

Digitale Denkmaltechnologien – neue Ansätze zur Fortschreibung der Denkmalpflege

Seit ihrem Bestehen hat die Denkmalpflege die zum Erhalt von Baudenkmalern, Kunst- und Kulturgütern notwendigen Informationen immer aus den einzelnen Wissenschaftsdisziplinen bezogen und diese Informationen zu objektbezogenen Aussagen miteinander verknüpft. Weiterentwicklungen in den einzelnen Fachbereichen führen auch zu einer Fortschreibung der Herangehensweisen der Denkmalpflege. Durch die zunehmende Digitalisierung von Informationen ist die klassische Denkmalpflege einem tief greifenden Wandel unterworfen.

Das Prinzip der Digitalisierung beruht auf der Umwandlung von analogen Signalen in sogenannte diskret abgetastete Signale. Dies bedeutet im Allgemeinen zunächst einen Verlust an Informationen; der Mehrwert der Digitalisierung entsteht erst durch die technisierte Verknüpfung dieser Informationen zu einer neuen Erkenntnis. Die Möglichkeiten dieser Art von verknüpften Informationen sind nahezu unendlich; am Anfang steht die Umwandlung der Signale und fast am Ende befindet sich der digitale Zwilling eines Baudenkmales / Kunstgutes, welcher die Eigenschaften seines Originals vollständig und möglichst in Echtzeit dem Bearbeiter widerspiegelt.

Der digitale Zwilling beruht auf einem sogenannten wahren Modell, das auf einer exakten Übernahme der kompletten physikalischen und chemischen Eigenschaften eines Objekts in ein Rechnermodell basiert.¹ Aber genau das ist aktuell in der geforderten Genauigkeit in keiner Weise möglich. Um diesen Fehler des Modells auszugleichen, bedarf es einer Modellanpassung. Eine Modellanpassung beruht jedoch auf der Messung der Eigenschaften des Originals, wobei diese Messungen wiederum unvollständig und zugleich fehlerbehaftet sind. Die rechnerbasierte Modellanpassung führt damit zu einem mathematischen Problem, welches aufgrund der beschriebenen Unzulänglichkeiten zu nicht reproduzierbaren Ergebnissen führt.² Den digitalen Zwilling wird es folglich in absehbarer Zeit nicht oder nur sehr unzulänglich geben.

Es verbleiben (vorerst) die anderen Stufen der Digitalisierung von Informationen. In vielen Fällen und gerade im Fachbereich der Denkmalpflege genügen bereits eine Erfassung, Verwaltung, einfache Auswer-

tung und Archivierung von Messdaten, ohne komplexe mathematische Algorithmen anwenden zu müssen. Ein einfaches Beispiel dafür ist das Monitoring von Temperatur und relativer Luftfeuchte eines Baudenkmales. Die Qualität und der Mehrwert dieser Messreihen entstehen durch die Länge ihrer Aufzeichnungen sowie durch ihren Bezug zum Ort, zur Tages- und Jahreszeit, zu den Aufzeichnungen der Einflussgrößen wie Besucherzahlen etc. Wichtig ist nur, dieses Monitoring regelmäßig zu warten und konsistent durchzuführen – die Praxis zeigt jedoch an ungezählten Beispielen, dass dies schon Herausforderung genug ist: Viele Messreihen werden nur kurzzeitig, an den Messpositionen unvollständig und zum Teil fehlerbehaftet aufgenommen. Die Ursachen hierfür sind vielfältig, sie sind aber fast immer von den Partnern vor Ort abhängig.

Der Mehrwert an Informationen entsteht jedoch besonders dann, wenn sich das Augenmerk auf die Art und Weise der Aufbereitung dieser Daten – den digitalen Denkmaltechnologien – richtet und dadurch neue Rückschlüsse auf denkmalpflegerische und konservatorische Fragen gewonnen werden können. Dabei werden Teilaspekte wie zum Beispiel das Tragverhalten oder das bauphysikalische Verhalten gesondert untersucht, im Rechner modelliert und die Reaktionen des Teilmodells auf bestimmte Einflussgrößen hin simuliert und vor allem quantifiziert.

Grundlage der Anwendung dieser Technologien bilden Basisinformationen des Baudenkmales beziehungsweise Kunstgutes, wie zum Beispiel die Geometrie und die Materialeigenschaften. Ein gewisser Modellierungsgrad ist schon dann erreicht, wenn diese über die Fachdisziplinen hinweg aus einer gemeinsamen Datenbasis bezogen werden können. Die gegenwärtig große Vielfalt an Datenformaten in den Methoden und Programmen zur Bestandserfassung erschwert jedoch die Schaffung einer solchen Basis.³ Das Setzen von Standards kann eine Antwort auf diese Problematik bilden.

Ein weiteres Problem in der digitalen Denkmalpflege ist zudem der Umgang mit dem Zuwachs an Informationen, allein dadurch, dass das Bauwerk über die Zeit existiert und verschiedene Phasen durchläuft. Sehr schnell werden die Optimierungsparameter, durch welche ein solches Modell begrenzt wird,

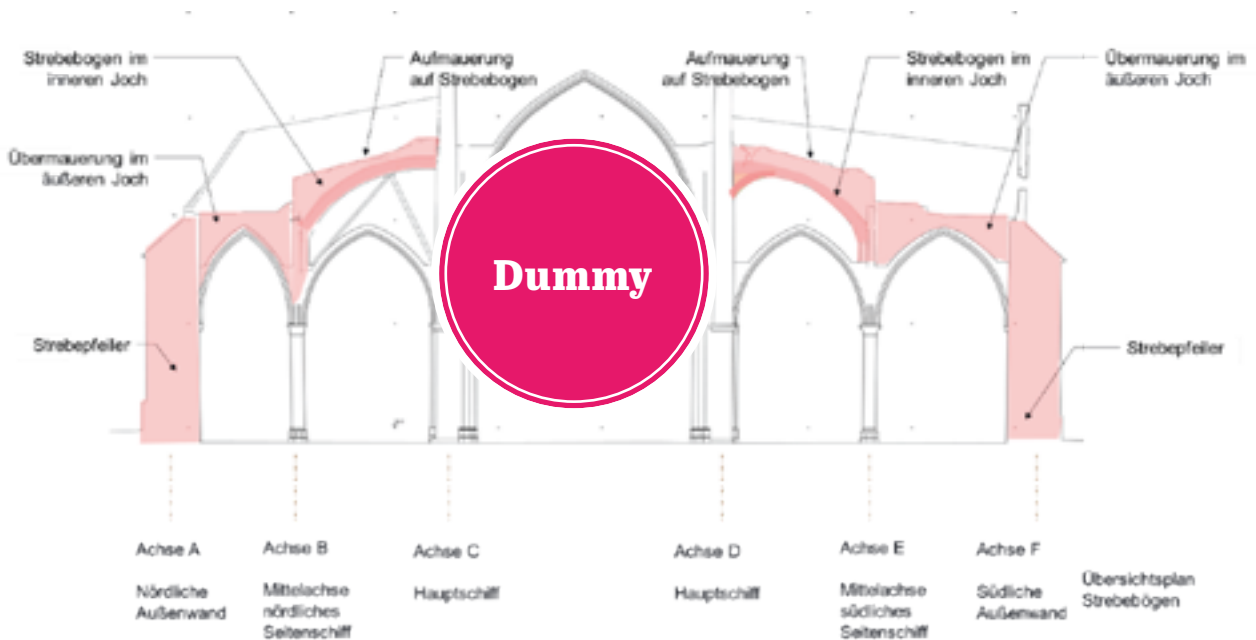
dabei deutlich: einerseits der Modellierungsgrad, andererseits die Anzahl und Qualität der Informationen, welche man dem Modell zuweisen kann, und schließlich die Anforderung einer schnellen und übersichtlichen Handhabung.

Es wird für absehbare Zeit notwendig bleiben, dass das eigentliche Modell, die Zusammenführung der Informationen, noch immer im Geist des Bearbeiters entsteht. Ziel sollte gegenwärtig daher sein, dass ein bestmöglich modelliertes Systemmodell im Computer existiert, das dem Bearbeiter ergänzend und entlastend zur Seite gestellt werden kann.

An drei Beispielen werden die Möglichkeiten dieser digitalen Denkmaltechnologien verdeutlicht.

Beispiel 1: Simulation des Tragverhaltens und Bewertung der Standsicherheit mit computergestützten Methoden

Manchmal ermöglichen erst genaue Berechnungen mit computergestützten Methoden das Verständnis des Tragverhaltens und der Ursachen vorhandener Schäden, das erforderlich ist, um Instandsetzungsmaßnahmen



1. Augsburg, Dom, Strebesystem mit Benennung der Bauteile



2. Augsburg, Dom, Strebebogen auf der Nordseite (links); Risse und Verformungen; Strebebogen Südseite (rechts) mit nachträglich ergänzter Ausrundung an der Oberadenwand

men gezielt planen, minimieren oder gar vermeiden zu können.

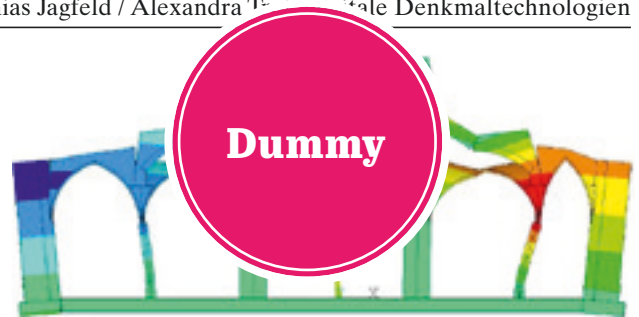
Ein Beispiel dafür ist die Instandsetzung des Strebesystems im Langhaus des Augsburger Doms, das sich von außen nicht sichtbar unter den Seitenschiffdächern befindet und massive Schäden aufwies (Abb. 1, 2).⁴

Vor allem auf der Nordseite waren breite Risse und starke Verformungen an den Strebebögen vorhanden. Unter den Bögen waren als provisorische Sicherung hölzerne Stützböcke eingebaut. Mehrere Strebebögen existierten nicht mehr und waren durch Holzstreben ersetzt worden. Ein verformungsgerechtes Aufmaß⁵ zeigte erhebliche Verkippungen der Strebepfeiler nach außen, eine Aufweitung des Mittelschiffs und vor allem des inneren nördlichen Seitenschiffs.

Folgende Fragestellungen mussten im Verlauf der Planung beantwortet werden: a) Wodurch sind die Schäden entstanden? b) Nehmen die Verformungen zu? c) Sind an den Strebebögen Sicherungsmaßnahmen erforderlich, und wenn ja welche? d) Müssen nicht mehr existente Strebebögen wieder erstellt werden?

Zur Beantwortung dieser Fragen wurden neben einer gründlichen Bestands- und Schadensaufnahme Langzeitverformungsmessungen⁶ durchgeführt und das Tragverhalten eines Regelquerschnitts mit Hilfe der Methode der Finiten-Elemente untersucht.

Die Berechnungen ergaben, dass schon bei einer geringen Verkippung der Strebepfeiler der Horizontal Schub auf der Nordseite nicht wie vorgesehen durch die Gurtbogenübermauerung, sondern vom Gewölbe des äußeren Seitenschiffes auf die Außenwand abgetragen wird (Abb. 3). Dadurch wird das Gewölbe zusammengedrückt, seine Spannweite wird kleiner und die Spannweite des inneren Seitenschiffgewölbes nimmt



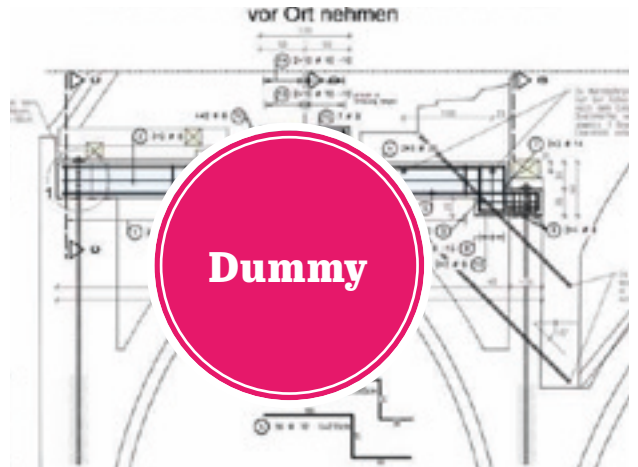
3. Augsburg, Dom, Finite-Elemente-Modell des Regelquerschnitts, Verformung bei Eigengewicht und vorgegebener Verkippung der Strebepfeiler; Darstellung überhöht

zu, was zu Rissbildungen in beiden Gewölben führt. Der Scheitel des äußeren Seitenschiffgewölbes wird nach oben gedrückt. Die Stützzlinie in den Strebebögen der Nordseite wird deutlich flacher und der resultierende Bogenschub nimmt zu. Auf der Südseite sind die Auswirkungen geringer, weil die nachträglich eingebaute Ausrundung einen steileren Verlauf der Stützzlinie erlaubt. (Abb. 3)

Aus diesen Ergebnissen wurden folgende Instandsetzungsmaßnahmen abgeleitet (Abb. 4): a) Die Strebebögen sind für die Tragfähigkeit des Regelquerschnitts erforderlich. Fehlende Strebebögen wurden daher ergänzt. b) Eine weitere Verformung der nördlichen Seitenschiffgewölbe muss verhindert werden. Dazu wurden auf der Gurtbogenübermauerung des äußeren Seitenschiffgewölbes biegesteife Balken aus Beton eingebaut, die eine weitere Verformung der Gewölbescheitel nach oben und damit ein Zusammendrücken des Gewölbes verhindern. c) Bei den Strebebögen der Nordseite wurden, wie auf der Südseite bereits



4a. Augsburg, Dom, neu erstellte Ausrundung auf der Nordseite; b. Bewehrungsplan für biegesteife Balken auf der Übermauerung der äußeren nördlichen Seitenschiffe





5. Augsburg, Dom, Verformungsmessungen; Messpunkte (links), Beispielhafter Verlauf der Verformungen an Punkt 5 (rechts)

vorhanden, Ausrundungen an der Obergadenwand hergestellt. Das ermöglicht eine steilere Stützlinie und verhindert, dass die für das Gleichgewicht des Strebebogens erforderliche Horizontalkraft größer wird als der Schub des Mittelschiffgewölbes (Abb. 4a, b).

Die Langzeitverformungsmessungen zeigen die Wirksamkeit der Maßnahme (Abb. 5). Vor und während der Umsetzung der Maßnahmen war neben den durch die jahreszeitlich bedingten Temperaturschwankungen hervorgerufenen Verformungen eine kontinuierliche Bewegung des Querschnitts nach Norden erkennbar. Diese Bewegung ist in den letzten Jahren nahezu zum Stillstand gekommen (Abb. 5).

Beispiel 2: Simulation von Behaglichkeit, Energieeffizienz und Schadensfreiheit am Beispiel der Villa Castelli am Comer See

Die Villa Castelli am Comer See sollte nicht mehr nur als Feriendomizil, sondern das ganze Jahr über zu Wohnzwecken genutzt werden (Abb. 6a–b). Das Probewohnen für ein paar Monate im unsanierten Gebäude hatte gezeigt, dass es auch bei Heizung auf Höchstleistung unerträglich zugig blieb und der Brennstoffbedarf sehr hoch war. Architekt und Energieberater schlugen – als Teil eines größeren Sanierungspakets inklusive Restaurierung der Fassade und nachhaltiger Heiz- und Lüftungstechnik – die Dämmung der bis zu einem halben Meter dicken Steinwände mit 20 Zentimeter Perlite an der Innenseite der Wand vor. Die Wärme, die im Winter durch die Wand verloren geht, sinkt dadurch auf weniger als ein Fünftel; durch die höhere Oberflächentemperatur ist es im Raum deutlich behaglicher.⁷

Besonders wichtig aber war es zu prüfen, ob es in den Balkenköpfen in der wegen der Dämmung nun kalten Steinwand zu gefährlich hohem Feuchtigkeitsniederschlag kommt. Dazu wurde der in die Steinmauer

einbindende Balkenkopf als 2D-Detail mit dem Simulationsprogramm Delphin⁸ für Wärme- und Feuchte-transport modelliert (Abb. 6c). Zur Charakterisierung der Materialien im Programm sind die typischen Werte aus dem Datenblatt nicht ausreichend, notwendig sind gemessene Kurven wie zum Beispiel die Sorptionsisotherme (wie viel Wasser nimmt das Material bei welcher Umgebungsfeuchte auf), die feuchteabhängige Wärme-, aber auch die Wasserdampf- und Flüssigwasserleitfähigkeit et cetera. Für die neuen Materialien waren die Datensätze in Delphin vorhanden; für den Bestand (Holzbalken, Stein, Mörtel, Kalkputz) wurden aufgrund der Angaben des Architekten möglichst entsprechende Datensätze aus der Delphin-Datenbank ausgewählt, in der auch eine Reihe von historischen Materialien, die unter anderem in Forschungsprojekten gemessen worden sind, verfügbar sind.

Als Klimarandbedingung konnte auf stündlich gemessene Werte der nahe gelegenen Wetterstation zurückgegriffen werden, wobei von den beiden zur Verfügung stehenden Jahren mit Regenniederschlagsmengen das in Bezug auf Schlagregen kritischere gewählt wurde.⁹ Besonders wichtig war auch, dass Schlagregen berücksichtigt werden konnte, da dieser sich wesentlich auf das Durchfeuchtungs- und Trocknungsverhalten der Wand auswirkt.

In den Simulationen können die für die Konstruktion kritische Zeiten und Orte bestimmt werden. Für die Darstellung der zeitlichen Entwicklung eignet sich besser ein Liniendiagramm (Abb. 6d). Für die Villa Castelli konnte die Simulation zeigen, dass die Feuchtwerte im Holzbalken im unkritischen Bereich bleiben. Dieselbe Konstruktion würde aber zum Beispiel im Klima der Region um Essen zu Feuchteschäden führen.

Für das Ergebnis einer Simulation gilt, dieses stets auf Plausibilität zu prüfen. Die Simulation ist ein Hilfsmittel, ein Werkzeug, welches hilft zu quantifizieren und das somit Dialog und Lösungsfindung unterstützt.



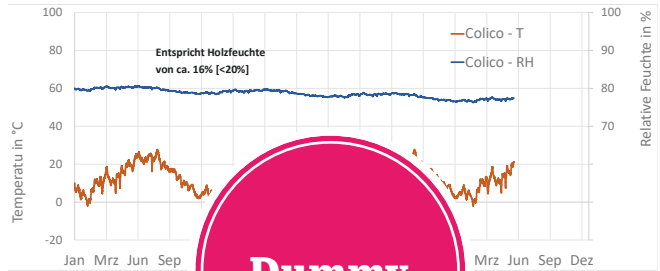
a.



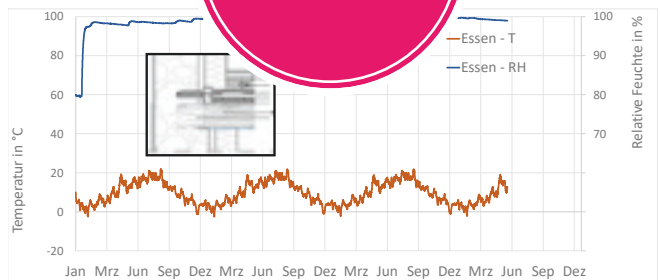
b.



c.



d.



e.

6. Villa Castelli am Comer See: (a) mit Detail der Fassadenrestaurierung (b). 2D-Detail der Feuchtigkeitsverteilung in der Wand und am Balkenkopf (c) sowie Temperatur und Feuchtigkeit am Balkenkopf als Liniendiagramm (d, e) – schadensfrei für das Klima am See, aber potenziell kritisch im Klima der Region um Essen.

Eine Simulation ist immer so gut wie die Eingangswerte, die man ihr zugrunde legt. Die gewählten Modelle sollten hierbei alle wesentlichen physikalischen Phänomene abbilden.

Beispiel 3: Kolorimetrisch und geometrisch korrekte 2D- und 3D-Aufnahmen von Kaisersälen in Residenzen in Bayern

Im Frühjahr 2018 wurde ein Kooperationsprojekt zwischen dem Kompetenzzentrum Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien der Universität Bamberg,¹⁰ dem dortigen Arbeitsbereich Digitale Denkmaltechnologien, dem Departement für Kunst-

geschichte der LMU München, Foto Marburg sowie dem Akademieprojekt »Corpus der barocken Deckenmalereien in Deutschland« in einem privaten niederbayerischen Schloss durchgeführt.

In dessen zweitem Obergeschoss, das komplett mit einem Malereizyklus ausgemalt ist, befindet sich ein prachtvoller Kaisersaal. Vor Ort wurden von den Fotografen von Foto Marburg orthografische hochauflösende und dann farblich kalibrierte Bilder angefertigt. Das Bamberger Team erstellte dazu mithilfe eines terrestrischen 3D-Laserscans (Abb. 7a), des Structure from Motion-Verfahrens und Panoramafotografien hochauflösende digitale Aufnahmen des Kaisersaals. Nachbearbeitet wurden diese durch Texturierung mit den farbkalibrierten Fotografien, welche



7a. Mitarbeiter des KDWT bei der Bedienung des 3D-Laserscanners im Kaisersaal des Schlosses (links);
b. Außendarstellung des 3D-Modells des Innenraumes des Kaisersaales mit hochauflösenden Texturen aus
Fotografien (rechts)

mit den hochauflösenden 3D-Oberflächenmessungen (ca. 1 Millimeter Punktabstand) überlagert wurden (Abb. 7b).¹¹

Die dreidimensionalen digitalen Aufnahmen können das Verständnis der Architektur des Raumes und seiner Ausmalung, also des barocken Ausbaus ermöglichen: Eine Darstellung der reinen Geometrie ohne Farbe gibt Aufschluss über die Form der Raumhülle vor Ausmalung mit der illusionistischen Deckenmalerei. Die Ansicht in 3D mit der Darstellung von Geometrie und Farbe erlaubt die Zusammenschau der Konzeption von malerischer Decken- und Wandgestaltung sowie aufwendiger Architekturglieder wie Wandsäulen, Statuen in Wandnischen und Kaminen.

Der mit einem Festgelage oder einem Göttermahl ausgemalte benachbarte Speisesaal wurde durch den späteren Einbau eines Theaters im späten 18. Jahrhundert verändert. Da auch die Theatereinbauten historisch bemerkenswert sind und keinesfalls entfernt werden können, ist die ursprüngliche Gesamtheit der Malerei durch einen Beobachter nur eingeschränkt wahrnehmbar. Hier kann nichtinvasiv eine virtuelle Rekonstruktion – durch digitale Löschung der Einbauten – annähernd den ursprünglichen Zustand des Raumes wieder erfahrbar machen.

Die digitale hochauflösende Bauaufnahme in 3D in Farbe und Geometrie erlaubt zudem die virtuelle Zugänglichkeit durch die Wissenschaftler zu einem späteren Zeitpunkt. Eine Interpretation und Gesamtschau der Räume mit Wand und Decke kann sich nun auf wissenschaftliche Messwerte stützen, die über

den klassischen Grundriss und Schnitt hinausgehen. Jede der drei Aufnahmemethoden eignet sich, um die Räume anschließend in einer virtuellen Realität wiederzugeben oder in eine interaktive virtuelle Umgebung zu übersetzen.

Der Studiengang Digitale Denkmaltechnologien (DDT)

Als eine Antwort auf diese Fortschreibung der Denkmalpflege ist der Studiengang M.Sc. *Digitale Denkmaltechnologien* in enger Zusammenarbeit der Otto-Friedrich-Universität Bamberg und der HAW Coburg entstanden.¹² Dieser Studiengang bietet einen Überblick über die Leistungsfähigkeit und Grenzen derzeitiger und in Entwicklung befindlicher Technologien und widmet sich der zukunftsweisenden Ausbildung von Akteuren der Integration der digitalen Technologien in der Denkmalpflege. Der Studiengang wendet sich an Studierende mit dezidiertem Interesse an technischen Zusammenhängen und bietet eine Verbindung von klassischer Denkmalpflege, ingenieurtechnischen Herangehensweisen und dem Erwerb informatischer Kompetenzen. Er ist durch eine Initiative »Bayern Digital« der bayerischen Staatsregierung und des Programms »Digitaler Campus Bayern«,¹³ das auf verbesserte Infrastrukturen zur Anwendung digitaler Arbeitstechniken in Studium und Lehre sowie auf die Vermittlung vertiefter IT-Kenntnisse abzielt, entstanden.

ANMERKUNGEN

- 1 Natke, Hans Günther: *Einführung in die Zeitreihen- und Modalanalyse*. Wiesbaden 1992.
- 2 Oeljeklaus, Michael: *Ein Beitrag zur Systemidentifikation. Das Projektive Eingangsgrößenverfahren und das Regularisierte Ausgangsgrößenverfahren im Frequenzbereich für unvollständige Messungen*. Hannover 1999 (<http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e002/270332359.pdf>; abgerufen am 18.10.2019); Huth, Olaf: *Ein adaptiertes Polyreferenz-Verfahren und seine Anwendung in der Systemidentifikation*. Dissertation Bauhaus-Universität. Weimar 2002.
- 3 Huth, Olaf, Gresik / Gerhard, Keßler, E.: *Von der digitalen Bauaufnahme zum Modell*. Vortrag anlässlich der BIM-Konferenz München 2018.
- 4 Generalinstandsetzung aller Dachtragwerke, der Maßwerkfenster im Ostchor und Instandsetzung des Langhausquerschnittes in den Jahren 2004–2009; Planung durch Barthel & Maus – Beratende Ingenieure, München.
- 5 Vermessungsbüro Hans-Jörg Blume, Garching.
- 6 LGA Landesgewerbeanstalt Bayern.
- 7 Troi, Alexandra / Stuffer, Oscar / Carì, Valentina: Villa Castelli: Sanierung mit Innendämmung auf nZEB-Standard. Nutzerüberlegungen zur Nachhaltigkeit, in: *Denkmal und Energie* 2018. Osnabrück 2017, S. 161–175.
- 8 <http://bauklimatik-dresden.de/delphin/> (abgerufen am 04.10.2019).
- 9 Troi, Alexandra / Stuffer, Oscar / Carì, Valentina / Exner, Dagmar: *Energetische Sanierung von Baudenkmalen am Beispiel Sanierung der Villa Castelli am Comer See*. In: Tagungsunterlage, 3. Innendämmkongress. Dresden 2015, S. 121–132.
- 10 Website des Kompetenzzentrums Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien (KDWT) der Otto-Friedrich-Universität Bamberg: <https://www.uni-bamberg.de/kdwt/> (abgerufen am 17.10.2019).
- 11 Hess, Mona: Corpus Barocke Deckenmalereien. Schloss Arnstorf in Niederbayern. Projekte Digitale Denkmaltechnologien. In: Arera-Rütenik, Tobias / Breitling, Stefan / Drewello, Rainer / Hess, Mona / Vinken, Gerhard (Hrsg.): *Kompetenzzentrum Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien 2016–2018* (Berichte aus dem KDWT, Bd. 1). Bamberg 2019, S. 42–43.
- 12 Webseiten des Studienganges: <https://www.uni-bamberg.de/ma-digitale-denkmaltechnologien/> beziehungsweise <https://www.hs-coburg.de/studium/master/bauen-design/digitale-denkmaltechnologien.html> (abgerufen am 4.10.2019).
- 13 <https://www.stmwk.bayern.de/studenten/digitalisierung/hochschule-digitaler-campus.html> (abgerufen am 04.10.2019).