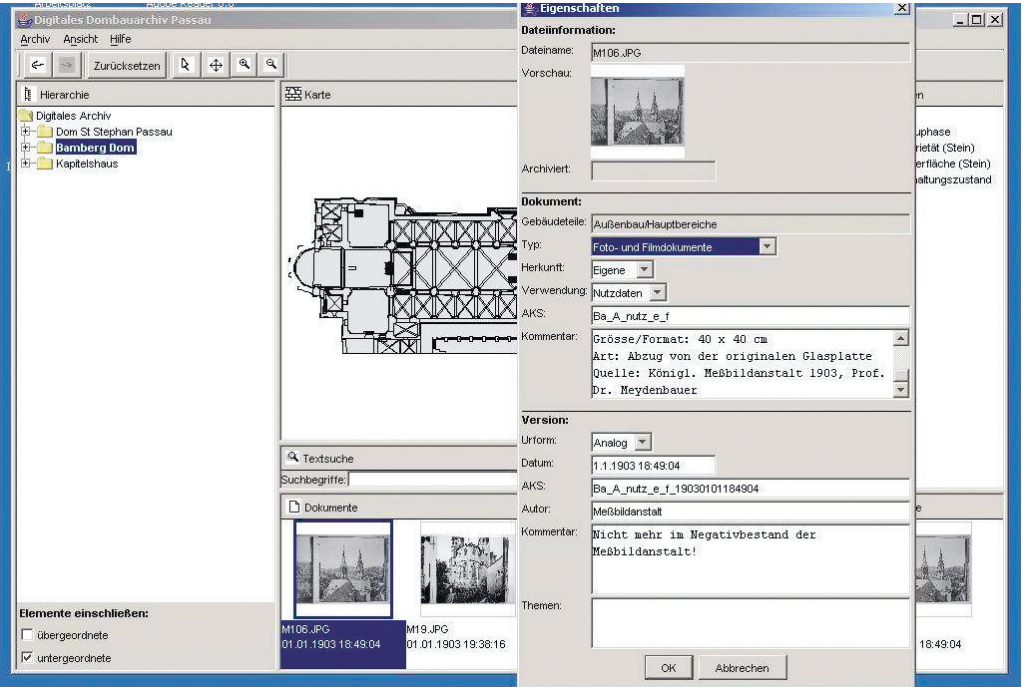
©BLDAM, Bildarchiv, Nr. V Bd 774.142f; und urn:nbn:de:bub:22-dtl-0000081018; Staatsbibliothek Bamberg; Bearbeitung durch Dethard v. Winterfeld 1979

Meydenbauersche Messbilder des südlichen Querhauses des Bamberger Doms.

©BLDAM, Bildarchiv, Neg.-Nr. links: 774.23; rechts: 774.22 (urn:nbn:de:bub:22-dtl-0000078511; urn:nbn:de:bub:22-dtl-0000078596, Staatsbibliothek Bamberg)



Schadenskartierung und Steinnummerierung, basierend auf dem Messbild des Südlichen Querhauses von 1903 mit zeichnerischen Ergänzungen im Jahr 2004 ©Mona Hess



Messbilder und Pläne im Digitalen Dombauarchiv als ontologische und semantisch gegliederte Datenbank, eingerichtet in der Dombauhütte Bamberg, Stand 2004. © Mona Hess

digitale Archiv wird nach wie vor genutzt und die zugehörige Software wird bis heute – im Jahr 2021 – weiterentwickelt.

3. Aktuelle Anforderungen aus der Denkmalpflege

Für die Bauforschung am Bauwerk und in der Archäologie sind Vermessung und verformungsgerechtes Handaufmaß die Grundlage für ein Verständnis der Bauphasen und verwendeten Materialien. Besonders in Kombination mit der digitalen Dokumentation, die auf Tachymetrie, Bildentzerrung, Photogrammetrie und anderen bildgebenden Verfahren basiert, wird eine zusätzliche Datenerhebung für die Bauforschung ermöglicht^{7,8}.

Die Dokumentationsanforderungen der klassischen Baudenkmalpflege des 19. Jh. gelten im Übertrag genauso auch für die Ergebnisse der digitalen Vermessungsmethoden. Die Möglichkeit eine 3D-Punktwolke grafisch in einen Plan zu übertragen, bauliche Verformungen sowie handwerkliche und technische Details erkennen zu können, verbleiben eng mit der Expertise des denkmalpflegerisch geschulten Blicks verbunden. Eine sinnvolle Gegenüberstellung der Detailtreue eines Laserscans mit der Darstellung in architektonisch gebräuchlichen Maßstäben wird heute genutzt. Beispielsweise entspricht einem architektonischen-zeichnerischen

Maßstab von 1:100 für ein schematisches Aufmaß nach Ecksteins Genauigkeitsstufe I eine Mindestaufauflösung, also Punktabtastung, von ≤ 15 mm durch einen 3D terrestrischen Laserscanner bzw. einer Pixelaufauflösung am Objekt (Ground Sampling Distance – GSD) von 10 mm in der Photogrammetrie; dem Maßstab von 1:25 entspricht eine Auflösung von mindestens $\leq 2,5$ mm oder einer GSD von mindestens 2 mm und damit Genauigkeitsstufe IV nach Eckstein für ein verformungsgetreues Aufmaß; entsprechend in 1:10 für konstruktive Details sind es 1 mm Auflösung und 1 mm GSD.

Noch im Jahr 2000 wurde dem sogenannten „maschinellen Aufmaß“ in der klassischen Bauforschung⁹ und in der Denkmalpflege mitunter kritisch begegnet, denn die reine technische 3D-Aufnahme eines Gebäudes ersetzt nicht Expertise und diagnostischen Blick eines Bauforschers. Oft wurde eine Kombination von digitalem Aufmaß mit verformungsgerechtem Aufmaß auf säurefreiem Papier mit Bleistift vor Ort vorgenommen¹⁰. Ein anderes Beispiel wäre ein tachymetrisches Aufmaß in CAD, dessen Ausdruck mit Bleistiftplotter und nachträglichem Eintrag von Detailzeichnung und Befundbeschriftung¹¹. Der Verhandlung zwischen objektivem, alle Details gleichmäßig darstellendem 3D-Aufmaß, und dem Aufwand der Datennachbearbeitung und Modellierung sowie intelligent interpretativen

„Durchzeichnung“ zum Plan und den damit verbundenen personellen Kosten wird nach wie vor in der Diskussion begegnet¹². Aber eine Annäherung der bisher disparat empfundenen „Denkmalpflege“ und des „Digitalen“ findet zunehmend statt¹³. Die zusätzlichen Vorteile der 3D-Aufnahme, wie beispielsweise virtuelle Rekonstruktion und Variantendiskussion, Zugänglichmachung der Ergebnisse in VR, werden in der Praxis mehr und mehr integriert^{14, 15}.

Tatsächlich stellt heute weniger das „wie“ der 3D-Aufnahmen ein Problem dar (siehe Abschnitt 4), sondern das „wie gehen wir damit um?“. Aus diesem Grund widmen sich jetzt viele Aktivitäten (z. B. die DFG geförderte NFDI, Nationale Forschungsdateninfrastruktur) der Entwicklung von Qualitätsstandards und Metadatenschemata. Praktikable Lösungen sind eine Voraussetzung und Herausforderung für die Langzeitnutzung der großen (3D) digitalen Datenmengen und deren Wiederauffindbarkeit, damit diese einen Mehrwert für Denkmalpflege und Kulturgüterschutz heute und in Zukunft bieten. Werden die Daten, die wir heute erzeugen, in 100 Jahren noch genauso nützlich sein, wie die Bilder und Pläne des Meydenbauerschen Archives, und was können wir dafür tun?

Ziel wäre ein 3D-Aufmaß, in Verbindung mit semantischen Beschreibungen und neu entwickelten kodierten Bau- und Befundbeschreibungen zur Schaffung neuer Erkenntnisse, und einige Forschungsprojekte in diese Richtung haben bereits begonnen¹⁶. Projekte zur Archivierung von Daten, wie das oben genannte Dombauarchiv, werden weitergeführt, um neue semantische Dimensionen zu integrieren, die neue informationstechnisch-infrastrukturelle Möglichkeiten bieten¹⁷.

4. Technische Lösungen der 3D-Erfassung

Das Spektrum von Messverfahren und Systemen zur dreidimensionalen Erfassung von Objekten ist weit gespannt¹⁸. Die oben genannten Anforderungen in der Denkmalpflege lassen sich dabei am besten mit berührungslosen und skalierbaren optischen 3D-Messstechniken erreichen¹⁹. Die Vielfalt von Formen, Größen, Materialien und Strukturen sowie Fertigungsarten von Objekten des kulturellen Erbes ist fast grenzenlos und reicht von großvolumigen Monumenten

(> 100 m) bis hin zu makroskopisch kleinen Exponaten (< 1 cm) mit jeweils sehr unterschiedlichen Anforderungen bezüglich einer sachgerechten 3D-Digitalisierung. Hinreichende Auflösung und Genauigkeit der gemessenen Rohdaten, wirtschaftlich vertretbarer Aufwand, örtlich und zeitliche Zugänglichkeit zum Objekt sowie weitere Spezifikationen wie farbtreue Darstellung oder maximale Datenvolumina sind fallweise festzulegen und führen damit auch zu sehr unterschiedlichen technischen Lösungen. Dazu kommen mögliche rechtliche und ethische Fragen aufgrund der Herkunft der Objekte oder aufgrund möglicher Nutzungseinschränkungen bei der Weiterverarbeitung von Daten.

Photogrammetrische Messverfahren bieten vielfältige Möglichkeiten, die genannten Anforderungen flexibel zu erfüllen. Seit Meydenbauers frühen Entwicklungen hat sich die Photogrammetrie in mehr als 150 Jahren zu einer leistungsfähigen, hochgenauen, wirtschaftlichen und universellen Methode entwickelt, die sich heute praktisch überall als anerkanntes und häufig alternatives Verfahren durchgesetzt hat. Auch wenn die Photogrammetrie im Bereich des Kulturerbes schon immer eine wichtige Rolle gespielt hat²⁰, hat sich erst in den letzten ca. 20 Jahren ein Paradigmenwechsel eingestellt, der es heute erlaubt, dass Photogrammetrie praktisch von Jedermann erfolgreich eingesetzt werden kann, ohne dass spezielle Vorkenntnisse erforderlich sind. Neben den kontinuierlichen Entwicklungen in der Computertechnik und bei Digitalkameras liegt der Grund vor allem in dem hohen Automationsgrad von Bildauswertungen, die durch Verfahren und Strategien wie Structure-from-Motion (SfM) oder Simultaneous Localisation and Mapping (SLAM) gekennzeichnet sind.

Grundlage jeder hochwertigen photogrammetrischen Auswertung ist das Aufnahmesystem, das den Ansprüchen hinsichtlich Auflösung, Genauigkeit, Farbqualität, Bildfrequenz, Handhabung usw. genügen muss. Obwohl heute praktisch jede beliebige Kamera photogrammetrisch eingesetzt werden kann, ist ihre geometrische und optische Qualität immer noch entscheidend für die Güte des Endprodukts. Wesentlichen Einfluss hat hier die mathematische Modellierung der inneren Orientierung und die Vorgehensweise bei der Kamerakalibrierung. Insbesondere für Laien oder

Nicht-Photogrammeter ist es häufig kaum nachvollziehbar, wie die Kamera im Rahmen einer automatischen Auswertung mit SfM kalibriert wird und ob die resultierenden Parameter genügend gut sind. Da die typischen SfM-Programme praktisch immer ein Ergebnis liefern, ist es ratsam, bei anspruchsvollen Aufgaben Spezialisten hinzuziehen, die das Ergebnis kritisch überprüfen.

Wichtige Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz von SfM ist eine hinreichende Textur der Objektoberfläche. Das Messverfahren ermittelt mit sogenannten Merkmalsdetektoren homologe Verknüpfungspunkte, die sich an markanten Oberflächenpunkten mit entsprechenden Kontrast- oder Farbverteilungen bilden. Zusätz-



lich muss auf eine hohe gegenseitige Überlappung der Bilder (z. B. 90 %) geachtet werden, da sich dann diese Merkmalspunkte relativ ähnlich sehen und eine automatische Zuordnung (Matching) zuverlässig möglich ist. Moderne Orientierungsverfahren führen schließlich zu 3D-Koordinaten der Verknüpfungspunkte (dünn besetzte Punktwolke), die anschließend noch durch Stereoverfahren weiter verdichtet werden kann (dichte Punktwolke).

Seit Beginn der 2000er-Jahre hat sich terrestrisches Laserscanning (TLS) zunehmend als weitere 3D-Erfassungsmethode für größere Objekte (Bauwerke, Monumente) etabliert. Der Vorteil gegenüber der Photogrammetrie liegt vor allem in der direkten Erfassung von Polarkoordinaten (Winkel und Strecke), einer Punktwolke des Objektes mit nur wenigen Standpunkten. Die

anschließende Datenauswertung (Registrierung, Modellierung) erfordert in der Regel einen erheblich höheren zeitlichen Aufwand, da bisher noch zahlreiche Schritte manuell und interaktiv ausgeführt werden. Neuere Laserscanner erlauben hier jedoch bereits erhebliche Fortschritte, z. B. durch SLAM-basierte automatische (Vor)Registrierung der Punktwolken. Einen besonderen Mehrwert hat TLS dann, wenn gleichzeitig kalibrierte und orientierte Farbbilder aufgenommen werden, die sowohl zur Einfärbung von Punktwolken als auch zur Objekterkennung verwendet werden können. Damit wird auch deutlich, dass hier laserbasierte (geodätische) Methoden mit photogrammetrischen Verfahren kombiniert werden können²¹.



Beispiel einer digitalen 3D-Rekonstruktion der historischen Kirche Lurdji in Tbilisi, Georgien
© Jade Hochschule/IAPG

In einem Anwendungsbeispiel aus Georgien wurden für die photogrammetrische Erfassung sowohl drohnengestützte Bildflüge als auch terrestrisch aufgenommene Bilder verwendet. Zusätzlich wurden TLS-Messungen des gesamten Gebäudes durchgeführt, aus denen auch Passpunktkoordinaten extrahiert wurden²². Damit konnten auch schwer zugängliche Objektbereiche vollständiger erfasst werden. Sämtliche Daten wurden simultan in einem Programm (RealityCapture) verarbeitet und resultieren in einer hochauflösten 3D-Rekonstruktion (farbcodierte Vermaschung) in einer Genauigkeit von ca. 5 mm. Dieses Beispiel macht deutlich, welches Potenzial moderne Photogrammetrie in Kombination mit weiteren Sensordaten heute aufweist.



3D-Darstellung des aufgenommenen Datensatzes des Goethe-Elefantenschädels mit Hilfe eines Handscanners
© Jade Hochschule/IAPG

Für kleinere Objekte eignen sich neben klassischen photogrammetrischen Ansätzen insbesondere auch aktive Messsysteme, die mit strukturiertem Licht arbeiten. Eine etablierte Technologie stellen Streifenprojektionssysteme dar, die mithilfe von projizierten Streifenmustern und photogrammetrischen Kameras die 3D-Oberfläche erfassen, auch wenn sie über keine eigene Textur verfügt. Sie bieten Auflösungen und Genauigkeiten von ca. 30 – 50 µm in typischen Objektdimensionen von ca. 0,2 – 1 m. Da diese Systeme eine sequenzielle Bildfassung durchführen, darf sich das Objekt während der Aufnahme geometrisch nicht verändern. Komplexe Objektformen werden auch hier über mehrere Einzelpositionen erfasst, deren lokale Punktwolken anschließend registriert und fusioniert werden. Eine weitere Alternative für kleinere Objektvolumina sind sogenannte Handscanner. Hierbei führt der Bediener ein mobiles Sensorsystem scannend über die Objekt-oberfläche. Typischerweise projizieren diese Scanner ein Lichtmuster, das von einer oder mehreren eingebauten Kameras beobachtet und zu 3D-Koordinaten umgerechnet wird. Typische Genauigkeiten liegen im Bereich von 0,05 – 2 mm, je nach Gerätetyp und Handhabung²³. Der Vorteil liegt in der intuitiven Echtzeiterfassung, d. h. der Bediener kann am Bildschirm unmittelbar kontrollieren, ob das Objekt schon hinreichend erfasst worden ist. Die Abbildungen oben zeigen das Beispiel einer 3D-Erfassung des Schädels des berühmten Goethe-Elefanten aus dem Ottoneum Kassel.



5. 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-Darstellungen. Die erhobenen 3D-Daten können zum effizienten digitalen Management für Museumsobjekte, aber auch für Denkmalstätten oder bei Denkmalinventaren beitragen²⁴. Standards für austauschbare Metadatensätze werden gerade etabliert. Eine allgemeine Infrastruktur für Langzeitspeicherung, Kommentierung und Wiederauffindbarkeit, sowie Standards für Meta- und Paradata (Digitale Provenienz) von Digitalisaten von Kulturgütern und Denkmälern sind noch in Entwicklung. Eine zentrale Frage bei der qualitätvollen archivarischen Digitalisierung von Kulturgütern und Beitrag zur systematischen Inventarisierung ist das Verständnis der Anforderungen an die 3D-Digitalisierung, die von den Museen, Sammlungen und Denkmälern gestellt werden²⁵. 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 und auch kuratorische (also technische und inhaltliche) Qualitätskontrolle der 3D-Datenerfassung²⁶.

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. Neue interaktive Medien mit VR erlauben beispielsweise eine Kombination von Objekten in einer neuen aufregenden Lernumgebung²⁷. Die mit der Vielzahl optischer 3D-Messverfahren gewonnenen Daten werden zukünftig weitere Möglichkeiten und Herausforderungen mit sich bringen, z. B. werden Methoden des maschinellen Lernens vermehrt dazu führen, Objekte automatisch im Kontext mit Metadaten zu klassifizieren und zu beschreiben. Auch neue Methoden der Visualisierung mit Verfahren von Virtual Reality oder Augmented Reality werden erweiterbare Interaktions- und Präsentationsmöglichkeiten schaffen. Die Digitalisierung für Kulturgüter wird auch zunehmend in der Hochschullehre angeboten²⁸. Es wurde das neue Kompetenzzentrum für Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien an der Otto-Friedrich-Universität im Jahr 2016 eingerichtet. Mit einer weiteren Förderung der Freistaates Bayern im Rahmen des Digitalen Campus Bayern wird nun ab Wintersemester 2017 erstmals der neue Masterstudiengang Digitale Denkmaltechnologien (M.Sc.) angeboten.

Literatur

1 ICOM. 50 Jahre Charta von Venedig – “Magna Carta” der Denkmalpflege – Charta von Venedig <http://www.charta-von-venedig.de/internationale-charta-zur-konservierung-und-restaurierung.html> (zugegriffen 2021 -07 -14).

2 Koldewey, R. The Excavations at Babylon; Macmillan: London, 1914.

3 Baden-Württemberg, L.; Eckstein, G.; Henes-Klaiber, U.; Goer, M.; Gromer, J.; Schäfer, H. Empfehlungen für Baudokumentationen, 2nd ed.; Theiss, Konrad: Stuttgart, 2003.

4 Grimm, A. 120 Jahre Photogrammetrie in Deutschland. Das Tagebuch von Albrecht Meydenbauer, dem Nestor des Messbild-Verfahrens, veröffentlicht aus Anlaß des Jubiläums 1858/1978.; Oldenburg/Deutsches Museum: München, 1977.

5 Ebenda

6 Land Brandenburg. Geschichte des Messbildarchivs <http://www.bldam-brandenburg.de/messbildarchiv/17-geschichte-des-messbildarchivs> (zugegriffen 2021 -07 -14).

7 Schuller, M. Building Archaeology; Monuments and sites (ICOMOS); Lipp: München, 2002.

8 Breiting, S.; Giese, J. Bauforschung in der Denkmalpflege: Qualitätsstandards und Wissensdistribution; University of Bamberg Press: Bamberg, 2018.

9 Vgl. Schuller 2002.

10 Schuller, M. Bauforschung und Denkmalpflege. In Denkmalpflege: Geschichte – Themen – Aufgaben. Eine Einführung; Hubel, A., Ed.; Reclam, Philipp, jun. GmbH, Verlag: Stuttgart, 2011.

11 Vgl. Breiting/ Giese 2018.

12 Ebenda

13 Arbeitskreis Theorie und Lehre der Denkmalpflege; Franz, B.; Vinken, G.; Weimar, A. B. der F. T. S. und der K. S. Das Digitale Und Die Denkmalpflege: Bestandserfassung-Denkmalvermittlung-Datenarchivierung-Rekonstruktion Verlorener Objekte- Chancen Und Grenzen, 1st ed.; Mitzkat, Jörg: Holzminde, 2017.

14 Hess, M. Digitalisierung Für Kultur. In Digitalisierung; Eppe, P., Ed.; Zwischen den Welten. Coburger Schriftenreihe (wissenschaftliche Schriftenreihe der Hochschule Coburg); Cuvillier: Göttingen Germany, 2018; Vol. 13, pp 53–74.

15 Stylianidis, E.; Remondino, F. 3D Recording, Documentation and Management of Cultural Heritage; Whittles Publishing, 2016.

16 Vgl. Breiting/ Giese 2018.

17 Breiting, S. Die Nürnberger Großkirchen: Best Practice Für Die Digitale Erfassung Komplexer Baudenkmale – Ein Semantisch Annotierter Plansatz (BMBF); KDW, Bamberg, 2021.

18 Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Mess-technik – Beiträge Der Oldenburger 3D-Tage (2002–2020); Luhmann, T., Schumacher, C., Eds.; Wichmann Verlag: Offenbach/Berlin, 2020.

19 Digital Techniques for Documenting and Preserving Cultural Heritage; Bentkowska-Kafel, A., MacDonald, L. W., Eds.; ARC Humanities Press: Plymouth, 2017.

20 Vgl. Schuller 2011.

21 Luhmann, T. Nahbereichsphotogrammetrie, 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage.; Wichmann: Berlin; Offenbach, 2018.

22 Chizhova, M.; Luhmann, T.; Jepping, A.; Hastedt, H.; Gorkovchuk, D. Vergleichende Analyse von Photogrammetrie Und Laserscanning Zur 3D-Rekonstruktion Georgischer Kirchendenkmäler.; Wichmann Verlag: Offenbach/Berlin; pp 271–284.

23 Kersten, T. P.; Lindstaedt, M.; Starosta, D. Comparative Geometrical Accuracy Investigations of Hand-Held 3D Scanning Systems – An Update. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 2018, XLII-2, 487–494. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-487-2018>.

24 Myers, D.; Dalgity, A.; Avramides, Y. Arches: A Free Software Platform Purpose-Built for Cultural Resource Inventories. In The Alliance Review; 2016; pp 22–27.

25 Hess, M. Online Survey about Current Use of 3D Imaging and Its User Requirements in Cultural Heritage Institutions. In 2015 Digital Heritage (Volume:2); IEEE Xplore Digital Library: Granada, Spain, 2015; pp 333–338. <https://doi.org/10.1109/DigitalHeritage.2015.7419517>.

26 Hess, M.; Robson, S.; Serpico, M.; Amati, G.; Pridden, I.; Nelson, T. Developing 3D Imaging Programmes-Workflow and Quality Control. Journal on Computing and Cultural Heritage (JOCCH) 2015, 9 (1), 1–11.

27 Chizhova, M.; Popovas, D.; Gorkovchuk, D.; Gorkovchuk, J.; Hess, M.; Luhmann, T. Virtual Terrestrial Laser Scanner Simulator for Digitalisation of Teaching Environment: Concept and First Results. The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 2020, XLIII-B5-2020, 91–97. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B5-2020-91-2020>.

28 Huth, O.; Hess, M.; Troi, A.; Jagfeld, M. Digitale Denkmaltechnologien – Neue Ansätze Zur Fortschreibung Der Denkmalpflege. Die Denkmalpflege 2019, 2 (77.Jg.), 145–151.