Der Modelle Tugend 2.0

→ Digitale 3D-Rekonstruktion als virtueller Raum der architekturhistorischen Forschung

Herausgegeben von Piotr Kuroczyński, Mieke Pfarr-Harfst und Sander Münster

arthistoricum.net
FACHINFORMATIONSDIENST KUNST · FOTOGRAFIE · DESIGN

Der Modelle Tugend 2.0

Band 2

Computing in Art and Architecture

→ Eine Buchreihe des Arbeitskreises Digitale Kunstgeschichte und der Arbeitsgruppe Digitale 3D-Rekonstruktion

Herausgegeben von Piotr Kuroczyński, Peter Bell, Lisa Dieckmann, Stephan Hoppe und Sander Münster

ARBEITSKREIS DIGITALE KUNSTGESCHICHTE

ARBEITSGRUPPE DIGITALE 3D-REKONSTRUKTION

ARBEITSGRUPPE DER DIGITAL HUMANITIES IM DEUTSCHSPRACHIGEN RAUM e.V.

Der Modelle Tugend 2.0

→ Digitale 3D-Rekonstruktion als virtueller Raum der architekturhistorischen Forschung

Herausgegeben von
Piotr Kuroczyński, Mieke Pfarr-Harfst und Sander Münster

arthistoricum.net
FACHINFORMATIONSDIENST KUNST · FOTOGRAFIE · DESIGN

Mit freundlicher Unterstützung von:

→ Hochschule Mainz – University of Applied Sciences

→ DHd – Digital Humanities im deutschsprachigen Raum e. V.

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie, detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über **http://dnb.ddb**.de abrufbar.

Dieses Werk ist unter der Creative Commons-Lizenz 4.0 (CC BY-NC-ND 4.0) veröffentlicht. Die Umschlaggestaltung unterliegt der Creative-Commons-Lizenz CC BY-NC-ND 4.0.

arthistoricum.net
FACHINFORMATIONSDIENST KUNST · FOTOGRAFIE · DESIGN

Publiziert bei arthistoricum.net, Universitätsbibliothek Heidelberg 2019. Die Online-Version dieser Publikation ist auf **www.arthistoricum.net** dauerhaft frei verfügbar (Open Access).

urn: urn:nbn:de:bsz:16-ahn-artbook-515-0
doi: https://doi.org/10.11588/arthistoricum.515

Text © 2019. Das Copyright der Texte liegt beim jeweiligen Verfasser.

Gestalterisches Konzept
Yvonne Kümmel

Gestaltung | Illustration | Satz
Michael Sherman

ISSN 2626-9538 (Print)
ISSN 2626-9546 (Online)
ISBN 978-3-947449-68-2 (PDF)
ISBN 978-3-947449-69-9 (Softcover)
ISBN 978-3-947449-70-5 (Hardcover)

HOCHSCHULE MAINZ
UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES

DHd digital humanities im deutschsprachigen raum

Inhaltsverzeichnis

Vorwort → 013
Einführung → 017
Memorandum → 021

Kapitel 1 Grundlagen

Stephan Hoppe → 031
Einführung

Sander Münster → 039
A. Die Begrifflichkeiten der 3D-Rekonstruktion

Heike Messemer → 059
B. Das digitale Modell historischer Architektur –
Seine Ursprünge, Technologien und Protagonisten

Horst Stenzel → 079
C. Technologie-Entwicklung
im Kontext digitaler 3D-Rekonstruktion

Gerd-Helge Vogel → 099
D. Die Sichtbarmachung des Unsichtbaren:
Ästhetische Konventionen in Rekonstruktionsmodellen

Reinhard Wendler → 125
E. Einst: Die Zeitstruktur der Architekturmodelle

Georg Schelbert → 137
F. Ein Modell ist ein Modell ist ein Modell –
Brückenschläge in der Digitalität

Kapitel 2 Darstellungs- und Vermittlungsformen

Fabrizio Apollonio, Oliver Hauck → 155
Einführung

Andreas Noback → 163
G. Lichtsimulation in der digitalen
Rekonstruktion historischer Architektur

Dmitry Karelin, Maria Karelina → 187
H. Methods of reconstructions' presentation and
the peculiarities of human perception

Sebastian Hageneuer → 203
I. »Without Drawing the Study of Antiquities is Lame!« –
Architektur-Rekonstruktion als wissenschaftliches Tool?

Martin Papirowski → 215
J. Visuelle Echos der Vergangenheit –
3D-Rekonstruktionen im Dokumentarfilm

Niklaus Heeb, Jonas Christen → 227
K. Strategien zur Vermittlung von Fakt, Hypothese
und Fiktion in der digitalen Architektur-Rekonstruktion

Kapitel 3 Methodik

Mieke Pfarr-Harfst, Sander Münster → 256
Einführung

Marc Grellert, Mieke Pfarr-Harfst → 264
L. Die Rekonstruktion-Argument-Methode – Minimaler Dokumentationsstandard im Kontext digitaler Rekonstruktionen

Markus Wacker, Jonas Bruschke → 282
M. Dokumentation von digitalen Rekonstruktionsprojekten

Christoph Schinko, Ulrich Krispel, Robert Gregor, Tobias Schreck, Torsten Ullrich → 296
N. Generative Modellierung – Verknüpfung von Wissen und Form

Bob Martens, Peter Herbert → 314
O. Virtuelle Rekonstruktion – BIM als Rahmenbedingung für eine langfristige Nutzung von 3D-Gebäudemodellen

Kapitel 4 Wissensorganisation und -repräsentation

Piotr Kuroczyński → 330
Einführung

Erik Malcolm Champion → 338
P. From Historical Models to Virtual Heritage Simulations

Paola Ronzino → 354
Q. CRMba: An ontological model for encoding buildings archaeology documentation

Alexander Stenzer, Christina Ehrlinger, Matthias Schmid → 372
R. Ansätze zur semantischen 3D-Repräsentation von Bauwerken in Datenbanken

Peter Fornaro → 392
S. 3D-Darstellungen in virtuellen Forschungsumgebungen

Fabrizio Apollonio → 412
T. Conceptual modelling and cognitive process in 3D virtual reconstruction

Kapitel 5 Projekt-Portfolio

Piotr Kuroczyński → 432
Einführung

Fabrizio Apollonio → 434
I. From text and drawing to model

Marco Gaiani → 448
II. The history of Palladian digital 3D models from the spatial grammar to the semantic construction

Marco Canciani, Federica Chiappetta, Corrado Falcolini, Manuela Michelini, Maria Pastor Altaba, Mauro Saccone, Alice Scortecci → 476

III. A methodology for virtual reconstruction at different scales: Environmental, architectural and archaeological heritage

Edward Johnston, Michael Richison, Marina Vujnovic, William Rodriguez → 498

IV. Augmented Asbury Park: Designing Augmented Reality 3D Content

Pelle Snickars → 510

V. Metamodeling — 3D-(re)designing Polhem's Laboratorium mechanicumn

Dirk Welich, Peter Heinrich Jahn, Markus Wacker → 530

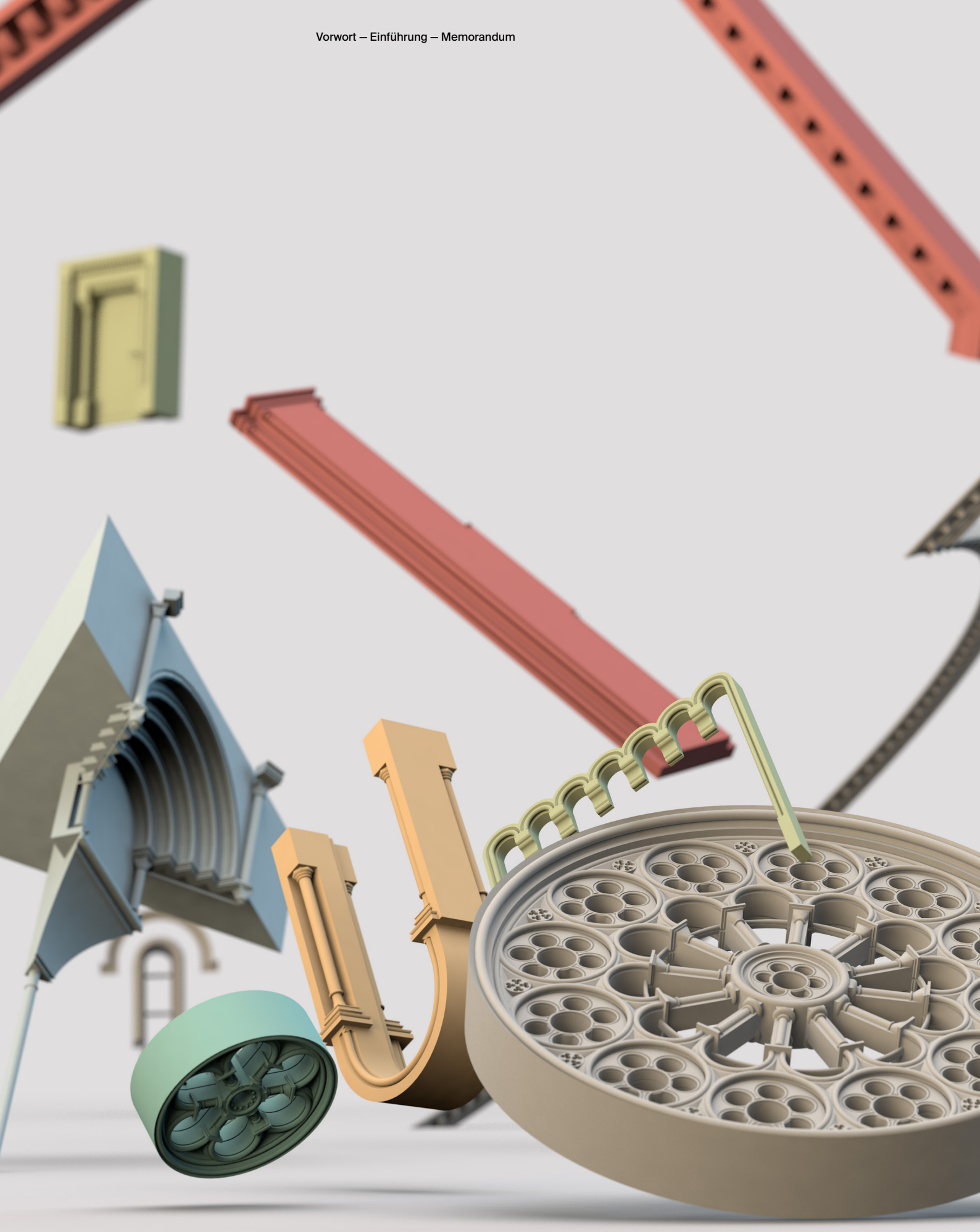
VI. Zurück in die Zukunft — Die Visualisierung planungs- und baugeschichtlicher Aspekte des Dresdner Zwingers

Piotr Kuroczyński, Dietmar Popp, Oliver Hauck, Martin Scholz, Carsten Neumann, Torsten Veit, Jan Lutteroth, Arthur Sarnitz, Daniel Dworak, Maria Pietruszka → 546

VII. Digitale 3D–Rekonstruktionen in virtuellen Forschungsumgebungen

Schlagworte → 562

Bibliografie → 566



Vorwort

Die Anwendung digitaler 3D-Rekonstruktion blickt mittlerweile auf eine über 30-jährige Geschichte zurück. Vor allem Archäologie, Kunstgeschichte und Bauforschung erkannten frühzeitig das Potenzial des **Computer Aided Design** (CAD), hauptsächlich für die Darstellung und Vermittlung von Wissen über das Kulturerbe. Das Spektrum der Anwenderdisziplinen umfasst inzwischen eine Vielzahl weiterer Disziplinen der Geisteswissenschaften wie beispielsweise Ethnologie, Musikologie oder historische Geografie.

Der informationstechnologische Fortschritt der letzten Jahre versetzt uns heute in die Lage, sowohl im Kontext des Wissenstransfers als auch in der Erforschung des kulturellen Erbes selbst solche digitalen 3D-Rekonstruktionen in unterschiedlicher Art und Weise einzusetzen. Erweitert wird die bisher vorhandene Palette an Anwendungsmöglichkeiten durch Technologien wie Game Engines, Virtual Reality und Augmented Reality, sowie durch die Verwendung von interaktiven, immersiven und vermehrten Elementen bis hin zur Re-Materialisierung der **born-digital** Modelle infolge von Rapid-Prototyping.

Betrachtet man diese computerbasierten 3D-Rekonstruktonsmodelle als Ergebnis einer (geistes-)wissenschaftlichen objekt-orientierten Auseinandersetzung und die dahinterliegenden digitalen 3D-Datensätze folgerichtig als ein räumliches Informationsmodell, dann bleiben Fragen nach der Nachvollziehbarkeit der Rekonstruktion und der langzeitlichen Zurverfügungstellung der Information, der Daten und des Wissens immer noch unbeantwortet.

Die wissenschaftliche Etablierung dieser digitalen 3D-Rekonstruktionen als Forschungsmethode fällt dabei für die jeweiligen Anwenderdisziplinen unterschiedlich aus. Die damit verbundenen Herausforderungen und bisher ungelösten Fragestellungen reichen von unklaren Begrifflichkeiten und Terminologien, fehlenden Dokumentationsstandards, einheitlichen Darstellungsformen über offene Rechtsfragen bis hin zu adäquaten Forschungsumgebungen und nicht gesicherter (Langzeit-)Verfügbarkeit.

Diese Herausforderungen waren Anlass für die bis dato nicht vernetzte Fach-Community über eine gemeinsame Arbeitsgruppe nachzudenken. So empfanden die Herausgeber die Gründung des Verbands **Digital Humanities im deutschsprachigen Raum e.V.** (DHd) und den Call für die 1. Jahrestagung an der Universität Passau als glückliche Fügung für die Einreichung eines breitaufgefassten Panels. Unter dem Titel **Pecha Kucha Virtuelle Rekonstruktion – Allgemeine Standards, Methodik und**

Dokumentation versammelten sich Kolleginnen und Kollegen, die sich schon seit Längerem dem Thema aus dem Blickwinkel der Architektur, Archäologie, Bau- und Kunstgeschichte sowie Computergrafik und Informatik gewidmet haben.

Die Gründungsmitglieder der **Arbeitsgruppe Digitale 3D-Rekonstruktion** (AGDR) nutzten die Gelegenheit, um auf der Passauer Mitgliederversammlung der DHd die Arbeitsgruppe als Plattform für einen engeren Austausch und eine feste Etablierung der digitalen 3D-Rekonstruktion innerhalb der Digital Humanities zu initiieren. 01

Vorrangiges Ziel der Arbeitsgruppe ist es, die Akteure im deutschsprachigen Raum zusammenzubringen, um sich zuerst einmal Grundsatzfragen wie Terminologie und Arbeitsmethodik sowie der Dokumentation und der Langzeitarchivierung von digitalen Rekonstruktionsprojekten zu widmen.

Die Mitglieder der AGDR sind sich bewusst, dass die Lösung der Fragen mittel- und langfristig und nur gemeinsam erfolgen kann und der Zusammenschluss innerhalb der AGDR nur den Anstoß für eine nachhaltige Entwicklung und Etablierung der 3D-Rekonstruktion als wissenschaftliche Forschungs- und Vermittlungsmethode geben kann.

Derzeit vereinigt die AGDR eine Fach-Community aus 40 deutschsprachigen Forschungseinrichtungen in Deutschland, Österreich und der Schweiz. 01 Die halbjährlichen Arbeitstreffen dienen vor allem dem Austausch über aktuelle Fragestellungen, der Festlegung zukünftiger Meilensteine im

■ **01**
http://www.digitale-rekonstruktion.info/.

☐01
Vernetzungsgrad der AG Digitale 3D-Rekonstruktion, Stand März 2019.

Sinne des Gesamtzieles und weiterhin zur Abstimmung gemeinsamer Forschungsprojekte und Tagungsauftritte.

Hier muss vor allem das erste Arbeitstreffen an der TU Darmstadt Erwähnung finden, in dessen Vorfeld die Idee zu der hier vorliegenden Publikation der Arbeitsgruppe geboren wurde. Dies geschah nicht ohne Vorsatz, denn das Buchprojekt war bewusst als eine Brücke zu der rund 15 Jahre zuvor am Fachbereich Architektur der TU Darmstadt organsierten Tagung **Der Modelle Tugend: CAD und die neuen Räume der Kunstgeschichte** und der gleichnamigen Publikation konzipiert. 02 Die aktuelle Publikation der AGDR nimmt nicht nur im Titel Bezug auf diese Tagung aus dem Jahre 2000, sondern sieht sich gewissermaßen auch inhaltlich als eine Fortschreibung dieser ersten Diskussion. Umso mehr freuen wir uns, in unserer Fortsetzung des Themas einige Autoren von damals mit reflektierter Sicht und neuen Ansätzen begrüßen zu können.

■ **02**
Marcus Frings (Hg.), Der Modelle Tugend: CAD und die neuen Räume der Kunstgeschichte, visual intelligence / Kulturtechniken der Sichtbarkeit, Weimar, 2001.

Die Publikation **Der Modelle Tugend 2.0 → Digitale 3D-Rekonstruktion als virtueller Raum der architekturhistorischen Forschung** fasst die digitale 3D-Rekonstruktion als Bestandteil einer interdisziplinären Forschung vor dem Hintergrund einer 30-jährigen Geschichte auf und will übergreifende Methoden an der Schnittstelle der eingangs erwähnten Disziplinen und im Kontext des kulturellen Erbes aufzeigen.

Übergreifendes Anliegen des Buches ist es, die Bandbreite des aktuellen wissenschaftlichen Diskurses zu digitaler 3D-Rekonstruktion aufzugreifen und dabei sowohl Traditionen und Entwicklungslinien als auch einen aktuellen Forschungs- und Praxisstand sowie künftige Herausforderungen und Desiderate darzustellen. Die Diskussion von Einzelaspekten findet unter Beachtung des internationalen Forschungsstandes sowie spezifischer Anforderungen der deutschen Wissenschaftslandschaft statt. Die Darstellung erfolgt bevorzugt projekt- und technologieübergreifend. Die besondere Bedeutung von Projekten für die Entwicklung und Trendsetzung wird in einem abschließenden Kapitel gewürdigt. Das brisante Thema einer nachvollziehbaren und nachhaltigen Dokumentation von Forschungserkenntnissen und Ergebnissen einer digitalen 3D-Rekonstruktion zieht sich analog der Behandlung von Technologien und Projekten durch viele Einzelaspekte hindurch.

Hinsichtlich der Zielgruppe richtet sich dieses Buch damit einerseits an Studierende, Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler und Interessierte, die einen fundierten Überblick auf dem Gebiet der digitalen 3D-Rekonstruktion erhalten wollen. Diesen Lesern soll das Buch Orientierungswissen vermitteln und einen Einstieg in das Themenfeld ermöglichen. Darüber hinaus adressiert das Buch die **Fach-Community** und zeigt eine aktuelle Verortung ebenso auf wie es Grundlage für weiterführende Diskurse und Arbeitsschwerpunkte bilden soll.

Zu danken haben wir der Hochschule Mainz und dem Verband der Digital Humanities im deutschsprachigen Raum e.V. für die finanzielle Unterstützung.

Einführung

In Hinblick auf die Buchstruktur wird jedes Kapitel von einem Einführungsaufsatz eingeleitet, welcher die jeweilige Thematik definiert, die Aufgabe des Kapitels mit Blick auf das gesamte Buch abgrenzt sowie untersuchungsleitende Fragestellungen und Aspekte vorstellt. In den Kapiteln verankerte Einzelaufsätze dienen folgend der umfassenden Erörterung der Einzelaspekte aus einer bevorzugt technologie- und projektübergreifenden Perspektive.

- → Kapitel 1
  »Grundlagen« (**Hoppe → 031**)
- → Kapitel 2
  »Darstellungs- und Vermittlungsformen« (**Apollonio, Hauck → 155**)
- → Kapitel 3
  »Methodik« (**Münster, Pfarr-Harfst → 256**)
- → Kapitel 4
  »Wissensorganisation und -repräsentation« (**Kuroczyński → 330**)
- → Kapitel 5
  »Projekt-Portfolio« (**Kuroczyński → 432**)

Das Kapitel **Grundlagen** (**Hoppe → 030**) nähert sich dem Thema der visuellen und speziell digital gestützten Rekonstruktion historischer Architekturen vor allem aus einer historischen Perspektive, die durch sinnvolle systematische Ausblicke ergänzt wird. Die digitale 3D-Rekonstruktion knüpft an eine längere und komplexe Geschichte der wissenschaftlich und künstlerisch eingebundenen bildlichen Vergegenwärtigung nicht mehr vorhandener Bauten an, die in Europa in der Epoche der Renaissance begann. Vor allem mit dem Wiedererwachen des Interesses an der Gestalt verlorener antiker Bauten entwickelten sich Strategien der theoretischen Rekonstruktion. Diese Ansätze des 16. Jahrhunderts wurden später durch die institutionalisierten Altertumswissenschaften erweitert, und es entwickelte sich eine reiche Kultur der theoretischen wissenschaftlichen Rekonstruktion, vor allem in den Medien der Zeichnung, des Gemäldes, und der haptischen Modelle in verkleinertem Maßstab. Mit der Einführung von digitalen Planungswerkzeugen für den Entwurf aktueller Architektur kam in den 1980er Jahren die Idee auf, damit auch historische Bauten in ihren räumlichen Qualitäten zu (re-)konstruieren und die Ergebnisse zu visualisieren. Ein Teilbereich des Kapitels ist der Bildgeschichte dieses digitalen Mediums gewidmet, also einer

Art Medienarchäologie, die hier erstmals für diesen Bereich versucht wird. Dabei sollen einige Meilensteine der digitalen 3D-Rekonstruktion, zentrale Protagonisten und beteiligte Institutionen vorgestellt werden und der Kontext ihrer wissenschaftlichen Ansätze erstmals im Zusammenhang skizziert werden.

Weitere Beiträge stellen die zu Grunde liegende technologische Entwicklung in ihren Hauptzügen vor und versuchen einen Überblick über die einzelnen Typen von digitalen 3D-Rekonstruktionen und die verwendete Terminologie eines international geführten Diskurses zu geben. Eine Modelltheorie im kulturhistorischen Diskurs und Epistemologie des 3D-Modellierens mit Ausblicken hin zu zukünftigen Anwendungspotentialen rundet den Themenkomplex ab.

Das Kapitel **Darstellungs- und Vermittlungsformen** (**Apollonio, Hauck → 155**) umkreist das vielfältige Thema der visuellen Repräsentation und Rezeption. Im Spannungsfeld von Illusion und Immersion existiert ein breites Spektrum von Darstellungs- bzw. Publikationsformen digitaler 3D-Rekonstruktionen, die sich nicht nur in ihrer Perzeption, sondern auch in ihren technischen Anforderungen sowie im Erstellungsaufwand massiv unterscheiden. Einleitend soll ein Überblick über die verschiedenen Darstellungsmöglichkeiten und die ihnen immanenten Eigenschaften und Anforderungen gegeben werden. Es soll der Frage nachgegangen werden, ob und inwiefern die Visualisierungsmethode Einfluss auf die Modellerstellung selbst hat und wo die Grenzen zwischen wissenschaftlich fundierbaren, nachvollziehbar zu machenden Entscheidungen und solchen rein künstlerischer Natur liegen. Dies ist eine Frage, die im wissenschaftlichen Diskurs bisher erstaunlich geringe Beachtung fand, dreht sich doch der Diskurs momentan hauptsächlich um Fragen der Nachvollziehbarkeit der Modellierung (wobei hier die Frage der Verknüpfung des Modells und seiner Quellen überwiegt).

Zuletzt soll die Frage diskutiert werden, ob die allgemein als Desideratum angesehenen Standards für digitale 3D-Rekonstruktionen überhaupt gebraucht werden, oder ob nicht die Forderung nach Werkzeugen zur wissenschaftlichen Diskurseinbindung, mithin also zur Herstellung der Zitierbarkeit der Modelle und ihrer Visualisierungen, insbesondere im Hinblick auf den rückwirkenden Umgang mit bestehenden 3D-Modellen und Visualisierungen wichtiger ist, da dies den Rückgriff auf die existierenden Standards wissenschaftlicher Arbeit erlaubt.

Das Kapitel **Methodik** (**Münster, Pfarr-Harfst → 256**) erörtert Arbeitsprozesse und methodologische Prinzipien digitaler 3D-Rekonstruktion. Dies umfasst die Frage nach technologischen Herangehensweisen, Zielsetzungen sowie Akteurs- und Projektkonstellationen. Dazu gehören beispielsweise unterschiedliche Erstellungsparadigmen, welche von der Darstellung von Oberflächen mittels Computer Aided Design (CAD) über landschaftsräumliche Geoinformationssysteme (GIS) bis hin zum Denkmalmanagement mittels Raumbüchern oder historischen Building Information Managment (BIM) Systemen reicht. Diese Paradigmen bedingen einerseits unterschiedliche Arbeitsweisen und technologische Werkzeuge, zielen andererseits auf verschiedene Rekonstruktionsinhalte und -anwendungen ab.

Darüber hinaus soll beleuchtet werden, wie sich diese Rahmenbedingungen in der Erstellung von derartigen Modellen widerspiegeln und wie ein Erkenntnis- und Modellaufbau ebenso wie methodologische Anforderungen in der Anwendungspraxis digitaler 3D-Rekonstruktion definiert werden. Vor dem Hintergrund, dass eine ganze Reihe elaborierter Standards und Vorgehensmodelle, wie beispielsweise die Londoner Charta, Leitlinien zur 3D-Rekonstruktion definieren, stellt sich zudem die Frage, ob und wie derartige Vorgaben Eingang in die Anwendungspraxis finden und wie ein idealtypischer Prozess definiert ist.

Das Kapitel **Wissensorganisation- und repräsentation** (**Kuroczyński → 329**) möchte einen Einblick in diese Themen innerhalb der Domäne der digitalen Rekonstruktion mit ihren 3D-Datensätzen geben und auf die domänenspezifischen Möglichkeiten, Chancen, aber auch die Herausforderungen einer Formalisierung und Operationalisierung des Wissens eingehen.

Die Potenziale von Linked Open Data, insbesondere die Strukturierung und Verknüpfung von Wissen über Bereichsgrenzen hinweg zu einem globalen Graphen für die Wissensdomäne sowie die Möglichkeiten web-basierter kollaborativer Arbeitsumgebungen, ziehen immer mehr Forschungsprojekte der Digital Humanities in ihren Bann.

Die Komplexität der Aufgaben stellt geisteswissenschaftlich grundierte Projekte vor neue Herausforderungen. Unter anderem stellt sich die Frage nach dem, was, wie und in welchen Umfang dokumentiert werden muss. Darauf folgt die Fragestellung nach adäquaten Thesauri, den Verknüpfungen zu kontrollierten Vokabularen und Normdaten sowie nach einer passgenauen Referenzierung auf internationale Standards, wie die Referenzontologie CIDOC CRM. Darüber hinaus muss im Kontext der postulierten **neuen Datenkultur** die Frage nach Strategien für eine Interoperabilität und Langzeitverfügbarkeit der Information adressiert werden. Und schließlich müssen Antworten an adäquate virtuelle Forschungsumgebungen und digitale Forschungsinfrastrukturen gefunden werden.

Die Beiträge des Kapitels setzten sich mit dem Thema der digitalen Erschließung der Forschungsdaten, der konzeptionellen Modellierung, der Erweiterung der Referenzontologie von CIDOC CRM, der web-basierten 3D-Darstellung und einer virtuellen Forschungsumgebung auseinander. Sie sollen an dieser Stelle den aktuellen Diskurs im Kontext der Wissensrepräsentation sowie neuer virtueller Räume für die objektbasierte Forschung punktuell beleuchten und die Bedeutung der Datenmodellierung in den Fokus stellen.

Das Kapitel **Projekt-Portfolio** (**Kuroczyński → 432**) widmet sich der exemplarischen Darstellung von Vorhaben. Seit jeher sind Projekte eine wichtige Triebfeder, um Forschung nicht nur auf dem Gebiet der digitalen 3D-Rekonstruktion voranzubringen. Aus diesen Grund soll eine Auswahl einen Einblick in Themenstellungen und Forschungsfragen, aber auch Arbeitskonstellationen und Ergebnisse von Projekten im Feld der digitalen 3D-Rekonstruktion anbieten.

Abschließend führt die Publikation eine einzigartige Zusammenstellung einschlägiger **Bibliografie** (**→ 570**) auf dem Gebiet der digitalen 3D-Rekonstruktion auf.

Henning Burwitz, Marc Grellert, Frank Henze, Cindy Kröber, Piotr Kuroczyński, Dominik Lengyel, Sander Münster, Mieke Pfarr-Harfst, Nikolas Prechtel, Georg Schelbert, Catherine Toulouse, Markus Wacker

Memorandum: Aktuelle Herausforderungen im Kontext digitaler 3D-Rekonstruktion

Durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) wurde 2014 der Agendaprozess »Zukunft sichern und gestalten — Forschung zu den großen gesellschaftlichen Herausforderungen« initiiert. Dieser diente dazu, zukünftige Themenschwerpunkte sozial- und geisteswissenschaftlicher Forschung zu Themen von besonderer gesellschaftlicher Relevanz zu identifizieren. Als Beitrag zu diesem Prozess wurde von Mitgliedern der Arbeitsgruppe Digitale 3D-Rekonstruktion unter Leitung von **Sander Münster** (**→ 039**) das nachfolgende Memorandum erstellt. Dies erfolgte mit dem Ziel, den aktuellen Status der digitalen 3D-Rekonstruktion als Forschungsfeld darzustellen und damit verbundene Herausforderungen und Bedarfe sowie zukünftige Entwicklungsschwerpunkte aufzuzeigen.

Präambel

Einordnung von digitaler 3D-Rekonstruktion

Digitale Rekonstruktionen besitzen als Wissensträger, Forschungswerkzeug und Darstellungsmittel eine zunehmende Bedeutung für die nachhaltige Bewahrung, Erforschung und breite Zugänglichmachung materiellen, immateriellen und digitalen Kulturerbes. Im Mittelpunkt digitaler Rekonstruktion steht die Erschaffung eines spatialen, temporalen und semantischen virtuellen Modells. Wesentliche Unterscheidungen betreffen dabei die Art des Untersuchungsgegenstandes in Form materieller und immaterieller Objekte (beispielsweise Bräuche). Darüber hinaus hinsichtlich eines Arbeitsvorgehens wesentlich ist die Unterscheidung zwischen einer Rekonstruktion nicht mehr existenter oder nie realisierter Objekte (beispielsweise nie realisierter Planungsstände) und der Digitalisierung noch existenter Objekte. 01 Während eine Digitalisierung die Perspektive einer technologischen Übertragung eines Objektes in ein Digitalisat (beispielsweise mittels einer semi-automatischen Modellierung anhand von Laserscans) bezeichnet, beinhaltet ein digitaler Rekonstruktionsprozess die Notwendigkeit zur menschlichen Interpretation von Daten.

■ 01
G. De Francesco, A. D'Andrea, Standards and Guidelines for Quality Digital Cultural Three-Dimensional Content Creation, in: M. Ioannides (Hg.): Digital Heritage: Proceedings of the 14th International Conference on Virtual Systems and Multimedia. Project Papers, Budapest 2008, p. 229–233; R. Beacham, H. Denard et al., An Introduction to the London Charter, in: M. Ioannides (Hg.), Papers from the Joint Event CIPA / VAST / EG / EuroMed Event, 2006, p. 263–269; M. Pfarr-Harfst, Dokumentationssystem für Digitale Rekonstruktionen am Beispiel der Grabanlage Zhaoling, Provinz Shaanxi, China (Dissertation), Darmstadt, 2009.

State-of-the-Art

Mit Blick auf einen Etablierungsgrad haben digitale Rekonstruktionen in der Praxis inzwischen sowohl im akademischen als auch im kommerziellen Umfeld vielfältig Anwendung gefunden. Digitale Rekonstruktionen erfolgen aktuell zumeist im **Einzelzusammenhang** mit **spezifischen Anwendungshorizonten**, durch **interdisziplinäre Arbeitsgruppen** und unter **Nutzung von Expertentechnologien**. Gerade vor diesem Hintergrund stellt sich die Schwierigkeit, dass eine Fülle von Standards sowie Leit- und Richtlinien zum Umgang mit kulturhistorischen Inhalten existieren, welche jedoch nur eingeschränkte Praxisrelevanz besitzen. 02 Demgegenüber hat sich das Konzept der Metadaten als Ansatz zur Klassifikation und Beschreibung von kulturgeschichtlichen Informationen inzwischen weitgehend etabliert. Auch wenn mit CIDOC-CRM 03 eines dieser Schemata inzwischen als Referenzontologie (im Sinne eines generischen Wissensstrukturkonzeptes) Popularität in der Archäologie erlangt hat, präsentieren sich sowohl eine Landschaft existierender Metadatenstandards als auch deren Umsetzung höchst heterogen. 04 Ebenso sind bisherige Ansätze zur nachhaltigen Dokumentation des Erstellungsprozesses digitaler Rekonstruktionen trotz vielfältiger und innovativer Konzepte 05 in der Praxis nur wenig etabliert 06. Eine internationale wissenschaftliche Community ist durch Akteure aus Südeuropa, Großbritannien sowie den USA geprägt und greift vor allem Perspektiven der Archäologie sowie der Cultural Heritage Conservation auf. 07 Im deutschsprachigen Raum beschäftigt sich eine Vielzahl von Akteuren aus Wissenschaft und Wirtschaft mit Themen um die digitale 3D-Rekonstruktion. Für einen disziplin- und anwendungsübergreifenden wissenschaftlichen Diskurs fehlen bisher aber etablierte Podien.

02
P. Kuroczyński, Pecha Kucha »Virtuelle Rekonstruktion – Allgemeine Standards, Methodik und Dokumentation« (Panel), in: Panel bei der 1. Jahrestagung der Digital Humanities im deutschsprachigen Raum (DHd 2014), Passau 2014; S. Münster, T. Köhler, 3D modeling as tool for the reconstruction and visualization of »lost« buildings in humanities, in: S. Hoppe, S. Breitling et al. Virtual Palaces II: Lost Palaces and Their Afterlife. Munich, 2012, S. 89–104.

03
M. Doerr, The CIDOC CRM – An Ontological Approach to Semantic Interoperability of Metadata, in: AI Magazine, 24 (3) 2003.

04
P. Ronzino, N. Amico et al., Assessment and Comparison of Metadata Schemas for Architectural Heritage, in: Proceedings of XXIII CIPA Symposium, Prague, 2011; A. Felicetti, M. Lorenzini, Metadata and tools for integration and preservation of cultural heritage 3D information, in: idem.; P. Ronzino, F. Niccolucci et al., Built Heritage metadate schemas and the integration of architectural datasets using CIDOC-CRM, in: M. Boriani, R. Gabaglio et al., Online Proceedings of the Conference BUILT HERITAGE 2013 Monitoring Conservation and Management, Milano, 2013, S. 883–889.

05
M. Pfarr-Harfst, Documentation system for digital reconstructions, in: Wolfgang Börner, Susanne Uhlirz et al., CHNT 16, 2011 – PROCEEDINGS, Wien, 2011, S. 648–658; F. Niccolucci, Setting Standards for 3D Visualization of Cultural Heritage, in: A. Bentkowska-Kafel, H. Denard et al., in Paradata and Transparency in Virtual Heritage, Burlington, 2012, S. 23–36.

06
A. Bentkowska-Kafel, H. Denard, D. Baker, Paradata and Transparency in Virtual Heritage, Burlington, 2012.

Aktuelle Förderlandschaft

Mit Blick auf eine Förderlandschaft adressiert das BMBF aktuell beispielsweise die Untersuchung geisteswissenschaftlicher Fragestellungen mittels digitaler Werkzeuge (**eHumanities)** sowie die wissenschaftliche Aufbereitung von Sammlungen (**Sprache der Objekte**). Ein derzeit laufendes Projekt untersucht mit BMBF-Unterstützung die raumbezogene Verortung von Inschriften. 08 Ferner untersucht werden mittels Förderung der Leibniz-Gemeinschaft der Aufbau einer virtuellen Forschungsumgebung zur webbasierten Dokumentation und Darstellung von semantischen 3D-Datensätzen zerstörter Architektur 09 sowie mit Hilfe der DFG die Dokumentation und Visualisierung archäologischer Inhalte 10. Auf europäischer Ebene adressiert die im Rahmen des Horizon-2020-Programmes zum Zeitpunkt der Entstehung des Memorandums laufende Ausschreibungen **Reflective 7** Fragen nach umfassenden Standards und Formaten für kulturgeschichtliche Informationen. 11 Ähnlich zu Richtlinien vergangener ICT-Programme zielt diese Ausschreibung dabei primär auf eine Technologieentwicklung ab. Demgegenüber fokussieren die EU-Förderungen zum Creative Europe wiederum spezifische Anwendungsfälle. 12 Durch eine aktuelle Förderlandschaft nur bedingt berücksichtigt wird, dass es sich bei digitalen Rekonstruktionen um komplexe soziotechnische Anwendungen handelt, welche inzwischen sowohl im akademischen Umfeld als auch in Museen, Medienwirtschaft und Tourismus breite Anwendung finden. Damit erwachsen sind eine ganze Reihe von Unterstützungsbedarfen, welche über eine reine Technologieentwicklung oder Einzelanwendung hinausgehen.

07
S. Münster, T. Köhler et al., 3D modeling technologies as tools for the reconstruction and visualization of historic items in humanities, in: A. Traviglia (Hg.), Across Space and Time., Amsterdam University Press, 2015, S. 430–441; A. E. Foni, G. Papagiannakis et al., A taxonomy of visualization strategies for cultural heritage applications, in: Journal on Computing and Cultural Heritage, 3 (1) 2010, S. 1–21; European Commission, Survey and outcomes of cultural heritage research projects supported in the context of EU environmental research programmes. From 5th to 7th Framework Programme, Brussels, 2011.

08
Inschriften im Bezugssystem des Raumes, http://www.spatialhumanities.de/ibr/startseite.html.

09
P. Kuroczyński, O. Hauck et al., Digital Reconstruction of Cultural Heritage – Questions of documentation and visualisation standards for 3D content, in: EUROMED, 2014.

10
OpenInfRA-Ein webbasiertes Informationssystem zur Dokumentation und Publikation archäologischer Forschungsprojekte, https://www.b-tu.de/openinfra/.

11
Reflective societies: cultural heritage and european identities, http://ec.europa.eu/research/participants/portal/desktop/en/opportunities/h2020/calls/h2020-reflective-7-2014.html.

12
Creative Europe Program, http://ec.europa.eu/programmes/creative-europe/index_en.htm.

Vorschläge und Ideen zu relevanten Themen und Fragestellungen

Eine Reihe aktueller Aufgaben der Digital Humanities im deutschsprachigen Raum wurde in einem zur Jahrestagung 2014 veröffentlichten Thesenpapier des Vorstands des Digital Humanities im deutschsprachigen Raum e. V. geschildert. [13] Darüber hinaus stellt sich eine Reihe von spezifischen Herausforderungen im Kontext digitaler Rekonstruktion:

Die Bandbreite digitaler Rekonstruktion untersuchen

Digitale Rekonstruktionen nutzen nicht nur Technologien aus der Informatik zur Bearbeitung geisteswissenschaftlicher Fragestellungen, sondern inkorporieren darüber hinaus eine Vielzahl unterschiedlicher disziplinärer Perspektiven und Verwendungskontexte. Neben der Archäologie sowie verschiedenen Aufgaben des Umgangs mit Kulturerbe als Schwerpunkte der EU-Förderung sind in der deutschen Forschungslandschaft spezifische Szenarien, beispielsweise aus Sicht der Kunst- und Architekturgeschichte, Kulturwissenschaft, Bauforschung sowie Museologie, relevant. [14] Damit verbunden ist der Bedarf einer **Erfassung und Systematisierung von Forschungs- und Nutzungsansätzen digitaler Rekonstruktion**. Diese umfassen über die Darstellung historischer Objekte hinaus die Erforschung von historischen Erstellungsprozessen (beispielsweise eines historischen, werkmeisterlichen Planungsvorgehens), die Kontextualisierung und Prüfung der Konsistenz von Quellen, die Klassifikation von Objekten und die Identifikation von Schemata (beispielsweise im Kontext der Provenienzforschung). Darüber hinaus existieren verschiedene Anwendungen jenseits eines Bezugs zu konkreten historischen Objekten, wie beispielsweise die Auslotung einer Bandbreite anhand von Architektursystemen zu schaffender hypothetischer Gebäude. [15] Als Aufgaben leiten sich die Erfassung sowohl von Good-Practice-Beispielen als auch von Forschungs- und Entwicklungsaufgaben in einer Forschungsagenda ab, wie sie beispielsweise für Cultural Heritage Research [16] und Archäologie [17] erstellt wurden.

Digitale Rekonstruktion zwischen Forschung und Praxisanwendung

Digitale Rekonstruktionen sind wie kaum ein anderer Bereich der Digital Humanities ein Querschnittsgebiet zwischen Forschung und praktischer Anwendung. Entsprechend existieren neben Fragen der Forschung und Wissenschaft vielfältige Anwendungen jenseits akademischer Nutzung – beispielsweise im Kontext von Lehre, musealer Präsentation, virtueller Touristik, Cultural Heritage Management oder Unterhaltungsmedien. [18]

■ 13
Vorstand des Verbandes Digital Humanities im deutschsprachigen Raum, Digital Humanities 2020, http://www.dhd2014.uni-passau.de/fileadmin/dokumente/projekte/digitalhumanities/DH2020-2014-2-Lang.pdf.

■ 14
A. Riedel, F. Henze et al., Paradigmenwechsel in der historischen Bauforschung?, in: K. Heine (Hg.), Der historischen Bauforschung, Darmstadt 2011, S. 131–141; H. Burwitz, F. Henze et al., Alles 3D?, in: E. I. Faulstich, A. Hahn-Weishaupt (Hg.), Dokumentation und Innovation bei der Erfassung von Kulturgütern, Band 2, 2012, Würzburg.

■ 15
S. Havemann, O. Wagener, Castles and their Landscape, in: S. Hoppe, S. Breitling et al., Virtual Palaces II: Lost Palaces and Their Afterlife., im Druck; Z. Ling, S. Ruoming et al., Rule-based 3d modeling for chinese traditional architecture, in: F. Remondino, S. El-Hakim (Hg.), 3D-ARCH, 2007, Zürich.

■ 16
D. Arnold, G. Geser, EPOCH Research Agenda – Final Report, Brighton, 2008.

■ 17
G. Gibbwons, Visualisation in Archaeology Project., 2012, o. Ort.

■ 18
S. Münster, Militärgeschichte aus der digitalen Retorte, in: A. Kästner, J. Mazerath (Hg.), Mehr als Krieg und Leidenschaft., Potsdam 2011, S. 457–486; M. Grellert, Immaterielle Zeugnisse – Synagogen in Deutschland, Bielefeld, 2007; P. Kuroczyński (Hg.), 3D-Computer-Rekonstruktion der Baugeschichte Breslaus, Band 3, W. Z. d. P. A. d. Wissenschaften, Wien 2012, S. 201–213.

Entsprechend wesentlich ist die Gestaltung eines **Transfers und Austauschs zwischen Forschung und Praxisanwendung**, beispielsweise hinsichtlich verwendeter Technologien, Standards und Schemata, Strategien und Qualitätsanforderungen. Darüber hinaus wesentlich ist eine **Untersuchung von praxisrelevanten Aspekten jenseits geisteswissenschaftlicher Forschungsfragen**, wie beispielsweise zur lernförderlichen Gestaltung, Usability oder tragfähigen Geschäftsmodellen.

Virtuelle Modelle und visuelle Ergebnisse als Gegenstände wissenschaftlichen Diskurses etablieren

Anders als in textbezogenen Disziplinen findet ein Erkenntnisaufbau bei einer digitalen Rekonstruktion vor allem bei der Erstellung eines virtuellen Modells und dessen digitaler, zumeist bildlicher Darstellung statt. Zudem sind in derartigen Medien Beiträge unterschiedlicher Autoren ebenso wie eine Vielzahl intuitiver, auf Erfahrungswissen basierender Entscheidungen enthalten. [19] Bisher fehlen sowohl **eine akademische Kultur als auch konkrete Mechanismen, digitale Modelle und generierte Bilder wissenschaftlich anknüpfbar und diskursfähig zu machen**. Dazu gehören Fragen nach einem Zugang und einer Bewertbarkeit von Modellen und Bildern, der Transparentmachung von Autorschaft und Bezügen zwischen Rekonstruktion und (explizierbaren) Wissensgrundlagen wie beispielsweise Quellen. Ferner umfasst dies die Zitierfähigkeit von Teilen oder Arealen in Modellen und Bildern und eine Modifizierbarkeit derartiger Medien durch andere. Als Bedarfe leiten sich neben einer Reihe im folgenden Abschnitt beschriebener technischer Anforderungen sowohl die Entwicklung von Ansätzen zur **Dokumentation von Prozessen und Ergebnissen** als auch zur **Transparentmachung einer Modelllogik** ab [20] – beispielsweise im Sinne übergreifender Referenzontologien und anwendungsspezifischer Applikationsontologien [21].

Nachhaltigkeit sichern

Es lässt sich feststellen, dass neue Technologien und Trends zumeist rasch in einzelnen Vorhaben zur digitalen Rekonstruktion aufgegriffen werden [22], diese jedoch gerade in akademischen Kontexten zumeist nur über Publikationen für eine (Fach-) Öffentlichkeit transparent werden. Neben den noch zu benennenden Aspekten der Interoperabilität und Langzeitverfügbarkeit von Datensätzen, Kompetenzen und Vorgehensmodellen ist für eine Verbesserung von Zugänglichkeit und Nachhaltigkeit eine **Erfassung und Kartierung von Vorhaben zur digitalen Rekonstruktion** aller Provenienzen und eine Einbeziehung etablierter Akteure wie Bibliotheken, kommerzielle Plattformen oder Forschungsinfrastrukturen in die Bereitstellung diesbezüglicher Informationen wesentlich.

Digitale Infrastrukturen für digitale 3D-Rekonstruktion etablieren

Generell sind Originale archäologischer oder kunsthistorisch bedeutender Objekte wie Fundstücke oder Skulpturen häufig von ihrem ursprünglichen Kontext losgelöst (z. B. in Sammlungen, Museen etc.) und können damit räumlich nur isoliert betrachtet, analysiert und bewertet werden. Demgegenüber lassen sich virtuelle Objekte nicht nur zeitlich und räumlich, sondern

19
S. Münster, N. Prechtel, Beyond Software., in: M. Ioannides (Hg.), Euromed, 2014, S. 131–145.

20
S. Hoppe, Die Fußnoten des Modells, in: M. Frings (Hg.) Der Modelle Tugend., Weimar 2001, p. 87–102; H. Günther, Kritische Computer-Visualisierung in der kunsthistorischen Lehre, in: M. Frings (Hg.) Der Modelle Tugend., Weimar, 2001, S. 111–122.

21
G. Homann, Die Anwendung von Ontologien zur Wissensrepräsentation und –kommunikation im Bereich des kulturellen Erbes, in: S. Schomburg (Hg.), Digitale Wissenschaft-Stand und Entwickung digital vernetzter Forschung in Deutschland, Köln, 2011, S. 33–40.

22
S. Münster, T. Köhler et al., 3D modeling technologies as tools for the reconstruction and visualization of historic items in humanities., in: A. Traviglia (Hg.), Across Space and Time., Amsterdam University Press, 2015, S. 430–441;

auch unter Berücksichtigung unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit der Rekonstruktionshypothese sowie mit Blick auf Bezüge zwischen einzelnen Objekten rekontextualisieren [23] und in differenzierter Weise mit (Quellen)-Materialien und Informationen zum Forschungsvorgehen verbinden. [24] Die Erfassung und Archivierung historischer Quellen unterschiedlicher Gattungen, digitalen Forschungsartefakten und -ergebnissen sowie zugeordneten Meta-, Para- und Kontextdaten steht seit langem im Fokus einer Vielzahl von europäischen Vorhaben (beispielsweise EPOCH, 3D-COFORM, CARARE, 3D-ICONS). Speziell im deutschsprachigen Raum spiegeln sich Anforderungen der digitalen Rekonstruktion jenseits von Archäologie und Baudokumentation [25] in Forschungsinfrastrukturen jedoch nur ungenügend wider. So zielen beispielsweise der DARIAH-Geobrowser und das ihm zugrunde liegende Europeana-4D-Interface trotz des Namens auf eine vorrangig zweidimensionale Kartierung von Objekten ab. [26] Spezifische Anforderungen digitaler Rekonstruktion stellen vor allem die raum- und zeitbezogene **Klassifikation und Identifikation** der erstellten digitalen Modelle sowie damit verbundener Materialien (beispielsweise mittels weltweit gültiger Unified Identifier) **und deren Verknüpfung dar.** [27] Darüber hinaus entstehen digitale Rekonstruktionen unter Nutzung einer Vielzahl unterschiedlicher Technologien aus Domänen wie beispielsweise GIS, VR, CAD und BIM, welche zueinander nur in geringem Maße kompatibel und nicht verlustfrei konvertierbar sind. [28] Damit verbundene Aufgaben sind gleichermaßen die Untersuchung, Entwicklung und Verbreitung von **Technologien und Strategien zur Interoperabilität von Daten** – beispielsweise zur verlustfreien Konvertierung oder zum Austausch von Daten in proprietären Formaten. Mit Blick auf eine Anknüpfbarkeit sind zudem einfach zu bedienende **Datenviewer** zur Darstellung der 3D-Datensätze relevant. Besondere Anforderungen bestehen dabei hinsichtlich Interaktivität und der Simulationsqualität von Materialität und Lichtstimmung. Darüber hinaus gefordert sind Werkzeuge und Mechanismen zur **semantischen Annotation** und **Modifikation von existenten Rekonstruktionen**, zur **Einbeziehung von Alternativhypothesen** oder zur **Versionierung**.

23
D. Lengyel, C. Toulouse, Die Gestaltung der Vision Naga, in: K. Kröper, S. Schoske, et al., Königsstadt Naga–Naga, Royal City., München, 2011, S. 163–175; Berliner Skulpturennetzwerk, http://de.wikipedia.org/wiki/Berliner_Skulpturennetzwerk; E. Laufer, Die Wiederentstehung Pergamons als virtuelles Stadtmodell, in: A. Scholl, V. Kästner et al., Pergamon., Petersberg, 2011, S. 82–86.

24
M. Raspe, G. Schelbert, ZUCCARO – Ein Informationssystem für die historischen Wissenschaften, in: IT–Information Technology, 4, 2009, S. 207–215.

25
OpenInfRA – Ein webbasiertes Informationssystem zur Dokumentation und Publikation archäologischer Forschungsprojekte, https://www.b-tu.de/openinfra/; IANUS – Forschungsdatenzentrum Archäologie & Altertumswissenschaften, http://www.dainst.org/de/project/ianus-forschungsdatenzentrum-arch%C3%A4ologie-altertumswissenschaften?ft=all; R. Drewello, B. Freitag et al., Neues Werkzeug für alte Gemäuer, in: DFG Forschung Magazin, 3, 2010, S. 10–14.

26
DARIAH – europeana 4D interface, http://dev2.dariah.eu/e4d/.

27
S. Münster, T. Köhler, 3D modeling as tool for the reconstruction and visualization of »lost« buildings in humanities, in: S. Hoppe, S. Breitling et al. Virtual Palaces II: Lost Palaces and Their Afterlife. Munich, 2016, S. 89–104

28
S. Münster, N. Prechtel, Beyond Software., in: M. Ioannides (Hg.), Euromed, 2014, S. 131–145.

Kompetenzen zum Umgang mit Bildern und digitalen Rekonstruktion entwickeln

Gerade im geisteswissenschaftlichen Umfeld sind Affinität und Kompetenz hinsichtlich digitaler Forschungsmethoden bisher wenig ausgeprägt. [29] Ähnlich wie für die Digital Humanities insgesamt [30] stellt der methodenbezogene **Wissens- und Kompetenzaufbau** bei Forschern und Praxisanwendern (bspw. Kuratoren) hinsichtlich einer Herstellung, Bewertung und Nutzung digitaler Rekonstruktionen eine wesentliche Herausforderung dar. [31] So sind wissenschaftliche Erkenntnisse in Archäologie und Bauforschung in den allermeisten Fällen unvollständig. Der Grad der Schärfe des Wissens reicht von authentischen Funden bis zu wissenschaftlichen Hypothesen, die auch widersprüchlich sein können. Damit besteht neben dem graduellen Gefälle zwischen sicherer und unsicherer Rekonstruktion auch ein Nebeneinander unterschiedlicher Alternativen. Es ist eine besondere Stärke virtueller Modelle, diese Unschärfe aufnehmen und in Form spezieller Visualisierungen zur wissenschaftlichen Diskussion und Vermittlung bereitstellen zu können. [32] Damit verbunden ist die Herausforderung, sowohl in wissenschaftlichen als auch populären Kontexten bei Nutzern **Methoden- und Nutzungskompetenz zum Umgang mit synthetisch erzeugten Bildern und Modellen** zu entwickeln. Dies umfasst sowohl ein Bewusstsein hinsichtlich Vorläufigkeit und Hypothesencharakter des inkorporierten Wissens als auch eine Bewertungskompetenz zu Einsatzmöglichkeiten sowie Erstellungsprozessen.

Digitale 3D-Rekonstruktionen als soziotechnische Systeme untersuchen

Themen der digitalen Rekonstruktion fanden bisher vor allem vor dem Hintergrund einer Technologieentwicklung sowie eines konkreten Objektbezugs Eingang in die deutsche Forschungs- und Förderlandschaft. Weitgehend ausgeklammert wurde demgegenüber eine Betrachtung soziotechnischer Aspekte. Neben den bereits geschilderten Bedarfen ist die **Erforschung und Entwicklung von geeigneten Workflows und Strategien** zur Erstellung von digitalen Rekonstruktionen eine wesentliche Aufgabe. Neben Impulsen zur Organisation von Arbeitsprozessen aus Innovations- und Projektmanagement sowie zur interdisziplinären Kommunikation und Kooperation [33] versprechen innovative Ansätze wie beispielsweise agile Entwicklungsmethoden der Informatik [34] praktische und wissenschaftliche Mehrwerte.

■ 29
S. Albrecht, Scholars' Adoption of E-Science Practices: (Preliminary) Results from a Qualitative Study of Network and Other Influencing Factors, in: XXXIII. Sunbelt Social Networks Conference of the International Network for Social Network Analysis (INSNA), Hamburg, 2013.

■ 30
Vorstand des Verbandes Digital Humanities im deutschsprachigen Raum, 2014.

■ 31
C. Kröber, S. Münster, An App for the Cathedral in Freiberg, in: 11th Cognition and Exploratory Learning in Digital Age 2014 (CELDA), 2017, S. 303–318.

■ 32
D. Lengyel, C. Toulouse, Ein Stadtmodell von Pergamon, in: L. Petersen, R. v. d. Hoff (Hg.), Skulpturen in Pergamon – Gymnasion, Heiligtum, Palast, Freiburg, 2011, S. 22–26.

■ 33
S. Münster, Workflows and the role of images for a virtual 3D reconstruction of no longer extant historic objects, in: ISPRS Annals of the Photogrammetry, XXIV International CIPA Symposium, 2013, S. 197–202.

■ 34
T. D. Baldwin, A. R. Flaten, Adapting the Agile Process to Digital Reconstructions of the Temple of Apollo at Delphi, in: M. Zhou (Hg.), Revive the Past. Proceedings of the 39th International Conference, Amsterdam, 2012, S. 30–37.

Digitale 3D-Rekonstruktion in der deutschen Digital Humanities-Landschaft etablieren

Aktuell umfasst eine Landschaft der digitalen Rekonstruktion in Deutschland eine Vielzahl von Akteuren unterschiedlicher Hintergründe, welche bisher nur ungenügend vernetzt und organisiert sind. Mit Blick auf die beschriebene Dominanz von Akteuren insbesondere aus mediterranen Staaten ist eine Ergänzung der aktuellen Förderschwerpunkte der EU wünschenswert. Die deutsche Wissenschaftslandschaft hat mit ihrer eigenen Forschungskultur spezifische Perspektiven auch zur digitalen Rekonstruktion hervorgebracht, die bisher noch nicht genug Aufmerksamkeit erfahren haben. Daraus leiten sich der **Bedarf gemeinsamer Plattformen** für einen Austausch und eine Etablierung der digitalen Rekonstruktion im Kanon der Digital Humanities ebenso wie die Notwendigkeit der **Unterstützung von Vernetzungsaktivitäten** ab. Darüber hinaus fehlen im deutschsprachigen Raum bisher etablierte und disziplinübergreifende **koordinierende Strukturen bzw. Institutionen** einer wissenschaftlichen und anwendungspraktischen Weiterentwicklung. Ein diesbezüglich erster Schritt ist die 2014 erfolgte Gründung der AG **Digitale 3D-Rekonstruktion** der DhD.

Kapitel 1
→ Grundlagen

Stephan Hoppe

Digitale Technik und visuelle Imagination: Das ungleiche Elternpaar der virtuellen Rekonstruktion historischer Architektur

Die Kultur der digitalen Rekonstruktion besitzt, wie der folgende Abschnitt aus verschiedenen Perspektiven belegt, im Wesentlichen zwei Elternteile. Wie bei einer echten Elternschaft, bringen diese beiden Genealogien sehr unterschiedliche Erbgüter in die Verbindung ein, die die aktuellen Strategien und Projekte zusammen deutlich prägen. Diese beiden Genealogien zu kennen kann helfen, auch die zukünftigen Potenziale der Weiterentwicklung besser verstehen zu lernen.

Die zunächst offensichtlichste Genealogie, quasi der namensgebende väterliche Erbteil, liegt in den technischen Verfahren, die sich in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts aufgrund der Entwicklung der Computertechnologie zu einem eigenen Bereich herausbilden konnten. Sander Münster zeigt anhand des Begriffsapparates grundlegende Konzepte und Möglichkeiten des analytischen Zugriffs. Es handelt sich der technischen Entwicklung folgend zurzeit noch um einen recht kurzen Stammbaum, den Horst Stenzel im Folgenden trotzdem mit großer Aufmerksamkeit für evolutionäre Wandlungen rekonstruiert. Bekanntlich basiert die digitale Rekonstruktion ehemals vorhandener Architektur de facto auf der zunächst entwickelten Fähigkeit, die Gestalt noch nicht vorhandener Architektur in einem Datenmodell und einer daraus digital erzeugten Visualisierung antizipieren zu können. Die Rede ist von computergestütztem Design (CAD), das in den 1960er Jahren innerhalb der Ingenieurswissenschaften und des Bauwesens entwickelt wurde.

Anfangs ermöglichte CAD **lediglich** die Anfertigung zweidimensionaler Modelle, bald jedoch bewältigte es auch die dritte Dimension. Damit war das Verfahren als Simulation räumlicher Phänomene zunächst vor allem auf die Zukunft ausgerichtet, und es war – und ist es noch heute – abhängig vom Stand der technischen Möglichkeiten, sowohl was die Konzepte und die Komplexität der Datenmodelle als auch die Möglichkeiten der visuellen Darstellung, des sogenannten Renderings, betrifft. 01 Georg Schelbert setzt genau bei diesem stets

■ 01
Sabine Ammon, Inge Hinterwaldner (Hg.), Bildlichkeit im Zeitalter der Modellierung. Operative Artefakte in Entwurfsprozessen der Architektur und des Ingenieurwesens, Paderborn 2017.

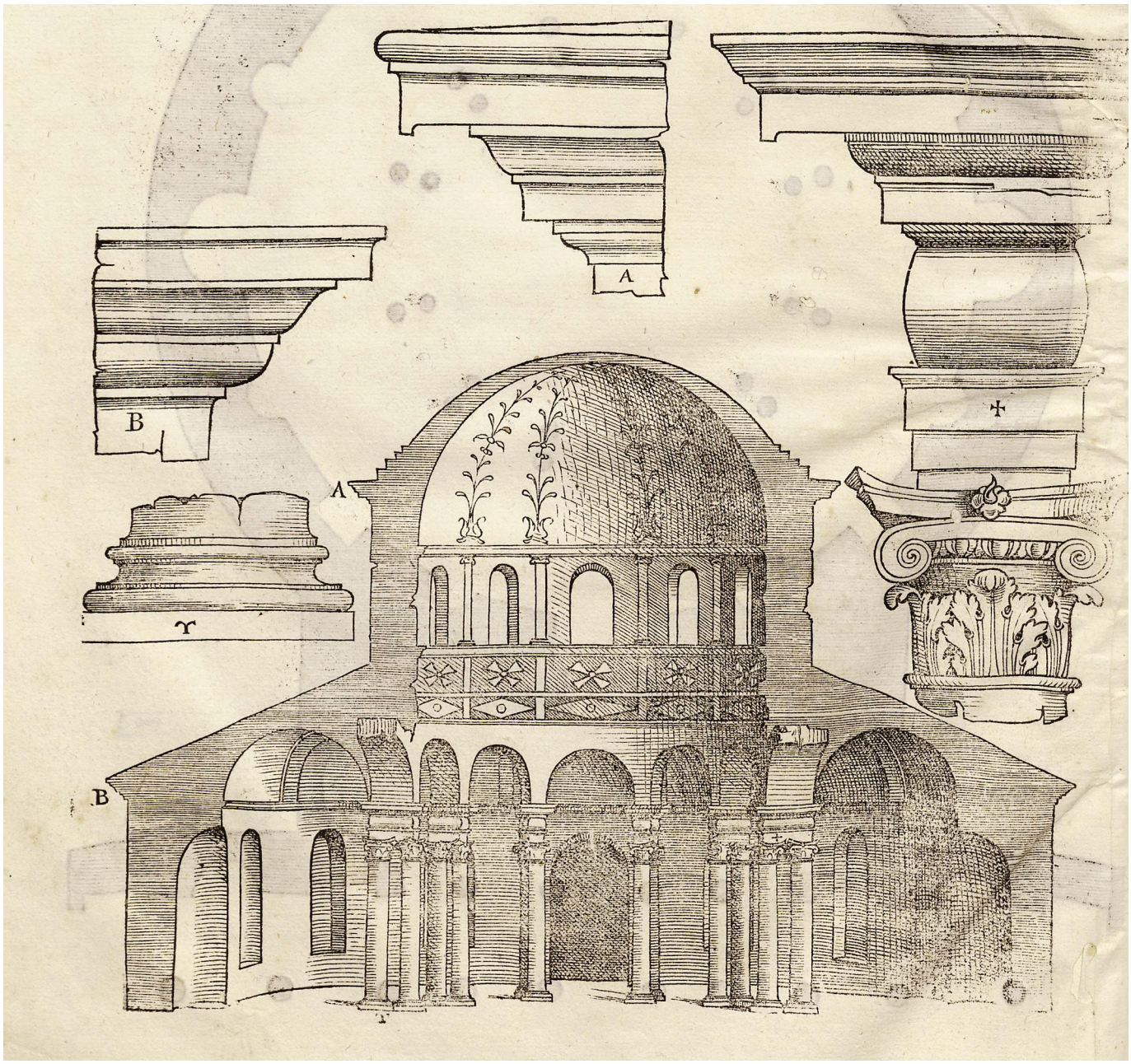
vorhandenen Hybridcharakter von Daten und Bild an und plädiert für Anreicherungsszenarien und Konvergenzpotenziale von Datensätzen und Modellwelten. Auch das von ihm quasi auf Möglichkeiten der Zweckentfremdung abgeklopfte Konzept des Building Information Modeling (BIM) ist ja eigentlich ein Spin-off der bauenden Zunft und könnte der historischen Beschäftigung mit Architektur in Zukunft gute Dienste leisten.

Es traf sich gut und stellt vielleicht auch gar keinen Zufall dar, dass im Verhältnis Baupraxis und CAD-Technik die ästhetischen Ideale der architektonischen Moderne mit ihrer Skepsis gegenüber Dekoration und Ornament mit der technisch bedingten Reduktion von Architektur auf ihre Volumina und basalen Oberflächen einherging. So wie die architekturbezogene Moderne im 20. Jahrhundert ganz generell die mathematischen Grundlagen der Architektur gegenüber den semantischen betont hat, 02 so enthielten die ersten Datenmodelle die räumlichen Parameter der noch zu bauenden Architektur. Diese am Anfang durch Rechnerkapazitäten und Speicherangebot technisch beschränkte Eigenart der digitalen Architekturmodelle wurde auch, zumindest anfangs, von den digitalen Modellen historischer Architektur übernommen. Der Beitrag von Heike Messemer soll hier erstes einschlägiges Material liefern und den Gang der Entwicklung zumindest andeuten. Leider hat die historisch ausgerichtete Bildwissenschaft bzw. Kunstgeschichte das Thema noch nicht auf breiterer Basis als eigenen Gegenstand sowohl der Mediengeschichte als auch der jeweiligen Fachgeschichte aufgegriffen.

Die virtuelle Rekonstruktion historischer Architektur ist jedoch nicht nur ein (digitaler) technischer Vorgang und besitzt mithin nicht allein eine technische Geschichte. Mindestens genauso wichtig ist die zweite Genealogie, nämlich die Herkunft von den Praktiken visueller und bildlicher Rekonstruktion historischer Architektur im Rahmen der mit der europäischen Renaissance beginnenden Forschungen zu verlorenen Bauten, zunächst vor allem jener der Antike.

Das Bedürfnis, über verlorene Architektur nicht nur zu sprechen und zu schreiben oder sie in technischen Zeichnungen für ein Fachpublikum darzustellen, trat fast gleichzeitig mit den eher wenig anschaulichen Bildtypen der Grundrisse und Schnitte auf. Bereits die ersten Rekonstruktionen antiker Bauten in der Hochrenaissance bedienten sich schon der Simulation aller drei Raumdimensionen. Es entstanden sowohl echte dreidimensionale Repräsentationen in Form hölzerner Modelle als auch Zeichnungen und Bilder, die teilweise sogar einzelne Bildformeln dieser haptischen Modelle simulierten 01.

■ 02
Das gilt auch in bedeutenden Teilen für die Architekturgeschichte. Vgl. etwa die vielbändige, von dem Architekten Pier Luigi Nervi ab 1971 herausgegebene Weltgeschichte der Architektur, Storia universale dell'architettura, Mailand 1971, die in zahlreiche Sprachen übersetzt wurde und eine Grundlage der architekturgeschichtlichen Lehre in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts bildete. In diesem Zusammenhang wäre als weiteres Beispiel auch Sigfried Giedions vielfach rezipierte Darstellung Space, Time and Architecture. The Growth of a New Tradition, Cambridge Mass. 1941 zu nennen.



☐ 01
Zeichnerische (Holzschnitt-)Darstellung eines römischen Bacchus-Tempels als virtuelles Schnittmodell mit Andeutung der dritten Dimension: In: Sebastiano Serlio: Sette Libri d'architettura. Il terzo libro, Venedig 1540, S. 20. (Public Domain).

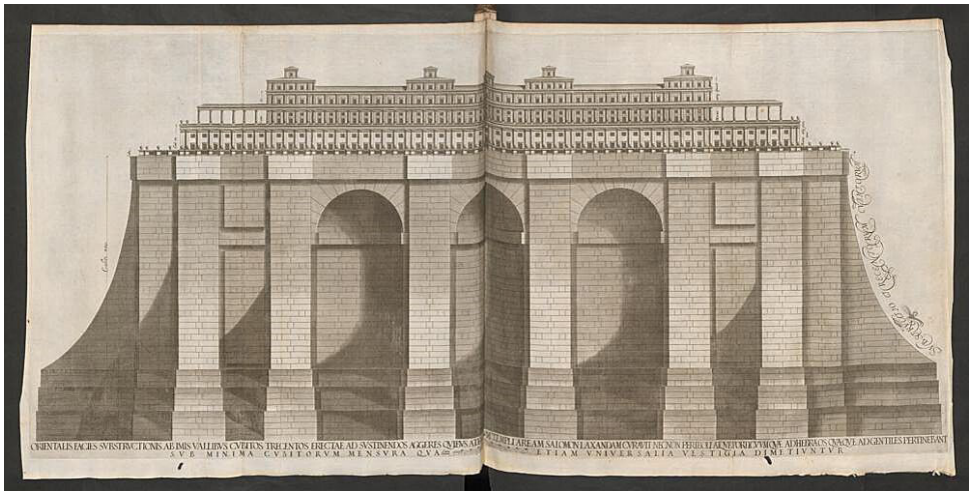
Ein erster Traditionsstrang begann in der italienischen Hochrenaissance, als es darum ging, die Größe der antiken Baukultur als Blaupause für die Darstellung eigener, zeitgenössischer Größe gerade in Rom zu aktivieren. 03 Dazu musste zunächst einmal, und dies ist hier ganz wörtlich zu verstehen, ein Bild der vergangenen Baukultur geschaffen werden. Ein zweiter Traditionsstrang entwickelte sich aus den schon älteren Bemühungen, ein Bild des verlorenen Tempels König Salomons zu gewinnen 02 03. 04

Mit zunehmender Kenntnis der antiken Architektur wurden solche bildlichen Rekonstruktionen immer detaillierter und nahmen einen protowissenschaftlichen Charakter an. Einen weiteren Meilenstein dieser Entwicklungslinie stellt die reich illustrierte Architekturgeschichte des Wiener Hofarchitekten Lucas von Hildebrandt dar, die ab 1712 in einer Serie großformatiger Kupferstiche berühmte historische Bauten auch aus Kulturkreisen außerhalb der römischen Antike präsentierte. 05 Der Aufsatz von Gerd-Helge Vogel zeigt,

■ 03
Hubertus Günther, Das Studium der antiken Architektur in den Zeichnungen der Hochrenaissance, Veröffentlichungen der Bibliotheca Hertziana, Max-Planck-Institut in Rom, Tübingen 1988.

■ 04
Paul von Naredi-Rainer, Cornelia Limpricht, Salomos Tempel und das Abendland. Monumentale Folgen historischer Irrtümer, Köln 1994.

■ 05
Zur Bildgeschichte der frühen Archäologie: Alain Schnapp, Die Entdeckung der Vergangenheit, Stuttgart 2011.



☐ 02
Zeichnerische Rekonstruktion des Salomonischen Tempels. In: Hieronymo Prado/Juan Bautista Villalpando: In Ezechiel explanationes et apparatus vrbis, ac templi Hierosolymitani. 3 Bde. Rom, 1596 – 1605 (Public Domain)

☐ 03
Hölzernes Modell des Salomonischen Tempels, das zwischen 1680 und 1692 von dem Hamburger Ratsherren Gerhard Schott in Auftrag gegeben wurde, heute Museum für Hamburgische Geschichte (teildemontierter Zustand im Mai 2013). (CC BY-SA 3.0 DE, nicht portiert, Autor: An-d)

welche unterschiedlichen Bildstrategien sich hier entwickelten, und Reinhard Wendler widmet sich aus systematischer Perspektive dem Aspekt der Zeitlichkeit in diesen Verfahren.

Die Geschichte der Rekonstruktion historischer Architektur ist aufgrund ihrer zeitlichen Ausdehnung und der Einbindung in ganz unterschiedliche Wissenschaftskulturen, seien diese auf Epochen bezogen oder national und ethnisch gegliedert, in ihrer ganzen Komplexität an dieser Stelle gar nicht aufzufächern. War die technische Entwicklung des CAD-Modells in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts im Wesentlichen ein internationales und gleichtaktiges Phänomen, so waren die Projekte bildlicher Rekonstruktionen historischer Architektur zum einen zwar Teil der internationalen und universalen Wissenschaftsentwicklung, zum anderen haben sie sich aber gerade an der Schnittstelle von wissenschaftlichen Diskurs im engeren Sinne und einem erweiterten Laienpublikum mit dessen vielfältigen und unterschiedlichen Bedürfnissen entwickelt.

Die bildlichen Rekonstruktionen dienten keineswegs nur der **interesselosen** wissenschaftlichen Vergegenwärtigung verlorener Bauten; sie waren oft genug eingebunden in aufgeladene Diskurse über vergangene Größe fremder Kulturen, wie die des antiken Rom oder Griechenlands, und ebenso in Diskurse nationaler Vorzeiten und ihrer architektonischen Leistungen oder ihrer Gründungs- und Symbolbauten. Die Erforschung, die visuelle Rekonstruktion und dann der Wiederaufbau der Hohkönigsburg in dem gerade für das neue Deutsche Reich nach 1871 als Zurückerwerbung gefeierten Elsass ist ein eindrückliches Beispiel, das beliebig vermehrbar ist und auch aktuell nicht irrelevant erscheint 04. 06

■ **06**
Claudia Hagenguth, Die Hohkönigsburg im Elsass. Die Pläne Bodo Ebhardts zum Wiederaufbau, in: KulturGut 17 (2008), S. 4–7.

□ 04
Bodo Ebhardt: Bildliche Rekonstruktion der Hohkönigsburg im Elsass, die ab 1901 beim Wiederaufbau in die Realität umgesetzt wurde. Postkarte. (Public Domain)

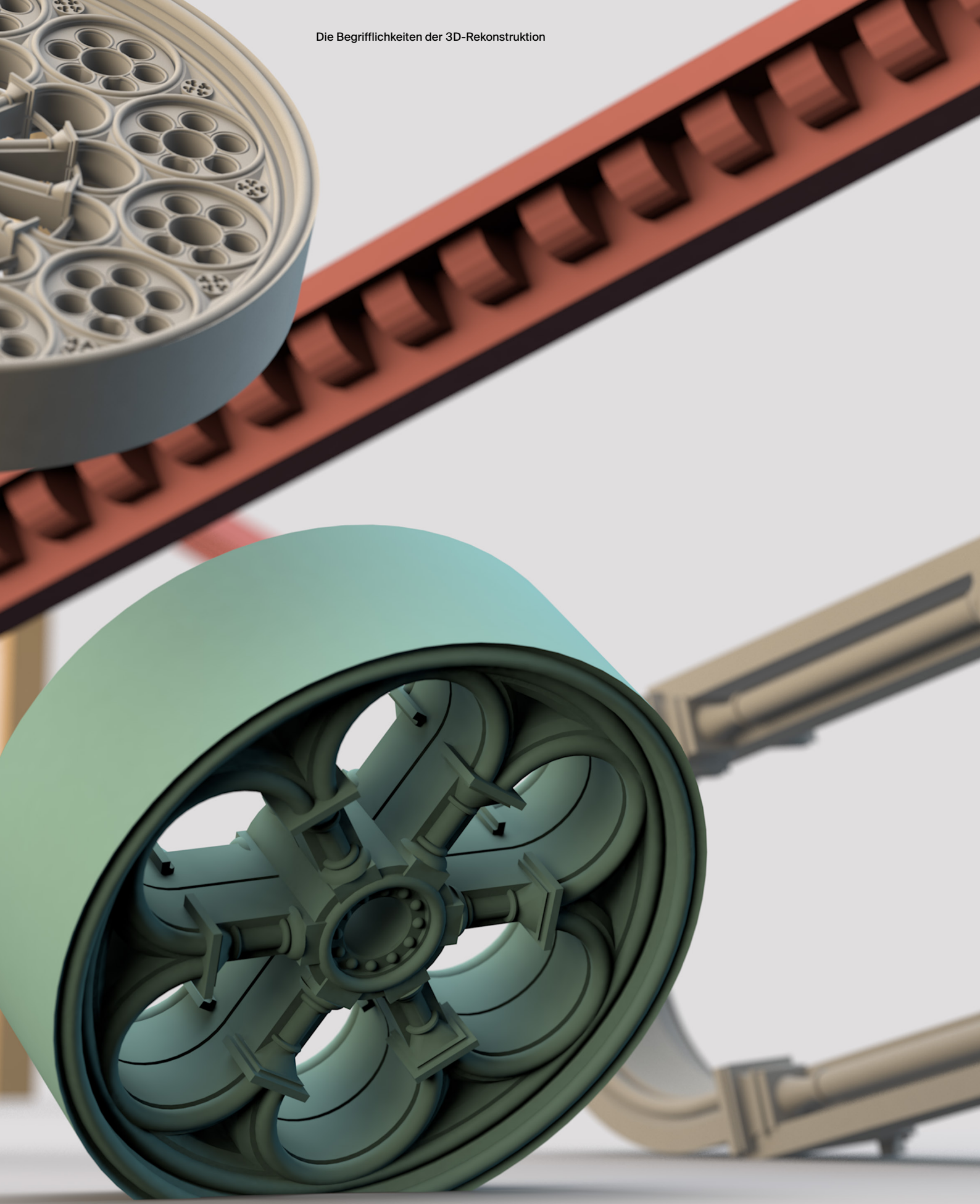
Von Anfang an dienten also bildliche (nicht-digitale) Rekonstruktionen mit ihrer dreidimensionalen Adressierung und dem Potenzial der Immersion auch vielfältigen gesellschaftlichen und politischen Intentionen und zogen auch deshalb jenseits reiner Schaulust das ganze Register naturalistischer Darstellungsweisen, wie sie die abendländische Kunst seit der Renaissance zu großer Perfektion gebracht hat. Ihre Indienstnahme durch gesellschaftliche Kräfte führte wiederum auf der wissenschaftlichen Seite zu Gesten der Reduktion der darstellerischen Mittel. Dies konnte so weit gehen, dass es gerade die wenig immersive Darstellung von Drahtmodellen war, die zeichnerisch einen Abstand zu der opulenten bildlichen Selbstvergewisserung am Rande des wissenschaftlich Belegbaren herstellen konnten. 07

Die seit den 1980er Jahren nun immer häufiger auf einem digitalen Datenmodell aufbauende Rekonstruktion historischer Architektur knüpft an dieses doppelte Erbe an. Angesichts der begrenzten technischen Möglichkeiten zu Beginn war visuelle Reduktion noch keine wirklich wählbare Option, sondern durch technische Restriktionen nahegelegt. Mit der Weiterentwicklung bildgebender Verfahren in dieser Technik wuchs ganz selbstverständlich der Wunsch, die neuen faszinierenden Bildtypen, realisierbaren Medien und die sich entwickelnden Ansätze zur Interaktion auch für die virtuelle Rekonstruktion einzusetzen. Ein Weg hin zu immer naturalistischeren und immersiveren Darstellungen schien vorgezeichnet. 08

Aber der alte Erbteil der Vielfalt bildlicher Optionen und Strategien konnte sich im Laufe der Zeit wieder deutlich bemerkbar machen. In dem Maße, wie die digitale Rekonstruktion nicht nur als zusätzliches bildliches Hilfsmittel dazu diente, Laien anzusprechen und zu informieren, sondern immer mehr auch als wissenschaftliches Werkzeug eingesetzt werden konnte, wuchs der Diskussionsbedarf über die hier sinnvoll anzuwendenden Datenkonzepte und Bildstrategien und die konzeptionellen Desiderate. Dies ist aber nicht mehr Teil des vorliegenden Abschnittes, der es sich zum Ziel gesetzt hat, die unterschiedlichen begrifflichen und historischen Grundlagen und schon vorhandenen Erfahrungspotenziale einer solchen Entwicklung zumindest anzudeuten.

07
Vgl. über den Zusammenhang politischer Verhältnisse und bildästhetischer Entscheidungen am Beispiel der tschechischen Forschung: Michael Rykl, Virtual Reconstructions and Building Archaeology in Bohemia. A Digital Model of the 14th-Century House U zvonu (›Zur Glocke‹/›At the Sign of the Bell‹) in Prague, in: Stephan Hoppe, Stefan Breitling (Hg.), Virtual Palaces, Part II. Lost Palaces and their Afterlife. Virtual Reconstruction between Science and Media, München 2016, S. 55–85.

08
Vgl. Oliver Grau, Die Sehnsucht, im Bild zu sein. Zur Kunstgeschichte der virtuellen Realität, Berlin 1999.



Sander Münster

A. Die Begrifflichkeiten der 3D-Rekonstruktion

→ 3D-Rekonstruktion, Begriffe, Definitionen

Digitale 3D-Rekonstruktion ein Wissenschaftsfeld mit vielfältigen disziplinären und — daraus folgend — terminologischen Bezügen. Vor diesem Hintergrund benennt und erläutert der vorliegende Aufsatz grundlegende Begriffe sowie Konzepte. Dabei hat der Aufsatz neben der begrifflichen Einordnung der digitalen 3D-Rekonstruktion ihre disziplinäre Einbettung und die Darlegung wesentlicher Charakteristika, Arbeitsabläufe und Entstehungskontexte zum Ziel.

Wie in vielen Wissenschaftsfeldern hat sich auch für den Bereich der digitalen 3D-Rekonstruktion ein eigenständiger Fachwortschatz herausgebildet. 01 Dieser Aufsatz soll einige in diesem Zusammenhang grundlegende Begriffe benennen und die damit verbundenen Konzepte erläutern sowie einordnen. Damit ergänzt er Überblicksdarstellungen wie die von **Kohle** 02 sowie historisch-kritische Betrachtungen wie die von **Messemer** (→ **060**).
Mit Blick auf eine Gliederung zielt dieser Aufsatz auf (A.1) eine Begriffsklärung, (A.2) die disziplinäre Einordnung, (A.3) die Darlegung wesentlicher Abläufe und Charakteristika sowie (A.4) deren Entstehungs- und Verwendungskontexte ab.

■ **01**
Weiterführende Systematisierungen liefern beispielsweise: Etienne Wenger, Communities of Practice: Learning, Meaning, and Identity, Cambridge 1998.

■ **02**
Hubertus Kohle, Digitale Rekonstruktion, in: Fotis Ioannides, Malte Rehbein, Hubertus Kohle (Hg.), Digital Humanities. Eine Einführung, Stuttgart 2017, S. 315–327.

A.1 Der Begriff der »Digitalen 3D-Rekonstruktion«

Rekonstruktion vs. Digitalisierung

Wie bereits im **Memorandum** (→ **021**) ausgeführt, finden digitale 3D-Modelllierungstechniken, zu welchen auch die 3D-Rekonstruktion gehört, in den historischen Wissenschaften auf zweierlei Art Verwendung. 03 Sie dienen zum einen der Erfassung und Digitalisierung existierender historischer Objekte. Dafür kommen zumeist Datenerfassungstechnologien wie beispielsweise photogrammetrische und laser- sowie radarbasierte Verfahren zum Einsatz. 04 Zudem sind diese Vorhaben häufig mit einer weitgehend algorithmischen Modellgenese verbunden. Während die Arbeitsabläufe derartiger Digitalisierungsvorhaben vor allem technische und logistische Herausforderungen beinhalten, beinhaltet die Erstellung von virtuellen Rekonstruktionen zur Nachbildung nicht mehr existenter oder nie realisierter Objekte und Strukturen die Einbeziehung und Interpretation historischer Quellen sowie deren Umsetzung in ein virtuelles 3D-Modell mithilfe digitaler Werkzeuge.

■ **03**
Siehe auch: Giuliana De Francesco, Andrea D'Andrea, Andrea, Standards and Guidelines for Quality Digital Cultural Three-Dimensional Content Creation, in: Marinos Ioannides, A. Addison, A. Georgopoulos, L. Kalisperis (Hg.), Digital Heritage: Proceedings of the 14th International Conference on Virtual Systems and Multimedia. Project Papers, Budapest 2008, S. 229–233.

■ **04**
Grundlegend hierzu: Fabio Remondino, Sabry El-Hakim, Stefano Girardi, Alessandro Rizzi, Stefano Benedetti, Lorenzo Gonzo, 3D Virtual reconstruction and visualization of complex architectures – The 3D-ARCH project, Zürich 2009. Wichtig ist, dass insbesondere in den Geowissenschaften und der Informatik die Digitalisierung von Objekten mitunter als Rekonstruktion bezeichnet wird, bei der das Objekt digital mittels Erfassungstechnologien »rekonstruiert« wird. Bspw. in: David Arnold, 3D-COFORM – D.1.5 – PROJECT FINAL REPORT, in: http://culturalinformatics.org.uk/sites/culturalinformatics.org.uk/files/3DC_D_1_5_Final_Report_v1_0_PUBLIC.pdf.

Digital vs. virtuell

Es besteht ein grundlegender Konsens darüber, dass **digitale 3D-Rekonstruktionen** mithilfe des Computers erstellt werden und sich damit von den in einer langen Tradition stehenden physischen Rekonstruktionen von Artefakten 05 oder auch papierbasierten Rekonstruktionen wie beispielsweise der Architekturzeichnung 06 unterscheiden. Dabei werden die Begriffe der **digitalen** und der **virtuellen** Rekonstruktion weitgehend synonym gebraucht, wobei sich die zugrunde liegenden Konzepte des Digitalen als »in Ziffern aufgelöst« bzw. »auf Ziffern beruhend« 07 gegenüber dem Virtuellen als »entsprechend seiner Anlage als Möglichkeit vorhanden« 08 durchaus unterscheiden. Während das Digitale damit eine Materialität beschreibt, geht der Begriff des Virtuellen vom inhaltlichen Wirklichkeitsbezug aus. Empirisch betrachtet ist im deutschsprachigen Raum dabei häufiger von **virtueller Rekonstruktion** die Rede, während im Englischen die **digital reconstruction** überwiegt. 09 In Anlehnung an die bereits ausgeführte Praxis sollen beide Begriffe auch in diesem Buch synonym verwendet werden.

05
Beispielsweise in der Experimentalarchäologie: Peter Stone, Phillipe Planel, The Constructed past. Experimental archaeology, education and the public, Routledge 1999.

06
Hierzu bspw. Mario Carpo, Architecture in the Age of Printing. Orality, Writing, Typography, and Printed Images in the History of Architectural Theory, Cambridge 2001.

07
Duden, digital, in: http://www.duden.de/rechtschreibung/digital.

08
Duden, virtuell, in: http://www.duden.de/rechtschreibung/virtuell.

09
Suchbegriffe bei Google.de: »Digitale Rekonstruktion«: 13 Tsd. Ergebnisse; »Virtuelle Rekonstruktion« 61 Tsd. Ergebnisse (23.8.2017). Suchbegriff bei Google.de: »Digital Reconstruction«: 434 Tsd. Ergebnisse; »Virtual reconstruction« 181 Tsd. Ergebnisse (23.8.2017).

A.2 Die disziplinäre Verortung digitaler 3D-Rekonstruktion zwischen Digital Humanities, Cultural Heritage und historischen Wissenschaften

Die digitale 3D-Rekonstruktion ist vereinfacht gesprochen ein digitales Werkzeug zur Untersuchung geistes- und kulturwissenschaftlicher Fragestellungen und damit — im Hinblick auf ihre disziplinäre Einordnung — als eine Arbeitstechnik der **Digital Humanities** zu sehen. Während die untersuchten Fragestellungen aus den historischen Wissenschaften und vor allem aus der Archäologie und der Kunstgeschichte stammen, sind die Quellengrundlagen bzw. Artefakte dem **Kulturerbe** zurechenbar.

■ 10
Unter vielen: Rafael Alvarado, The Digital Humanities Situation, in: The Transducer, 5 (11) 2011. Bryan W. Carter, Digital humanities: Current perspective, practices, and research, Bingley 2013. Matthew K. Gold, Debates in the digital humanities, Minneapolis 2012. Matthew G. Kirschenbaum, 2010 What is Digital Humanities and what's it doing in English Departments?, in: ADE Bulletin, (150) 2010, S. 55–61. Melissa Terras, Julianne Nyhan, Edward Vanhoutte, Defining Digital Humanities. A Reader, Farnham 2013.

A.3 3D-Rekonstruktionen als Teil des Methodenkanons der Digital Humanities

Trotz vielfältiger Definitionen [10] ist die Begriffsbestimmung von Digital Humanities noch immer unscharf und heterogen. [11] Aus historischer Perspektive haben sich die Digital Humanities etwa seit Mitte der 2000er Jahre durch die Herausbildung einer eigenständigen epistemischen Kultur aus der historischen Informatik bzw. dem **Humanities Computing** entwickelt. [12]

■ 11
Alvarado 5 (11) 2011. Frederick W. Gibbs, Digital humanities definitions by type, in: Internet Digital humanities definitions by type, https://moodle.ucl.ac.uk/course/view.php?id=11859&section=3.

■ 12
Als eine der jüngsten Darstellungen der historischen Entwicklung der Digital Humanities: Manfred Thaller, Geschichte der Digital Humanities, in: Fotis Ioannides, Malte Rehbein, Hubertus Kohle (Hg.), Digital Humanities. Eine Einführung, Stuttgart 2017, S. 315–327. Zum Emanzipationsprozess: Cathy N. Davids, Humanities 2.0: Promise, Perils, Predictions, in: Publications of the Modern Language Association of America (PMLA), 123 (3) 2008, S. 707–717. Patrik Svensson, Humanities Computing as Digital Humanities, in: Digital Humanities Quarterly, 3 (3) 2009 pp. Zur Geschichte der historischen Informatik: Susan Hockey, The History of Humanities Computing, in: Susan Schreibman, Ray Siemens, John Unsworth (Hg.), A Companion to Digital Humanities, Oxford 2004. Patrik Svensson, The Landscape of Digital Humanities, in: Digital Humanities Quarterly, 4 (1) 2010.

Weitgehender Konsens herrscht darüber, dass sich die Digital Humanities hinsichtlich ihres Gegenstandes mit der Untersuchung geisteswissenschaftlicher Fragestellungen unter Nutzung digitaler Methoden beschäftigen. [13] Noch immer ist jedoch umstritten, was eine solche Nutzung digitaler Methoden bedeutet. Dies beinhaltet beispielsweise die qualitative Frage, ob die Digital Humanities als vorrangig praktisch orientiertes Feld eine hinreichende Wissenschaftlichkeit aufweisen. [14] Zumindest für die Anwendung von 3D-Rekonstruktionstechniken ist noch nicht scharf umrissen, welche **neuen** Forschungsperspektiven Digital Humanities zum Erkenntnisprozess beitragen. Aus Sicht der Geisteswissenschaften liegen die digitalen Mehrwerte insbesondere in der Skalierbarkeit und leichten Editierbarkeit von Informationen sowie in den bisher nicht da gewesenen Möglichkeiten zur Mustererkennung. [15] Ebenso ist fraglich, ob eine solche Definition nur digitale Forschungsmethoden umfasst oder ob alle Aspekte forschungsbezogener Informations- und Kommunikationspraxis umfasst sind. Demgegenüber herrscht Einigkeit in der Auffassung, dass die Zusammenarbeit in den Digital Humanities disziplinübergreifender Natur ist, wobei gerade im deutschsprachigen Raum eine Unterscheidung zwischen e(nhanced) Humanities als Zusammenarbeit zwischen Geisteswissenschaftlern und informatischen Disziplinen sowie den Digital Humanities als **hybrider Disziplin**, [16] welche Ansätze und Methoden beider disziplinärer Sphären umfasst, getroffen wird. Zur Definition einer solchen Kooperation merkt beispielsweise Beland an:

»Digital humanities research usually involves collaboration of individuals with different types of expertise: subject, analytical, data management, and project management. Some universities have established digital humanities research centers, and some academic libraries are collaborating with such centers. In other cases, collaboration takes place on an ad hoc basis«. [17]

13
Demgegenüber definiert Waters Digital Humanities als »the application of tools and processes to the ›why possible?‹ questions of humanistic inquiry« Donald J. Waters, An overview of the digital humani-ties, in: Research Library Issues, (284) 2013, S. 3–22. Eine empirisch-sozialwissenschaftlich begründete Definition von Digital Humanities sieht diese mehrheitlich als »the application of technology to humanities work«, Gibbs, 2011.

14
Vgl. Melissa Terras, Disciplined: Using Curriculum Studies to Define Humanities Computing, in: Literary and Linguistic Computing, 21 (2) 2006, S. 229–246.

15
Vgl. S. Münster et al. (2016). A classification model for digital reconstruction in context of humanities research. 3D Research Challenges in Cultural Heritage II. S. Münster et al. Cham, Springer LNCS: 3–31. Empirisch anhand von Fallbeispielen skizziert bspw. in: David J. Bodenhamer et al. (Hg), The Spatial Humanities. GIS and the Future of Humanities Scholarship, Bloomington 2010. Eugene Ch'ng et al. (Hg.), Visual Heritage in the Digital Age, London 2013. Franco Moretti, Graphs, Maps, Trees: Abstract Models for Literary History, London, New York 2007.

16
Vgl. Cologne Center for eHumanities, Digitale Geisteswissenschaften, Köln 2011. Sowie: BMBF, Bekanntmachung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung von Richtlinien zur Förderung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben aus dem Bereich der eHumanities, http://www.bmbf.de/foerderungen/21126.php.

17
Melinda Beland, Digital Humanities Trend Report, https://www.library.uni.edu/rodcast/201604/digital-humanities-trend-report.

Mit Blick auf Anwendungsgebiete der Digital Humanities unterscheidet Waters aus historischer Perspektive zwischen Textanalyse, spatialer Analyse und Medienuntersuchung. 18

Ein differenzierteres Bild zeichnen Thaller und Sahle mit einer Zuordnung von Anwendungsbereichen und inhaltsgebenden Disziplinen. 01 Demnach gehören Techniken der digitalen 3D-Rekonstruktion in die Bereiche der Archäoeinformatik und Digital History und befördern vor allem Forschung in der Kunstgeschichte und Archäologie.

■ 18
D. J. Waters, An overview of the digital humanities, in: Research Library Issues, 284 2013, S. 3–22. Ein erweitertes Bild zur Beschreibung der Digital Humanities anhand ihrer Themen und Akteure zeichnen Kompendien der Digital Humanities, bspw. Juho Hamari, Jonna Koivisto, Why do people use gamification services?, in: International Journal of Information Management, 35 (4) 2015, S. 419–431. Fotis Ioannides, Malte Rehbein, Hubertus Kohle, Digital Humanities. Eine Einführung, Stuttgart 2017. J. B. Metzler, Susan Schreibman, Ray Siemens, John Unsworth, A Companion to Digital Humanities, Oxford 2004. Blackwell, Melissa Terras, Julianne Nyhan, Edward Vanhoutte, Defining Digital Humanities. A Reader, Ashgate 2013. Dem breiten Spektrum an Themen und Akteuren entspricht eine große Bandbreite bei Lehrveranstaltungen im Bereich der Digital Humanities. Dies wird empirisch durch zahlreiche State-of-the-art-Erhebungen belegt, zuletzt: Chris Alen Sula, S. E. Hackney, Phillip Cunningham, A Survey of Digital Humanities Programs, 2017.

□ 01
Anwendungsgebiete der Digital Humanities nach Sahle (Anne Schimmeck)

A.4 Kulturerbe als Gegenstand der 3D-Rekonstruktion

Als Gegenstand der Digital Humanities definiert Alvarado mit Bezug zu Panofsky:

»[...] ›the records left by men [...]‹ — works of literature, art, architecture, and other products and traces of human intellectual labor«. [19]

Das Konzept des Kulturerbes bzw. des Cultural Heritage stellt mithin das historische Artefakt bzw. Kulturgut in den Mittelpunkt. [20] Dies umfasst Aspekte der Bewahrung, Vermittlung und Erforschung des kulturellen Erbes [21] aus multidisziplinärer Perspektive, beispielsweise aus jener der Materialwissenschaften, der Denkmalpflege oder aber auch den Museumswissenschaften. [22] Darüber hinaus umfasst das Kulturerbe sowohl materielle als auch immaterielle Artefakte. [23] Zu letzteren zählen neben den bereits aufgeführten Kulturgütern wie beispielsweise Musik, Tanz, Theater, Spiele, Sprache, Geschichte, Literatur auch Kulturpraktiken wie Handwerke und Riten sowie hypothetische Konzepte wie architektonische Stile.

19
Alvarado, Rafael, The Digital Humanities Situation, in: The Transducer, May 11th, 2011.

20
Hierzu bspw.: »Cultural heritage [subsumes] material structures, institutional complexes and practices, and at the same time carries a powerful emotional charge and a value structure [...].« Kai Huotari, Juho Hamari, A definition for gamification: anchoring gamification in the service marketing literature, in: Electronic Markets, 27 (1) 2016, S. 21–31.

21
Beispielhaft zu benennen sind Unterstützungsfunktionen von 3D-Modellen bzw. spezielle Rekonstruktionen für die Erhaltung, den Wiederaufbau, die Dokumentation, die Erforschung und die Verbreitung von Kulturerbe. Ausgeführt beispielsweise in Fabio Bruno, Giovanna De Sensi, Stefano Bruno, Maria-Laura Luchi, Stefania Mancuso, Maurizio Muzzupappa, From 3D reconstruction to virtual reality: A complete methodology for digital archaeological exhibition, in: Journal of Cultural Heritage, 11 (1) 2010, S. 42–49.

22
Zur Schwierigkeit der Abgrenzung des Konzeptes digitalen Erbes als »Agora« siehe Eugene Ch'ng, Vincent Gaffney, Henry Chapman, Visual Heritage in the Digital Age, London 2013.

23
Marilena Vecco, A definition of cultural heritage: From the tangible to the intangible, in: Journal of Cultural Heritage, 11 (3), 2010, S. 321–324.

Die Bedeutung von 3D-Digitalisierungs- und Rekonstruktionstechniken für deren Erforschung hat immens zugenommen. [24] Eine Forschungslandschaft wird neben dem **klassischen** inhaltlich-geisteswissenschaftlichen Zugang zum digitalen Kulturerbe heute durch technologische Fragen wie die nach der digitalen Erfassung von Kulturerbe und des Datenmanagements sowie damit verbundene informatische, geodätische, ingenieurwissenschaftliche und architekturwissenschaftliche Zugänge dominiert. [25]

■ 24
Das europäische »Network of Excellence in Open Cultural Heritage« (EPOCH) betrieb zwischen 2004 und 2008 eine Statuserhebung des Digital Cultural Heritage und lieferte eine noch immer weitgehend aktuelle Übersicht des Fachgebiets und damit verbundener Zugänge und Herausforderungen. David Arnold, Guntram Geser, EPOCH Research Agenda – Final Report, Brighton 2008. Weiterführend beispielsweise: A. Bentkowska-Kafel et al., Digital Techniques for Documenting and Preserving Cultural Heritage, Kalamazoo 2017.

■ 25
Siehe Sander Münster, A Survey on Topics, Researchers and Cultures in the Field of Digital Heritage. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2017.

A.5 Die fachwissenschaftlichen Perspektiven – Archäologie und Kunstgeschichte

Archäologie

Die Archäologie als Disziplin zur Erforschung **materieller Evidenzen** untersucht Artefakte als Überreste menschlicher Kultur. [26] Sie wird im deutschsprachigen Raum traditionell den Kulturwissenschaften zugeordnet. Im Gegensatz zum Bereich des kulturellen Erbes steht bei der Archäologie nicht die physische Bewahrung des Artefakts, sondern dessen Bestandsaufnahme sowie – in unscharfer Abgrenzung beispielsweise zu den anderen historischen Wissenschaften – deren kulturelle Einordnung im Vordergrund. [27] Da dazu eine gründliche Datenerhebung und Dokumentation erforderlich ist, erhält die Archäologie die Rolle einer Vorreiterdisziplin bei der Verwendung von 3D-Digitalisierungsmethoden. Zu den dabei eingesetzten Verfahren gehören insbesondere das Laser-Scanning [28]

■ 26
Colin Renfrew, Paul Bahn, Archaeology, New York, Routledge 2005.

■ 27
Hinsichtlich der Bedeutung für die Geschichtswissenschaften wird die Archäologie traditionell als »Hilfswissenschaft« gesehen, welche materielle Evidenzen für eine weiterführende geschichtswissenschaftliche Interpretation liefert: Ernst Opgenoorth, Einführung in das Studium der neueren Geschichte, Paderborn 1997.

■ 28
E. Christofori et al., Recording cultural heritage using terrestrial laserscanning, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, S. 183–188, 2013. P. Clini et al., All-in-one laser scanning methods for surveying, representing and sharing information on archaeology; R. Lasaponara et al., Flights into the past, in: Journal of Archaeological Science, Vol. 38 2011, S. 2061–2070.

und die bildbasierte photogrammetrische Modellierung. 29 Als weitere Erhebungsmethode dienen Fotografien und Pläne der detaillierten Dokumentation von Ausgrabungen. Ausgehend von dieser Datengrundlage finden in der Archäologie häufig 3D-Rekonstruktionstechniken zur Untersuchung und Darstellung eines ursprünglichen Zustandes Verwendung. Sie unterstützen zudem die Erforschung und Vermittlung des historischen Kontextes dieser Artefakte wie beispielsweise deren Nutzung oder Funktion. 30

Kunst- und Architekturgeschichte

Kunstwerke wie Architektur, Bild und Skulptur stehen als spezifischer Teil eines kulturellen Erbes im Mittelpunkt der Kunstgeschichte wobei. 31 Durch das Studium der Realien sowie der dazugehörigen bildlichen und textlichen Quellen werden die Kunstwerke in allen ihren Aspekten erschlossen. Ein Hauptbereich der Methodik ist dabei die Stilkritik als Untersuchung genetischer und morphologischer Verbindungen. 32

■ **29**
Beispielsweise M. Lo. Brutto, P. Meli, Computer vision tools for 3d modelling in archaeology, in: M. Ioannides (Ed.), Progress in Cultural Heritage Preservation – EUROMED 2012, S. 1–6. Martin-Beaumont, N. Nony, B. Deshayes, M. Pierrot-Deseilligny, L. De. Luca, (2013) Photographer-friendly work-flows for image-based modelling of heritage artefacts, in: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-5 (2) 2013, XXIV International CIPA Symposium S. 421–424.

■ **30**
Siehe Marcello Carrozzino, Massimo Bergamasco, Beyond virtual museums: Experiencing immersive virtual reality in real museums, in: Journal of Cultural Heritage, 11 (4) 2010, S. 452–458.

■ **31**
Zur Geschichte der Disziplin: Heinrich Dilly, Kunstgeschichte als Institution, Frankfurt a. M. 1979; Hubert Locher, Kunstgeschichte als historische Theorie der Kunst 1750–1950, München 2001; Wiebke Ratzeburg, Mediendiskussion im 19. Jahrhundert. Wie die Kunstgeschichte ihre wissenschaftliche Grundlage in der Fotografie fand, in: Kritische Berichte, 30 (1) 2002, S. 22–39. Johannes Rößler, Kunstgeschichte als Realpolitik, in: W. Bałus (Hg.), Die Etablierung des Faches Kunstgeschichte in Deutschland, Polen und Mitteleuropa, Warszawa 2010, S.61–85. Zum Begriff der »Kunst«: Hubert Locher, Kunstbegriff und Kunstgeschichte – Schlosser, Gombrich, Warburg, in: W. Bałus (Hg.), Die Etablierung des Faches Kunstgeschichte in Deutschland, Polen und Mitteleuropa (S. 391–410), Warszawa S. 391–410.

■ **32**
Zur Stilkritik siehe Ralf-Peter Seippel, Architektur und Interpretation. Methoden und Ansätze der Kunstgeschichte in ihrer Bedeutung für die Architekturinterpretation, Essen 1989. Zum Begriff des »Stils« vgl. Robert Suckale, Stilgeschichte, in: Kunsthistorische Arbeitsblätter, 11 2001, S. 17–26.

Ein anderer Bereich, nämlich das Feld der Ikonografie und Ikonologie, erforscht vornehmlich den Gehalt oder die Symbole hinter den sichtbaren Formen. 33 Eine Verschränkung beider Richtungen findet sich in der Strukturanalyse. 34 Daneben werden in jüngster Zeit verstärkt Methoden aus anderen Wissenschaftsbereichen herangezogen. Dazu zählen die Medienwissenschaften, die Visual Studies, die Cultural Studies, aber auch die Anthropologie. 35 Digitale dreidimensionale Rekonstruktionen ergänzen dabei die Fotografie um die Möglichkeit, nicht mehr vorhandene Objekte sichtbar zu machen sowie Objekte wie Skulpturen und Architektur plastisch-dimensional darzustellen. 36 Außerdem werden 3D-Rekonstruktionen zu Dokumentationszwecken sowie zur Prüfung von Hypothesen und Quellenkorrespondenz verwendet. 37 Anders als für die Archäologie oder für den Umgang mit Kulturerbe existiert dabei jedoch bis heute weder ein gemeinsames Verständnis noch eine umfassende Typologie bzw. Systematik einer Methodologie. Im Besonderen sichtbar wird dieses Desiderat vor dem Hintergrund der traditionell primären Objektorientierung kunst- und baugeschichtlicher Forschung, welche mit der Vielschichtigkeit der Forschungsfragen kontrastiert.

33
Zu Ikonologie und Ikonographie siehe Ralf-Peter Seippel Architektur und Interpretation. Methoden und Ansätze der Kunstgeschichte in ihrer Bedeutung für die Architekturinterpretation, Essen 1989.

34
Zur Strukturanalyse siehe ebd.

35
Siehe Wolfgang Kemp, Kunstgeschichte und Interdisziplinarität, in: Kunsthistorische Arbeitsblätter, 7 (8) 2000, S. 43–48.

36
Hubertus Kohle, Digitale Bildwissenschaft, Glückstadt 2013.

37
Näher ausgeführt in Sander Münster, Wolfgang Hegel, Cindy Kröber, A classification model for digital reconstruction in context of humanities research, in: S. Münster, M. Pfarr-Harfst, P. Kuroczyński & M. Ioannides (Hg.), 3D Research Challenges in Cultural Heritage II, Cham 2016, S. 3–31.

A.6 Der 3D-Rekonstruktionsprozess — von der Quelle zum Modell und dessen Visualisierung

Der Prozess der digitalen 3D-Rekonstruktion umfasst nicht nur die Erstellung des virtuellen Modells mithilfe von Softwarewerkzeugen, durchgeführt zumeist von spezialisierten Modelleuren, sondern auch deren anschließende Visualisierung, also die Übertragung des Modells in ein Präsentationsformat. Dieser Prozess wird zumeist eng von geschichtswissenschaftlicher Forschungsarbeit begleitet, bei der zumeist Historiker anhand von Quellen eine fundierte Vorstellung vom Modellierungsobjekt entwickeln. 38

38
Vgl. Sander Münster, Peter-Heinrich Jahn, Markus Wacker, Von Plan- und Bildquellen zum virtuellen Gebäudemodell. Zur Bedeutung der Bildlichkeit für die digitale 3D-Rekonstruktion historischer Architektur, in: S. Ammon, I. Hinterwaldner (Hg.), Bildlichkeit im Zeitalter der Modellierung. Operative Artefakte in Entwurfsprozessen der Architektur und des Ingenieurwesens, München 2017, S. 255–286.

Quellen und Befunde

Grundlage einer wissenschaftlichen 3D-Rekonstruktion sind Quellen bzw. Befunde. [39] Da es sich bei Quellen zumeist um vom Menschen geschaffene Überreste handelt, sind diese im Kontext ihrer Entstehungszeit und -kultur zu betrachten, aber auch hinsichtlich der dahinter liegenden Intention kritisch zu untersuchen. [40] In den Geschichtswissenschaften werden Quellen hinsichtlich ihrer Unmittelbarkeit in Primär- und Sekundärquellen sowie hinsichtlich der Quellenart (beispielsweise Text- oder Bildquellen sowie archäologische Befunde als »Gesamtheit historisch aussagefähiger Beobachtungen in archäologischen Fundsituationen« [41]) unterschieden. [42] Unter Primärquellen versteht man dabei den Rekonstruktionsgegenstand betreffende historische, meist zeitgenössische Bild-, Plan- und Textartefakte wie beispielsweise Veduten, Plandarstellungen oder Verträge. Demgegenüber sind Sekundärquellen zumeist zeitlich nachgelagerte Quellen wie beispiels weise wissenschaftliche Auseinandersetzungen mit dem Rekonstruktionsgegenstand sowie die daraus resultierende mediale Aufbereitung desselben in Text, Grafiken und Bildern. Eine Abgrenzung zwischen beiden Quellenarten kann wie im Fall des archäologischen Befunds nicht immer trennscharf vorgenommen werden. Eine darüber hinausgehende Metaebene zu den primären und sekundären Quellen bilden logische Quellen. Sie werden deduktiv auf der Basis logischer Überlegungen entwickelt und umfassen beispielsweise architektonische Kategorisierungen wie beispielsweise Bautypologien, Bautechniken oder die Systematiken der historischen Baustile. [43]

Der Modellbegriff

Im Mittelpunkt einer digitalen 3D-Rekonstruktion steht die Erschaffung eines virtuellen Modells. Per definitionem ist ein Modell — wie im Beitrag von **Schelbert** (**→137**) ausführlich dargelegt wird — »die (vereinfachte) Nachbildung eines Originalsystems« und muss »dem Originalsystem im Hinblick auf den Zweck seiner Realisierung [...] hinreichend ähnlich« sein. [44] 3D-Rekonstruktionsmodelle zählen folglich unter dem Gesichtspunkt ihres Entstehungszeitpunkts zu den nachschaffenden Modellierungen beziehungsweise **post factum models**: das Modell wird erst im Nachgang des Originals geschaffen.

■ 39
Zum Rekonstruktionsbegriff vgl. Peter Geimer, Michael Hagner, 2012 Vergangenheit im Bild, in: P. Geimer et al., Nachleben und Rekonstruktion., München 2012, S. 9–13.

■ 40
Hierzu als grundlegende Überlegungen aus der Bildwissenschaft: F. Haskell, Die Geschichte und ihre Bilder, München 1995.

■ 41
M. Eggert, Prähistorische Archäologie, Tübingen 2001.

■ 42
Weiterführend beispielsweise bei: A. Brandt, Werkzeug des Historikers, Stuttgart 18. Auflage 2012. E. Opgenoorth, Einführung in das Studium der neueren Geschichte, Paderborn 1997.

■ 43
Innerhalb der architektonischen Epochenstile kommen, sobald sich Künstlerindividuen fassen lassen, als Unterkategorie die systemisch begreifbaren Personalstile bedeutender Architekten hinzu.

■ 44
Die angesprochene Modelltheorie geht dabei zurück auf Herbert Stachowiak. Die ursprüngliche allgemeine Modelltheorie wurde 1965 in Grundzügen skizziert. H. Stachowiak, Gedanken zu einer allgemeinen Theorie der Modelle, in: Studium Generale, 18 (7) 1965, S. 432–463. und 1973 dann in erweiterter und der heute häufig zitierten Form präsentiert H. Stachowiak, Allgemeine Modelltheorie, Wien 1973. Zum Modellbegriff vgl. außerdem aus der jüngeren Literatur: B. Mahr et al., Bilder zeigen Modelle — Modelle zeigen Bilder, in: G. Böhm et al., Zeigen, München 2010, S.183–205, insbes. S. 193–196. Vgl. außerdem I. Hinterwaldner, Das systemische Bild, München 2010, S. 116–120.

»to create the original appearance of ruined or totally vanished buildings and are frequently used in exhibition and museum display« [45]

Wie im Beitrag von **Wendler** (**→125**) in diesem Buch noch fundiert, unterscheiden sie sich darin von vorgelagerten Entwurfsmodellen wie beispielsweise dem Architekturentwurf. Eine weitere wesentliche Unterscheidung der Untersuchungsgegenstände ist die zwischen materiellen und immateriellen Objekten — zu Letzteren zählen beispielsweise Bräuche oder Tänze. Hinsichtlich des Arbeitsvorgehens ist die Unterscheidung zwischen der Rekonstruktion nicht mehr existenter oder nie realisierter Objekte, wie beispielsweise nie realisierter Planungsstände, und der Digitalisierung noch existenter Objekte wesentlich. Während **Digitalisierung** die technologische Übertragung eines Objektes in ein Digitalisat, zum Beispiel mittels einer semi-automatischen Modellierung anhand von Laser-Scans, bezeichnet, beinhaltet ein digitaler Rekonstruktionsprozess die Notwendigkeit zur menschlichen Interpretation von Daten. [46] Während die althergebrachten physischen Gebäudemodelle von Modellbauern mit traditionellen handwerklichen Techniken materiell angefertigt werden, wird bei digitalen 3D-Rekonstruktionen ein virtuelles Modell primär computergestützt erstellt. Dabei kommen als digitale Werkzeuge für eine derartige Modellerstellung vorrangig CAD-, 3D-Modellierungs-, Animations- oder VR-Programme zum Einsatz, welche als Expertensysteme durch Modellierer bedient werden. Technische Abläufe und Werkzeuge einer manuellen 3D-Rekonstruktion sind den Entwurfsprozessen in den Ingenieurs- oder Gestaltungsdisziplinen sowie der Architektur ähnlich — weiterführend ausgeführt wird dies im folgenden Kapitel zur Methodologie.

Die Rolle von Modellen im 3D-Rekonstruktionsprozess

Im wissenschaftlichen Erkenntnisprozess dienen Modelle gleichermaßen der Repräsentation sowie Kommunikation von Wissen [47] und als »methodisches Instrument zum Generieren von Erkenntnis«. [48] Dabei lässt ein Modellbegriff verschiedene Konnotationen zu. So entwickeln die am Forschungsprozess zu einem historischen Objekt beteiligten Personen in einer abstrakten Sichtweise verschiedene mentale Modelle als geistige Vorstellungen vom historischen Original. [49] Derartige Gedankengerüste sind hochgradig subjektiv und an individuelle Erfahrungswelten gekoppelt. Als Artefakt entsteht im Zuge des Arbeitsprozesses ein virtuelles, dreidimensionales Modell, in dem individuelle Wissensdomänen zusammenfließen. Wie in dieser Arbeit noch untersucht werden soll, erfordert eine solche computerisierte Simulation nicht nur eine Aushandlung zwischen individuellen mentalen Modellen der Beteiligten, sondern auch die Beachtung von Anforderungen der computerisierten Modellerstellung.

■ **45**
John Wilton-Ely, Architectural Model, in: n. b. (Hg.), The Dictionary of Art, Bd. 2, London 1996, S.335–338.

■ **46**
Giuliana de Francesco, Andrea D'Andrea, 2008 Standards and Guidelines for Quality Digital Cultural Three-Dimensional Content Creation, in: M. Ioannides, A. Addison, A. Georgopoulos & L. Kalisperis (Hg.), Digital Heritage: Proceedings of the 14th International Conference on Virtual Systems and Multimedia. Project Papers, Budapest, Archaeolingua, Münster 2008, S. 229–233. Sander, Wolfgang Hegel, Cindy Kröber, A classification model for digital reconstruction in context of humanities research, in: S. Münster, M. Pfarr-Harfst, P. Kuroczyński & M. Ioannides (Hg.), 3D Research Challenges in Cultural Heritage II, Cham 2016, S. 3–31.

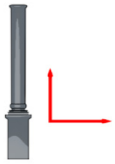
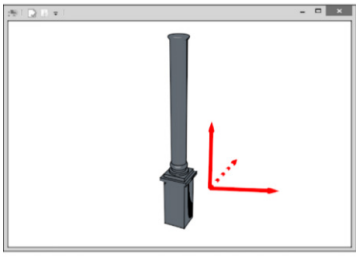
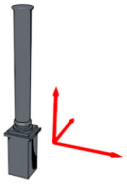
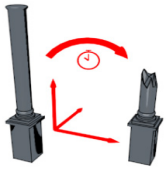
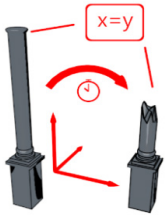
■ **47**
Mahr, Bernd, Das Wissen im Modell, Berlin 2004.

■ **48**
P. E. Stephan, Denken am Modell, in: B. E. Bürdek (Hg.), Der digitale Wahn, Frankfurt a. M. 2001, S.109–129.

■ **49**
Franco Niccolucci, Setting Standards for 3D Visualization of Cultural Heritage in Europe and Beyond, in: A. Bentkowska-Kafel, H. Denard & D. Baker (Hg.), Paradata and Transparency in Virtual Heritage, Burlington 2012, S.23–36.

3D als Raumbezug

Gemeinhin bezieht sich das Präfix **3D** auf das im Mittelpunkt einer digitalen 3D-Rekonstruktion stehende räumlich-dreidimensionale Modell. Darüber hinaus haben sich insbesondere in Computergrafik und Geowissenschaften weitere Dimensionierungen etabliert. 02

	2D bezeichnet räumlich-zweidimensional skalierte Modelle und Darstellungen wie beispielsweise Auf- oder Grundrisse mit den Dimensionen Breite und Länge
	2,5D bezeichnet in der Computergrafik die perspektivische Darstellung eines Modells auf einem räumlich zweidimensional skalierten Medium wie dem Computermonitor oder einem Ausdruck.
	3D bezeichnet ein virtuelles oder physisch räumlich-dreidimensionales Modell, welches in den Dimensionen Höhe, Länge und Breite skaliert ist.
	4D steht für ein räumlich-dreidimensional sowie zeitlich skaliertes Modell. Beispielhaft hierfür ist das Modell eines Baus, welches neben der dreidimensional-räumlichen Gliederung auch Informationen zu dessen Veränderung über die Zeit wie den Bauablauf beinhaltet.
	5D und höher: Vereinzelt wird neben der Einbeziehung der drei räumlichen sowie der zeitlichen Dimension in ein virtuelles Modell noch dessen semantische Anreicherung als weitere Dimension benannt. 50

□ 02
Modell- und Abbildungsdimensionen virtueller 3D-Rekonstruktion. (Sander Münster)

■ **50**
Beispielhaft: A. Doulamis et al. (2015) 5D Modelling: An Efficient Approach for Creating Spatiotemporal Predictive 3D Maps of Large-Scale Cultural Resources, In: ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. Volume II-5, No. W3, S. 61–68

Das Modell als Objekt

Auch wenn in Modellen ein Sachbezug zum dargestellten Objekt erkennbar bleiben muss, werden Modelle und das darin enthaltene Wissen selbst zum Objekt und zum Gegenstand sozialer Interaktion. Zu Funktion und Autonomie von Modellen hat sich ein wissenschaftstheoretisch wichtiger Diskurs entwickelt. Vor diesem Hintergrund führt Kuhn aus, dass »Modelle [...] der Gruppe bevorzugte Analogien [liefern]«. [51] Dabei werden Modelle nach Mahr wiederum zu einem vom ursprünglichen Kontext losgelösten »Modell für etwas« [52] und repräsentieren als solches ein Ordnungssystem, das zum Objekt — beispielsweise von Diskursen — werden kann oder auf andere Sachverhalte übertragbar ist.

■ **51**
Thomas Kuhn, Die Entstehung des Neuen, Frankfurt a. Main 1978.

■ **52**
Bernd Mahr, Das Wissen im Modell, Berlin 2004.

Die Simulation

Eng mit dem Modellbegriff verwandt ist der Begriff der Simulation. Während ein Modell einen statischen Zustand bezeichnet, beinhaltet die Simulation die »retrospektiv-historische oder [...] perspektivische Darstellung eines zeitlichen Verlaufs«. [53] Simulationen dienen der »Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.« [54]

Im Kontext der 3D-Rekonstruktion bezeichnen Modell und Simulation somit gemeinsam eine — gegenüber der Realität — auf ausgewählte Parameter reduzierte Nachbildung und deren computerisierte Berechnung. Law und Kelton unterscheiden Simulationsarten anhand der verwendeten Modelle, wobei sich folgende Klassifikationen ergeben: [55]

- → statisch oder dynamisch,
- → diskret oder kontinuierlich.
- → deterministisch oder stochastisch.

Entsprechend dieser Klassifikation ist beispielsweise das 3D-Modell von Zeitschnitten eines Bauablaufs eine dynamische (Bauablauf), diskrete (Zeitschnitte) und deterministische (nicht-zufällige) Simulation.

■ **53**
Hubertus Kohle, Digitale Rekonstruktion, in: F. Ioannides, M. Rehbein, H. Kohle (Hg.), Digital Humanities. Eine Einführung, Stuttgart 2017, S. 315–327. J. B. Metzler. Siehe auch Racha Chahrour, Integration von CAD und Simulation auf Basis von Produktmodellen im Erdbau, Kassel 2006.

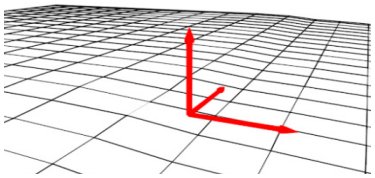
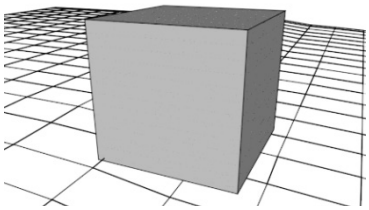
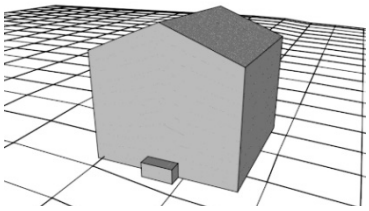
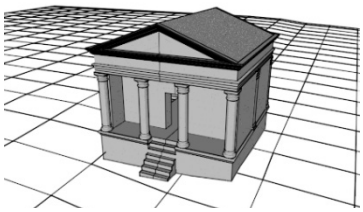
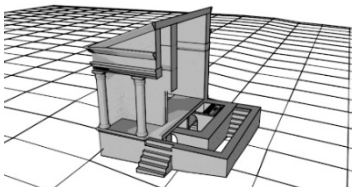
■ **54**
Zitiert nach: Franz Liebl, Simulation: problemorientierte Einführung, 2, überarb. Aufl., München 1995. Thomas Sauerbier, Theorie und Praxis von Simulationssystemen: eine Einführung für Ingenieure und Informatiker, Braunschweig 1999.

■ **55**
Averill M Law, W. David Kelton, Simulation modeling and analysis, 3. ed., New York 2000.

Level of Detail (LoD) – Klassifizierung nach Detaillierungsgrad

Einen inzwischen weitverbreiteten Ansatz zur Qualifizierung von 3D-Rekonstruktionen stellt der aus den Geowissenschaften stammende Ansatz des Level of Detail (LoD), also die Klassifizierung nach Detaillierungsgrad, dar. 56 Diese unterscheidet zwischen fünf Abstufungen. 03 Da diese hinsichtlich der Graduierung nur grob beschrieben sind, führt dies in der Praxis häufig zu Zwischenstufen wie bspw. einem LoD 2,5 als Modell der Gebäudeaußenhülle inklusive Fensterteilung. Darüber hinaus haben sich in einigen Anwendungsfeldern spezifische LoD-Klassifikationen entwickelt, wie beispielsweise im Aufsatz von Martens für das Building Information Management ausgeführt wird.

■ **56**
Filip Ir. Biljecki, The concept of level of detail in 3D city models, 62 2013, Delft. Ähnlich auch in der Computergrafik: David Luebke, Level of Detail for 3D Graphics, San Francisco 2003.

	LoD0: Regionalmodell bzw. Geländemodell, welches der Verdeutlichung von Lagebeziehungen dient.
	LoD1: Auf die Kubatur reduziertes Modell.
	LoD2: Vereinfachtes 3D-Modell der Außenhülle.
	LoD3: Detailliertes 3D-Modell der Außenhülle.
	LoD4: Detaillierte Nachbildung von Außen- und Innenräumen.

□ 03
Modell- und Abbildungsdimensionen virtueller 3D-Rekonstruktion. (Sander Münster)

Visualisierung

Ergebnis der 3D-Rekonstruktion ist ein 3D-Modell, das als digitaler Datensatz vorliegt. Als solches ist sowohl dem Bearbeiter als auch dem Betrachter nur mittelbar zugänglich. Um ein digitales 3D-Modell sichtbar und bearbeitbar zu machen, muss es abgebildet bzw. **gerendert** [57] werden [58], wobei neben statischen Einzelbildern häufig Bewegtbilddarstellungen oder interaktive Anwendungen entstehen. [59] Neben einer geometrischen Form sind für die visuelle Qualität sowohl eine virtuelle Beleuchtung als auch die Nachbildung von Materialeigenschaften des Referenzobjektes entscheidend. Auch physische Ausgaben des virtuellen 3D-Modells, erstellt beispielsweise mittels 3D-Druck-Verfahren oder anderen Techniken des Rapid Prototyping, erlangen zunehmend an Relevanz. [60] Da im Gegensatz zu textlichen Forschungsergebnissen bei einer digitalen 3D-Rekonstruktion selbst bei fehlenden oder inkonsistenten Befunden eine Entscheidung bezüglich der durch die Modellierung herauszuarbeitenden historischen Gestalt getroffen werden muss, sind digitale 3D-Modelle und damit verbundene Visualisierungen keine holistischen Darstellungen [61], sondern stellen nur eine Hypothese beziehungsweise Interpretation dar. [62] Wie im Kapitel zur Darstellung noch ausgeführt wird, stellt die Darstellung damit verbundene ›Unschärfen‹ und ›Unsicherheiten‹ ebenso wie der zugrunde liegende Forschungs- und Interpretationsprozesse eine Herausforderung dar.

57
Rendering bezeichnet in der Computergrafik die Berechnung einer Abbildung des virtuellen Modells. Weiterführend hierzu: José Luis Encarnação, Wolfgang Straßer, Reinhard Klein, Graphische Datenverarbeitung, München [u. a.], Oldenbourg 1996. Heidrun Schumann, Wolfgang Müller, Visualisierung, Berlin [u. a.] 2000.

58
Allgemein zu dieser Relation vgl. Mahr, Wendler, Bilder zeigen Modelle (Anm. 37), S. 199–203. Generell zur Bildlichkeit visueller Vergangenheitsrekonstruktionen: Geimer, Hagner, Vergangenheit im Bild (Anm. 13), S. 12f.

59
Einen Ansatz zur Klassifikation stellt die von nachfolgend zitierten Autoren entwickelte »Engagement Taxonomy« dar, welche solche visuellen Ausgaben anhand interaktiver Einflussmöglichkeiten unterscheidet: S. Grissom, M. F. McNally, T. Naps, Algorithm visualization in CS education: Comparing levels of student engagement, in: Proceedings of the ACM Symposium on Software Visualization, 2003.

60
Vgl. bspw. Marc Grellert, Rapid Prototyping in the Context of Cultural Heritage and Museum Displays. Buildings, Cities, Landscapes, Illuminated Models, in: S. Münster, M. Pfarr-Harfst, P. Kuroczyński & M. Ioannides (Hg.), 3D Research Challenges in Cultural Heritage II, Cham 2016.

61
Diane Favro, In the eyes of the beholder. Virtual Reality re-creations and academia, in: L. Haselberger, J. Humphrey, D. Abernathy (Hg.), Imaging ancient Rome: Documentation, visualization, imagination: Proceedings of the 3rd Williams Symposium on Classical Architecture, Rome, 20.- 23. 5. 2004, Portsmouth 2006, S. 321–334.

62
Ausgeführt u. a. in: Bernard Frischer, Dean Abernathy, Fulvio Giuliani, Scott Cairoli, T. Russell, Hauke Ziemssen, ibid. A new digital model of the Roman Forum, S. 163–181.

A.7 Die Entstehung von 3D-Rekonstruktionen in interdisziplinären Projekten

Die Erstellung digitaler 3D-Rekonstruktionen findet vorrangig in Form von Projekten als zeitlich abgegrenzte, zielgerichtete und prototypische Arbeitsfolge statt, hinter welcher als Akteure interdisziplinäre Teams stehen.

Projekte

Projekte stellen unter arbeitswissenschaftlichen Gesichtspunkten eine Form temporärer Arbeitsorganisation dar, die sich durch Systeme aus Regeln zur Koordination einer arbeitsteiligen Zielerreichung auszeichnet. [63] Dabei stellen Projekte nach DIN 69901 Aufgaben dar, die »im Wesentlichen durch Einmaligkeit der Bedingungen in ihrer Gesamtheit gekennzeichnet« sind. [64] Wesentliche Merkmale dieser Arbeitsform sind Aufgabenorientierung, Teamarbeit, zeitliche Begrenztheit und eine Zustandsveränderung. [65] Alle Aspekte der Steuerung von Projekten werden unter dem Dachbegriff Projektmanagement zusammengefasst. 3D-Rekonstruktionsprojekte sind dabei spezifisch Innovationsprojekte. Derartige Vorhaben zeichnen sich durch den hohen Komplexitätsgrad der Aufgabenstellung und die damit verbundene Unklarheit der Problemstruktur sowie die Unabsehbarkeit von Problemkomponenten aus [66], wodurch ein Arbeitsablauf ein **ständiges Probieren, Annähern, sehr häufig verbunden mit Wiederholungsschritten** ist, bis ein Ergebnis als »brauchbar selektiert wird«. [67]

Interdisziplinäre Teams

Eine Bearbeitung von 3D-Rekonstruktionsprojekten erfolgt zumeist durch interdisziplinäre Teams. Der Begriff des Teams bezeichnet eine »auf Dauer oder vorübergehend zusammengehörige, zahlenmäßig überschaubare Gruppe von Personen, die sich durch eine gemeinsame Zielsetzung, relativ hohe, grundsätzlich aber begrenzte Autonomie und eine spezifische Arbeitsform auszeichnet«. [68] Interdisziplinarität bezeichnet eine »Konfrontation von mehreren Disziplinen mit einem [alle betreffenden] Thema oder einer Fragestellung.« [69] Eine interdisziplinäre Zusammenarbeit zeichnet sich gleichermaßen durch die Entwicklung einer disziplinübergreifenden Terminologie sowie eine gemeinsame Methodologie aus. [70]

63
Zur Definition siehe P. Nausner, Projektmanagement, Wien 2006. Die Organisation von Arbeitsprozessen als Projekt ist dabei ein zumindest den gesamten Zeitraum der Neuzeit umfassendes Phänomen; H. Kerzner, Project management, New York 2003.

64
Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DIN 69901-5 Projektmanagement – Projektmanagementsysteme – Teil 5. Begriffe, Berlin 2009.

65
Hierzu: R. A. Lundin et al., A theory of the temporary organization, in: Scandinavian Journal of Management, 11 (4) 1995, S. 437–455. P. Nausner, Projektmanagement, Wien 2006.

66
J. Hauschildt et al., Innovationsmanagement, München 2007.

67
P. Nausner, Projektmanagement, Wien 2006.

68
F. X. Bea et al., Organisation, Stuttgart 2010.

69
M. Schophaus et al., Von Brücken und Einbahnstraßen, Berlin 2003, synonym: M. Gibbons, The New Production of Knowledge, London 1994.

70
Gibbons, The New Production of Knowledge, London 1994; A. Krishnan, What are academic disciplines, Southhampton 2009.

Ein diesbezüglicher Grad der Institutionalisierung reicht von temporären Kooperationen bis hin zur Schaffung feldübergreifender, hybrider Forschungsdisziplinen wie beispielsweise den bereits benannten Digital Humanities. 71 Im Fall der 3D-Rekonstruktion findet eine Zusammenarbeit vor allem zwischen Modelleuren, welche für die Erstellung und Visualisierung des virtuellen Modells mithilfe von Softwarewerkzeugen verantwortlich sind, und geschichtswissenschaftlichen Forschern statt, die anhand von Quellen eine fundierte Vorstellung vom Modellierungsobjekt entwickeln. 72 Zwischen allen beteiligten Akteuren einen Konsens über Sprache, Fragestellungen und Methodologie, über die Integration des gemeinsamen Ergebnisses sowie die Diffusion und Verbreitung dieses Ergebnisses zu finden, stellt dabei eine große Herausforderung dar.

Geschichtswissenschaftliche und populäre Inhalte

Eine wissenschaftliche Rekonstruktion zielt auf ein möglichst enges Verhältnis zwischen dem Modell und einer vergangenen Wirklichkeit ab. Da man der Vergangenheit medial nur mithilfe von Quellen habhaft werden kann, sind diese von grundlegender und damit entscheidender Bedeutung. Damit unterscheidet sich die wissenschaftliche Rekonstruktion von digitalen 3D-Modellierungen im Kontext von Unterhaltungsanliegen wie beispielsweise der Film- und Computerspielproduktion. Letztere sollen beim Betrachter primär eine authentisch anmutende Wirkung von Vergangenheit erzielen, während eine korrekte Objektnachbildung häufig von lediglich optionaler Bedeutung ist. 73 Ein anderes Phänomen betrifft die Popularisierung der Produktion: Mit der flächendeckenden Verbreitung von Computern nebst 3D-Werkzeugen, Bildbearbeitungs- und Videoschnittsoftware ist beinahe jedem die Produktion und Verbreitung von 3D-Modellen und Modelldarstellungen möglich. Die Qualität weist gegenüber professionellen Angeboten — zumindest hinsichtlich der erreichbaren Ergebnisse - nur wenige Einschränkungen auf. 74 Auch mit Blick auf die inhaltliche Qualität lässt sich keine pauschale Unterscheidung zwischen wissenschaftlicher und nicht-wissenschaftlicher 3D-Visualisierung treffen. Wenn in der hier vorliegenden Arbeit eine Betrachtung geschichtswissenschaftlicher Rekonstruktionen weitgehend synonym für eine Beteiligung akademischer Institutionen steht, resultiert dies primär daraus, dass Publikationen zu kommerziellen Vorhaben eine Geschichtswissenschaftlichkeit nur selten thematisieren und bewertbar machen.

71
Julie Thompson Klein, A Conceptual Vocabulary of Interdisciplinary Science, in: P. Weingart, N. Stehr (Hg.), Practising Interdisciplinarity, Toronto 2000, S.3–24.

72
Ähnliche Vorgehensmodelle gibt es beispielsweise zu Entwurfsprozessen des Produktdesigns: Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz, J. Feldhusen, Karl-Heinrich Grote, Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung, Berlin [u. a.] 2007.

73
Sander Münster, Militärgeschichte aus der digitalen Retorte — Computergenerierte 3D-Visualisierung als Filmtechnik, in: A. Kästner, J. Mazerath (Hg.), Mehr als Krieg und Leidenschaft. Die filmische Darstellung von Militär und Gesellschaft der Frühen Neuzeit (Militär und Gesellschaft in der frühen Neuzeit, 2011/2), Potsdam 2011 S. 457–486. Als Beispiel für populäre Rekonstruktionen mit dem Anspruch historischer Plausibilität sei auf die Computerspielreihe »Assasin Creed« verwiesen.

74
Beispielhaft sei auf einige mit der kostenfreien 3D-Software Blender realisierte Filme verwiesen, http://www.blender.org/features-gallery/movies/.

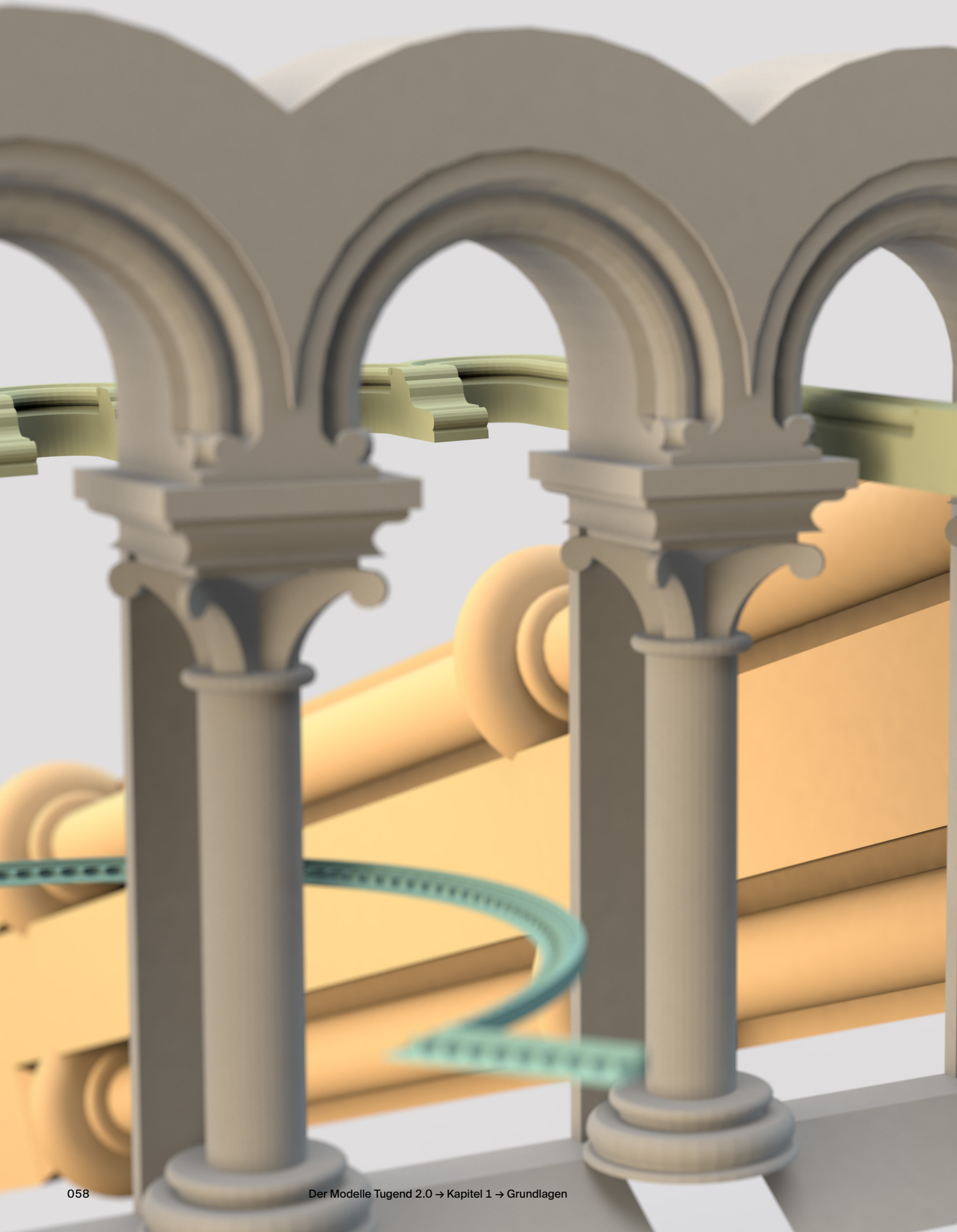
A.8 Resümee

Die Vielschichtigkeit disziplinärer Zugänge zur digitalen 3D-Rekonstruktion spiegelt sich auch in deren Terminologie wider. So sind relevante Begrifflichkeiten und Konzepte den Geistes- und Kulturwissenschaften, der Informatik sowie den Geowissenschaften entlehnt. Wichtige Elemente für eine Emanzipation als wissenschaftliches Feld sind zudem die Entwicklung unikaler Terminologien und Konzepte [75], welche in Grundzügen bei Konzepten wie dem der **5D**-Modelle erkennbar ist. Dabei lässt sich jedoch feststellen, dass nicht zuletzt aufgrund der disziplinären Heterogenität des Feldes nur bedingt ein gemeinsames Verständnis existiert. Vor diesem Hintergrund ist ein wichtiges Anliegen dieses Buches, mit digitaler 3D-Rekonstruktion verbundene Konzepte zu diskutieren und exemplarisch darzulegen und so zu einem gemeinsamen Grundverständnis beizutragen.

■ **75**
Armin Krishnan, What are academic disciplines. Some observations on the Disciplinarity vs. Interdisciplinarity debate, Southhampton 2009, S. 9.

A.9 Danksagungen

Ich danke Dr. Peter-Heinrich Jahn und Dr. Wolfgang Hegel für ihre wichtigen Impulse und Literaturhinweise. Teile dieses Textes wurden in ausführlicherer Form veröffentlicht in: Sander Münster, Wolfgang Hegel, Cindy Kröber, A classification model for digital reconstruction in context of humanities research, in: Sander Münster, Mieke Pfarr-Harfst, Piotr Kuroczyński, Marinos Ioannides (Hg.), 3D Research Challenges in Cultural Heritage II, Cham 2016, S. 3–31, ebd. Sander Münster, Peter-Heinrich Jahn, Markus Wacker, Von Plan- und Bildquellen zum virtuellen Gebäudemodell. Zur Bedeutung der Bildlichkeit für die digitale 3D-Rekonstruktion historischer Architektur, in: Sabine Ammon, Inge Hinterwaldner (Hg.), Bildlichkeit im Zeitalter der Modellierung. Operative Artefakte in Entwurfsprozessen der Architektur und des Ingenieurwesens, München 2017, S. 255–286.



Heike Messemer

B. Das digitale Modell historischer Architektur – Seine Ursprünge, Technologien und Protagonisten

→ Architekturrekonstruktion, Digitale 3D-Rekonstruktion, Digitales 3D-Modell, head mounted display, Historische Architektur, Kulturerbe, Online-Archiv, Virtual Reality

Wissenschaftlich erstellte digitale 3D-Modelle von historischer Architektur wurden bislang vor allem aus der Sicht der klassischen und vorgeschichtlichen Archäologie betrachtet. Jedoch handelt es sich bei den am Computer rekonstruierten Bauwerken vielfach um Architektur, die kunsthistorisch erforscht wird. Umso drängender ist es, die neuen Forschungswerkzeuge und Visualisierungsmethoden, die aus der wissenschaftlichen digitalen 3D-Rekonstruktion von meist nicht mehr oder nur mehr in Teilen existierenden Bauwerken resultieren, auch aus kunsthistorischer Perspektive in den Blick zu nehmen. Ziel dieses Aufsatzes ist es daher, die technischen Grundlagen und wesentlichen Vorläufer für die Entstehung von digitalen 3D-Modellen historischer Architektur aus einem spezifisch kunsthistorischen Blickwinkel zu untersuchen. Vorgestellt werden wichtige Projekte zur 3D-Rekonstruktion historischer Architektur, die in den vergangenen Jahrzehnten durchgeführt wurden. Anhand dessen werden Protagonisten identifiziert, die in diesem Feld federführend tätig sind. Im Fokus der Untersuchung stehen unterschiedliche Forschungsansätze, Anwendungsbereiche und Technologien. Dadurch soll die große Bandbreite im Bereich wissenschaftlicher 3D-Modellierung von historischer Architektur verdeutlicht werden und in der Folge mögliche Anknüpfungspunkte für zukünftige Projekte bieten. Auch die Bedeutung von wissenschaftlichen Institutionen und einschlägigen Konferenzen für die Institutionalisierung digitaler Architekturmodelle in der Forschung wird aufgezeigt. Darüberhinaus eröffnet der Hinweis auf ein aktuelles Projekt, das Virtual-Reality-Technologien einsetzt, wie zukünftig 3D-Rekonstruktionen nicht mehr existierender Bauwerke der Öffentlichkeit mittels Head Mounted Displays präsentiert werden können. Abschließend wird auf das große Potential dem weltweiten Zugänglichmachen und Dokumentieren von (bedrohtem / zerstörtem) Kulturerbe zu dienen anhand des Beispiels eines öffentlich zugänglichen Online-Archivs von digitalen 3D-Modellen historischer Architektur hingewiesen.

B.1 Einführung

Die digitale Visualisierung und Rekonstruktion historischer Architektur ist im Vergleich zu der langen Tradition haptischer Architekturmodelle und der bildlichen Rekonstruktion von Gebäuden noch ein sehr junges Feld, das insbesondere in den letzten Jahren großen Aufschwung in der geisteswissenschaftlichen Forschung erfahren hat. Umso wichtiger wird es, zu seinen Ursprüngen vorzudringen, Vorläufer und Protagonisten zu identifizieren und seinen Entstehungskontext zu erfassen. Bisher fehlten Publikationen mit einem umfassenden geschichtlichen Überblick, insbesondere solche, die auch den direkten Zusammenhang zwischen technischer Entwicklung und geisteswissenschaftlicher Anwendung von digitalen Architekturmodellen aufzeigen. 01 Auch erfolgten bisherige Darlegungen meist aus der Sicht der klassischen und vorgeschichtlichen Archäologie. Einen Überblick über die Situation in den Geschichtswissenschaften lieferte Sander Münster 2010. 02

Im vorliegenden Kapitel werden aus kunsthistorischer Perspektive die technischen Grundlagen und wesentlichen Vorläufer für die Entstehung von digitalen 3D-Modellen historischer Architektur genauer betrachtet. Vorgestellt werden wichtige Projekte der vergangenen Jahrzehnte, wobei im Fokus der Untersuchung unterschiedliche Forschungsansätze, Anwendungsbereiche und Technologien stehen. Auch die Bedeutung von wissenschaftlichen Institutionen und Konferenzen für die Institutionalisierung digitaler Architekturmodelle in der Forschung wird aufgezeigt.

■ 01
Die Autorin hat in ihrer 2018 abgeschlossenen Dissertation »Entwicklung und Potentiale digitaler 3D-Modelle historischer Architektur– Kontextualisierung und Analyse aus kunsthistorischer Perspektive« unter der Betreuung von Prof. Dr. Stephan-Hoppe und Prof. Dr. Hubertus Kohle an der Ludwig-Maximilians-Universität München einen international ausgerichteten Überblick über die Entwicklung digitaler Rekonstruktion historischer Architektur erarbeitet. Vgl. die Website zum Promotionsprojekt: http://www.digitale-kunstgeschichte.de/wiki/Typologie_und_Genese_digitaler_Architekturmodelle.
In ihrem 2016 erschienenen Aufsatz »The Beginnings of Digital Visualization of Historical Architecture in the Academic Field« legte sie erstmals einen Überblick über die Entwicklung wissenschaftlicher 3D-Modelle historischer Architektur vor: Heike Messemer, The Beginnings of Digital Visualization of Historical Architecture in the Academic Field, in: Stephan Hoppe u. Stefan Breitling (Hg.), Virtual Palaces, Part II. Lost Palaces and their Afterlife. Virtual Reconstruction between Science and Media, München 2016 (= PALATIUM e-Publications, 3), S. 21–54, DOI: 10.11588/arthistoricum.83.79

■ 02
Vgl. Sander Münster, Entstehungs- und Verwendungskontexte von 3D-CAD-Modellen in den Geschichtswissenschaften, in: Klaus Meißner u. Martin Engelien (Hg.), GeNeMe '11: Gemeinschaften in Neuen Medien, TU Dresden, 07. – 8. September 2011, Dresden 2011, S. 99–108.

B.2 Die Ursprünge — eine Geschichte der Technologien

Digitale Rekonstruktionen von historischen Bauwerken erlebten in den letzten Jahren einen immensen Aufschwung. Beinahe omnipräsent begegnen sie uns in Museen, in Fernsehdokumentationen, Webseiten, Videospielen u. v. m. Die Computertechnik hat in den letzten Jahrzehnten große Innovationen hervorgebracht, die auch die Entwicklung digitaler Rekonstruktionen maßgeblich geprägt haben: im Bereich der Hardware wären hier zu nennen (unter anderem) der Personal Computer, der Laptop, das Smartphone, der Tabletcomputer, und Virtual-Reality-Brillen, im Bereich Software das Internet und diverse Softwareprodukte.

Doch wo liegen die Ursprünge digitaler Modelle historischer Architektur? Ermöglicht wurde ihre Entwicklung durch Innovationen in der Computertechnologie im 20. Jahrhundert. Ein wesentlicher Schritt waren Kathodenstrahl-Bildschirme. Sie ermöglichten es, mittels eines 1955 am **Massachusetts Institute of Technology** (MIT) entwickelten sogenannten Lightpen die am Bildschirm dargestellten Informationen zu bearbeiten. 03 In diesem Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion stellt das von Ivan Edward Sutherland entwickelte **Sketchpad** einen essenziellen Beitrag dar. 04 1963 veröffentlichte er am MIT seine Doktorarbeit, in der er den interactive graphics terminal präsentierte 01. 05 Mit diesem ließen sich auf einem Bildschirm zweidimensionale Objekte zeichnen und verändern. 06 Mit einer Tastatur und einem **Lightpen** konnten diese virtuellen Objekte bearbeitet werden. 07 **Sketchpad** stellte damit eine der ersten grafischen Benutzeroberflächen dar und fand großes Interesse bei Ingenieuren im Bereich des **Computer-Aided Design** (CAD). 08

■ 03
Vgl. Bernhard Langer, Computerdarstellung. Vom Programm zum digitalen Ökosystem, in: Wolfgang Sonne (Hg.), Die Medien der Architektur, Berlin u. a. 2011, S. 157–168, hier: S. 158.

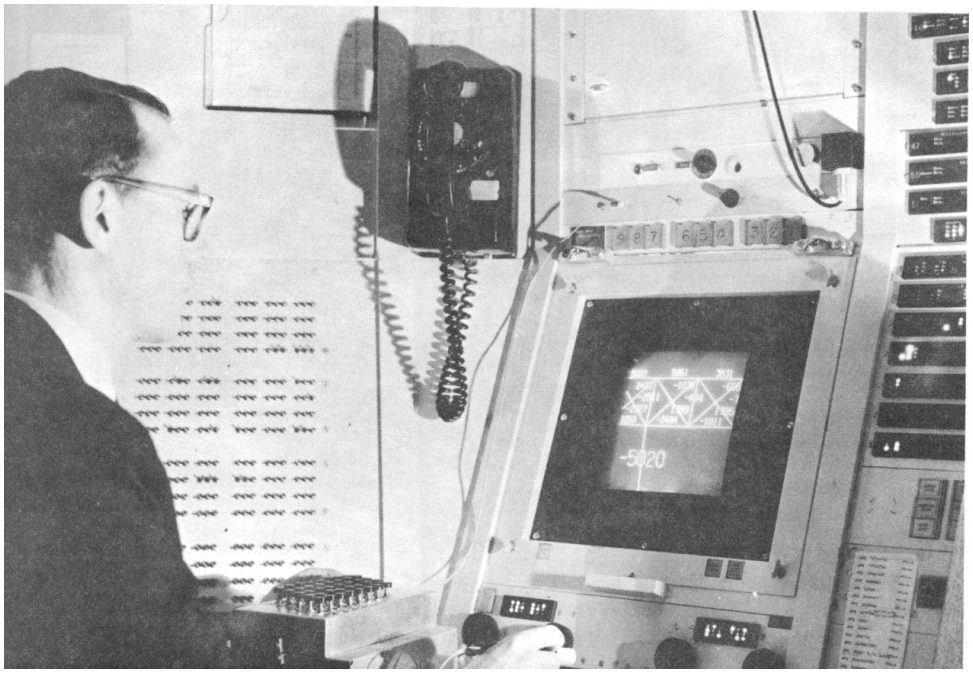
■ 04
Vgl. Ivan Edward Sutherland, Sketchpad, A man-machine graphical communication system (Diss. 1963, MIT, Massachusetts), kommentierte Neuauflage, Cambridge 2003; Heike Messemer 2016, S. 21–54, hier: S. 22.

■ 05
Vgl. William J. Mitchell, Computer-aided architectural design, New York 1977, S. 14–15.

■ 06
Vgl. A. Blackwell u. Kerry Rodden, Preface to this Electronic Edition, in: Ivan Edward Sutherland 2003, S. 3–6, hier: S. 3; William J. Mitchell 1977, S. 14–15.

■ 07
Vgl. William J. Mitchell 1977, S. 14–15.

■ 08
Vgl. A. Blackwell u. Kerry Rodden 2003, S. 3–6, hier: S. 3.

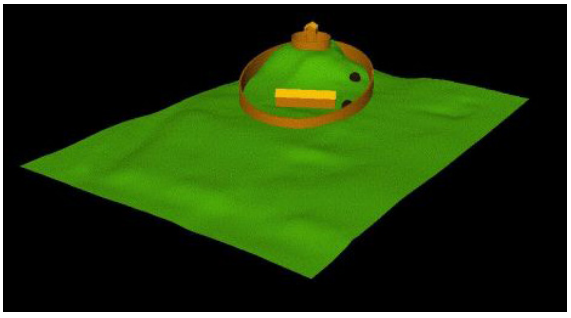


□ 01
Ivan Edward Sutherland bedient Sketchpad, Fotografie vom 1. Januar 1963. (Computer Laboratory, University of Cambridge. Reproduced by permission.)

CAD-computergestütztes Entwerfen — befand sich in den 1960er und 1970er Jahren noch in seinen Anfängen. 09 Die damals erhältliche Hard- und Software war sehr kostspielig, sodass sie vornehmlich in der Automobil- und Luftfahrtbranche Verwendung fand. Architekturbüros konnten sich diese Technik größtenteils nicht leisten. Erst als sich Anfang der 1980er Jahre der Personal Computer (PC) durchzusetzen begann und auch architekturspezifische CAD-Programme entwickelt wurden, konnte sich CAD in Architekturbüros etablieren. 10

Das große Potenzial der neuen Computertechnologie für die Anwendung in der Wissenschaft erkannte bereits im Jahr 1973 der Archäologe John D. Wilcock. 11 Als eine Anwendungsmöglichkeit sah er computergenerierte Rekonstruktionen von historischen Monumenten. 12

Eine der ersten wissenschaftlichen digitalen Rekonstruktionen eines historischen Bauwerks stammt denn auch aus der Archäologie: Zwischen 1985 und 1989 wurde Mathrafal, eine frühmittelalterliche Burganlage in Wales, Großbritannien, die im 13. Jahrhundert zerstört wurde, digital rekonstruiert. 13 Unterstützung erhielt das Projekt vom **IBM UK Scientific Centre** sowie verschiedenen britischen Kulturinstitutionen. Vorgestellt wurde es auf der Konferenz **Computer Applications and Quantitive Methods in Archaeology** (CAA) im Jahr 1989. 14 Damit ist es das erste 3D-Modell eines archäologischen Monuments, das auf der 1973 gegründeten CAA präsentiert wurde. 15
Ziel des Projekts war es, mittels neuer Technologien im Bereich der Computergrafik die Funktion und Entwicklung der Burganlage zu erforschen. 16
Anhand der angewendeten Technologien konnten die Forscher in einem 3D-Modell des Geländes mehr Details erkennen, als zuvor bekannt waren. 02



☐ 02
3D-Modell der digital rekonstruierten Burganlage von Mathrafal in Wales, Großbritannien, Ende der 1980er Jahre. (Paul Reilly)

So zeichnete sich ein ovaler Bereich ab, der als Hof **bailey** gedeutet werden kann und bislang nicht in Mathrafal bekannt war. Diese und weitere durch neue Methoden erbrachte Erkenntnisse ergänzten bzw. widersprachen den bisherigen Forschungen und stellten sogar die Datierung der gesamten Anlage infrage. Aufgrund dieser Untersuchungen war es möglich, einen Plan für eine Ausgrabung zu erarbeiten, die 1989 durchgeführt wurde. 17
Diese Ausgrabung konnte in Verbindung mit der Auswertung historischer Quellentexte belegen, dass die einstige Annahme, Mathrafal sei prä-normannisch, nicht korrekt ist, die äußere Umgrenzung höchstwahrscheinlich erst zwischen 1200 und 1400 errichtet wurde. Diese Erkenntnisse stellten eine wichtige Bereicherung in der Erforschung von Mathrafal und weiterer historischer Anlagen in Wales dar.

■ **09**
William J. Mitchell 1977, S. 14–18.

■ **10**
Vgl. Bernhard Langer 1977, S. 17.

■ **11**
Vgl. John D. Wilcock, A General Survey of Computer Applications in Archaeology, in: John D. Wilcock (Hg.), Computer Applications in Archaeology 1. Science and Archaeology, Nr. 9, 1973, S. 17–21.

■ **12**
Vgl. ebd., insbes. S. 20 zum Stichwort »Miscellaneous Applications«; Bernard Frischer, Introduction. From digital illustration to digital heuristics, in: Bernard Frischer u. Anastasia Dakouri-Hild (Hg.), Beyond Illustration: 2D and 3D Digital Technologies as Tools for Discovery in Archaeology, Oxford 2008, S. i–xxiv, hier: S. vi.

■ **13**
Informationen zur digitalen Rekonstruktion der Burganlage von Mathrafal sind zu finden in: Christopher J. Arnold, Jeremy W. Huggett, Paul Reilly u. C. Springham, Mathrafal: a case study in the application of computer graphics, in: Sebastian Rahtz (Hg.), Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology 1989. CAA89 (BAR International Series 548) 1989, S. 147–155, insbes. S. 147, 149, 150, 152.

■ **14**
Hier vgl. auch: Bernard Frischer 2008, S. i–xxiv, hier: S. vi–vii.

■ **15**
Vgl. ebd.

■ **16**
Vgl. auch: Paul Reilly, Three-dimensional modelling and primary archaeological data, in: Paul Reilly u. Sebastian Rahtz (Hg.), Archaeology and the information age. A global perspective, London u. a. 1992, S. 147–173, hier: S. 165.

■ **17**
Die Ausgrabung 1989 wird ausführlich erläutert in: Christopher J. Arnold, Jeremy W. Huggett, Excavations at Mathrafal, Powys, 1989, in: Montgomeryshire collections, Bd. 83, 1995, S. 59–74, insbes. S. 59–60, 72.

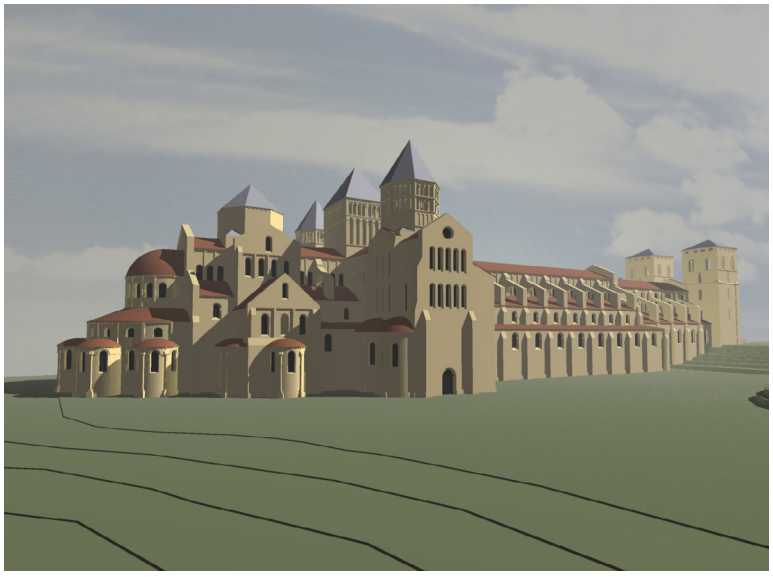
Technische Grundlage für die digitale Rekonstruktion der Burganlage von Mathrafal war das **WINchester Solid Modelling Programme** (WINSOM). 18 Anhand dessen konnten die zuvor erhobenen geophysikalischen und topografischen Daten über das Untersuchungsgebiet in ein am Computer erstelltes »three-dimensional wire-frame surface, or digital terrain model« 19 eingefügt werden. Indem die Forscher zusätzlich Licht und Schatten in die Darstellung integrierten, war es möglich, sämtliche Elemente der historischen Anlage besser zu erkennen.

Ein Meilenstein in der Geschichte der digitalen Rekonstruktion von historischer Architektur mit kunsthistorischem Gegenstand stellt ein Projekt zu Cluny III dar, das nur wenig später in Deutschland realisiert wurde: 1989 erarbeitete der Architekt Manfred Koob mit seinen Kollegen der Firma **asb baudat** in Bensheim eine digitale Rekonstruktion der im 19. Jahrhundert zerstörten Abteikirche Cluny III in Burgund, Frankreich. 20 Das Ergebnis war ein vierminütiger Film, der das einstige Erscheinungsbild sowohl des Äußeren als auch des Inneren der Kirche mit einer simulierten Kamerafahrt darstellte 03 04.

■ **18**
Vgl. Christopher J. Arnold, Jeremy W. Huggett, Paul Reilly u. C. Springham 1989 (s. 13), insbes. S. 150, 152.

■ **19**
Ebd. S. 150.

■ **20**
Ausführliche Informationen zur digitalen Rekonstruktion von Cluny III bietet: Manfred Koob, Die dreidimensionale Rekonstruktion und Simulation von Cluny III, in: Horst Cramer u. Manfred Koob (Hg.), Cluny. Architektur als Vision, Heidelberg 1993, S. 58–86, insbes. S. 58–59, 64, 78.

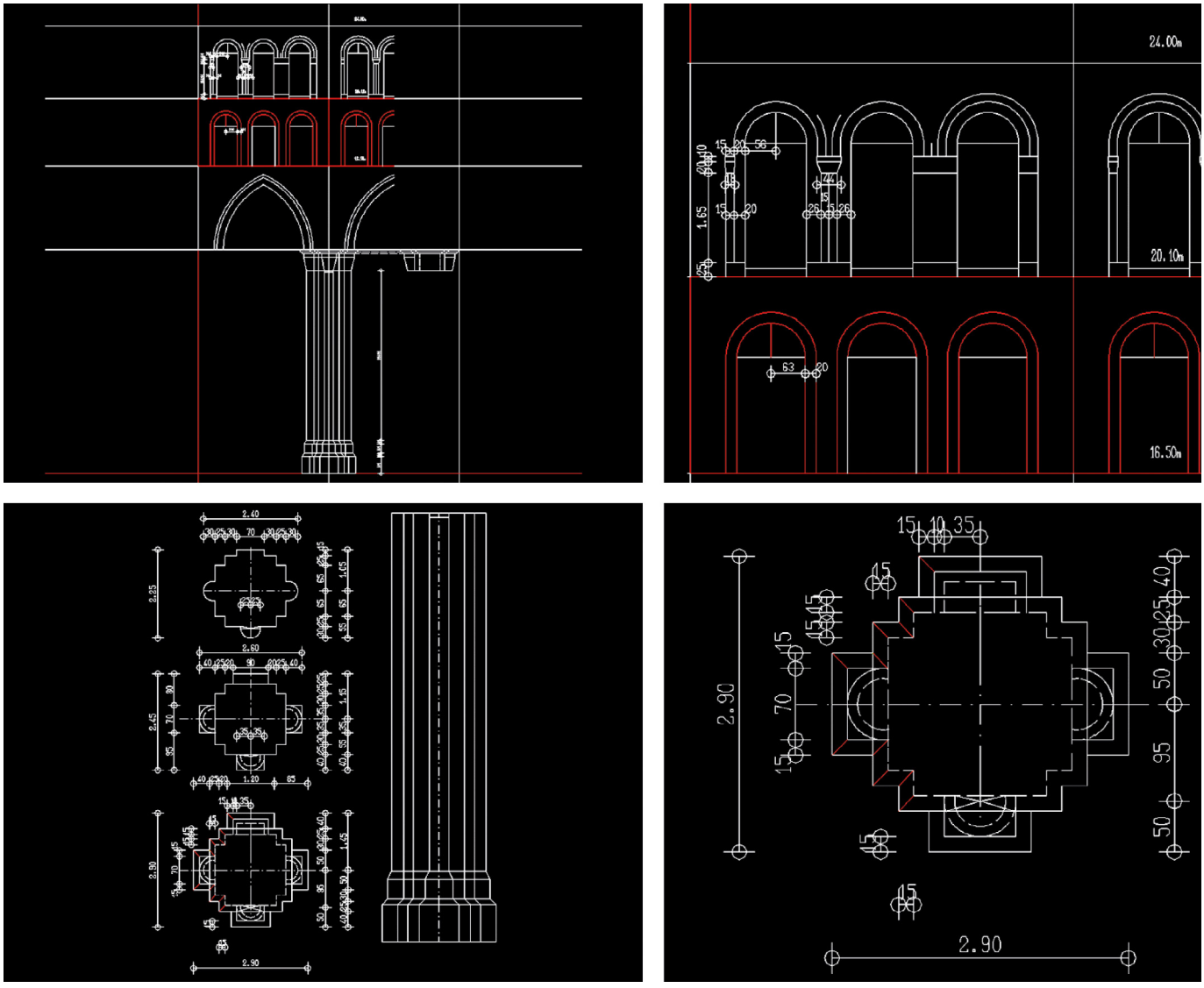


□ 03
Digitale Rekonstruktion von Cluny III, Außenansicht, 1989. (Architectura Virtualis GmbH, Kooperationspartner der Technischen Universität Darmstadt)

□ 04
Digitale Rekonstruktion von Cluny III, Blick von der Vierung ins Hauptschiff Richtung Westen, 1989. (Architectura Virtualis GmbH, Kooperationspartner der Technischen Universität Darmstadt)

Gezeigt wurde er im öffentlich-rechtlichen Fernsehen, im Rahmen eines Dokumentarfilms über die Salier. Einzigartig an diesem Projekt war die Visualisierung eines solch komplexen Bauwerks — immerhin handelt es sich bei Cluny III um die zur Zeit ihrer Erbauung größte Kirche der Christenheit — mittels neuester Computertechnik. Die Herausforderung bestand darin, mit der damals zur Verfügung stehenden Technik alle Bauelemente zunächst zu konstruieren, in einer Datenbank zu verwalten und dann systematisch zu einem Modell zusammenzusetzen [05].

☐ 05
Bildschirmfotos aus dem Arbeitsprozess an der digitalen Rekonstruktion von Cluny III, 1989. (Architectura Virtualis GmbH, Kooperationspartner der Technischen Universität Darmstadt)



Durchgeführt wurde das Projekt mit der Software **speedikon**, das ein erst kurz zuvor entwickeltes 3D-Modul umfasste. Die wissenschaftliche Grundlage für diese Arbeit bildete die Forschung des Architekten Kenneth John Conant. Dass durch die Erstellung des 3D-Modells Unstimmigkeiten in der Forschung zu Cluny zutage traten, zeigt das große Potenzial, das digitale Rekonstruktionen für die Forschung haben. Allerdings hat dies bis heute noch nicht dazu geführt, dass sie sich als Standard in der kunstgeschichtlichen Wissenschafts-Community etabliert hätten.

In den 1990er Jahren nahm die Erstellung digitaler 3D-Modelle historischer Architektur stark zu, was sowohl auf die steigende Rechenleistung von Computern als auch auf die Weiterentwicklung spezieller Software zurückzuführen ist. Insbesondere in der Archäologie hatte diese Entwicklung große Auswirkungen. So ist es wohl kein Zufall, dass in diese Zeit auch die Einführung des Begriffs **Virtual Archaeology** fällt, geprägt im Jahr 1990 durch den Archäologen Paul Reilly in seinem Vortrag **Towards a virtual archaeology** auf der CAA-Konferenz. [21] Er sah insbesondere **Solid Modelling** und Hypertext als neue technologische Entwicklungen, die zur Datenauswertung und -repräsentation in der Archäologie zukünftig wichtige Instrumente sein würden. [22] Nur wenige Jahre später waren in der Archäologie bereits viele 3D-Projekte anzutreffen, wie das Buch **Virtual Archaeology. Re-creating Ancient Worlds** verdeutlicht, das 1997 der Archäologe Maurizio Forte mit Alberto Siliotti publizierte. [23] Insgesamt fünfzig Projekte zur digitalen Rekonstruktion historischer Architektur werden darin vorgestellt, die Bauwerke weltweit (antikes Griechenland, Römisches Reich, Afrika, Südamerika, China) aus einem weiten Zeitraum — von der Bronzezeit bis Anfang des Mittelalters — umfassen. Durchgeführt wurden sie überwiegend an Universitäten in Italien und Frankreich sowie an außeruniversitären Forschungsinstitutionen und Museen. [24]

Nicht nur in Europa, auch in Nordamerika wurden digitale Rekonstruktionen historischer Architektur in den 1990er Jahren erstellt. Ein Schwerpunkt lag hier im Bereich der universitären Architekturforschung. Dies verdeutlicht der von Barbara-Jo Novitski 1998 zusammengestellte Überblick, [25] in dem mehr als 20 unterschiedliche Projekte, vornehmlich durchgeführt an Architekturfakultäten in den USA und Kanada, vorgestellt werden. Gegenstand sind Bauwerke unterschiedlichster Epochen, von vor-christlicher Zeit bis zum 20. Jahrhundert. Novitskis Überblick verdeutlicht auch, dass der Erstellungskontext jeweils stark variierte. So beschäftigten sich einige Projekte mit der Rekonstruktion nicht mehr existierender Bauwerke, andere mit nie gebauten Entwürfen namhafter Architekten, wieder andere mit aus der Phantasie geborenen Bauten oder auch mit als Virtual-Reality-Anwendung konzipierten 3D-Modellen. Dieser Überblick kann stellvertretend für die große Spannweite des Forschungsinteresses im Bereich der digitalen Rekonstruktion historischer Architektur gesehen werden, wie es sich in den 1990er Jahren herausbildete.

Relativ spärlich anzutreffen waren jedoch 3D-Projekte, die von Kunsthistorikern initiiert und durchgeführt wurden. Ein möglicher Grund hierfür — insbesondere in der Frühphase digitaler Rekonstruktion — mögen mangelndes technisches Wissen [26] bzw. eine gewisse Skepsis gegenüber neuen Forschungswerkzeugen wie CAD sein. [27]

■ **21**
Vgl. Paul Reilly, Towards a virtual archaeology, in: Sebastian Rahtz u. K. Lockyear (Hg.), CAA90. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, Oxford 1991, S. 132–139, https://proceedings.caaconference.org/files/1990/21_Reilly_CAA_1990.pdf ; Juan A. Barceló, Virtual Museums. When Heritage does not exist, in: K. T. Biró (Hg.), A Közgyütemények és a Tudomány Konferencia — Conference on Public Collections and Science, Budapest, 1. — 2. Juli 1999, 2002, o. S., http://www.ace.hu/tudvil/indexe.html.

■ **22**
Vgl. Paul Reilly 1991, S. 132–139, hier: S. 133.

■ **23**
Vgl. Maurizio Forte u. Alberto Siliotti (Hg.), Virtual Archaeology. Re-creating Ancient Worlds, New York 1997.

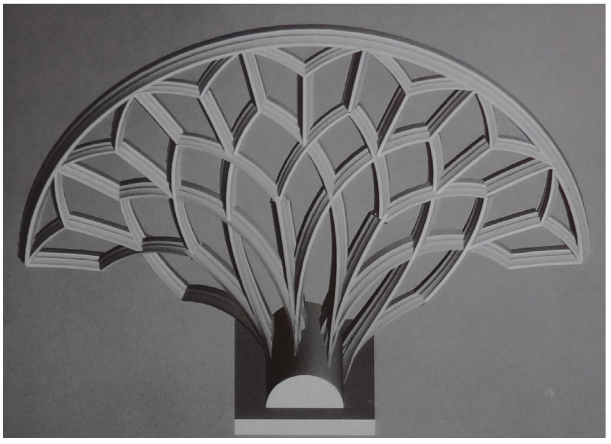
■ **24**
Vgl. dazu die Übersicht über die Beitragenden in der Publikation in ebd. S. 6.

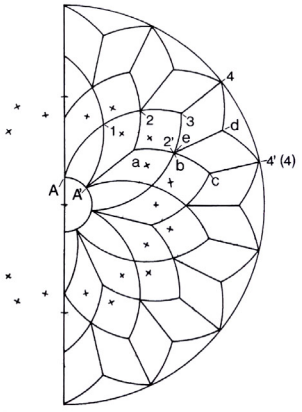
■ **25**
Vgl. Barbara-Jo Novitski (Hg.), Rendering real and imagined buildings. The art of computer modeling from the Palace of Kublai Khan to Le Corbusier's Villas, Gloucester, Massachusetts, 1998.

■ **26**
Vgl. Ronald Stenvert, Constructing the Past: Computer-Assisted Architectural-Historical Research. The application of image-processing using the computer and Computer-Aided Design for the study of the urban environment, illustrated by the use of treatises in seventeenth-century architecture, Diss. o. O. 1991, S. 134.

■ **27**
Vgl. Werner Müller, Computersimulation spätgotischer Gewölbe. Ein Diskussionsbeitrag zum Thema »CAD als Ende der Baukunst«, in: Geschichte des Konstruierens IV. Konzepte SFB 230, Heft 33, 1990, S. 144–153, hier: S. 144.

Eine Ausnahme bildete die kunsthistorische Forschungsarbeit, die Werner Müller über mehrere Jahre hinweg in Kooperation mit dem Mathematiker Norbert Quien leistete. 28 Ihre der digitalen Rekonstruktion von gotischen Gewölben gewidmete Zusammenarbeit währte vom Ende der 1980er Jahre bis zum Tode Müllers im Jahr 2005. 29 Die Quellen für ihre computertechnischen Visualisierungen bildeten historische Gewölbegrundrisse aus der **Österreichischen Nationalbibliothek** in Wien und dem **Historischen Archiv der Stadt Köln.** 30 Die dort befindlichen abstrakten Konstruktionszeichnungen übertrugen sie anhand von Algorithmen in dreidimensionale Rippengewölbe, die auf einem Computerbildschirm visualisiert wurden 06. 31





☐ 06
1991 digital rekonstruiertes Rippensystem (links) mit Hilfsgrundriss (rechts), basierend auf einem aus dem 16. Jahrhundert stammenden historischen Grundriss, der im Manuskript W* 276, fol. 20r (Historisches Archiv der Stadt Köln) abgebildet ist. (Werner Müller und Norbert Quien)

Ihr Anliegen, den Entwurfsvorgang gotischer Gewölbe darzustellen, setzten sie beginnend mit dem DFG-Projekt **CAD spätgotischer Gewölbe** zwischen 1989 und 1993 an der Universität Heidelberg mit dem Projektleiter Willi Jäger um. 32 In den folgenden Jahren publizierten sie einige Bücher zu ihrem Forschungsthema und stellten ihre Arbeit in Ausstellungen der Öffentlichkeit vor. 33

■ **28**
Vgl. Karl-Eugen Kurrer, Werner Müller. Ein Nachruf, in: ARCH+, Nr. 175, 2005, S. 11.

■ **29**
Vgl. ebd.

■ **30**
Vgl. Willi Jäger, Werner Müller u. Norbert Quien, Gotische Ziergewölbe aus dem Computer, in: forschung. Das Magazin der Deutschen Forschungsgemeinschaft. spezial 2004, 2004, S. 48–51.

■ **31**
Vgl. Werner Müller u. Norbert Quien, Computergraphik und Video nach Algorithmen spätgotischer Steinmetzkunst, in: Thomas W. Gaehtgens (Hg.), Künstlerischer Austausch. Artistic Exchange. Akten des XXVIII. Internationalen Kongresses für Kunstgeschichte, Berlin, 15. — 20. Juli 1992, Bd. 3, Berlin 1993, S. 271–282, hier: S. 272.

■ **32**
Vgl. ebd. S. 276. Ein kurzer Bericht über das DFG-Projekt ist zu finden in: Willi Jäger, Werner Müller u. Norbert Quien 2004, (s. 30). Zur Laufzeit des Projekts vgl.: Werner Müller u. Norbert Quien, Hammer, Meißel und Computer — Spätgotik im rechten Maß, Ausstellung im Landesmuseum für Technik und Arbeit in Mannheim, Mannheim 1999, S. 2.

■ **33**
Vgl. folgende Publikationen: Werner Müller u. Norbert Quien, Von deutscher Sondergotik. Architekturphotographie — Computergraphik — Deutung, Baden-Baden 1997 (= SAECVLA SPIRITALIA, Bd. 33); Werner Müller u. Norbert Quien, Spätgotik virtuell. Für und Wider die Simulation historischer Architektur, Weimar 1999; Werner Müller u. Norbert Quien, Virtuelle Steinmetzkunst der österreichischen und böhmisch-sächsischen Spätgotik: die Gewölbeentwürfe des Codex Miniatus 3 der Österreichischen Nationalbibliothek in Wien, Petersberg 2005 (= Studien zur internationalen Architektur- und Kunstgeschichte, Bd. 37). Zur Ausstellung Hammer, Meißel und Computer. Spätgotik im rechten Maß im Landesmuseum für Technik und Arbeit in Mannheim (Juni 1999 – Januar 2000) erschien eine Begleitpublikation: Werner Müller u. Norbert Quien 1999.

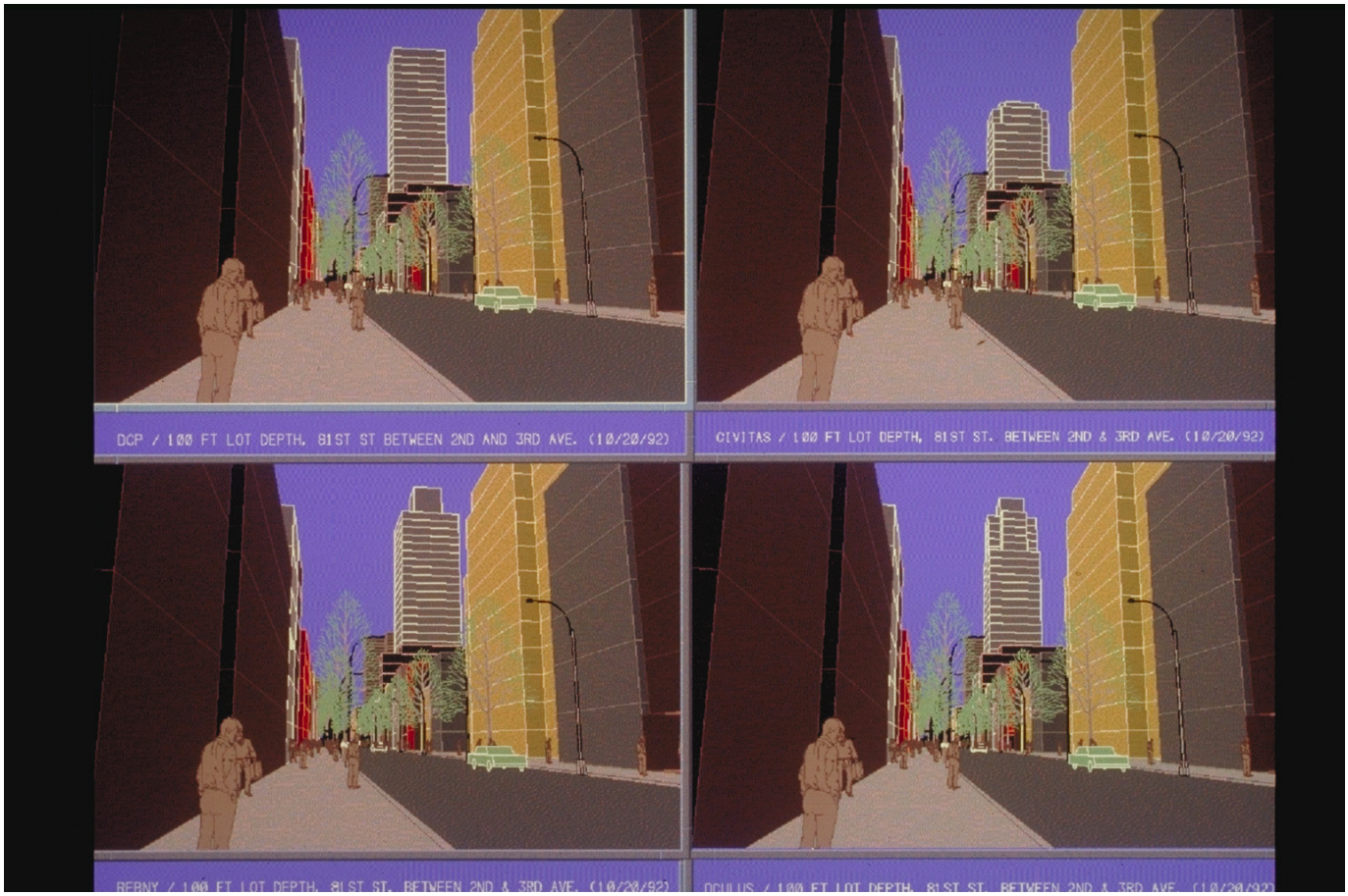
B.3 Etablierung in der Forschungslandschaft — Protagonisten

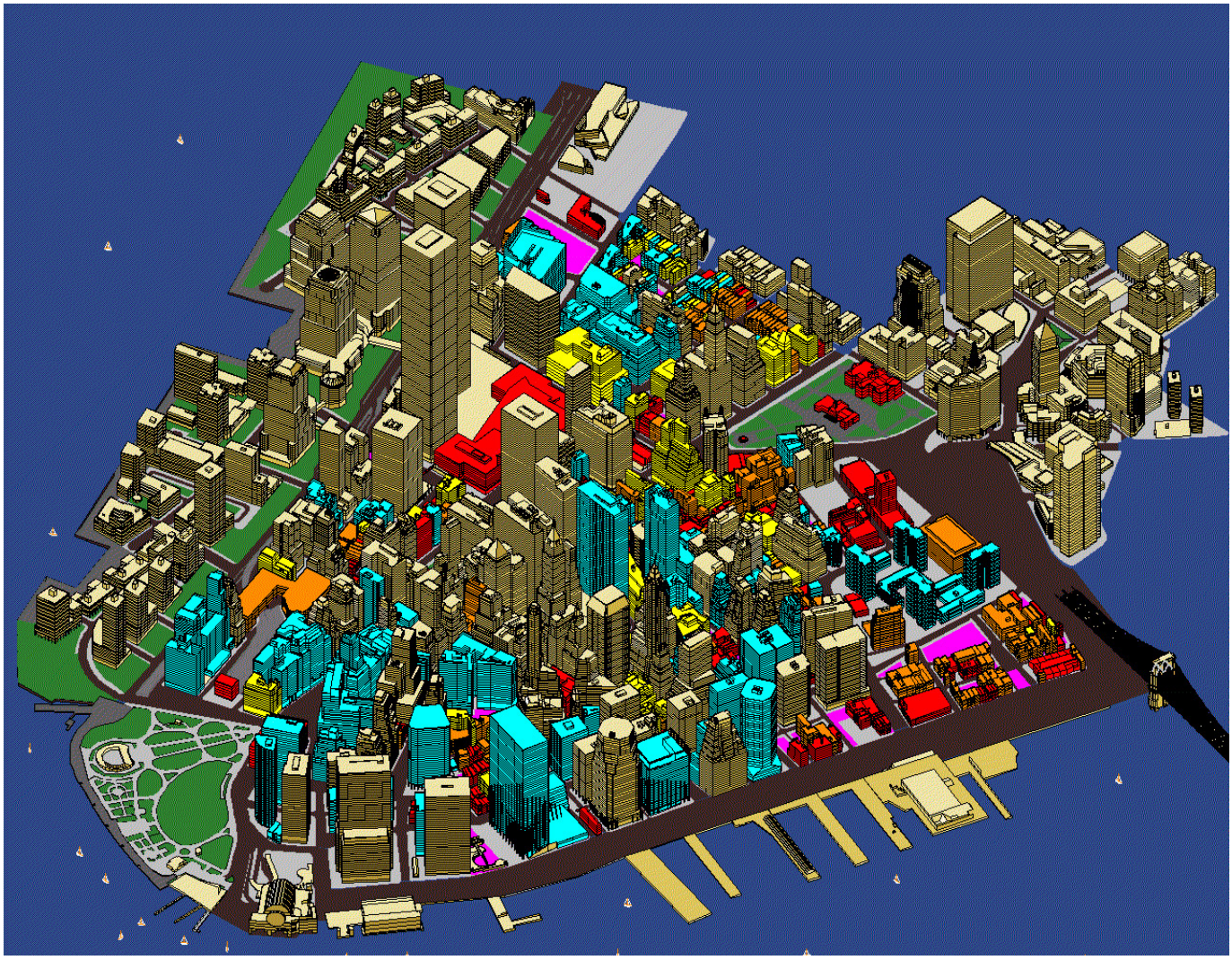
Zunehmenden Rückhalt und Legitimation erhielten digitale Rekonstruktionsprojekte in den 1990er Jahren durch die Gründung von Forschungsgruppen und spezialisierten Einrichtungen, die sich an Universitäten formierten. 34 Als frühes Beispiel ist hier das **Environmental Simulation Center** (ESC) zu nennen, das 1991 in New York ins Leben gerufen wurde und noch heute existiert. 35 Zunächst angegliedert an die **New School for Social Research** in New York, ist es inzwischen als unabhängiges Non-Profit-Institut in stadtplanerischen Angelegenheiten beratend tätig und nutzt für seine Tätigkeit modernste Technologien. 1993 konnte es mit der Computersimulation einer Straßenflucht in Lower Manhattan zwischen verschiedenen Interessensvertretern vermitteln 07 08. Die digitale Visualisierung führte allen Beteiligten die unterschiedlichen Lösungsvorschläge für die Umgestaltung der Straßenflucht objektiv vor Augen und diente so als Entscheidungsgrundlage.

■ **34**
Vgl. Heike Messemer 2016, S. 21–54, hier: S.39.

■ **35**
Die Webseite des ESC bietet Informationen zur Institution und ihren Projekten: http://www.simcenter.org/. In folgender Publikation sind insbesondere Details zum Projekt in Lower Manhattan zu finden: James Steele, Architektur und Computer. Planung und Konstruktion im digitalen Zeitalter, München 2001, insbes. S. 45.

□ 07
Digitale Rekonstruktion der Upper East Side in New York mit unterschiedlichen Bebauungsszenarien, 1993. (Environmental Simulation Center)





□ 08
Digitales 3D-Modell von Lower Manhattan, 1993. (Environmental Simulation Center)

1997 gründeten der Archäologe Bernard Frischer und die Architekturhistorikerin Diane Favro das **Cultural Virtual Reality Laboratory** (CVRLab) an der **University of California in Los Angeles** (UCLA). 36 Das CVRLab widmet sich vorrangig der Erstellung wissenschaftlicher 3D-Modelle von Stätten des kulturellen Erbes. Zudem treibt es die Anwendung dieser Modelle in unterschiedlichen Bereichen voran und führt Studierende in die Nutzung der Virtual-Reality-Technologie zur Erforschung des kulturellen Erbes ein. Um die Wissenschaftlichkeit und Verlässlichkeit der im CVRLab erarbeiteten 3D-Modelle zu gewährleisten, wurde ein aus Experten gebildetes **Scientific Committee** eingesetzt, das mit den Modellierern eng zusammenarbeitet.

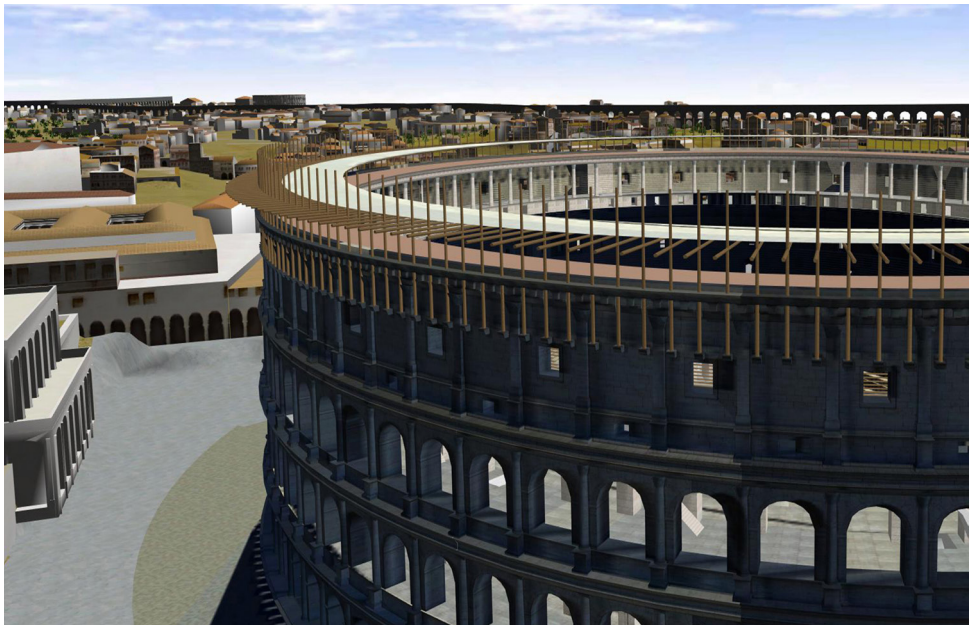
■ **36**
Inzwischen hat das Experiential Technologies Center (ETC) an der UCLA die Aufgaben des CVRLab übernommen. Vgl. Diane Favro, In the eyes of the beholder: Virtual Reality re-creations and academia, in: Lothar Haselberger (Hg.), Imaging ancient Rome. Documentation, visualization, imagination. (Proceedings of the Third Williams Symposium on Classical Architecture, 20. – 23. Mai 2004 in Rom), Portsmouth 2006, S. 321–334, hier: S. 321; Webseite des ETC: http://etc.ucla.edu/about/. Umfangreiche Informationen zum CVRLab sind zu finden in: Bernard Frischer, Mission and recent projects of the UCLA Cultural Virtual Reality Laboratory, in: Tiré-à-part des Actes du colloque. Virtual Retrospect 2003, 6. – 7. November 2003 in Biarritz (France), Bordeaux 2004 (= Archéovision, Bd. 1), S. 65–74, insbes. S. 65–66.

Das bislang umfangreichste Projekt des CVRLab ist **Rome Reborn.** 37 Das international ausgerichtete Langzeitprojekt umfasst ein digitales 3D-Modell des antiken Rom, das bis heute in Arbeit ist. 38 Ziel des bereits 1995 begonnenen und seit 1998 an das CVRLab angeschlossenen Projekts ist es, Rom in einem Zeitraum von etwa 1000 v. Chr. bis etwa 550 n. Chr. darzustellen. Als Startpunkt der digitalen Rekonstruktionen wählten die Projektleiter in Abstimmung mit dem **Scientific Committee** das Jahr 320 n. Chr., denn zu diesem Zeitpunkt befand sich Rom in Bezug auf seine städtebauliche Entwicklung auf einem Höhepunkt. Zudem liegen aus dieser Zeit die meisten archäologischen Funde vor, die somit eine auf relativ sicheren Befunden basierende Rekonstruktion ermöglichen. Eine erste Version des digitalen 3D-Modells von Rom, **Rome Reborn 1.0,** wurde 2007 fertiggestellt. Sie visualisiert das hügelige Gelände der Stadt mit tausenden Gebäuden sowie Wasserläufen innerhalb der spätantiken Aurelianischen Mauer 09.

■ 37
Ausführliche Informationen zum Projekt Rome Reborn sind zu finden in u. a.: Bernard Frischer, Diane Favro, Paolo Liverani, Sible De Blaauw u. Dean Abernathy, Virtual Reality and Ancient Rome: The UCLA Cultural VR Lab's Santa Maria Maggiore Project, in: Juan A. Barceló, Maurizio Forte u. D. H. Sanders (Hg.), Virtual Reality in Archaeology, Oxford 2000 (= British Archaeological Reports, International Series S 843), S. 155–162; Bernard Frischer, Dean Abernathy, Fulvio Cairoli Giuliani, Russell T. Scott u. Hauke Ziemssen, A new digital model of the Roman Forum, in: Lothar Haselberger (Hg.), Imaging ancient Rome. Documentation, visualization, imagination. (Proceedings of the Third Williams Symposium on Classical Architecture, 20.-23. Mai 2004 in Rom), Portsmouth 2006, S. 163–182; Gabriele Guidi, Bernard Frischer u. Ignazio Lucenti, Rome Reborn — Virtualizing the Ancient Imperial Rome, in: Fabio Remondino u. Sabry El-Hakim (Hg.), Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, Proceedings of the 2nd ISPRS International Workshop, 3D-ARCH 2007, ETH Zürich, 12.-13. Juli 2007, o. O. 2007 (= International Archives of Photogrammetry, Remote-Sensing and Spatial Information Science, Bd. XXXVI-5/W47), o. S., http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/5-W47/pdf/guidi_etal.pdf.

■ 38
Einen Überblick vor allem zum aktuellen Stand bietet die Webseite des Projekts Rome Reborn: https://www.romereborn.org/content/aboutcontact.

□ 09
Digitale Rekonstruktion des Kolosseums in Rom, 2008. (Model: The Regents of the University of California; Image: The Board of Visitors of the University of Virginia)



Die Bauten sind in zwei Detailgraden dargestellt, abhängig von der vorliegenden Quellenlage: 250 Gebäude konnten hinsichtlich ihrer Lage, Gestaltung und Bestimmung detailliert visualisiert werden. Die übrigen Bauten hingegen wurden nur schematisch dargestellt. Nur ein Jahr später wurde **Rome Reborn 2.0** mit umfangreichen Verbesserungen gegenüber der Vorgängerversion veröffentlicht. So konnten aufgrund archäologischer Forschungen beteiligter Institutionen beispielsweise die zuvor nur schematisch mit Texturen visualisierten Bauten nun geometrisch modelliert werden. Zudem wurden 32 Gebäude, die mit dem höchsten Detailierungsgrad erstellt wurden, in das Format von 3D Studio Max umgewandelt. Die 2012 veröffentlichte Version, **Rome Reborn 2.2,** beinhaltet Visualisierungen weiterer bedeutender Bauwerke sowie animierte Bewohner [10]. [39]

■ **39**
Vgl. Webseite von Rome Reborn: https://romereborn.org/website-announcment; Video zu Rome Reborn 2.2: https://www.youtube.com/watch?v=v-rlEwjgfbYs.

□ 10
Digitale Rekonstruktion des Kolosseums in Rom, 2008–2012. (Elements of the model: The Regents of the University of California 2008, Université de Caen Basse-Normandie 2011, Frischer Consulting 2012; Image: Bernard Frischer 2012)

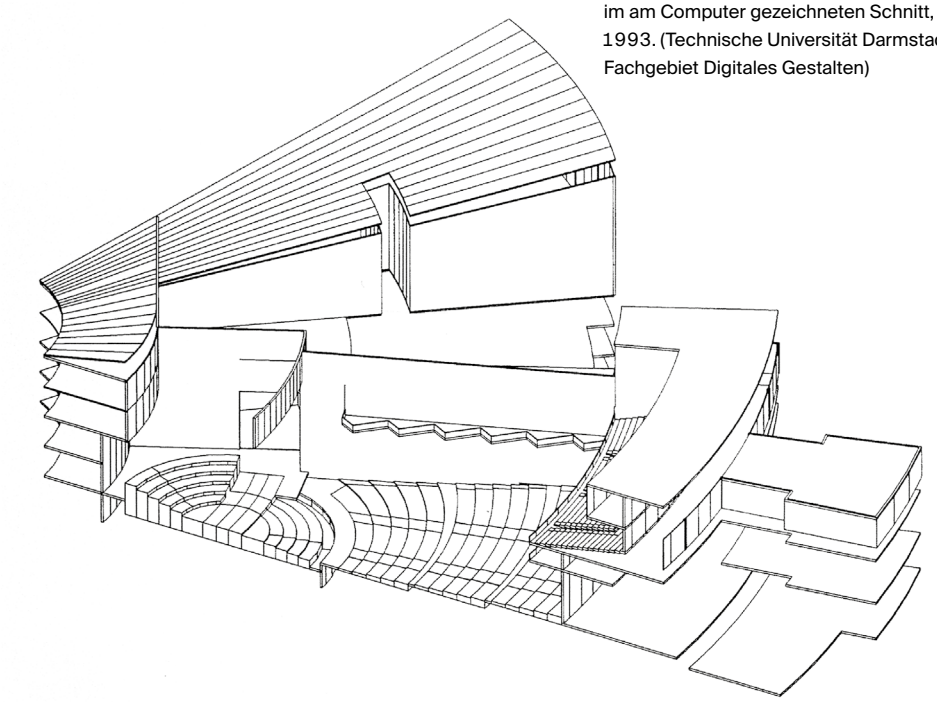
Forscher weltweit konnten zur Weiterentwicklung des digitalen Modells von **Rome Reborn** beitragen, indem sie einen Artikel zum Thema in dem peer-reviewed Online-Journal **Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage** publizierten. In diesem ist es auch möglich, interaktive 3D-Modelle zu veröffentlichen. [40]

■ **40**
Bereits 2006 erfolgte ein Aufruf zur Mitwirkung. Vgl. Bernard Frischer, Dean Abernathy, Fulvio Cairoli Giuliani, Russell T. Scott u. Hauke Ziemssen 2006, S. 182. Die folgende Webseite zum Projekt, die seit 2018 nicht mehr online verfügbar ist, informierte über Möglichkeiten zur Beitragseinreichung zu Rome Reborn: http://romereborn.frischerconsulting.com/about.php.

Die Beiträge konnten anschließend in **Rome Reborn** aufgenommen werden. Für das Projekt stellte dies eine Möglichkeit dar, rascher sein übergeordnetes Ziel zu erreichen: ein komplettes digitales Modell des antiken Rom zu erstellen. Das administrative Zentrum des internationalen Langzeitprojekts **Rome Reborn** liegt seit 2009 in der von Bernard Frischer Ende der 1990er Jahre gegründeten Firma **Frischer Consulting Inc.**, die auch als Geldgeber fungiert.

Auch in Europa bildeten sich seit den 1990er Jahren universitäre Forschungsschwerpunkte heraus, die sich verstärkt mit digitalen Technologien in der Kunst- und Architekturgeschichte beschäftigten. An der TU Darmstadt beispielsweise legte Anfang der 1990er Jahre der damals als Gastprofessor tätige Architekt Manfred Koob (gest. 2011) im Fachbereich Architektur den Fokus auf digitale Rekonstruktionen historischer Bauten. 41 Das erste Projekt, das im Rahmen des damals neuen Fachgebiets **CAD in der Architektur** realisiert wurde, umfasste die digitale Rekonstruktion heute nicht mehr existierender Bauten bzw. nie umgesetzter Bauentwürfe namhafter Architekten und Künstler am Bauhaus und der damaligen europäischen Avantgarde. 42 Als Seminar konzipiert, stellte dieses Projekt ein Experiment dar, die technische Ausbildung der Studierenden im Bereich des CAD mit der Auseinandersetzung mit einem Architekten bzw. Künstler zu verbinden. Das Ergebnis waren digitale 3D-Modelle, die auf Grundlage von historischen Plänen und Schriften der Architekten mit der Software **speedikon** erstellt worden waren. In Form von kurzen Animationssequenzen und ausgedruckten Bildern einzelner Sequenzen wurden sie 1993 auch in einer Ausstellung präsentiert. 43

Beispielsweise rekonstruierte ein Student den von Walter Gropius vorgelegten Entwurf für den **Palast des Sowjet** 11 12. 44



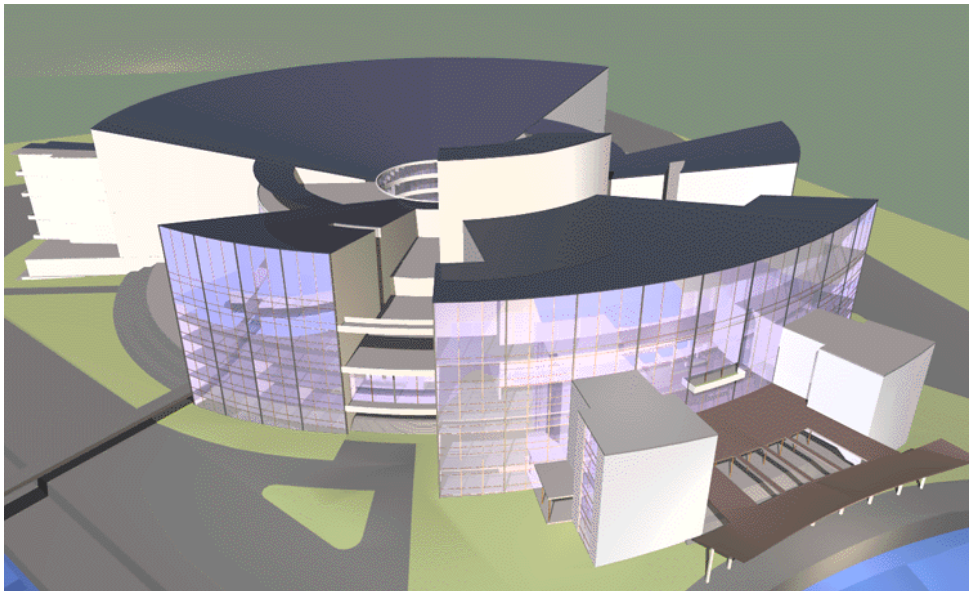
□ 11
Digitale Rekonstruktion des von Walter Gropius entworfenen **Palasts des Sowjet** im am Computer gezeichneten Schnitt, 1993. (Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Digitales Gestalten)

■ 41
Vgl. Webseite des Fachgebiets Digitales Gestalten am Fachbereich Architektur der TU Darmstadt: http://www.dg.architektur.tu-darmstadt.de/dg/forschung_dg/digitale_rekonstruktionen/projekte.de.jsp; Manfred Koob, Weiche Werkzeuge — Neue Gedächtnisse, in: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet »CAD in der Architektur« (Hg.), Bauhaus — Avantgarde der 20er Jahre. Architektur als Vision. CAD-Simulationen von Entwürfen und nicht gebauten bzw. nicht mehr existierenden Projekten der beginnenden Moderne, Heidelberg 1994, S. 12–18, hier: S. 12.

■ 42
Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet »CAD in der Architektur« (Hg.), Bauhaus — Avantgarde der 20er Jahre. Architektur als Vision. CAD-Simulationen von Entwürfen und nicht gebauten bzw. nicht mehr existierenden Projekten der beginnenden Moderne, Heidelberg, 1994. Zur Umsetzung dieses Projekts vgl. Manfred Bernhardt, CAD-Bearbeitung der Projekte, in: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet »CAD in der Architektur« (Hg.) 1994, S. 9–11, hier: S. 9.

■ 43
Vgl. Manfred Koob, Die Bauhaus-Ausstellung, in: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet »CAD in der Architektur« (Hg.) 1994 (s. 42), S. 152.

■ 44
Der Entwurf von Walter Gropius wird erläutert in: Lars Urspruch u. Torsten Butz, Walter Gropius. Palast des Sowjet, in: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet »CAD in der Architektur« (Hg.) 1994 (s. 42).



□ 12
Digitale Rekonstruktion des von Walter Gropius entworfenen **Palasts des Sowjet** als texturiertes CAD-Modell, 1993. (Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Digitales Gestalten)

Im Rahmen der 1931 durchgeführten zweiten Runde des Wettbewerbs für einen Baukomplex, der gegenüber dem Kreml realisiert werden sollte, waren auch westliche Architekten eingeladen. Das Gebäude sollte mehrere Versammlungssäle mit Platz für insgesamt über 20.000 Zuschauer bieten sowie im Außenbereich Großveranstaltungen für bis zu 50.000 Menschen ermöglichen. 45 Gropius plante einen auf konzentrischen Kreisen beruhenden Bau. Da dessen streng formaler Stil nicht dem Geschmack der Wettbewerbsausrichter entsprach, wurde sein Entwurf abgelehnt.

Mitte der 1990er Jahre initiierte Koob gemeinsam mit dem Architekten Marc Grellert die digitale Rekonstruktion zahlreicher einst in Deutschland existierender, während des Nationalsozialismus jedoch zerstörter Synagogen 13 14. 46 In einzelnen abgeschlossenen Teilprojekten widmeten sie sich der computergestützten Rekonstruktion des verlorenen kulturellen Erbes. Die Ergebnisse ihrer Arbeit präsentierten sie in öffentlichen Ausstellungen und zugehörigen Katalogen. 47

■ 45
Vgl. Boris Schlörb u. Christian Volkmann, Le Corbusier. Palast des Sowjet, in: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet »CAD in der Architektur« (Hg.) 1994, S. 128–131, hier: S. 128.

■ 46
Ausführliche Informationen zu den Synagogen-Rekonstruktionen an der TU Darmstadt sind zu finden in: Marc Grellert, Immaterielle Zeugnisse. Synagogen in Deutschland. Potentiale digitaler Technologien für das Erinnern zerstörter Architektur, Bielefeld 2007, S. 286ff.

■ 47
Folgender Ausstellungskatalog ist hier beispielhaft zu nennen: Synagogen in Deutschland. Eine virtuelle Rekonstruktion, Ausstellung in der Kunst- und Ausstellungshalle der Bundesrepublik Deutschland, Bonn, 17. Mai – 16. Juli 2000, Darmstadt u. a. 2004.

☐ 13
Außenansicht der digital rekonstruierten Synagoge am Börneplatz in Frankfurt am Main, ca. 1995. (Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Digitales Gestalten)

☐ 14
Blick von der Empore in den Hauptraum der digital rekonstruierten Synagoge am Börneplatz in Frankfurt am Main, ca. 1995. (Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Digitales Gestalten)

Eine Besonderheit ihrer Projekte ist, dass sie Zeitzeugen hinzuziehen, um mit deren Hilfe ansonsten verlorene Informationen zu den zerstörten jüdischen Gotteshäusern ergänzen zu können. Seitdem Koob und Grellert im Jahr 2000 die Firma **Architectura Virtualis GmbH** aus der TU Darmstadt ausgründeten, haben sie in enger Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet **Informations- und Kommunikationstechnologie in der Architektur** der TU Darmstadt und weiteren Institutionen 3D-Modelle einer Vielzahl an historischen Bauten erarbeitet. 48

Ein weiterer universitärer Schwerpunkt bildete das **King's Visualisation Lab** (KVL) in London, das angegliedert an das **Department of Digital Humanities** des **King's College London** zwischen 2005 und 2015 aktiv war. 49 Bereits 1996 wurde dessen Vorläufer, das **Visualisation Team**, von dem Theaterwissenschaftler Richard Beacham an der University of Warwick gegründet. Von Anfang an lag ein wichtiger Fokus auf der digitalen Modellierung historischer Gebäude. Eines der frühesten Projekte ist das **Kilmartin Valley Project**, das 1997 in Zusammenarbeit mit dem **Department of Archaeology** der **University of Glasgow** realisiert wurde [15]. 50 Ziel war es, in mehreren 3D-Rekonstruktionen einzelne Entwicklungsphasen des Dunadd Fort zu erstellen, des ersten Sitzes der schottischen Könige.

□ 15
3D-Visualisierung des Fort-Dunadd-Komplexes im Rahmen des Kilmartin Valley Projects, 1997. (Martin Blazeby & Drew Baker, King's Visualisation Lab, King's College London)

So entstanden virtuelle Flüge über die historische Anlage, QuickTime-Panoramen sowie ein interaktives Spiel. In den darauffolgenden Jahren wurden unter Leitung von Richard Beacham zahlreiche weitere digitale Rekonstruktionen, darunter einige von historischen Theaterarchitekturen, realisiert. 51

Neben Forschungseinrichtungen haben einschlägige Konferenzen als rahmengebende und als Diskussionsforen dienende Veranstaltungen großen Einfluss auf die Weiterentwicklung digitaler Rekonstruktionen historischer Architektur sowie deren Etablierung in der Forschung. Die bereits zuvor erwähnte internationale Organisation CAA veranstaltet seit ihrer Gründung 1973 jährliche Konferenzen. 52 Ihr Ziel ist es, Experten unterschiedlicher Disziplinen zu vernetzen, um ihre Forschung in der Archäologie unter Anwendung von Computertechnologien zu präsentieren und zu diskutieren. Seit Ende der 1980er

■ **48**
Vgl. Webseite der Architectura Virtualis: http://www.architectura-virtualis.de/projekte/index.php?lang=de.

■ **49**
Informationen zum KVL und dessen Projekten bieten die zugehörige Webseite: http://www.kvl.cch.kcl.ac.uk/about.html, sowie das zugehörige Wiki: https://wiki.digitalclassicist.org/King%27s_Visualisation_Lab.

■ **50**
Vgl. Webseite des KVL: http://www.kvl.cch.kcl.ac.uk/funding.html. Das Kilmartin Valley Project wird auf der folgenden Webseite erläutert: http://www.kvl.cch.kcl.ac.uk/kilmartin.html.

■ **51**
Eine Übersicht über realisierte Projekte des KVL ist zu finden auf dessen Webseite: http://www.kvl.cch.kcl.ac.uk/projects.html.

■ **52**
Detaillierte Informationen zur CAA bietet deren Webseite: http://caa-international.org/about/.

Jahre werden in diesem Rahmen zunehmend Forschungsprojekte vorgestellt, die die Erstellung von digitalen 3D-Rekonstruktionen von historischer Architektur und Artefakten beinhalten. [53] Die bis heute ungebrochene Aktualität und Relevanz dieser Konferenzen zeigt sich in ihren umfangreichen Programmen und der hohen Anzahl an Beiträgen. [54] Aber auch in den 1990er Jahren wurden neue Konferenzformate ins Leben gerufen. So fand 1990 in London die erste Konferenz **EVA** (Electronic Visualisation and the Arts) statt, deren Fokus auf der Anwendung neuer Technologien im Kulturbereich liegt. [55] Inzwischen finden auch in Berlin, Florenz und Moskau regelmäßige **EVA**-Konferenzen statt, die sich jeweils einem eigenen Thema widmen. [56] Sie sind ein Forum, das Experten aus den Bereichen Wissenschaft, Technik und Kulturinstitutionen zusammenbringt und den gegenseitigen Ideenaustausch fördert.

■ **53**
Vgl. dazu die Beiträge in den Proceedings, die auf der Website der CAA zugänglich sind: http://proceedings.caaconference.org/.

■ **54**
Vgl. dazu beispielsweise CAA 2017 https://2017.caaconference.org/program/ oder auch CAA 2015 https://2015.caaconference.org/sessions/.

■ **55**
Vgl. Website der EVA London: http://www.eva-london.org/about/.

■ **56**
Vgl. Website der EVA Berlin: https://www.eva-berlin.de/international.html.

B.4 Ausblick

Digitale Rekonstruktionen historischer Architektur vollzogen seit ihren Anfängen in den 1980er Jahren große Entwicklungsschritte. Als essenzielle Träger dieser Entwicklung erweisen sich (universitäre) Forschungseinrichtungen, die wissenschaftlich fundierte 3D-Modelle erstellen und in Forschungskontexte einbinden. Einschlägige Konferenzen dienen der Verbreitung und Diskussion neuer Methoden und Ansätze. Dabei gewinnt die Veröffentlichung von Forschungsergebnissen in Form von 3D-Modellen zunehmend an Bedeutung. Die Bandbreite für Anwendungsmöglichkeiten von digitalen Rekonstruktionen wächst rasant, nicht zuletzt aufgrund der Innovationen in der Computertechnik. So erfuhr beispielsweise das Langzeitprojekt **Rome Reborn** Anfang 2017 eine grundlegende technische Erweiterung: In Form von **Rome Reborn VR** wurde eine Virtual-Reality-Anwendung erarbeitet und schließlich 2018 veröffentlicht, die beispielsweise über **Oculus Rift** und **Samsung Gear VR** zugänglich ist. Hierzu werden derzeit eine Reihe von Apps entwickelt, die bedeutende Bauwerke wie das Pantheon oder die Maxentiusbasilika umfassen [16]. [57]

■ **57**
Vgl. die Vorschau auf das Projekt Rome Reborn VR auf YouTube: https://www.youtube.com/watch?v=Jlj9i8sJ9tE. Für Informationen zum aktuellen Stand des Projekts vgl. die zugehörige Website: https://www.romereborn.org/.

☐ 16
Digitale Rekonstruktion der Maxentiusbasilika in Rom, Bildschirmfoto der VR-Anwendung **Rome Reborn VR, 2017.** (Frischer Consulting, Inc. 2017. All rights reserved.)

Dadurch kann ein Benutzer die digital rekonstruierten historischen Gebäude unmittelbar selbstständig erleben. Sogenannte Head Mounted Displays sind in den letzten Jahren technisch so weit ausgereift, dass Geräte wie **Samsung Gear VR** allgemein erschwinglich geworden sind. Es ist nur eine Frage der Zeit, wann sämtliche Forschungsprojekte standardmäßig auch Virtual-Reality-Anwendungen ihrer 3D-Modelle anbieten.

Die digitale Rekonstruktion historischer Architektur erhält in Zeiten weltweiter politischer Unruhen und zunehmender Naturkatastrophen neues Gewicht und gewinnt an Relevanz. Das Bewahren kulturellen Erbes und die Unterstützung der Erinnerung daran wird von kulturpolitischer und akademischer Seite zunehmend forciert. Im Jahr 2003 gründete der irakisch-stämmige Ingenieur Ben Kacyra die Non-Profit-Organisation **CyArk** in Kalifornien, USA. 58 Das Ziel von **CyArk** ist es, weltweit kulturelles Erbe unter Verwendung von neuester Technologie digital zu bewahren, in Daten zu überliefern und in einer frei zugänglichen 3D-Bibliothek online zur Verfügung zu stellen. Hintergrund dieser Mission ist, kulturelle Stätten für nachfolgende Generationen zu bewahren, bevor sie mutwilliger Zerstörung, Naturkatastrophen oder auch dem der Zeit geschuldeten Verfall anheimfallen. Auf der Webseite von **CyArk** befinden sich bereits über 100 Projekte, die historische Bauwerke vom Mittelalter bis heute (z. B. der Tower of London, die Kathed-

■ **58**
Für Informationen zu Ben Kacyra vgl. Webseite von TED: http://www.ted.com/speakers/ben_kacyra. Hintergrundinformationen zu CyArk sind auf der zugehörigen Webseite zu finden: http://www.cyark.org/about/.

rale von Beauvais, das Brandenburger Tor in Berlin, das Opernhaus in Sydney), antike Stätten, aber auch kulturelle Stätten und Landschaften digital rekonstruiert dokumentieren. 59

Als ein Beispiel für die umfangreiche Dokumentation von historischen Bauwerken in **CyArk** kann die digitale Rekonstruktion der Kirche St. Sebald in Nürnberg genannt werden 17. 60 Anlässlich der Feierlichkeiten für den 50. Jahrestag der Wiedereinweihung des Gotteshauses 2007 wurde sowohl der aktuelle Zustand der Kirche per Laserscan und HD-Fotografie dokumentiert als auch eine digitale Rekonstruktion der Baugeschichte erstellt. So entstanden digitale 3D-Modelle auf Basis historischer Quellen, die die bauliche Entwicklung von St. Sebald in mehreren Phasen seit der Erbauung in den 1230er Jahren darstellen. Ein Video dieser digitalen Rekonstruktion wurde in einer Ausstellung 2007 präsentiert und ist heute neben zahlreichen zeitgenössischen und historischen Fotos sowie interaktiven 3D-Modellen über das Projektarchiv von **CyArk** öffentlich zugänglich. 61 3D-Projekte, die wie das zu St. Sebald auch kunsthistorische Forschung umfassen, sind allerdings noch in der Unterzahl innerhalb des **CyArk**-Archivs. Hier zeigt sich ein wichtiges Desiderat, das es zu füllen gilt.

Initiativen wie die hier vorgestellten sind somit nur der Anfang. Innovative Technologien, erschwingliche Hard- und Software sowie wachsendes technisches Know-how und Interesse in verschiedenen akademischen Disziplinen versprechen weitere Fortschritte und Innovationen im Bereich der Rekonstruktion historischer Architektur — vor allem auch in der Kunstgeschichte.

■ **59**
Vgl. Webseite von CyArk: http://www.cyark.org/projects/.

■ **60**
Das Projekt zur digitalen Rekonstruktion von St. Sebald ist im Projektarchiv von CyArk dokumentiert: http://archive.cyark.org/3d-historical-reconstruction-of-the-churchs-north-facade-media.

■ **61**
Alle Fotos, 3D-Modelle, Videos etc. sind in der Mediengalerie zu St. Sebald im Projektarchiv von CyArk zugänglich: http://archive.cyark.org/saint-sebald-church-gallery-all.

□ 17
Digitale Rekonstruktion der Kirche St. Sebald in Nürnberg mit hochgotischen Umbauten. Still aus einem Video, das im Rahmen der Feierlichkeiten zum 50. Jahrestag der Wiedereinweihung der Kirche 2007 erstellt wurde. (Robert Frank, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege; Image: CyArk, licensed under Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0)

Horst Stenzel

C. Technologie-Entwicklung im Kontext digitaler 3D-Rekonstruktion

→ 3D-Rekonstruktion, 3D Modelle, Archäologie, Architektur, Computergrafik, historische Entwicklung

Die digitale 3D-Rekonstruktion von Architektur- und Archäologieobjekten ist eng mit der Anwendung der Methoden und Systeme der Computergrafik verknüpft. Dieser Artikel stellt solche Verbindungen seit den Anfängen der Computergraphik in den 1950er Jahren bis etwa zur Jahrtausendwende dar, indem Entwicklungsschritte von Computergrafik-Hard- und -Software, Datenaustauschformaten und Standardisierungsbestrebungen und ihre Nutzung dargestellt werden. Die Entwicklungen von Methoden zur Gewinnung der 3D-Daten, i. e. 3D-Scannverfahren und Photogrammetrie, werden ergänzend kurz betrachtet.

Über den betrachteten Zeitraum hinweg wird deutlich, dass es immer wieder Pioniere gab, die die aktuellsten Entwicklungen der Computergrafik zur 3D-Rekonstruktion nutzten. Andererseits dauerte es oft zehn Jahre, bis Techniken, die sich anderenorts schon etabliert hatten, auch im betrachteten Anwendungsbereich als nützlich erwiesen und weitere Akzeptanz fanden. Zum Teil wird dies daran gelegen haben, dass in der Computergrafik keine weit akzeptierten Standards entstanden sind.

C.1 Computergrafik — Verbindung zwischen der Konzeption einer 3D-Rekonstruktion und ihrer Repräsentation

Im Kern einer digitalen 3D-Rekonstruktion historischer Architektur steht die Erstellung einer Datenstruktur im Computer, die das abstrakte Modell einer Bearbeitung und Darstellung zugänglich macht. Die visuellen Aspekte dieser Daten — Geometrie und Aussehen, d. h. Oberflächen- und Materialeigenschaften — sind Gegenstand der Computergrafik. Die digitale 3D-Rekonstruktion wendet vor allem die Methoden und Systeme an, die im Rahmen des umfassenderen und allgemeineren Feldes der Computergrafik entwickelt wurden. Deshalb beginnt diese Betrachtung mit einem Blick auf die Anfänge der Computergrafik seit den 1950er Jahren. Sie geht im Wesentlichen nicht über die Jahrtausendwende hinaus, denn viele der danach begonnenen Entwicklungen sind noch nicht abgeschlossen. 01 Ergänzend werden die Entwicklungen von 3D-Scanverfahren und Photogrammetrie sowie **structure from motion** als Methoden zur Gewinnung von 3D-Daten kurz betrachtet. Sander Münster schreibt, dass ein Modell eine vereinfachte Rekonstruktion eines Originals ist, deren Abstraktionsgrad dem Verwendungszweck folgt. Er betont, dass zwischen dem digitalen 3D-Modell und seiner visuellen Darstellung im Sinne eines Modellabbildes zu unterscheiden ist. 02 Auch aus diesem Grund werden Visualisierung und Rendering-Verfahren hier nicht angesprochen (wie Shading, Texture Mapping, Raytracing, Radiocity, Non-photorealistic Rendering).

Diese Betrachtung bleibt trotzdem aufgrund der Fülle an Techniken und Anwendungen in vielen Punkten skizzenhaft und ist zudem von den persönlichen Erfahrungen des Autors geprägt. Auf viele, vielleicht nötige technische Details und Begriffserläuterungen wird verzichtet. Der Leser wird hiermit pauschal auf die umfangreiche Computergrafik-Literatur und die einschlägigen Lehrbücher verwiesen. Im Kontext dieser Betrachtung sind die seinerzeit richtungsweisenden Bücher von Foley, van Dam et al. 03 zu nennen. Eine aktuelle zusammenfassende Darstellung der Elemente der Computergrafik aus Sicht der 3D-Rekonstruktion findet sich z. B. in der Dissertation von Joyce Wittur. 04

01
Unter anderem der Einfluss der GPUs, prozedurale Modellierung, Point-Cloud-Verarbeitung, der Einfluss von Open-Source-Software.

02
Sander Münster, Entstehungs- und Verwendungskontexte von 3D-CAD-Modellen in den Geschichtswissenschaften, In: Klaus Meißner, Martin Engelien (Hg.), GeNeMe '11 — Gemeinschaft in Neuen Medien, Technische Universität Dresden, 2011, S. 99.

03
James D. Foley und Andries van Dam, Fundamentals of interactive computer graphics: Repr. with corrections, Reading Ma. 1984.
James D. Foley, Andries van Dam und Steven K. Feiner, Computer Graphics: Principles and Practice, 2nd ed., New York, Don Mills, Wokingham, Amsterdam, Bonn, Sydney, Singapore, Tokyo, Madrid, San Juan, Milan, Paris 1995.

04
Joyce Wittur, Computer-generated 3D-visualisations in archaeology: Between added value and deception, BAR international series 2463, Oxford 2013.

C.2 Entwicklung der Computergrafik

Von ihren Anfängen um 1950 bis zum Beginn der 1970er Jahre war die aktive forschende und entwickelnde Auseinandersetzung mit Computergrafik-Anwendungen wenigen privilegierten Institutionen vorbehalten, z. B. der Luftfahrtindustrie und militärischen Anwendungen. Erst dann beschleunigte sich die Entwicklung der Computergrafik mit der Abkehr von vektor- zu rastergrafischen Geräten. Kalligrafische Displays, auf Kathodenstrahlröhren basierend, wurden durch pixelbasierte Videogeräte mit digitalem Bildspeicher abgelöst, und später langsame Stiftplotter durch Rasterdrucker. In den 80er Jahren kam Computergrafik durch PCs und Apple-Rechner auf jeden Arbeitsplatz, was einen neuen Impuls für die Entwicklung von Verfahren und Anwendungen auslöste. In der gleichen Zeit wurde die Unterhaltungsindustrie zu einem weiteren Motor der Entwicklung, mit Animationen für Werbesppots, **special effects** für Kinofilme und Videospiele. Schließlich wurden Ende der 90er Jahre die aufwendigen Grafik-Controller durch preiswertere und leistungsstarke 3D-Grafikkarten abgelöst. Die darin vorhandenen spezialisierten hoch-parallelen Recheneinheiten (GPUs) gestatteten nun auch die Beschleunigung einer Vielzahl von Anwendungen. Ein Ende der Auswirkungen der GPUs auf die Anwendungen der Computergrafik und nicht nur auf pixelbasierte Grafik ist noch nicht abzusehen.

C.3 Entwicklung der 3D-Modell-Erstellung, CAD und CSG

Der Fortschritt der 3D-Rekonstruktion ist eng verbunden mit der Entwicklung der Computergrafik. Deren mathematische Grundlagen wurden lange vor der Computer-Ära gelegt. In den sechziger Jahren begann eine intensivere Auseinandersetzung mit Fragen der computergestützten Darstellung und der Interaktion mit geometrischen Objekten.

→ 1950 und folgende: Anfänge im Dunkeln. Die frühen Computergrafik-Entwicklungen, z. B. am MIT, bis in die frühen 1960er Jahre hinein, sind bislang nur wenig publiziert worden. Sie waren wenig zielgerichtet und in aller Regel an militärischen Projekten orientiert. Die Geräte zur Ausgabe von Grafiken waren Kathodenstrahlröhren, die eigentlich zur Überwachung der Hardware direkt an die CPU angeschlossen waren, sowie Textdrucker. Der Elektronenstrahl zeichnete eine Linie auf den Schirm, indem die Strahlablenkung durch Digital-Analog-Wandler vom Rechner gesteuert wurde. Da der Phosphor der Kathodenstrahlröhre nur eine begrenzte Nachleuchtzeit besitzt, musste das Bild auf dem Bildschirm regelmäßig aufgefrischt werden. Dafür wurde das Bild in eine **display list** umgesetzt, eine Folge von x-y-Werte-Paaren, den Endpunkten der Linien, die regelmäßig abgearbeitet wurde. Die Alternative, das Bild im Rechner in ein Pixelraster aufzulösen, das zeilenweise einem Videobildschirm zugeführt wurde, war bis in die 1970 Jahre nicht praktikabel, weil Videobildschirme zu langsam und zu niedrig aufgelöst waren.

→ 1960 und folgende: Die Computergrafik entsteht. Der Begriff **Computergrafik** wurde ab 1960 durch William Fetter, einen Mitarbeiter von Boeing, aufgebracht. Zu dieser Zeit übliche Grafik-Ausgabegeräte waren an Mainframes über Lochstreifen oder Magnetband offline gesteuerte Stiftplotter sowie Mikrofilm-Aufzeichnungsgeräte, in deren Kathodenstrahlröhren aufwendige Zeichengeneratoren integriert waren. Jack Bresenham publizierte 1965 den DDA-Algorithmus, mit dem Linien effizient für Plotter generiert werden konnten. Terminals mit Grafik-Funktionalitäten, insbesondere an Prozessrechnern, kamen im Laufe der 60er Jahre auf. Einen Durchbruch brachten 1969 die Speicherröhren von Tektronix, die keine ständige Bildwiederholung durch den Rechner und keinen aufwendigen Controller brauchten. Sie konnten beliebig komplexe Liniengrafiken ohne zu flackern darstellen und waren erheblich preiswerter als Grafik-Terminals mit **display list**-Prozessoren.

→ 1963: Sketchpad. Ivan Sutherland legte 1963 in seinem Sketchpad-System die Basis für alle grafisch-interaktiven Computer-Anwendungen. 05 Sketchpad zeigte, wie über die Bildschirmoberfläche unmittelbar mit der Software interagiert werden kann, um Daten einzugeben, Aktionen auszulösen und Ergebnisse zu visualisieren. Sutherland bemühte sich dabei darum, die Interaktion so **natürlich** wie möglich zu gestalten, um die Benutzbarkeit zu erhöhen.

Eine weitere Innovation von Sutherland war 1966 das Head-Mounted Display (HMD), das die Basis für Virtual Reality darstellte. Zunächst konnte der Betrachter damit eine im Raum schwebende Drahtgitter-Darstellung eines Würfels durch Kopfbewegung von verschiedenen Seiten betrachten.

■ 05
Ivan E. Sutherland, Sketchpad a man-machine graphical communication system, in: Transactions of the Society for Computer Simulation 2 (5) 1964.

→ 1963: Lawrence Roberts. Aufbauend auf den Arbeiten Sutherlands erzeugte Lawrence Roberts in den frühen 1960ern mit den Rechnern am MIT aus Fotografien 3D-Modelle. 06 Anhand von vier oder mehr Punkten, die auf den 2D-Bildern identifiziert wurden, berechnete er die 3D-Koordinaten dieser Punkte und anschließend Kanten und Polygone. Er war darüber hinaus Pionier der Algorithmen für das Entfernen verdeckter, vom Betrachter nicht sichtbarer Bildteile ebenso wie der Berechnung perspektivischer Projektionen mittels Transformationsmatrizen. Roberts berechnete von 3D-Modellen perspektivische 2D-Ansichten von verschiedenen Blickpunkten. Er benutzte die 2D-Datenstrukturen für Punkte und Linien, die Sutherland für Sketchpad entwickelt hatte, und erweiterte sie für 3D-Operationen. Die interne Repräsentation der 3D-Objekte hatte schon wesentliche Elemente der später erfolgreichen **winged edge**-Datenstruktur. 07 Eine Szene aus 3D-Objekten wurde von Roberts in einer Baumstruktur abgespeichert, die an den Blättern geometrische Objekte als Instanzen von Objekten-Definitionen enthielt. Die Kanten waren Transformationen, die als 4x4-Matrizen samt ihren Inversen gespeichert waren, und die Knoten waren, als **picture** bezeichnet, Listen von weiteren **pictures** oder Objekt-Instanzen. Damit antizipiert Roberts auch die hierarchische Struktur des Szenengraphen.

■ 06
Lawrence Gilman Roberts, Machine perception of three-dimensional solids, Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 1963.

■ 07
Bruce G. Baumgart, Winged edge polyhedron representation, Reports / STANFORD UNIV Memo AIM-179, 1972.

Wie in einem Round-Table-Gespräch 1989 von Roberts berichtet wurde, testete er die Leistungsfähigkeit seiner Implementierung an 3D-Modellen von Bauwerken. 08 Eine (vermutlich hypothetische) **Burgruine** kann vielleicht als die erste 3D-(Re-)Konstruktion angesehen werden. Die Refresh-Rate kollidierte mit der Belichtungszeit, so dass das Bild der Burg auf der Oszillografenröhre nicht in Gänze abfotografiert werden konnte. 09

→ 1963 und folgende: 2D-Computer-Anwendungen in der Archäologie. Ab Mitte der 1960er Jahre wurden zunehmend Computer in der Archäologie eingesetzt, wenn auch zunächst vorwiegend für Datensammlungen und statistische Berechnungen. Auch erste grafische Anwendungen, die über die 2D-Visualisierung von Ergebnissen und Illustrationen hinausgingen, wurden berichtet. Wilcock beschrieb eine Anzahl von Computer-Anwendungen in der Archäologie aus dieser Zeit. 10 Er hob das Potenzial der Computergrafik hervor, insbesondere das des Stiftplotters als automatisiertes Zeichenwerkzeug. Cowgill erwähnte 1967 die Möglichkeit, die Formen von Artefakten digital im Computer zu speichern. 11

→ 1960 und folgende: CAD kommt auf. Computer-Aided Design (CAD) wurde in den Ingenieurs- und Architekturdisziplinen mit dem Ziel entwickelt, neue Objekte zu konstruieren. Etwas zeitversetzt und zunächst unabhängig davon entstanden im Vermessungswesen andere computergestützte Methoden, Befunde zu dokumentieren, vor allem 2D- und 2,5D-Ansätze in Verbindung mit Geo-Informations-Systemen (GIS) zur Erfassung von Gebäuden und Ensembles. Die Dokumentation und Rekonstruktion von historischen Artefakten konnte sich in Folge erfolgreich solcher vorgefundenen Methoden und ihrer Experten bedienen.

Die Treiber der CAD-Entwicklung waren um 1965 große Konzerne im Automobilbau und der Flugzeugindustrie. Vermutlich die erste kommerzielle CAD-Anwendung wurde in der Mitte der 1960er Jahre entwickelt. 12 Kristine Fallon stellt die Entwicklung der Computergrafik-Anwendungen im Ingenieurs- und Konstruktions-Bereich sehr ausführlich dar. 13 Sie vermutet, dass 1966 mit PD&S in Boston die erste Consulting-Firma gegründet wurde, die Computergrafik für Architekten anbot.

Mitte der 70er Jahre wurden CAD-Systeme auf Minicomputern (vorwiegend VAX von Digital Equipment) von großen Konstruktions- und Architekturfirmen genutzt. Fallon weist auf eine bemerkenswerte Architekturvisualisierung Donald P. Greenbergs von der Cornell University Anfang der 1970er Jahre hin. 14 Greenberg habe, im Gegensatz zu den sonst üblichen Drahtnetz-Darstellungen, ein geplantes Museum mit schattierten Oberflächen visualisiert. Fallon bemerkt, dass Entwerfen und Konstruieren bis in die 90er Jahre hinein die Schwerpunkte für den Einsatz von CAD-Systemen blieben.

Weisberg schildert 2008 den Aufstieg und Fall der frühen CAD-Firmen und ihrer Produkte und Entwickler in großer Sorgfalt; allerdings spielten Architektur- und erst recht Archäologie-Anwendungen dabei eine eher untergeordnete Rolle. 15 Er erwähnt, dass 1967 Harper und Sides ein Bau-Planungsprogramm auf einem Prozessrechner von IBM entwickelten. Die Chicagoer Firma SOM entwickelte 1970 ein umfassendes Programm für Architektur- und

■ 08
Robert L. Judd, ACM SIGGRAPH 89 Panel Proceedings, New York 1989.

■ 09
Leider macht Roberts in seinem Diskussionsbeitrag keine zahlenmäßigen Angaben zur Komplexität des Bildes oder des Modells.

■ 10
John D. Wilcock, A general survey of computer applications in archaeology, in: Science and Archaeology 9, 1973, S. 17–21.

■ 11
George L. Cowgill, Computer applications in archaeology, in: the November 14–16, 1967, fall joint computer conference, 1967, S. 331.

■ 12
Don Bissell, Was the IDIIOM the first stand-alone CAD platform?, in: IEEE Annals of the History of Computing 20 (2) 1998, S. 14–19.

■ 13
Kristine K. Fallon, Early computer graphics developments in the architecture, engineering and construction industry, in: IEEE Annals of the History of Computing 20, (2)1998, S. 20–29.

■ 14
Donald P. Greenberg, More accurate simulations at faster rates, in: IEEE Computer Graphics and Applications 11.1 (1991): S. 23–29.

■ 15
Dave Weisberg, The engineering design revolution CAD history: The people, companies and computer systems that changed forever the practice of engineering, www.cadhistory.net.

Design-Anwendungen, das später unter dem Namen AES von IBM vermarktet wurde.

Solid-Modelling-Systeme, basierend auf Constructive Solid Geometry (CSG), und zeichnungsorientierte CAD-Systeme entwickelten sich bis in die 70er Jahre weitgehend parallel zueinander – CAD mehr im industriellen Umfeld und CSG eher im akademischen Bereich.

Das Programm Autocad erschien 1984 auf dem Markt. Es wurde hauptsächlich als ein System zum 2D-Zeichnen genutzt, obwohl es seit 1986 über 3D-Elemente verfügte. Das Programmpaket Autodesk 3D Studio, später Autodesk 3DS, erschien 1990. Es bot weit mehr und höher entwickelte Oberflächenmodellierung als Autocad und war speziell dazu gedacht, 3D-Modelle zu konstruieren und diese Modelle zu visualisieren und zu animieren. Autocad und Autodesk 3D Studio sind nur zwei Vertreter der zahlreichen CAD-Systeme, die für alle Arten von Computern im Laufe der 80er Jahre vermarktet wurden, zunächst für Prozessrechner und Workstations, dann zunehmend auch für die leichter verfügbaren PCs.

→ 1970er Jahre bis heute: Unterhaltungsindustrie. In einem Artikel von 1998 zeigt Morie die Entwicklung der Computergrafiknutzung von einer anderen Seite, von jener der Filmindustrie: 16 In den 1970er Jahren entwickelten Computergrafiker alle benötigten Werkzeuge und Techniken, die für Filmproduktionen benötigt wurden, jeweils neu, denn es gab kaum schlüsselfertige Systeme für die Aufgaben der Filmindustrie. 3D-Computergrafik war eine recht esoterische Technologie; es hieß, sie gäbe Antwort auf Fragen, die noch nicht gestellt wurden. 1974 wurde im Hollywood-Film **Futureworld** erstmalig 3D-Computergrafik eingesetzt. Die Unterhaltungsindustrie vergab gelegentlich Aufträge an Hochschulen, um ihre Probleme lösen zu lassen. Die Werbeindustrie war in den späten 1970er und frühen 80er Jahren unter den Ersten, die intensiver 3D-Grafik nutzten, insbesondere für kurze TV-Werbe-Filme, die aufgrund ihrer Neuheit Aufmerksamkeit erweckten. Ab der Mitte der 1980er Jahre gab es zunehmend spezialisierte Agenturen, die die Filmindustrie belieferten. Noch war die Produktion annähernd realistischer 3D-Computergrafik-Szenen zu teuer, um sich auf breiter Basis durchzusetzen. Das änderte sich in den 90er Jahren. Special Effects und Computer-Animationen waren seitdem unverzichtbar, was durch den Erfolg von Pixars **Toy Story** deutlich wurde. Im Laufe dieser Jahre verschob sich die Expertise der mit der Erstellung von 3D-Computergrafik-Animationen befassten Experten von Computerspezialisten hin zu Künstlern, die sich die Fachkenntnisse aneigneten und auch die Entwicklung der Werkzeuge in ihrem Sinne vorantrieben.

■ 16
Jacquelyn F. Morie, CGI training for the entertainment film industry, in: IEEE Computer Graphics and Applications 98, Januar / Februar 1998.

Eine ähnliche Entwicklung vollzog sich bei den Computerspielen, die zwar etwas später einsetzte, aber inzwischen einen größeren Marktanteil besitzt und mehr Entwickler beschäftigt als die Filmindustrie.

→ 1975: Zeichen-Programme, **Video-Framebuffer.** 2D-Zeichen-Programme, die das Arbeiten mit Pinsel und Stift am Computer nachbilden, werden hier nicht ausführlicher betrachtet. Sie besitzen eine Bedeutung für die Erstellung von 3D-Modellen, da mit ihrer Hilfe oft Texturen und anderes manuell

nachbearbeitet werden müssen. 2D-Zeichen-Programme erschienen zuerst am Anfang der 70er Jahre. Ab 1975 wurden von Evans und Sutherland die digitalen Framebuffer (**pixel refresh memories**) entwickelt und als Bildwiederholspeicher für den zeilenweise arbeitenden Videobildschirm genutzt. Sie besaßen zunächst 512 x 480 Pixel mit je 8 Bit und arbeiteten mit **color lookup tables.**

Ab 1980 wiesen sie 3x8 Bit Farbtiefe für RGB auf, bald auch 4x8 Bit mit dem zusätzlichen Alpha-Kanal für Transparenz, und 1024 x 1024 Pixel. Der Bildwiederholspeicher konnte über **double buffering** vom Anwendungsprogramm gelesen und geschrieben werden, ohne dass inkonsistente Zwischenzustände sichtbar wurden. 17

■ 17
Alvy R. Smith, Digital paint systems: an anecdotal and historical overview, in: IEEE Annals of the History of Computing, 23 (2), S.4–30, 2001.

→ 1980 und folgende: Grafische Workstations und Personal Computer.
In den 80er Jahren waren Video-Bildwiederholspeicher genügend hoch aufgelöst und schnell, um die Speicherröhren zu verdrängen. Ebenso wurden die Prozessrechner von Minicomputern und grafischen Workstations abgelöst, typischerweise mit Motorola 68000-Prozessoren und von den sehr erfolgreichen Unix-Workstations von Sun und Silicon Graphics.

Der IBM-PC mit der CGA-Grafik kam 1981 auf den Markt, aber er war erst Ende der 80er Jahre leistungsfähig genug, um CAD-Software zu betreiben, die den Vergleich mit professioneller, Workstation-basierter CAD-Software standhalten konnte. Die in Forschung und Lehre sehr beliebte Hercules-Grafikkarte für den IBM-PC erschien 1982. Sie konnte auf dem bis dahin nur alphanumerischen PC-Bildschirm 720 x 384 Pixel mit 4 Helligkeitsstufen ausgeben. Die Bilder wurden pixelweise im Hauptspeicher erzeugt. 1993 brachte Microsoft Windows NT für den PC auf den Markt, ein Betriebssystem, das im Wesentlichen die Funktionalität eines Unix-Systems bot, sodass die Grenzen zwischen PC und Workstations zunehmend verschwanden und viele Anwendungen, die ursprünglich für Workstations entwickelt wurden, nun auch im PC umgesetzt wurden.

Das Erscheinen des Apple Macintosh setzte 1984 einen weiteren Meilenstein, indem die grafische Benutzeroberfläche mittels des rastergrafischen Bildschirms in ein geschlossenes, vollständiges System integriert war. Viele Anwendungen für den Designbereich konzentrierten sich in Folge auf den Mac.

→ 1982 und folgende: 3D-Anwendungen der Archäologie. In den 1980er und 1990er Jahren wurde die Grafik-Peripherie der Computer in der Archäologie vorwiegend wie eine Zeichenmaschine zur Erzeugung zweidimensionaler Datenvisualisierungen gebraucht. Laut Pfarr-Harfst wurde 3D-Computer-Grafik seit den 1980er Jahren systematisch als Kommunikationsmedium im Bereich c**ultural heritage research** und Wissenstransfer verwendet. 18

■ 18
Mieke Pfarr-Harfst, Typical workflows, documentation approaches and principles of 3D digital reconstruction of cultural heritage, in: Sander Münster et al. (Hg.), 3D research challenges in cultural heritage II: How to manage data and knowledge related to interpretative digital 3D reconstructions of cultural heritage, Cham 2016, S. 32–46.

Frischer berichtete, dass ab 1982 3D-Modelle manuell, unter Einsatz von CAD-Software, konstruiert wurden. [19] Nach Miller wurden in Großbritannien die ersten 3D-Visualisierungsprojekte in den 1980er Jahren begonnen. Die Software und die Computer wurden von großen Firmen gesponsert, die sich eine Werbewirkung versprachen. [20] Reilly schrieb ebenso, dass die Verwendung der Computergrafik in der Archäologie von dem Bedürfnis geprägt war, schöne Bilder für die Öffentlichkeit zu produzieren, und dass zu der Zeit die Forschung nicht im Vordergrund stand. [21] Cornforth und Davidson beschrieben, dass Fishbourne Palace mithilfe eines Apple Macintosh II modelliert wurde. [22] Huggett wies 1990 auf die Möglichkeiten hin, die AutoCAD für Archäologen böte. CAD wurde zur Aufnahme von Befunden benutzt, aber auch zur Rekonstruktion von Vergangenem, wobei Huggett eine visuelle Unterscheidung für erforderlich hielt. Er publizierte Makros und Menüs, die die Benutzung von AutoCAD für Archäologen erleichterten. [23]

Wood und Chapman stellen 1990 für die Archäologie Festkörpermodellierung und Oberflächenmodellierung einander gegenüber, mit einigen Praxisbeispielen und den dabei aufgetretenen Problemen (u. a. Inkompatibilität der verwendeten Softwaresysteme). [24] Sie kamen zu dem Schluss, dass keines der eingesetzten Programme ideal sei, und äußerten die Hoffnung, dass die kommende Version 11 von AutoCAD oder Software von Intergraph einige Problem löse.

Von dieser eher experimentierenden Nutzung ausgehend fanden in den 1990er Jahren 2D-GIS-Anwendungen zunehmend Eingang in die Archäologie, und CAD-Anwendungen wie AutoCAD und 3D Studio wurden für Architektur-Rekonstruktionen eingesetzt. [25] Eine Darstellung der frühen 3D-Rekonstruktionen für die Archäologie aus den 1980er bis 1990er Jahren findet sich bei Wittur. [26] Die Auswahl der Modellierungssysteme war oft nicht Teil der Projektplanung, sondern wurde durch Präferenzen der Beteiligten oder das zur Verfügung stehende Equipment vorgegeben. [27]

■ **19**
Bernard Frischer, Introduction, in: Bernard Frischer und Anastasia Dakouri-Hild (Hg.), Beyond illustration: 2D and 3D digital technologies as tools for discovery in archaeology, Oxford 2008, S. v–xxii.

■ **20**
Paul Miller und Julian Richards, The good, the bad, and the downright misleading: archaeological adoption of computer visualization, in: BAR INTERNATIONAL SERIES 600, 1995, S. 19–22.

■ **21**
Paul Reilly (Hg.), Archaeology and the information age: A global perspective; [derived from the Second World Archaeological Congress, held in Barquisimeto, Venezuela, Sept. 1990], One world archaeology 21, London 1992.

■ **22**
Janice Cornforth und Craig Davidson, Picturing the past, in: Archaeological computing newsletter 19, 1989, S. 6–10.

■ **23**
J. Huggett, Programming AutoCAD for the archaeologist, in: Archaeological computing newsletter 25, 1991, S. 18–24.

■ **24**
Jason Wood und Gill Chapman, Three-dimensional computer visualization of historic buildings with particular reference to reconstruction modelling, in: Paul Reilly und Sebastian Rahtz (Hg.), Archaeology and the information age: a global perspective, London 1992, S. 123–46.

■ **25**
Julian D. Richards, Recent trends in computer applications in archaeology, in: Journal of Archaeological Research 6 (4) 1998, S. 341.

■ **26**
Wittur 2013, S. 9–13.

→ 1985 und folgende: 3D-Software-Normen, Core, GKS und Nachfolger. Van Dam bezeichnete Normen als ein Übel, das aber sehr notwendig sei. [28] Ab Mitte der 1970er Jahre stellte man fest, dass die Portierbarkeit von Computergrafik-Anwendungen aufgrund der inkompatiblen kommerziellen Softwareentwicklungen zunehmend schwieriger wurde. Aus der ACM heraus wurde der erste grafische Standard Core (**3D Core Graphics System**) 1977 entwickelt. [29] Parallel und im Wettstreit wurde GKS (Grafisches Kern-System, **Graphical Kernel System**) mit dem Ziel einer internationalen Norm entwickelt. [30] GKS wurde 1985 zur ISO-Norm – zunächst auf 2D beschränkt – und 1987 zu GKS-3D ergänzt. [31] Core und stärker noch GKS haben durch Abstraktion und Systematik für eine gemeinsame Begriffsbildung im Bereich der Grafik-Programmierung gesorgt. Sinclair et al. erwähnten 1992, dass im Gegensatz zur Situation bei den Datenbanken fehlende Computergrafik-Standards die Computernutzung in der Archäologie erschweren, und hofften, dass GKS die Situation verbessere. [32]

Eine erfolgreiche Programmierschnittstelle im 3D-Bereich wurde ab 1988 PHIGS (**Programmer's Hierarchical Interactive Graphics System**). [33] PHIGS lag auch der von Foley und van Dam verwendeten didaktischen 3D-Software SRGP **(Simple Raster Graphics Package)** zugrunde, die in Computergrafik-Vorlesungen verwendet wurde. [34] PHIGS war im Wesentlichen noch auf Vektorgrafik ausgerichtet – die damaligen Normungsbemühungen wurden von der Technologieentwicklung überholt, die inzwischen zu rastergrafischen Systemen übergegangen war. Dieses Defizit wurde 1991 durch PHIGS PLUS behoben. [35] PHIGS PLUS enthielt auch Schnittstellen für modernere B-Spline-Linien und -Flächen (NURBS, **non uniform rational b-splines**) und Schattierungsalgorithmen. Auch diese Norm wurde bald durch De-facto-Industriestandards überholt, in diesem Fall durch OpenGL, die aber von den Grundlagen profitierten, die die ISO-Normen gelegt hatten. Ein Ansatz, Normen für die grafische Programmierung in die Objekt-orientierte Softwarewelt hineinzubringen, war PREMO (**Presentation Environment for Multimedia Objects**), das 1998 verabschiedet wurde, aber wenig Marktbedeutung erlangte. [36]

27
Oft sind Informatik- und Technologie-Aspekte der erstellten Rekonstruktionen schwer zugänglich tief in Projektdokumentationen verborgen. Ein interessantes Projekt könnte sein, die Dokumentationen der 3D-Rekonstruktionen aus dieser Zeit auf die verwendeten Systeme hin zu analysieren.

28
Steve Carson et al., The history of computer graphics standards development, in: ACM SIGGRAPH Computer Graphics 32 (1) 1998, S. 34–38

29
R. H. Ewald und R. Fryer, Final report of the GSPC state-of-the-art subcommittee, in: ACM SIGGRAPH Computer Graphics 12, (1–2)1978, S. 14–169.

30
Peter R. Bono et al., GKS – The first graphics standard, in: IEEE Computer Graphics and Applications 2 (5) 1982, S. 9–23.

31
ISO / IEC 7942, ISO / IEC 7942 1985 (1985).

32
Paul Sinclair et al., The impact of the information technology on the archaeology of southern and eastern Africa: the first decades, in: Paul Reilly, Sebastian Rahtz (Hg.), Archaeology and the information age: a global perspective, London 1992, S. 29–40.

33
ISO / IEC 9592, ISO / IEC 9592 1989 (1989).

34
Foley et al. 1995.

35
ISO / IEC 9592–4, ISO / IEC 9592–4 1991: Plus Lumière und Surfaces (PLUS) (1991).

36
Ivan Herman et al., PREMO: an ISO standard for presentation environment for multimedia objects, ACM 1994.

→ 1992 bis heute: OpenGL. OpenGL ist eine Programmierschnittstelle zwischen dem Anwenderprogramm und der Grafikhardware zum Modellieren und Projizieren von dreidimensionalen Objekten. OpenGL wurde in den 90er Jahren für die SGI-Workstations entwickelt und in die Public Domain gestellt. 37 Seitdem wurde OpenGL kontinuierlich weiterentwickelt und an neue Anforderungen angepasst. Die Schnittstelle umfasst mehrere Hundert Befehle zum Verwalten von elementaren geometrischen Primitiven wie Punkten, Linien, Polygonen und Bézierkurven und von Attributen wie Farben und Normalenvektoren sowie von Transformationen und Projektionen. Auch höhere geometrische Objekte wie Kugel, Kegel und Torus bis zu komplexeren Objekten wie NURBS und Quadrics stehen zur Verfügung. Objekte können von der Anwendung selbst definiert und unter einem Namen in der Display-Liste gespeichert und damit mehrfach instanziiert werden. Einmal gesetzte Attribute, wie z. B. Farben, bleiben als Zustand erhalten, bis sie explizit geändert werden. 38

OpenGL bietet den Durchgriff auf die Optimierungsfeatures der jeweiligen Hardware (Framebuffer, Transformationen, hierarchische Modellierung, Z-Buffer, Texture Handling, Shader). OpenGL hat sich als De-facto-Standard und als eine stabile Basis für die Erstellung von grafischer Anwendungssoftware herausgestellt, der die Portierbarkeit von Anwendungen ermöglicht, ohne auf Leistungszuwächse neuer Hardware zu verzichten.

■ **37**
Mark Segal und Kurt Akeley, The OpenGL Graphics System: A Specification (Version 1), Silicon Graphics Computer Systems (1994).

■ **38**
Durch diese modalen Attribute der grafischen Elemente erscheint OpenGL noch der generativen Grafik der 1980er Jahre verhaftet, wie z. B. Core.

C.4 Interne Repräsentationen

Geometrische Formen werden im Computer durch Datenstrukturen beschrieben. Elementare Objekte sind Punkte im dreidimensionalen Raum. Werden benachbarte Punkte durch Kanten verbunden, erhält man ein sogenanntes Drahtgittermodell (**wire frame**). Das reicht für eine eindeutige Repräsentation nicht aus. Deshalb werden alternativ 3D-Modelle durch ihre Oberflächen oder die Volumina der beteiligten Objekte beschrieben.

→ Punktwolken. Von Scannern oder mit der Photogrammetrie werden umfangreiche Punktwolken erzeugt, die jedoch keine eindeutigen Oberflächen besitzen. Wenn die Punkte dicht genug liegen (im Bereich der Bildschirmauflösung), ergibt das überzeugende, detailreiche Bilder. Ein weiteres Hineinzoomen ist jedoch nicht mehr ohne Weiteres möglich. Ein Ausweg ist die Visualisierung mittels Oberflächen, die von den Scannerpunkten aufgespannt werden. Gebhardt et al. beschreiben ausführlich und mit Hintergrundinformationen, wie sie aus Punktwolken automatisiert Oberflächenmodelle erzeugt haben. 39 Die Beschreibung von Software zur Verarbeitung von Punktwolken (Reduktion, Oberflächenrekonstruktion, Registrierung) ist leider außerhalb der Möglichkeiten dieses Aufsatzes. 40

■ **39**
Scott Gebhardt, Eliezer Payzer und Leo Salemann, Polygons, point-clouds, and voxels, a comparison of high-fidelity terrain representations, in: Simulation Interoperability Workshop and Special Workshop on Reuse of Environmental Data for Simulation—Processes, Standards, and Lessons Learned.

■ **40**
Fabio Remondino, From point cloud to surface: The modeling and visualization problem, in: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences: International Workshop on Visualization and Animation of Reality-based 3D Models, 24–28 February 2003, Tarasp-Vulpera, Switzerland, XXXIV-5/W10 2003. Radu B. Rusu und Steve Cousins, 3D is here: Point Cloud Library (PCL), in: IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2011, S. 1–4.

→ Oberflächenmodelle. Um ein dreidimensionales Objekt eindeutig durch seine Oberfläche zu beschreiben (**boundary representation**, B-rep), begrenzen die Kanten Oberflächenelemente (Polygon, Facette, Patch). Die Polygone müssen zu einem vollständig geschlossenen, überschneidungsfreien Netz verbunden werden (**mesh,** Mannigfaltigkeit). Zusätzlich werden in der Regel zu jeder Ecke und / oder zu jedem Polygon die Normalen angegeben; das sind Einheitsvektoren, die senkrecht auf der Oberfläche stehen und konsistent in Richtung der Außenseite des Objekts zeigen sollen.
Eine 3D-Datenstruktur soll außerdem gestatten, Nachbarschaften einfach abzufragen, z. B. welche Kanten an einem Punkt enden oder welche Polygone sich in einer Kante schneiden. Eine optimale Datenstruktur gibt es jedoch nicht, da ihre Eigenschaften von den Anwendungen abhängen.
Gute Datenstrukturen sind mehrfach entwickelt und beschrieben worden. Eine frühe, viel zitierte Quelle ist die Arbeit von Baumgart aus dem Jahr 1975. 41

■ 41
Baumgart 1972.

Schon Roberts nutzte 1963 polygonale Facetten zur Modellierung. Im Laufe der 1970er Jahre wurden sie u. a. von Blinn sowie Evans und Sutherland vervollkommnet, insbesondere ihr Rendering. Seit den 1980er Jahren dominierte ihre Benutzung in der 3D-Modellierung. Vierseitige Polygone erschienen intuitiv ansprechend, insbesondere, wenn man von 2,5 D **height maps** über einem regelmäßigen Raster ausging, aber sie können sich an Krümmungen nicht **anschmiegen**. Man ging entweder zu polynomial definierten Oberflächen (**Coons patches**, Spline-Flächen, NURBS) über, oder die Flächen wurden in Dreiecke aufgeteilt (trianguliert). Beide Methoden wurden in den 1970er Jahren entwickelt. Im Kontext der 3D-Rekonstruktion haben sich polynomiale Flächendefinitionen nicht eingebürgert.

→ Konstruktive Modellierung mit Festkörpern. Bei der konstruktiven Festkörper-Modellierung (**solid modelling** oder **constructive solid geometry**, CSG) beschreibt man Objekte im Rechner, indem man von einfachen Festkörpern (Würfel, Kugel, Zylinder) ausgeht, die auf verschiedene Weise zu ausgedehnten Objekten mit komplizierteren Oberflächen kombiniert werden.

Mit CSG wird in der Regel die Instanziierung von elementaren Körpern bezeichnet, die positioniert, in der Größe angepasst und durch boolsche Operationen (Durchschnitt, Vereinigung, Differenz) kombiniert werden. Reilly wies darauf hin, dass die ersten 3D-Rekonstrutionen in Großbritannien und Irland 1985 mit Hilfe von CSG erstellt wurden. Er stellte 1990 fest, dass Festkörpermodellierung in der Archäologie eine längere Tradition hatte als B-rep-Modelle und hob das von IBM entwickelte **solid modelling**-System WINSOM hervor. 42

■ 42
Paul Reilly, Three-dimensional modelling and primary archaeological data, in: Paul Reilly, Sebastian Rahtz (Hg.), Archaeology and the information age: a global perspective, London 1992, S. 147–173.

Eine extreme Form des CSG benutzte nur Halbräume bzw. unendlich ausgedehnte Ebenen, die den Raum in ein Inneres und ein Äußeres teilen (wie mit einer Säge). Die Teile wurden durch boolsche Operationen miteinander verknüpft. Woodwark beschrieb, dass mit dieser Methode 1983 der Tempel von Sulis Minerva des römischen Bath (England) zusammen mit seiner Umgebung mit 2.300 Halbräumen modelliert wurde sowie ein Jahr später das römische Bad in Caerleon, Wales, mit 7.000 Halbräumen. 43

■ 43
John Woodwark, Reconstructing history with computer graphics, in: IEEE Computer Graphics and Applications 11, (1) 1991, S. 18–20.

Wenn der 3D-Raum regelmäßig in gleichgroße würfelförmige Zellen aufgeteilt wird (**volumetric pixels**, Voxel), kann damit ein Objekt beschrieben

werden, indem pro Voxel festgehalten wird, ob es sich im Innern des Objekts oder außerhalb befindet. Die Koordinaten der Oberfläche ergeben sich aus der Position im Voxel-Array. Voxel fanden durch die 1973 von Hounsfield entwickelte Computertomografie intensiv in der 3D-Modellierung Eingang. Die Verwendung von Voxeln ist in der 3D-Rekonstruktion nicht verbreitet. Wittur weist darauf hin, dass diese Methode von Nigro 2001 in der Archäologie genutzt wurde. 44

■ 44
Joseph D. Nigro et al., The creation and potential applications of a 3-dimensional GIS for the early hominin site of Swartkrans, South Africa, in: Göran Burenhult (Hg.), Archaeological informatics – pushing the envelope, Oxford 2002, S. 115–123.

C.5 Formate für Austausch und Archivierung

Bei der Publikation von 3D-Rekonstruktionsprojekten wurde den verwendeten Formaten wenig Aufmerksamkeit gewidmet, da Wiederverwendbarkeit und Austausch keine vordergründige Rolle spielten. Im Folgenden wird auf einige 3D-Datenformate hingewiesen, die zum Austausch und zur Archivierung von 3D-Modellen benutzt wurden. Die Betonung liegt auf solchen Formaten, die nicht an eine Anwendungssoftware oder einen Hersteller gebunden sind. Die Auswahl ist bei Weitem nicht vollständig. Erwähnt werden könnten auch COLLADA, PLY, 3DS, FBX und andere mehr. Eine frühere Übersicht über zahlreiche 3D-Formate und die Programme, die damit umgehen konnten, bieten McHenry und Bajcsy. 45

■ 45
Kenton McHenry und Peter Bajcsy, An overview of 3d data content, file formats and viewers, in: National Center for Supercomputing Applications 1205, 2008.

→ 1980, 1986, 1987: IGES. Erst 1979 wurde mit CAM-1 eine erste Version eines Standard-Formats für den Datenaustausch zwischen CAD- und CSG-Systemen vereinbart. Parallel dazu wurde die US-Norm IGES (**Initial Graphics Exchange Specification**) entwickelt und 1980 veröffentlicht, die den Datenaustausch zwischen technischen Zeichensystemen zum Gegenstand hatte. 46 IGES beschränkte sich zunächst auf 2D-Zeichnungsdaten und -Annotationen. In der Folge definierte IGES eine produktneutrale Repräsentation von Geometrie aus 2D- und 3D-Kurven, Flächen und Körpern sowie deren Annotation und Bemaßung. Mit Version 3 von IGES wurde 1986 auch der Austausch von Architekturdaten spezifiziert. Ab 1987 gingen die zwischenzeitlichen Weiterentwicklungen im CAM-1-Bereich in die Version 4 von IGES ein, das dann auch den Austausch von CSG-Modellen zwischen prominenten CAD-Systemen ermöglichte. 47

■ 46
ASME Y14.26M – Initial Graphics Exchange Specification (IGES), Ansi 1980.

■ 47
Peter Wilson, A short history of CAD data transfer standards, in: IEEE Computer Graphics and Applications 7 (6) 1987, S. 64–67.

→ 1988: STL. 1988 wurde mit dem STL-Format (Stereo-Lithografie, auch **Standard Triangulation Language** oder **Surface Tesselation Language**) von 3D-Systems ein einfaches, offenes Format für 3D-Oberflächen geschaffen, das als Geometrie-Elemente Ecken, Dreiecke und Polygon-Normale enthält. Es wendete sich in erster Linie an Rapid Prototyping und den 3D-Druck. Oberflächeneigenschaften wie Farben oder Texturen können in der Standard-Version nicht definiert werden. 48

■ 48
Inc. 3D Systems, 3D Systems 1989, Valencia 1989.

→ 1989: OBJ. Das oft benutzte OBJ-Format wurde ursprünglich um 1989 von Wavefront Technologies geschaffen und ging an AutoDesk über. Dadurch, dass es gut dokumentiert und leicht implementierbar war, gewann es schnell Beliebtheit als Austausch- und Archivierungsformat. [49] Es gestattete, Oberflächen von 3D-Objekten mittels Polygonen und parametrischen Patches zu definieren. Materialeigenschaften wie Farben und Texturen konnten über eine externe MTL-Datei beschrieben werden. [50]

→ 1994: STEP. IGES war mindestens bis zum Ende der 1980er Jahre das De-facto-Standard-Datenaustauschformat. Einige Defizite von IGES, wie fehlende CAD-Datenelemente, u. a. für B-rep, und die träge Verarbeitung großer Dateien, führten zur Definition von alternativen Datenaustauschformaten (u. a. PDDI, VDA/FS, PDES, CAD 1). Schließlich begann die ISO 1984 Aktivitäten unter der Überschrift STEP mit dem Ziel, eine internationale Norm zu entwickeln, die ermöglicht, alle Informationen, die ein computerisiertes Produktmodell enthält, in hersteller- und systemneutraler Form über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg zu erfassen, ohne an Vollständigkeit zu verlieren. Dies führte zur ISO-Norm 10303 STEP (**Standard for the Exchange of Product Model Data**), deren erste Version 1994 verabschiedet wurde. [51]

Mit STEP können Eigenschaften wie Geometrie, Topologie, Struktur, Größe, Toleranzen, Finite Elemente, Materialeigenschaften, elektrische Eigenschaften, Zeichnungselemente und Präsentation beschrieben werden. Die geometrischen Eigenschaften beinhalten Punkte, Kanten, Kurven, Oberflächen für CSG und polygonale Repräsentation.

Charakteristisch für STEP ist, dass es definierte Teilmengen gibt, für die die Norm-Konformität nachgewiesen werden kann. Die Anwendungen von STEP erstrecken sich über viele Bereiche von computergestütztem Entwurf, Konstruieren und Simulation. [52] Architektur- oder Bauwerksdaten sind nicht im gleichen Umfang vertreten wie z. B. Maschinenbau und Elektrotechnik. Obwohl STEP allgemein als bedeutend dargestellt wird, schritt seine Akzeptanz nicht so schnell voran wie erwartet. Ein Grund könnte die große Komplexität und der Widerwille gegen Abkehr von Bekanntem sein.

Konformität eines Anwendungsprogramms mit IGES oder STEP bedeutet, dass das Programm die Definitionen lesen und **verstehen** kann. Ob es sie aber genau so interpretiert wie das erzeugende Programm, war nicht sichergestellt. Dies kann ein Grund für die lückenhafte Akzeptanz dieser Standards gewesen sein. [53]

49
Die Interoperabilität mittels OBJ wird dadurch eingeschränkt, dass Anwendungen inkompatible Teilmengen verwenden.

50
Wavefront, OBJ file format summary, in: FileFormat. info, 2011.

51
ISO 10303, Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange (STEP), 1994.

52
J. Wapakabulo et al., A step towards the adoption of data-exchange standards: a UK defence community case study, in: The 4th Conference on Standardization and Innovation in Information Technology, 2005, S. 242–53.

53
Kent A. Reed, Product modeling of buildings for data exchange standards: from IGES to PDES / STEP and beyond, in: Conceptual modelling of buildings, CIB W 74, 1988, S. 157–164.

→ 1994: VRML. In den 1990er Jahren wurde für Anwendungen im World Wide Web der Bedarf an einem unabhängig einsetzbaren und von Browsern ohne spezielle Plug-ins darstellbaren Datenformat deutlicher. Als erster 3D-Standard im Internet wurde die populäre Web3D-Technik **Virtual Reality Modeling Language** (VRML) 1994 in der ersten Version und 1997 in der ergänzten zweiten Version veröffentlicht. [54] VRML umfasst die Geometrie-Elemente Ecken, Linien, Polygone, Kurven, Bögen, parametrische Patches, Normale sowie CSG-Objekte. Objekt-Eigenschaften wie Farben und Texturen können definiert werden. Auch ist dynamisches Verhalten und Interaktivität definierbar. Durch Hyperlinks können beliebige Objekte im Web referenziert werden.

VRML folgt in seinem Aufbau dem Szenengraphen von Open-Inventor. Seine Baumstruktur enthält als Blätter Instanzen primitiver (d. h. elementarer) Objekte mit Default-Werten. Die Zwischenknoten enthalten Transformationen, Attribute, Aktionen sowie Gruppierungen von Unterknoten. An der Spitze steht ein Wurzelknoten, der die Welt repräsentiert. Anderson et al. führten 2010 einige Anwendungen zur Cultural Heritage, wie virtuelle Museen, auf, die auf VRML basierten. [55] Über die Webanwendung hinaus eignet sich VRML als Austauschformat für 3D-Geometrie.

Raytracing, Schattenwurf oder NURBS findet man nicht in VRML, sondern erst im Web3D-Nachfolger **Extensible 3D Format** (X3D), der 2005 von der ISO / IEC veröffentlicht wurde. [56]

■ **54**
ISO / IEC 14772, Virtual Reality Modelling Language (VRML), 1994.

■ **55**
Eike F. Anderson et al., Developing serious games for cultural heritage: A state-of-the-art review, in: Virtual Reality 14, (4)2010, S. 255–275.

■ **56**
ISO / IEC 19775 -77, X3D, 2005.

C.6 Gewinnung der 3D-Daten

In der Computer Vision und der Photogrammetrie bezeichnet **Rekonstruktion** von Objekten die Gewinnung der Koordinaten dieser 3D-Objekte aus Messungen und aus Bildern. [57] Wenn 3D-Rekonstruktionen auf realen Objekten basieren bzw. deren Darstellung integrieren, stammen ihre Daten oft von 3D-Scannern, die eine schnelle und genaue Datenaufnahme ermöglichen. Am Anfang stand allerdings die punktweise traditionelle Vermessung, auf die hier nicht eingegangen wird (siehe dafür Heiliger [58]). Zunächst wurden Fotografien hinzugezogen und die Methoden der Photogrammetrie benutzt.

→ 1858 bis 1950: Wurzeln der Photogrammetrie. Albrecht Meydenbauer begründet 1858 die photogrammetrische Gebäudevermessung mit dem Ziel der Erfassung unzugänglicher Objekte und detailreicher Dokumentation. Wiedemann et al. konnten die historischen Aufnahmen Meydenbauers für eine 3D-Rekonstruktion nutzen. [59]

■ **57**
Wolfgang Förstner und Bernhard P. Wrobel, Photogrammetric computer vision: Statistics, geometry, orientation, and reconstruction, Geometry and computing 11, Cham 2016.

■ **58**
Ralph Heiliger, Die Vermessung von Architektur: Von Pareto, Parmenides und dem schönsten Weihnachtsbaum, Lohmar 2016.

■ **59**
Albert Wiedemann, Matthias Hemmleb, Jörg Albertz, Reconstruction of historical buildings based on images from the Meydenbauer archives, in: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXXIII, 2000, Introduction i-ii

Ab 1900 begann mit dem Bau des Stereokomparators unter Carl Pulfrichs Leitung die Einführung des stereoskopischen Messprinzips, das die photogrammetrische Auswertung revolutionierte. 1908 erfand Eduard von Orel in Wien den Stereoautografen, der die stereoskopische Messung unmittelbar mit der Kartierung verband. Daraus entstanden mehrere Generationen von stereophotogrammetrischen Auswertegeräten, die nach unserem heutigen Sprachgebrauch Analogcomputer darstellten, und die der Photogrammetrie zum Durchbruch verholfen haben. 60

→ 1963 und folgende: Photogrammetrie in der 3D-Rekonstruktion.

Die Arbeiten Roberts am Anfang der 1960er Jahre sind schon erwähnt worden. Roberts benötigte wie Meydenbauer für photogrammetrische Rekonstruktionen die exakte manuelle Einmessung von Kontrollpunkten.

Am Anfang der 1980 Jahre fanden Digitalrechner Eingang in die photogrammetrische Praxis, die im Wesentlichen durch die Auswertung von Luftbildern geprägt war. 61 In dieser Zeit wurde Photogrammetrie aber schon regelmäßig für Dokumentationen von Gebäuden und für Formkontrollen eingesetzt. Die Bilder wurden jedoch in der Regel manuell (in Komparatoren) punktweise ausgemessen. Seit dem Ende der 1990er Jahre gab es Digitalkameras, die eine genügend hohe Auflösung für brauchbare digitale photogrammetrische Auswertungen besaßen. 62 Teure analytische Auswertegeräte wurden durch PCs ersetzt.

Im Zuge der Bemühungen, die Fähigkeiten von Menschen und Tieren zum räumlichen Sehen zu verstehen und analytisch nachzubilden, wurde der Begriff optischer Fluss **(optical flow)** geprägt. Aus Bildpaaren, die eine Kamera von bewegten Objekten in kurzen Zeitabständen aufnahm bzw. — im Fall von Stereo-Aufnahmen — die zwei nahe benachbarte Kameras von einer Szene aufzeichneten, sollte die aufgenommene Geometrie berechnet werden. Diese Konzepte wurden in den Kognitionswissenschaften schon in den 1960er Jahren entwickelt. Der Physiker und Kognitionspsychologe Longuet-Higgins erarbeitete in der ersten Hälfte der 1980er Jahre die Mathematik dazu. 63 In der Computer Vision und der Steuerung von autonomen Fahrzeugen wurden diese Entwicklungen parallel mit der Namen **structure from motion** verbunden. 64 Lange Zeit wurde das Problem unter einschränkenden Bedingungen gelöst, wie z. B. dass eindeutig identifizierbare Markierungen in allen Bildern existieren oder die Bilder in einer festen zeitlichen Reihenfolge aufgenommen wurden. Mit Zunahme der verfügbaren Rechnerleistungen entstanden Programme, die diese Einschränkungen nicht mehr haben.

Wiedemann konnte Ende der 1990er Jahre mithilfe der modernen Methoden des Bündelausgleichs (**bundle adjustment)** auch Bilder mit unbekannten Aufnahmeparametern und unkalibrierten Kameras als Informationsquellen nutzen. 65 Auf diese Weise konnte er ein weitgehend vollständiges 3D-Modell des zerstörten Berliner Stadtschlosses unter Zuhilfenahme der oben erwähnten Aufnahmen Meydenbauers rekonstruieren. Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang die Technik der **Pseudo-Stereo-Restitution**, bei der repetitive Strukturen oder der Schattenwurf auf ebenen Objektteilen aus nur einem Bild für die Gewinnung von 3D-Daten genutzt werden.

■ **60**
Jörg Albertz, Information aus Bildern — 100 Jahre Entwicklung in Photogrammetrie und Fernerkundung, in: VGI — Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation 85 (4) 1997, S. 251–259.

■ **61**
H. Belzner, Photogrammetrie und Fernerkundung in der Bundesrepublik Deutschland 1976–1980, in: 14. Kongress der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie, Hamburg 1980, S. 274–305.

■ **62**
Ralf Reulke und Thomas Döring, Computer Vision im Kontext von Photographie und Photogrammetrie, in: Wolfgang Reisig und Johann-Christoph Freytag (Hg.), Informatik: Aktuelle Themen im historischen Kontext, Berlin, Heidelberg 2006, S. 315–28.

■ **63**
H. C. Longuet-Higgins, A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections, in: Nature 293 (5828) 1981, S. 133–135.

■ **64**
Shimon Ullman, The interpretation of structure from motion, in: Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences 203 (1153) 1979, S. 405–426.

■ **65**
Wiedemann et al. 2000.

→ 1980 und folgende: Scanner. Über die Entwicklung von sogenannten Laserscannern und verwandten Geräten (**time of flight scanner,** LiDAR) in der Zeit von ca. 1980 bis 2000 gibt Blais einen Überblick. 66 Die der optischen Entfernungsmessung zugrunde liegende Mathematik ist, wie in der Photogrammetrie, seit Langem bekannt. Laserscanner entstanden und entwickelten sich seitdem mit dem Aufkommen und der Verfügbarkeit von neuen Technologien und Geräten weiter. In den 1980er Jahren begann die Entwicklung von automatischen optischen Scannern in Forschungs- und Entwicklungslaboren. Seit 1990 machte die Entwicklung der kontaktlosen optischen Abtastung von Oberflächen große Fortschritte. Parallel mussten für die Bewältigung der Datenmengen leistungsfähige Algorithmen entwickelt werden. Mit der Einführung von CCD-Arrays konnten Genauigkeiten von 0,1% und bald 0,01% erreicht werden. Während Scanner mit einem Punktlaser einige technische Vorteile boten, stellten Linienlaser einen Kompromiss dar, da sie die Erfassung einer Profillinie in einem einzelnen Videoframe gestatteten und preisgünstiger waren. Im Gegenzug erforderten sie Bildverarbeitungsmethoden, um die 3D-Information aus den Bildern zu gewinnen. Strukturiertes Licht, das ist die Projektion von Streifen oder Mustern, kam auch seit der Mitte der 1980er Jahre in Gebrauch. Hier stieg der Bildverarbeitungsaufwand noch mehr, und für ausgedehnte Objekte war die Technik leicht überfordert.

Auf der Reflektion von ausgesandtem sichtbaren Licht basierende Methoden haben mehr oder weniger große Probleme mit stark reflektierenden oder absorbierenden Oberflächen. Alternativ und besonders für größere Strukturen geeignet sind **time of flight**-Scanner (LiDAR), die nach dem Radarprinzip arbeiten. Sie waren jedoch im betrachteten Zeitraum noch zu komplex für einen praktischen Einsatz.

Um die Jahrtausendwende stand eine Vielzahl von industriell gefertigten Scannermodellen zur Verfügung, die für die unterschiedlichen Anwendungsbereiche ausgewählt werden konnten. Die Kombination von Scandaten und RGB-Bildern der Objekte befand sich noch in den Anfängen. Mit Anfang dieses Jahrtausends wurden 3D-Scanner erschwinglich, und ihre Verwendung wurde zunehmend alltägliche Praxis.

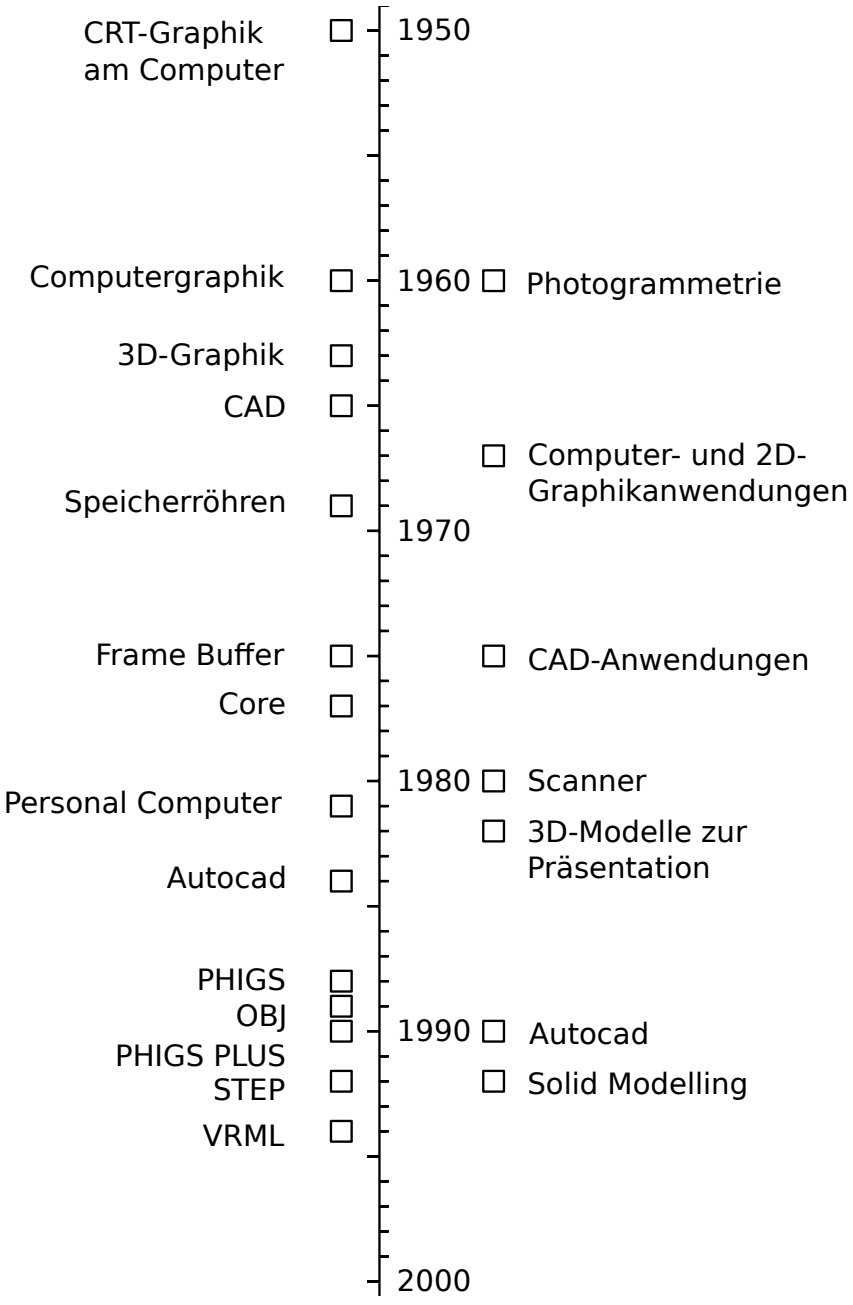
■ **66**
Francois Blais, Review of 20 years of range sensor development, in: Sabry F. El-Hakim, Armin Gruen und James S. Walton (Hg.), Electronic Imaging, SPIE 2003, S. 62.

C.7 Abschließende Bemerkungen

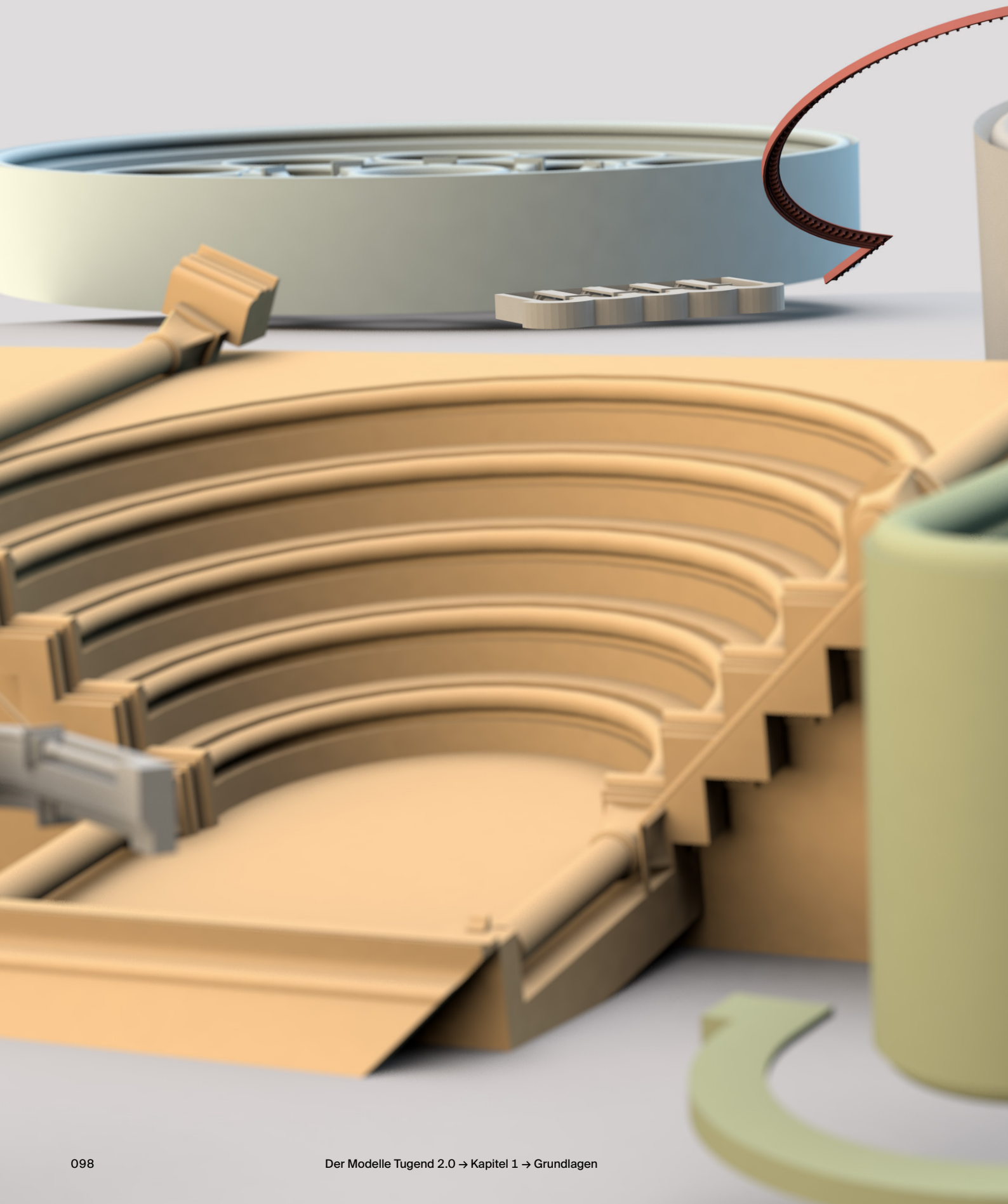
Der Einzug der Computergrafik in die 3D-Rekonstruktion von Architektur und archäologischen Objekten wurde anfangs von Experimenten und der vielleicht zufälligen Kooperation von Enthusiasten getragen. Mit dem Heranreifen der Technologie bereiteten frühzeitige Anwender den Weg für die zunehmend systematischen Anwendungen ab den 1980er Jahren. Mit der Jahrtausendwende stand eine Fülle von etablierten Techniken und Produkten und in ihrer Anwendung geschulten Experten zur Verfügung, die eine Vielzahl von Objekten rekonstruiert haben.

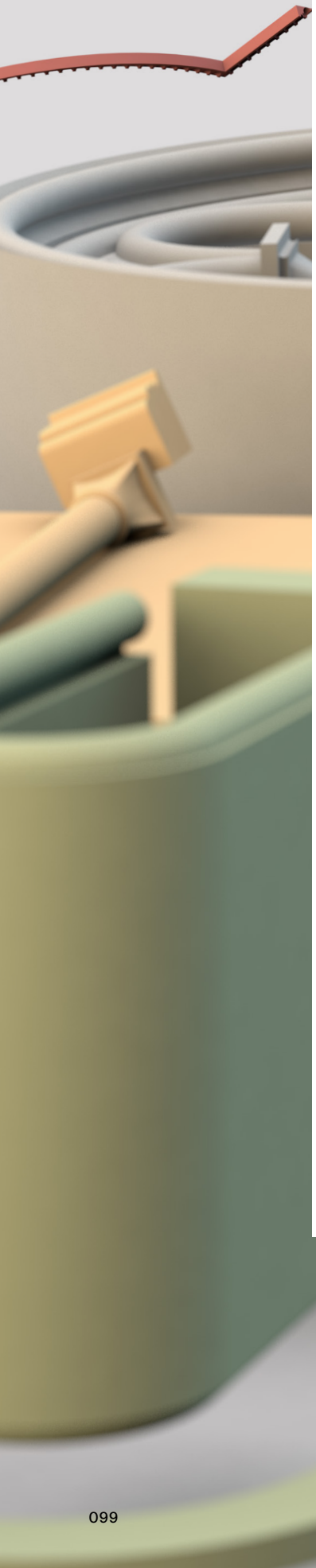
Die digitale Rekonstruktion von Bauwerken bediente sich des jeweiligen Entwicklungsstands der Computergrafik. Sie trat kaum als Treiber der Technologie-Entwicklung hervor; wenn über Computergrafik-Anwendungsfelder berichtet wird, dominieren normalerweise Ingenieurs- und Unterhaltungsanwendungen (Spiele, Animationen). Die digitale Architekturrekonstruktion ist dadurch auf die Nutzung vorhandener Applikationen angewiesen, die für andere, wenn auch ähnliche Zwecke entwickelt wurden. Dabei stellt sie durchaus hohe, spezifische Anforderungen, z. B. durch die Ausdehnung der Objekte und den gleichzeitigen Detaillierungsgrad, den Bedarf, eine Entwicklung über die Zeit aufzuzeigen, und die Notwendigkeit der Verknüpfung mit vielfältigen anderen Datenquellen und semantischen Informationen.

Die Technologieentwicklung und ihre Integration in die archäologische und die architekturgeschichtliche Forschung schreitet bis heute ungebrochen voran. Immer leistungsfähigere, erschwinglichere Hardware macht immer komplexere Anwendungsprogramme möglich, die einen Gewinn an Qualität, Komfort und Geschwindigkeit der Modellerstellung mit sich bringen. Dies ist jedoch verbunden mit einem gleichzeitig steigenden Ausbildungsbedarf. Erschwerend tritt ein nach wie vor bestehender Mangel an Standardisierung der Begriffe, Technologien und Formate hinzu. Die beobachtete Abhängigkeit der Weiterentwicklung der digitalen Rekonstruktion von der Entwicklung der Computertechnologie 01 relativiert sich nach der Jahrtausendwende durch die eingesetzte Integration von Informatik-Inhalten in die Curricula.



☐ 01
Einige Entwicklungsschritte der Computergrafik (links) und ihrer Anwendung in der 3D-Rekonstruktion (Horst Stenzel)





Gerd-Helge Vogel

D. Die Sichtbarmachung des Unsichtbaren: Ästhetische Konventionen in Rekonstruktionsmodellen

→ 3D-Rekonstruktion, archäologische Rekonstruktionsmethoden, Bildtraditon, Computeranimation, Darstellungskonventionen, Illusionismus, Raumillusion, View-Master-Dioramen, Virtual Reality

Die Geschichte der archäologischen Rekonstruktionen wird v. a. von zwei Faktoren bestimmt, die für die Gestaltung des hypothetischen Wiederaufbaus einer Grabungsstätte entscheidend sind: vom wissenschaftlichen Kenntnisstand in der Interpretation der Grabungsbefunde und von der jeweiligen Praxis der ästhetischen Darstellungskonventionen jener Epoche, in der die archäologische Rekonstruktion entstand. Der Essay beschäftigt sich v. a. mit letzterem Problem und geht den Fragen der Entwicklung ästhetischer Darstellungskonventionen in der Kunst- und Architekturgeschichte auf den Grund, bei denen es um größtmögliche Annäherung an die historische Wirklichkeit einstiger Bauten ging. Anhand verschiedener Beispiele aus unterschiedlichen Epochen der Kunstgeschichte wird aufgezeigt, wie die Bemühungen um immer wahrheitsgetreuere Beherrschung der Illusion von Räumlichkeit, Atmosphäre, Materialwirkung und des Eindrucks der Bewegung in filmhaften Sequenzen sukzessive voranschritten. Die Kenntnis dieser Darstellungskonventionen führten im Bereich der archäologischen Rekonstruktion zu immer überzeugenderen Versuchen, das Unsichtbare der verlorengegangenen originalen Bausubstanz sichtbar zu machen. Für die heutigen computergenerierten Rekonstruktionsmodelle in der Archäologie und Architekturgeschichte kann die bewusste Übertragung dieses historischen Wissens um die Darstellung illusionistischer Wirklichkeitserfahrungen genutzt werden, um auf der Basis bestehender Sehgewohnheiten aus der analogen Welt zu authentischeren archäologischen Wissensbildern in der computergenerierten virtuellen Realität gelangen zu können.

D.1 Einleitung

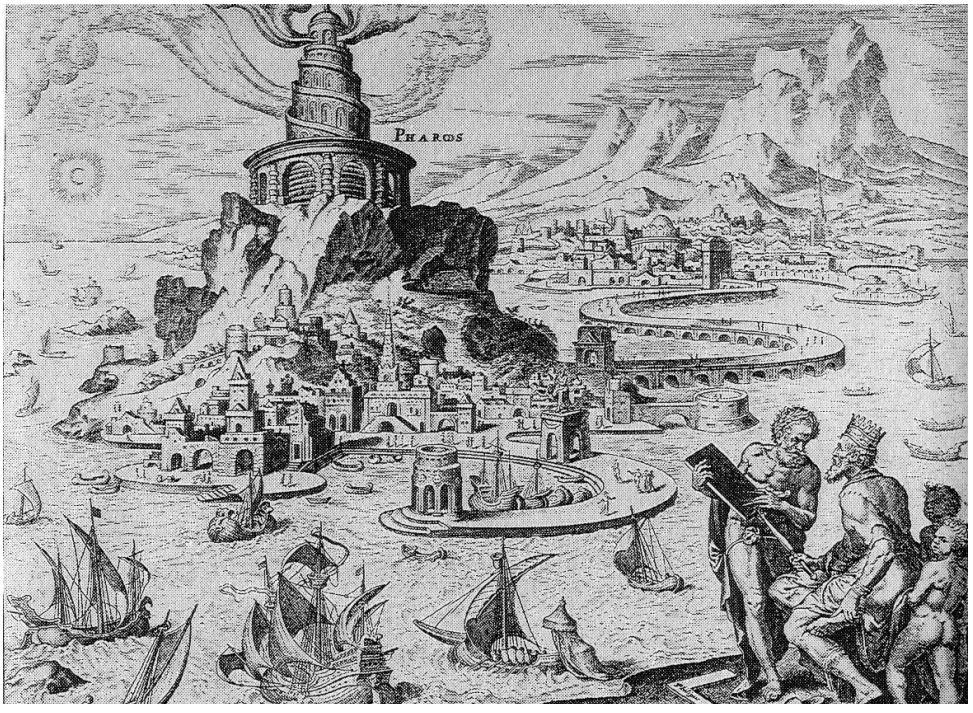
Die meisten Gebäude der Antike sind nur in Resten auf spätere Zeiten gekommen, und schon früh — maßgeblich seit der Renaissance — setzten Bestrebungen ein, ihre verlorene Gestalt bildlich zu rekonstruieren. Die Rekonstruktionen des stereometrischen Aufbaus der verlorenen Baukörper archäologischer Befunde werden im Wesentlichen von zwei Faktoren bestimmt: vom wissenschaftlichen Kenntnisstand archäologischer und architekturhistorischer Rekonstruktionsmethoden der jeweiligen Epoche, in der die Rekonstruktion entstand, und von den ästhetischen bzw. bildlichen Konventionen, die in der betreffenden Zeit Praxis waren. Das erklärt u. a. die teilweise sehr unterschiedlichen Gestaltformen von rekonstruierten Gebäuden, die für dieselben Grabungsstätten erstellt wurden, wie z. B. vom Pharos in Alexandria 01 01 02 03 04, vom Palast des Tiberius auf Capri 02 05 06 07 08 oder von den Toranlagen des Limes 03 09 10. Ihren Darstellungsweisen dokumentieren entweder die unterschiedlichen Kenntnisstände über die Bauausführung der betreffenden Bauten oder zeigen variantenreich unterschiedliche Rekonstruktionsmöglichkeiten auf.

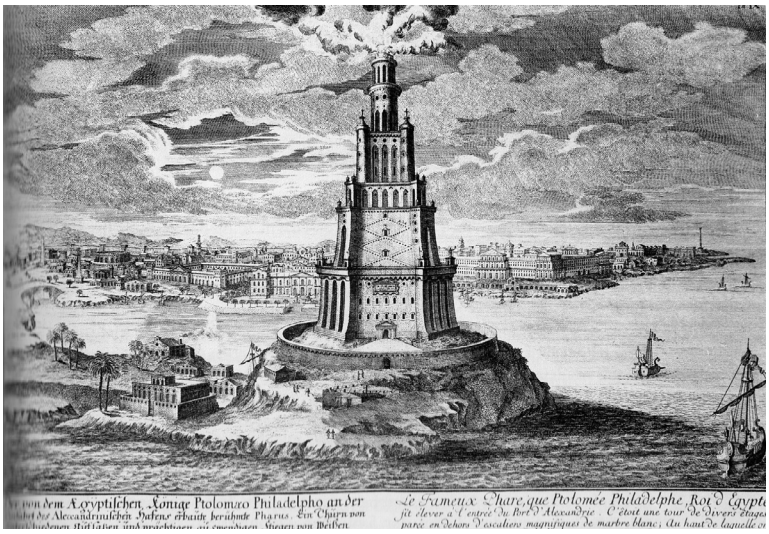
■ 01
Vgl. Johann Bernhard Fischer von Erlach, Entwurf einer historischen Architektur. Mit einem Nachwort von Harald Keller, Dortmund 1978, Tab. IX. Hermann Thiersch, Pharos: Antike, Islam und Occzident. Ein Beitrag zur Architekturgeschichte, Berlin, Leipzig 1909, S. 1–3. Vojtěch Zamarovský, Den Sieben Weltwundern auf der Spur, 2. Aufl., Leipzig 1981, S. 191–212. Werner Ekschmitt, Die Sieben Weltwunder. Ihre Erbauung, Zerstörung und Wiederentdeckung, Mainz 1984, S. 183–197. Peter A. Clayton, Martin J. Price (Hg.), Die Sieben Weltwunder, Stuttgart 1990, S. 182–207. Judith McKenzie, The Architecture of Alexandria and Egypt 300 BC — AD 700, New Haven, London 2010, S. 41–47.

■ 02
Vgl. C. Weichardt, Das Schloss des Tiberius und seine Römerbauten auf Capri, Leipzig o. J. 1900, S. 49–63. Alfonso de Franciscis, Führer mit Rekonstruktionsversuchen. Pompei-Herculaneum und die Villa Iovis in Capri einst und jetzt, Roma 1964, S. 88–89. Clemens Krause, Villa Jovis. Die Residenz des Tiberius auf Capri, Mainz 2003, S. 63–78.

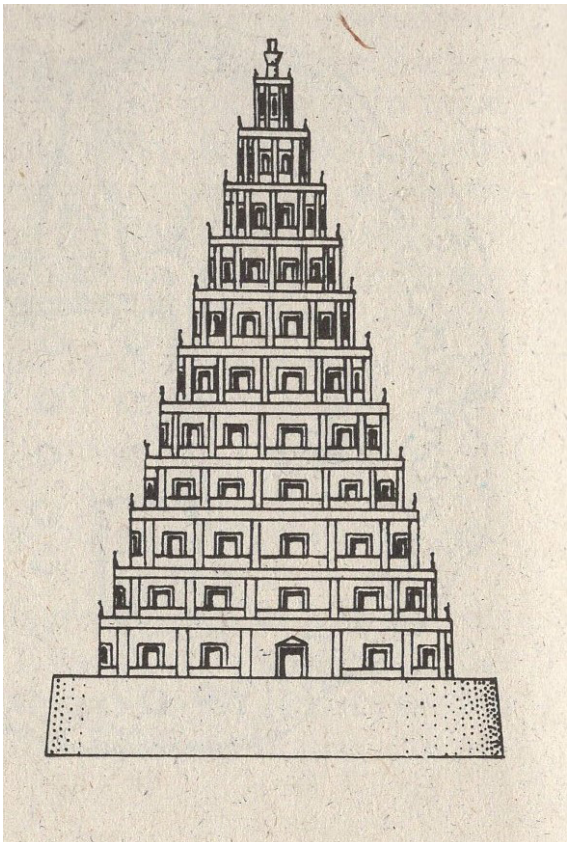
■ 03
Vgl. Jörg Bofinger, Stephan M. Heidenreich (Hg.), Befund — Rekonstruktion — Touristische Nutzung. Keltische Denkmale als Standortfaktoren, Archäologische Informationen aus Baden-Württemberg, Heft 72, Esslingen 2015, S. 17–22.

□ 01
Marten van Heemskerck: Der Pharos von Alexandria wurde fantasiereich nach antiken Schriften rekonstruiert. 16. Jh., Kupferstich. (Clayton und Price)

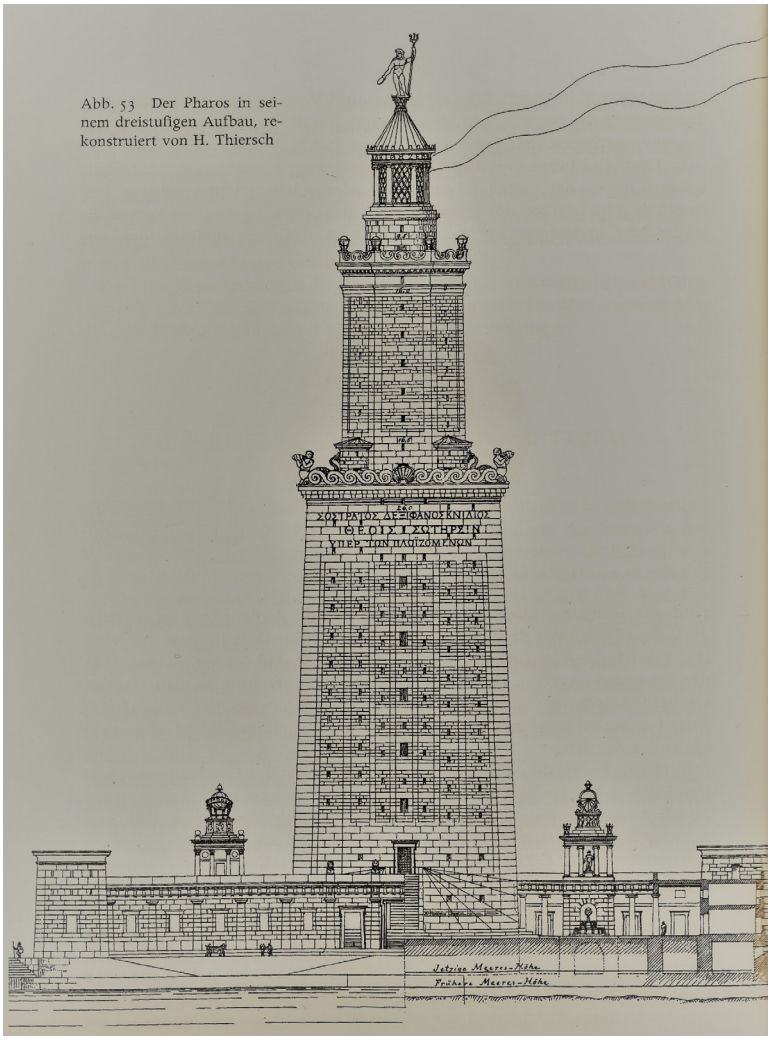




☐ 02
Johann Bernhard Fischer von Erlach: Das Siebte Wunder der Welt, der Leuchtturm auf Pharos des Königs Ptolemæus Philadelphus, 1721. (Fischer von Erlach)



☐ 03
Gerkan: Rekonstruktion des Leuchtturms auf Pharos, 1890. (Zamarowsky)



☐ 04
Rekonstruktion des Leuchtturms auf Pharos, 1909. (Ekschmitt und Thiersch)

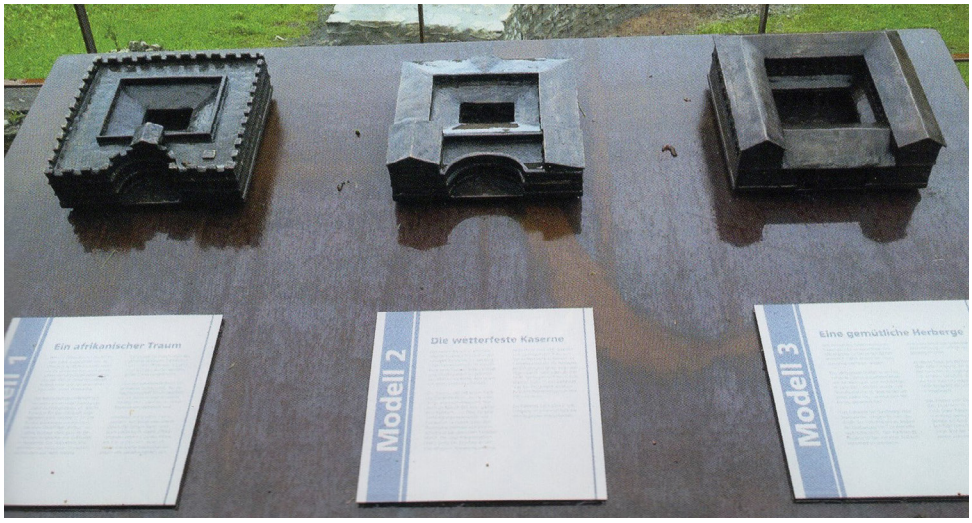
☐ 05
C. Weichhardt: Rekonstruktion der Villa Jovis von Südwesten, 1900. (Weichhardt)

☐ 06
Alfonso des Franciscis: Villa Jovis. Archäologischer Befund. Roma 1964. (Franciscis)

☐ 07
Alfonso des Franciscis: Villa Jovis. Archäologische Rekonstruktion. Roma 1964. (Franciscis)

☐ 08
Villa Jovis. Ansicht der Westfassade. Modell, Maßstab 1:100. (Clemens Krause 2003)

☐ 09
Zusammenstellung aller in Baden-Württemberg rekonstruierten Limestürme (von links nach rechts): Rainau-Buch, Osterburken, (3) Lorch, (4) Großerlach-Grab, (5) Welzheim, Ostkastell, die mit größter Wahrscheinlichkeit so die einstige Realität wiedergeben, aber die Variabilität verschiedener Rekonstruktionshypothesen aufzeigen (Bofinger und Heydenreich)



□ 10
Römisches Kastell von Burgsalach. Bronzemodelle mit der Darstellung, wie ein Grundriss in drei unterschiedlichen Rekonstruktionshypothesen des aufgehenden Mauerwerks interpretiert werden kann. (Bofinger und Heydenreich)

Ungeachtet dieser vom unterschiedlichen Wissenstand sich herleitenden Variabilität letztlich fiktional bleibender Rekonstruktionsversuche beruhen die Darstellungen rekonstruierter Bauwerke vor allem auf zeitbedingten historischen Sehgewohnheiten bzw. Darstellungskonventionen. Fakt ist, archäologische Rekonstruktionen bilden — abgesehen vom aktuell beschränkten Wissenstand der Forschung — immer auch die Zeit bzw. den Geschmack ihrer Entstehungszeit ab. Die Herausbildung und Weiterentwicklung dieser Sehgewohnheiten bzw. ästhetischen Konventionen von archäologischen 3D-Modellen ist demzufolge eng mit der Entwicklung der realistischen Architekturdarstellung verbunden, wie sie im kunsthistorischen Kontext seit der Entdeckung zentralperspektivischer Raumsuggestionen durch Filippo Brunelleschi (1377–1446) und Leon Battista Alberti (1404–1472) in der Renaissance stattgefunden hat. Sie bilden noch heute die Basis moderner Computeranimationen bzw. CAD-Modelldarstellungen, wie sie in den letzten beiden Jahrzehnten zum Standard für die virtuelle Wiederherstellungspraxis verloren gegangener Bauten aus historischer Zeit geworden sind. 04 Anhand markanter, richtungsweisender Beispiele soll in einem knappen Überblick der Prozess der allmählichen Ausformung dieser Darstellungsmuster/-konventionen aufgezeigt und deren Potenzial bewusst gemacht werden, sodass sie als aktives Werkzeug in der gegenwärtigen wie zukünftigen archäologischen Rekonstruktionspraxis zur Optimierung der computergenerierten archäologischen Modelle als virtuellen Abbildern **historisch-archäologischer Wahrheit** sinnvoll zum Einsatz gelangen können.

■ **04**
Vgl. Heike Messemer, The Beginnings of Digital Visualization of Historical Architecture in the Academic Field, in: Stephan Hoppe, Stefan Breitling (Hg.): Virtual Palaces II. Lost Palaces and their Afterlife. Virtual Reconstruction between Science and Media, München 2016, S. 21–54.

D.2 Illusion des Raumes

Virtuelle Rekonstruktionen archäologischer 3D-Visualisierungen, wie sie z. B. im Bereich Knowledge Visualization der Zürcher Hochschule der Künste (ZHdK) oder der Freiburger Firma L!NK3D seit den letzten fünf Jahren entstehen 05, setzen sich zum Ziel, in ihren Computeranimatinnen archäologischer Rekonstruktionen historischer Lebensbilder den stereoskopischen 3D-Rekonstruktionen einen **raumgreifenden Illusionismus** zu verleihen. In der Technik der Virtual Reality (VR) soll den Betrachtern durch die 360°-Sicht im horizontalen wie vertikalen Umfeld ein Erlebnisraum verschafft werden, der

■ 05
Vgl. Beitrag Heeb, Christen in dieser Ausgabe; L!NK3D, Virtuelle Rekonstruktion für die Archäologie, http://link3d.de/virtuelle-rekonstruktion/.

> »auf kraftvolle und emotionale Weise vergangene Zeiten lebendig und fast schon greifbar werden lässt«, wobei die »interaktive[n] Bewegungen in virtuellen Räumen in Echtzeit (Level-Technologie) [so realisiert werden, dass ihre] Herkunft [...] aus dem Computer [u. a. durch Berechnungen des korrekten Schattenwurfs in der Bewegung] nicht mehr sofort erkennbar sein [sollten]«. 06

■ 06
L!NK3D 2019.

Zur Erreichung dieser scheinbar **lebendigen** virtuellen Realitäten in historischen Welten, die einer Zeitreise zu gleichen scheinen, ist auch im modernen bildgebenden Verfahren der Rückgriff auf Sehgewohnheiten und Darstellungskonventionen von Stand- und Bewegtbildern notwendig, die sich in Jahrhunderten der visuellen Kultur des Abendlandes herausgebildet haben. Sie bestimmen unsere rationale Wahrnehmungsweise spätestens seit der Wiederentdeckung der stereometrischen Darstellungsformen im zweidimensionalen Bild, wie sie von Brunelleschi und Alberti in der Frührenaissance durch die Kenntnis des Fluchtpunktes in der **Zentralperspektive** in Anlehnung an antike Erfahrungen entwickelt wurden.

Durch die Legende vom Wettstreit zwischen den Malern Parrhasius (2. Hälfte 5. Jh. v. Chr. bis Anfang 4. Jh. v. Chr.) und Zeuxis (ca. 430 v. Chr. bis 390 v. Chr.), berichtet in der **Naturgeschichte** Plinius' des Älteren, wissen wir, dass bereits die Antike die Kunst des augentäuschenden Illusionismus oder **Trompe-l'œils** perfekt beherrschte. 07 Heute vermitteln uns allerdings lediglich Reste der Architekturmalerei des 2. Stils in Pompeij einen Abglanz davon 11.

■ **07**
Vgl. Gaius Plinius Secundus: Die Naturgeschichte des Caius Plinius Secundus, (Hg.) Lenelotte Möller, Manuel Vogel, übersetzt und mit Anmerkungen versehen von G. C. Wittstein, Leipzig 1881, Wiesbaden 2007, Bd. 2, S. 487 (Plinius 35, 65).

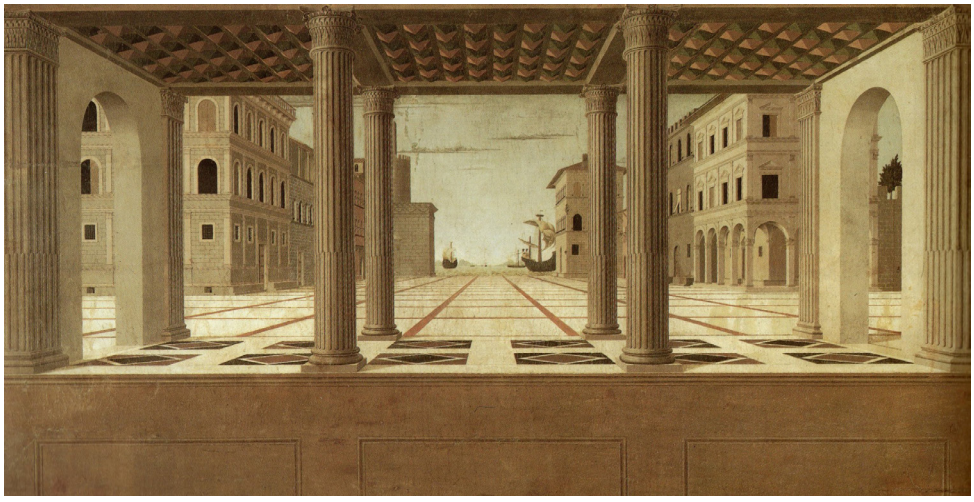
☐ 11
Illusionistische Architekturmalerei, Boscoreale, Villa des P. Fannius Sinistor, Cubiculum, ca. 90–50 v. Chr., New York, Metropolitan Museum of Art (McKenie)

Nachdem diese Kenntnisse in den Untergangswirren des Römischen Reiches und der Völkerwanderung verloren gegangen waren, bemühte sich in der Protorenaissance der namenlos gebliebene Isaak-Meister mit der Entwicklung des sog. **Kastenraums** in den Wandmalereien der Oberkirche von St. Francesco in Assisi 12 darum, die mittelalterliche Bedeutungsperspektive zu überwinden und sie durch eine stereometrische Darstellungsweise zu ersetzen, die freilich noch nicht um deren geometrische Gesetze wusste. 08

■ **08**
Frank Büttner, Giotto und die Ursprünge der neuzeitlichen Bildauffassung. Die Malerei und die Wissenschaft vom Sehen in Italien um 1300, Darmstadt 2013.

☐ 12
Isaak-Meister: Isaak weist Esau zurück. um 1290, Assisi, Basilika von San Francesco

Über Giotto (1266–1337) und dessen Nachfolger, die die Tendenz zur Beherrschung der Wiedergabe eines rational erlebbaren Raumes im flächigen Bild fortsetzten, gelang es erst im zweiten Viertel des 15. Jh. dem mit Brunelleschis Perspektivkenntnissen vertrauten Masaccio (1401–1428), illusionistische Raumwirkungen zu erzeugen, wobei sich mit Francesco di Giorgio Martini (1439–1501) und anderen Spezialisten der Architekturperspektive 13 Meister etablierten, die den Illusionismus der Wirkung eines dreidimensionalen Raumes effektvoll auf die Spitze zu treiben versuchten. Bald wurden die Erfahrungen der **wissenschaftlichen Linearperspektive** zur



☐ 13
Anonymer Meister: Architekturperspektive, um 1480, Tempera auf Holz, 132 x 235 cm, Berlin, SMPK, Gemäldegalerie, Inv.-Nr. 1615 (Evers)

Vervollkommnung des illusionistischen Effektes vom zentralen Augenpunkt auf Fluchtpunkte mit anderen Koordinaten ausgeweitet und damit neue perspektivische Darstellungsweisen zur Erweiterung augentäuschender Wirkungen ausprobiert, die mit der Verschiebung der Fluchtlinien im wahrsten Sinne des Wortes der bildmäßigen Wiedergabe von räumlichen Situationen auf einer Ebene neue Perspektiven eröffneten und mit den so konstruierten Abbildern den Betrachtern ein besseres Erkennen tatsächlicher Zusammenhänge ermöglichen. 09 Mit der Änderung des Augenpunktes, der Horizontlinie, des Distanzpunktes usw. ergaben sich in der »perspektiv[ischen] Bildordnung [...] von Wertung und Ordnung (auch Beherrschung) von Realität« 10 neue An- und Einsichten, auf denen z. B. auch die Konstruktionsprinzipien von **Kavalier-, Vogel-** 11 oder **Froschperspektive** beruhen. Perspektivische Experimente zur Erzielung eines illusionistischen Raumgefühls gehörten in Renaissance und Barock zu den Programmpunkten der malerischen Beherrschung der Wirklichkeit.

■ 09
Vgl. Perspektive, in: Harald Olbrich (Hg.), Lexikon der Kunst. Bd. 5, Leipzig 1993, S. 520–524; — Perspektive, in: Wolf Stadler (Hg.), Lexikon der Kunst. Malerei, Architektur, Bildhauerei. Bd. 9, Erlangen 1994, S. 123–126.

■ 10
Ebd. S. 521.

■ 11
Vgl. Y. Doosry, Von oben gesehen. Die Vogelperspektive, Nürnberg 2014.

So hatte Pieter Sanredam (1597–1665), der erste Maler Hollands, der sich auf die Darstellung existierender Gebäude in Innen- und Außenansichten spezialisiert hatte, zur Erreichung eines hyperrealistischen Raumgefühls die Ansichten der von ihm dargestellten baulichen Befunde v. a. durch die Wahl unerwarteter, spektakulärer Blickwinkel so manipuliert, dass nicht zuletzt durch die ausschnitthafte Motivwahl ein zufälliger, momenthafter Eindruck entstand 14,

□ 14
Pieter Sanredam: Das Südschiff der St. Laurentskerk in Alkmaar mit Begräbnisprozession, 1637, Öl/Holz, 76,2 x 40,6 cm, Penshurst, Major Philip Sidney (Schwartz und Bok)

der die Suggestion dreidimensionaler Wirkung steigern half. Dies gelang ihm, weil seinen konstruierten Perspektivprojektionen eigene präzise Vermessungen der Gebäude zugrunde lagen. 12 Auch die Meister der Delfter Schule, ihnen voran Carel Fabritius (1622–1654), waren um illusionistische Raum- und Lichtwirkungen in ihren Architekturdarstellungen bemüht — besonders wenn sie für die Präsentation im neuen Medium des Guck- oder Perspektivkastens bestimmt waren. Zur Intensivierung der Wirkung bezogen sie dabei neben der architektonischen Gruppe eines städtischen Straßenzuges auch Personen und stilllebenhafte Momente mit einen 15. 13 Damit suchten sie Raumerlebnisse zu antizipieren, die erst die heutige Technik der Virtual Reality in ihren multiplen Funktionen möglich

■ **12**
Vgl. Gary Schwartz, Marten Jan Bok, Pieter Sanredam. The Painter and His Time, The Hague 1990, S. 79–82.

■ **13**
Vgl. Walter A. Liedtke (Hg.), Vermeer and the Delft School. New York, London 2001, S. 250–254. Ariane van Suchtelen, Gero Seelig (Hg.), Carel Fabritius 1622–1654. Das Werk, Zwolle 2004, S. 129–135.

macht. Allerdings gelang es ihnen, durch einfühlsame Wiedergabe atmosphärischer Stimmungen die auffallend sterile Glätte virtuell erzeugter Rekonstruktionen zu vermeiden.

□ 15
Carel Fabritius: Straße in Delft mit Nieuwe Kerk und dem Bildnis eines Musikalienhändlers, 1652, Öl/Lw., 15,4 x 31,6 cm, London, National Gallery (Liedtke)

Neben den angeführten Beispielen für sich abzeichnende Konventionen zur Darstellung illusionistischer Raumeffekte in der Malerei soll noch die grafische Kupferstichserie der **Carceri** von Giovanni Battista Piranesi (1720–1778) 14 aufgeführt werden. Seine verwirrenden Raumdurchsichten von bedrohlicher Monumentalität und fast surrealer Magie stellen einen entwicklungsgeschichtlichen Höhepunkt für die Herausbildung von Sehgewohnheiten suggestiver Raumerlebnisse dar und sie bestimmten im zweidimensionalen Bereich die abendländischen Bildtraditionen mit.

Für CAD-generierte archäologische Rekonstruktionen kommen aber noch jene ästhetischen Komponenten hinzu, die sich unmittelbar von den analogen 3D-Modellen der Architekturgeschichte und Archäologie, den szenografischen Panoramen in ihrer Zwischenstellung zwischen realen Requisiten und illusionistischer Monumentalmalerei 15, aber auch von der Filmkunst und der 3D-Fotografie, herleiten.

■ **14**
Vgl. G. B. Piranesi: Invenzioni Capric. di Caceri all' acquaforte datte in luce da Giovani Buzard in Roma Mercante al Corso, 1749/50, in: Ficacci 2006, S. 56–81. Piranesis »Veduti di Roma« und »Antichità Romane« übten wiederum großen Einfluss auf die Präzision der dreidimensionalen Korkmodelle von Antonio Chichi aus. Vgl. Anita Büttner, Korkmodelle, in: Staatliche Museen Kassel o. J. (1975), S. 12–22, hier: S. 18.

■ **15**
Vgl. Bernard 2000. In jüngster Zeit erlangten die von Yadegar Asisi (*1955) erstellten 360°-Panoramen wie jenes in Leipzig und Dresden gezeigte Rom 312 oder das in Berlin präsentierte von Pergamon spektakuläre Aufmerksamkeit.

Um den Auftraggebern von repräsentativen Bauten noch vor deren Errichtung eine Vorstellung vom zu erwartenden Raumeindruck vermitteln oder diverse architektonische Lösungen für Baudetails anschaulich erörtern zu können, war es spätestens seit der Renaissance üblich geworden, auseinandernehmbare, maßstabgerechte Architekturmodelle vorab fertigen zu lassen 16 **16**, die in ihrer räumlichen Ausdehnung ein suggestives Raumerlebnis schufen, das weit über das Vorstellungsvermögen der Entscheidungsfinder bei der Betrachtung des üblichen Grund- und Aufrisses

■ 16
Vgl. Bernd Evers (Hg.), Architekturmodelle der Renaissance. Die Harmonie des Bauens von Alberti bis Michelangelo, München, New York 1995, S. 220–229. Sabine Frommel (Hg.), Les maquettes d'architecture. fonction et évolution d'un instrument de conception et de réalisation, Paris 2015.

□ 16
Christoforo Rocchi, Giovan Pietro Fugazza: Holzmodell des Doms von Pavia, 1488, 505 x 364 x 364 cm, Pavia, Musei Civici del Castello Visconteo (Evers)

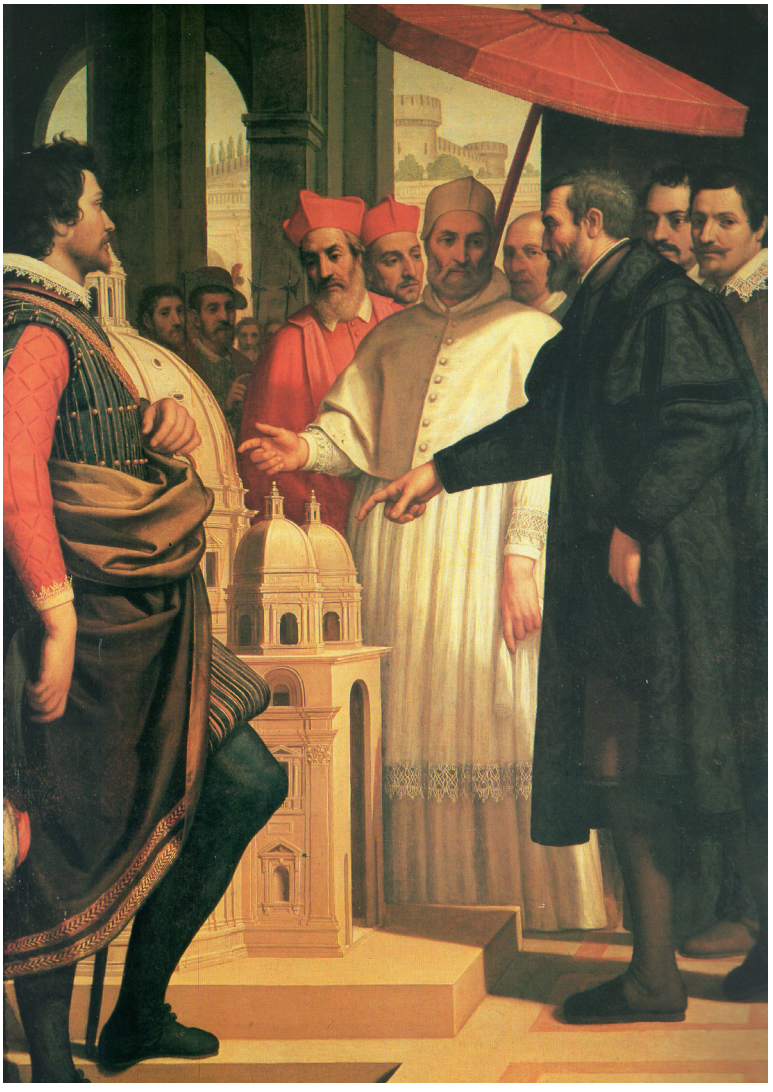
bzw. der die Umgebung einbeziehenden Architekturbilder hinausgriff [17]. [17] Selbst die Material- und Farbwirkung des betreffenden Gebäudes konnte noch vor der Bauausführung lebensnah überprüft werden, wie es zahlreiche Beispiele aus der Renaissance [18] und dem Barock [19] beweisen.

■ 17
Ebd., bes. S. 391–392.

■ 18
Zum Beispiel die Modelle von Fassadenteilen für den Palazzo Strozzi in Florenz, um 1490, die Materialvariationen von Rustica-Mauerung oder Glattputz aufzeigen. Vgl. Evers, 1995, S. 260–261.

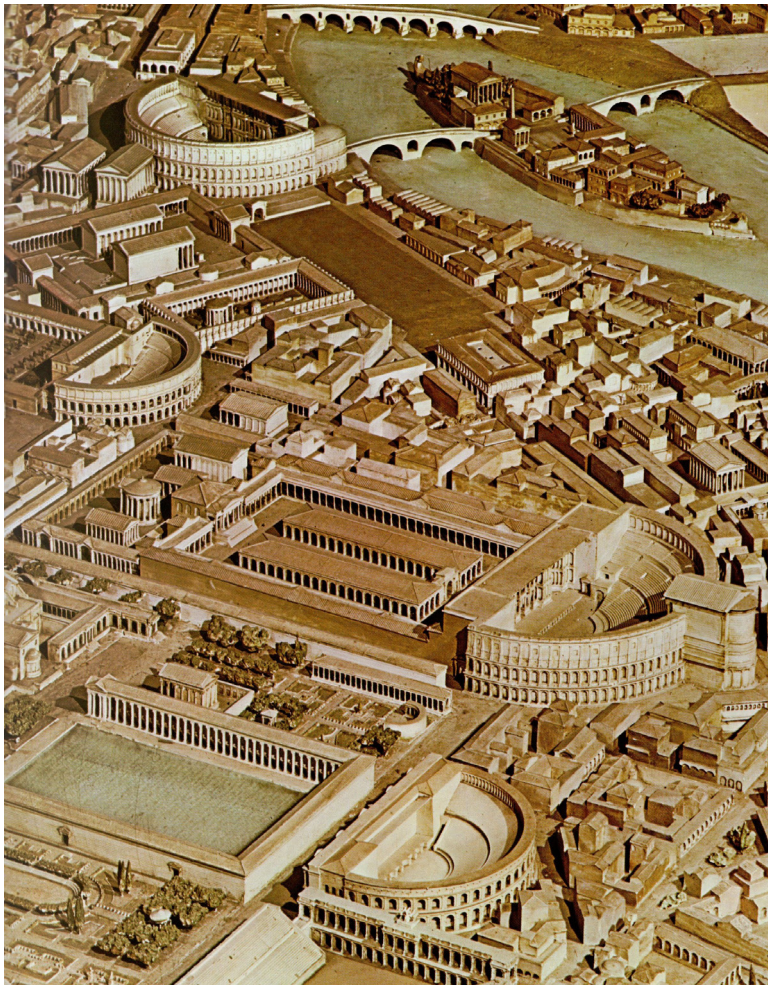
■ 19
Beispielsweise das Modell von F. B. Rastrelli vom Smolny-Kloster in St. Petersburg oder das Modell von A. Rosz vom Chinesischen Turm in Caserta, Caserta, Palazzo Reale, Museo Vanviteliano. Vgl. H. A. Millon (Hg.), The Triumph of the Baroque. Architecture in Europe 1600–1750, Milan 1999, S. 160, 166–171, 582 (Kat. 575), S. 391, 492–493 (Kat. 226).

□ 17
Domenico Cresti da Passignano: Michelangelo präsentiert Papst Paul IV. das Modell für die Vollendung der Kirche und der Kuppel von St. Peter, 1619, Öl/Lw., 236 x 141 cm, Florenz, Casa Buonaroti (Evers)



Ungeachtet ihrer haptischen Wirkung als analoge 3D-Modelle blieb ihr ästhetischer Einfluss auf die Gestaltungskonventionen virtueller architektonischer 3D-Modelle genauso marginal wie die zahlreich im 18. und 19. Jh. entstandenen archäologischen Korkmodelle 20, es sei denn, es sollte bewusst der Modellcharakter des betreffenden Bauwerks und nicht dessen scheinbare Rekonstruktion als virtueller Raum hervorgehoben werden. Weit stilprägender wurde hingegen die stereometrische Rekonstruktion des Zentrums des konstantinischen Roms (3./4. Jh. n. Chr.) 18 aus dem Jahr 1937 durch den Architekten Italo Gismondi (1887–1974).

■ **20**
Staatliche Museen Kassel (Hg.), Antike Bauten. Korkmodelle von Antonio Chichi 1777–1782, Kassel o. J. (Katalog der Staatlichen Museen Kassel Nr. 26), 1999?



□ 18
Italo Gismondi: Ausschnitt aus der Rekonstruktion des antiken Stadtmodells Roms zur Zeit von Kaiser Konstantin im 4. Jh. a. D. mit dem Campus Martius (Marsfeld), den Theatern des Marcellus und des Balbus usw., Maßstab 1:250 (Dal Maso)

Dessen detailreiche Anschaulichkeit und räumliche Plastizität fand als stilprägendes Requisit nicht nur Eingang in den Monumentalfilm **Quo Vadis** (USA 1951) 21, sondern wurde generell zum Ausgangspunkt idealisierender Rekonstruktionen sowohl des Forum Romanum 22 als auch anderer antiker Gebäudeensembles, wie sie in aufwendigen Filmkulissen der meisten Antikenfilme aus vordigitaler Zeit Verwendung fanden. 23 So schufen z. B. John Moore und Veniero Colosanti in Spanien sogar ein Idealmodell des Forum Romanum im Maßstab 1:1, das dann in dem aufwendigen Monumentalfilm **The Fall of the Roman Empire**, (USA 1964; 19) von Anthony Mann als Kulisse einen scheinbar authentischen Eindruck des antiken Rom — auf jeden Fall

■ **21**
Vgl. Lochman, Späth, Stähli. 2008, S. 117.

■ **22**
Vgl. Dal Maso. 1993, S. 22–23.

■ **23**
Vgl. Lochman, Späth, Stähli. 2008.

□ 19
Das Forum Romanum in The Fall of the Roman Empire (USA 1964), Filmszene (Lochman, Späth und Stähli)

aber eine der »archäologisch überzeugendsten Rekonstruktionen antiker Architektur in der Geschichte des Kinos« 24 – vermittelte. In abgewandelter Form begegnen uns vergleichbare Idealbilder antiker Baukunst auch in Sergio Leones **Der Koloss von Rhodos** (Italien, Frankreich 1960) 25 und in den zahllosen weiteren Produktionen von **Sandalenfilmen**. Sie prägten in den Zeiten der vordigitalen Filmproduktion die ästhetischen Vorstellungen antiken Lebens so stark, dass ihr Einfluss bis in die didaktischen Visualisierungen antiker Historie in filmischen Animationen für den Schulunterricht, in das Edutainment, in die museale Vermittlung oder in interaktive Panoramen reichte, die in heutiger Zeit in der Regel computergeneriert entstehen.

Einen nicht zu übersehenden ästhetischen Einfluss auf heutige CAD-generierte Rekonstruktionsmodelle in der Archäologie hatten auch die von der Bildhauerin Florence Thomas mit ihrem Assistenten Joe Liptak und anderen Künstlern erstellten View-Master-Dioramen. Florence Thomas schuf sie zwischen 1944 und 1971 als handwerklich perfektionierte Miniaturfigurinen aus Ton, bemalte sie mit geeigneten Farben und stattete sie mit Stoffmustern aus, um sie dann mit geschickt arrangiertem Licht in 3D-Fotografie abzulichten, sodass stereoskopisch zu betrachtende Dia-Bildserien von greifbarer Plastizität im Hyperstereo-Effekt entstanden. 26 Sie waren nicht nur zur Unterhaltung und Belehrung von Kindern bestimmt, sondern für die ganze Familie. Neben Märchenserien erzielten vor allem jene 21 **View-Master stereo pictures** der **The Seven Wonders of the World** aus dem Jahr 1962 eine große Wirkung, die in ihrer räumlichen Visualisierungsästhetik z. T. schon die Ansichten

■ **24**
Vgl. Thomas Lochman, Thomas Späth, Adrian Stähli (Hg.): Antike im Kino. Auf dem Weg zu einer Kulturgeschichte des Antikenfilms, Basel 2008, S. 74–79, 109–111.

■ **25**
Vgl. Sandra Uebbing, Der Koloss von Rhodos – Mehr als nur ein Sandalenfilm, Begleitheft zur DVD der e-m-s new media AG, Der Koloss von Rhodos, Sergio Leone's il Colosso di Rodi. 2006.

■ **26**
Vgl. John M. Clement, Florence Thomas-A View Master Artist., https://archive.org/stream/FlorenceThomas-ViewmasterArtist/Flore.

der Virtual Reality in ihrem glatten Perfektionismus vorwegzunehmen scheinen, jedoch darüber hinaus durch die überaus gekonnte Lichtregie der 3D-Aufnahmen eine magische Atmosphäre zu erzeugen vermochten 20, die wesentlich zu einer gesteigerten raumgreifenden Wirkung beitrug.

□ 20
Florence Thomas, Creative Department of Sawyer's Inc.: The Lighthouse of Alexandria (250 B. C.), aus der View-Master World- (B901) (Ekschmitt)

D.3 Illusion der Atmosphäre

Die Erzeugung eines stereoskopischen Raumgefühls ist nicht das einzige notwendige Element, das erforderlich ist, um in CAD-generierten Rekonstruktionen archäologischer Wirklichkeit den Eindruck von realer historischer Wahrheit vermitteln zu können. Ein weiteres wichtiges Element zur Erreichung dieses Ziels bildet die Formung einer glaubhaften Atmosphäre, von der die rekonstruierten Modelle umgeben werden. Auch in diesem Bereich ästhetischen Gestaltens war die Malerei bereits zu wichtigen Einsichten gelangt, die sich nach und nach bei der Erstellung virtueller Rekonstruktionen durchsetzten. So ist etwa die Erkenntnis, wie durch eine geschickt ausgewählte Beleuchtungsperspektive eine stimmungshafte Verteilung von Licht und Schatten (**Clair-obscur)** geschaffen werden kann, ebenso in den Erfahrungsschatz zur Darstellung atmosphärischer Wirkungen in die Malkunst eingeflossen wie die Einsichten in die Raumwirkung der Farben durch die Kenntnis der Gesetze der **Farbperspektive** oder das Verschwimmen der Konturen im **Sfumato** nach den Regeln der **Luftperspektive**.

Die allmähliche Herausarbeitung der Kenntnis der Gesetze der Beleuchtungsperspektive, d. h. die Beobachtung und Wiedergabe der Wirkung des natürlichen Lichtes beim Auftreffen auf Körper und die dabei entstehenden Schatten, die entweder als dumpfe Eigenschatten oder kräftige Schlagschatten in Erscheinung treten, setzte erstmals empirisch in der Helldunkelmalerei des Trecento v. a. im Schaffen von Pietro Lorenzetti (um 1280–1348) ein. 27 Sie machten große Fortschritte, als in der toskanischen Frührenaissance innerhalb einer Gruppe von Künstlern – den sogenannten **Problematikern** wie etwa Domenico Veneziano (1400/10–1461) – systematisch der Ergründung der natürlichen Lichtwirkung nachgespürt wurde. Unter dieser Voraussetzung gelangte Piero della Francesca (1410–1492) zu der Erkenntnis, dass unter der Einwirkung des natürlichen Lichtes die Farben und Gegenstände stets etwas von der Farbe ihrer Umgebung annehmen; eine Entdeckung, die aber bald wieder verloren ging und erst von den Impressionisten neu gemacht wurde.

■ 27
Vgl. Frank Büttner, Giotto und die Ursprünge der neuzeitlichen Bildauffassung. Die Malerei und die Wissenschaft vom Sehen in Italien um 1300, Darmstadt 2013.

Der Florentiner Piero di Cosimo (1462–1521) war mit diesen Errungenschaften vertraut und wandte sie in seinen Architekturstücken so an, dass durch die kurzen kräftigen Schlagschatten der Eindruck der Stimmung eines heißen Sommertages mit aufziehendem Gewitterhimmel entsteht [21].

☐ 21
Piero di Cosimo: Der Bau eines Palazzo, 1515–20, Öl/Holz, 82,6 x 196,9 cm, Sarasota, Florida, The John and Mahle Ringling Museum of Art (Evers)

Hier zeichnet sich bereits die Kenntnis des atmosphärischen Zusammenwirkens von Licht, Dunkelheit und Farbe als dialektischer Einheit zur spannungsreichen Diversifizierung der Erscheinungsmöglichkeiten der Wirklichkeit in einer kraftvollen Steigerung ihrer Wirkungsqualität ab, deren sorgfältige Beachtung zur Darstellung unterschiedlicher Stimmungen gelangt. Insofern geht dieses Wissen über den simplen Helldunkelkontrast als Erscheinungskomponente der Farbe weit hinaus. Im Zeitalter des Barock kam es im Schaffen von Künstlern wie Caravaggio (1573–1610), Rembrandt (1606–1669) und vielen anderen mehr zu einer revolutionär neuen Lichtbehandlung. Sie nutzten mit messerscharfen Schlagschatten im nachtdunklen Raum oder mit diffusem Clair-obscur eine Fokussierung des Lichts zur zuspitzenden Dramatisierung des Dargestellten und bewirkten damit ein neues Verhältnis zwischen Licht und Raum.

Die so entstehende geheimnisvolle Atmosphäre eröffnet den Assoziationen der Betrachter einen breiten Spielraum, wie sich etwa bei der Architekturmalerei des Monsù Desiderio (François de Nomé; ca. 1593–1644) 22 oder in der breiten Tonwertspanne der Mezzotinten des John Martin (1789–1854) 23 beobachten lässt. Gleichzeitig diente die spannungsreiche Clair-obscur-Behandlung zur Unterscheidung zwischen Wichtigem und Unwichtigem im Bilde.

☐ 22
Monsù Desiderio (François de Nomé): Der Turm zu Babel. Um 1620/30, Öl/Lw., 152 x 130 cm, Privatbesitz (Wullen und Schauerte)

☐ 23
John Martin: Der Untergang Babylons. 1831, Radierung und Mezzotinto, 59 x 81,3 cm, SMPK, Kupferstichkabinett. (Wullen und Schauerte)

Unter dieser Voraussetzung führte die Beleuchtungsperspektive zu einer Modulierung der Lokalfarben in feine Valeurs von Erscheinungsfarben bzw. Grautönen in der Grafik; ein Aspekt, der in den gegenwärtigen CAD-generierten Rekonstruktionen bisher noch viel zu wenig Beachtung findet und zur Erzielung realistischer Lichteffekte stärker herangezogen werden sollte. Auch die in der deutschen Frühromantik vor allem durch Caspar David Friedrich entwickelte stimmungsvolle Landschaftsauffassung 24, die mithilfe subtilster Beleuchtungseffekte zu einem Stimmungsträger für emotionale Befindlichkeit wird und dadurch die Identifikation mit der Gefühlslage der Betrachter hervorzurufen vermag, ist bislang noch nicht angemessen rezipiert worden.

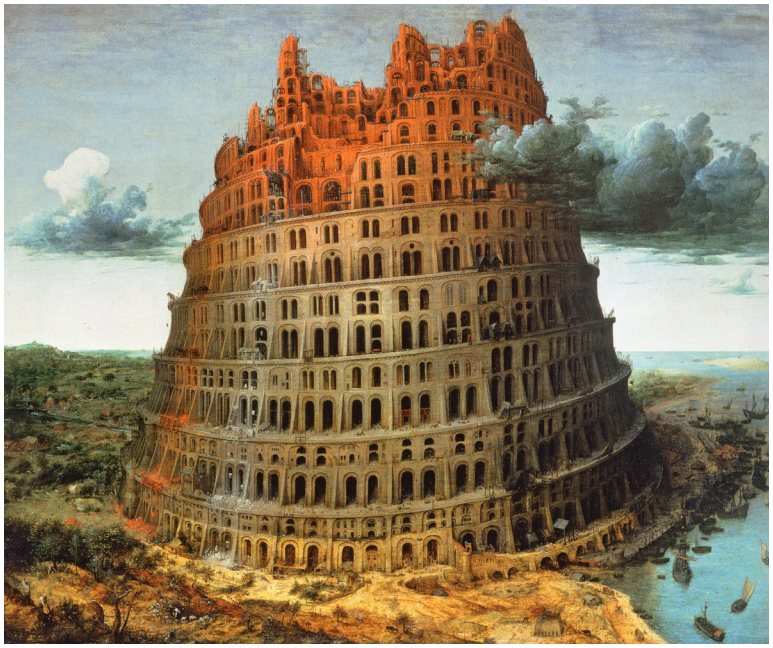
□ 24
Caspar David Friedrich: Junotempel in Agrigent, um 1828/30, Öl/Lw., 54 x 72 cm, Dortmund, Museum für Kunst und Kulturgeschichte. (Börsch-Supan und Jähnig)

Bedeutsam für die Sehgewohnheiten der abendländischen Malerei wurde überdies die Entdeckung der Luftperspektive um 1470, die Wahrnehmung der Luft, die sich bei entfernten Gegenständen zwischen die Objekte und das wahrnehmende Auge schiebt und deshalb als flimmernde Glast oder Dunst bzw. Nebel erscheint, indem in der Ferne die klare Ton- und Farbflächentrennung des Vordergrunds in seiner konturenbetonten Modellierung der Nahsicht zugunsten eines allmählich verrauchenden Verschwimmens des Ineinanderfließens von Formen in verblauende Farbwerte aufgegeben wird. Damit verbindet sich die luftperspektivische Wahrnehmungsweise mit der Erkenntnis farbperspektivischer Gesetzmäßigkeiten, die besagen, dass sich die durch die Luftperspektive hervorgerufene Unschärfe in der Ferne mit der Wirkung der Farbperspektive trifft, sodass sich mit zunehmender Raumtiefe die Farbskala zugleich in Richtung der kalten Töne bewegt. Leonardo da Vinci (1452–1519) entwickelte mit systematischer Gründlichkeit dieses Gestaltungsprinzip des Sfumato als atmosphärischer Dunstschleier weiter, indem er

»die Körperhaftigkeit figürlicher Details gleichzeitig ausformt und doch weich mit dem Hintergrund verschmelzen lässt, so dass zwischen Nähe und Ferne ein Raumkontinuum erlebbar wird«. 28

■ **28**
Sfumato, in: Stadler (Hg), Bd. 11, 1994, S. 26.

Das Prinzip fand besonders in der flämischen Landschaftsmalerei des 16. Jhs. – etwa im Schaffen von Peter Brueghel d. Ä. (um 1528/30 bis 1569) – einen nachhaltigen Niederschlag 25. In den 3D-Konstruktionen der Virtual Reality vermisst man es allerdings bisher meist noch.



□ 25
Pieter Breughel d. Ä.: Der Turmbau zu Babel, um 1563, Boymans Van Beuningen Stichting Museum Rotterdam. (Wullen und Schauerte)

D.4 Illusion der Materialität

Einen weiteren wichtigen Aspekt in der illusionistischen Wahrnehmungsweise bildet die Beobachtung und korrekte Wiedergabe der materialgerechten Wirkung der Oberflächen in ihren haptischen Eigenschaften. Organische Körper wirken anders als anorganische. Die Gegensätze der Materialien scheinen sich in der optischen Wahrnehmung in unendlichen Abstufungen zwischen hart und weich, glatt und rau, transparent und opak, kalt und warm, glänzend und stumpf etc. zu bewegen. Erst die Erlangung einer fein differenzierten körperlichen Textur in materialgerechter Wiedergabe vermag zusammen mit der Illusion von dreidimensionaler Räumlichkeit und stimmungsvoller Atmosphäre eine glaubhafte Wirklichkeit des Gegenständlichen zu suggerieren. Auf diesem Gebiet hatten die alten Meister der niederländischen Kunst Pionierarbeit geleistet. Das setzt allmählich mit Jan van Eyck (tätig von 1422 bis 1441) ein, der bereits unterschiedliche Tuch-

qualitäten zwischen Wollstoffen und Seide, zwischen Brokaten und Leinen, aber auch zwischen dem Inkarnat des Fleisches und dem harten, porösen Stein zu unterscheiden wusste und die jeweils charakteristischen Eigenschaften der Materialien in überzeugender Wahrhaftigkeit darzustellen verstand. 29 Während des holländischen **Gouden Eeuw** im Barock erlangte diese Fähigkeit dann ihren künstlerischen Höhepunkt vor allem in der Stillleben- und Trompe-l'œil-malerei, als die Künstler neben moralisierenden Botschaften in ihren Werken auch ihre Virtuosität in der Treffsicherheit der Materialität stofflicher Strukturen unter Beweis zu stellen suchten. Absichtsvoll wurden Esswaren neben Prunkgeräten, Tuchdraperien mit Musikinstrumenten, Marmorplastiken mit Früchten, Blumen, Pelzen, Geschirr, Kerzen usf. arrangiert, um durch stofflichen Kontrast eine verblüffend echt wirkende Augentäuschung in der Wiedergabe unterschiedlichster Materialien in ihren spezifischen haptischen Qualitäten bis ins kleinste Detail zu erfassen. Zwar griff diese Absicht täuschender Materialechtheit nicht auf die monumentalen Aspekte der Baukunst in der Architekturmalerei über, fand aber immerhin in der dreidimensionalen Modellbaukunst dieser Epoche einen gewissen Niederschlag, wo gelegentlich auf die jeweils einzusetzenden Baumaterialien in der Mauerverkleidung, der Dachdeckung usw. aufmerksam gemacht wurde 30 bzw. wo mit den antike Bauwerke darstellenden **Korkmodellen** bewusst auch der Eindruck verwitterten Marmors erweckt werden sollte, um damit gegenüber den getischlerten Holzmodellen eine größere Authentizität in der Materialwirkung des Baukörpers zu erreichen 26. Gegenüber den rasterhaften Oberflächenmustern der digital erstellten 3D-Modelle besitzen sie noch immer größere Überzeugungskraft von materialechter Wirkung.

■ 29
Vgl. zum Beispiel dessen Porträt eines jungen Mannes (Tymotheos), 1432, Öl / Eiche, 33,4 x 19 cm, oder Mann mit Turban, 1433, Öl / Eiche, 33,3 x 25,8 cm, beide: London, National Gallery.

■ 30
Vgl. Anm. 16, 17 bzw. Millon, Antonio Rosz: Model of a Chinese Tower, Caserta, Museo Vanvitelliano, (226) 1999, S. 391,492. Francesco Bartolomeo Rastrelli, Jacopo Lorenzo, Smolny Convent in St. Petersburg, 1748/56, St. Petersburg, Scientific Research Museum of Academy of Art of Russia, Abb. S. 134, 582, Kat.-Nr. 575.

□ 26
Antonio Chichi: Nervaforum, Südwand beim Minervatempel in Rom, ca. 1777/82, Korkmodell, ca. 1:29, 46,5 x 24x50cm, Staatliche Museen Kassel, Inv.-Nr. N 104. (Staatliche Museen Kassel)

D.5 Illusion der Bewegung in filmhaften Sequenzen

Es steht außer Zweifel, dass die Wiedergabe von Materie ohne Bewegung tot erscheint. Deshalb ist es wünschenswert, in die archäologischen Rekonstruktionen des digitalen Zeitalters auch Akzente der Bewegung mit einzubauen. Diese sind naturgemäß nicht auf die entsprechenden rekonstruierten Bauten selbst anzuwenden, sondern auf deren Umfeld. Dazu werden bewegte Staffagen eingesetzt, die den Eindruck von lebendiger Natürlichkeit erwecken sollen. Programme der Interaktivität decken diese Absicht zwar zum Teil ab, doch reichen sie längst nicht aus, um wirklich die Illusion einer wahrscheinlichen Zeitreise in historische Welten herzustellen. Die abendländische Malerei hatte zur Darstellung von Bewegung nur bedingt Möglichkeiten zur Erzeugung eines lebendigen Wirklichkeitseindrucks gefunden, da die Darstellung von Bewegung die vierte Dimension voraussetzt, die sich im zwei- und dreidimensionalen Bereich allenfalls symbolhaft oder nur mit Mitteln der Verunklärung, des Verwischens, Verschwimmens usw. andeuten lässt, indem damit Bewegung bzw. Geschwindigkeit suggeriert werden. 31

Letztlich lässt sich Bewegung aber nur mit filmhaften Sequenzen von Animationen realisieren. Doch dabei zeigt sich, dass der Einsatz von **bewegten Staffageelementen**, wie z. B. auf einer DVD der gleichförmige Flug eines kleinen Vogelschwarms über dem Kolosseum in Rom, per se nicht ausreicht, um beim Betrachter schon die Illusion lebendiger Wahrhaftigkeit zu erzeugen. 32 Vielmehr erscheint dieses Bewegungsmotiv aufgrund seiner schematisch wirkenden Konstruktion artifiziell: zum einen, da es sich — abgesehen von der Kamerafahrt — um die einzige Bewegung im virtuellen Modell handelt, zum anderen, weil sich dieses Bildmotiv undifferenziert mehrmals wiederholt. Insofern ist darauf zu achten, dass es zur Erzeugung einer glaubwürdigen **lebendigen Bewegung** weit stärker in sich differenzierterer Einzelmotive als auch insgesamt einer größeren Motivvielfalt bedarf!

■ 31
Vgl. Gerd-Helge Vogel, Mobility: The Fourth Dimension in the Fine Arts and Architecture, in: Contemporary Aesthetics, Special Volume I, http://www.contempaesthetics.org, 2005.

■ 32
Vgl. die DVD: Ancient Rome. A Virtual Archeoguide, Beilage zu: Julia Coletta u. a., Rom in Rekonstruktionen, (mit eingeschlossener DVD »Ancient Rome. A Virtual Archeoguide«), Roma 2013.

D.6 Die Sichtbarmachung des Unsichtbaren in archäologischen Rekonstruktionen

Einen wichtigen wissenschaftlichen Akzent bildet in archäologischen Rekonstruktionen die klare visuelle Absetzung der erhaltenen Gebäudeteile und Grabungsbefunde von den rekonstruierten (aber letztlich hypothetisch bleibenden) Strukturen. In den klassischen Verfahren bildlicher Rekonstruktion archäologischer Bauten, erstellt in Tusche, Bleistift, Aquarell usw., begegnen uns zwei grundsätzliche Methoden der visuellen Rekonstruktion: entweder wird durch eine gestrichelte Strichführung die Modellierung des Bauwerks unübersehbar als Fiktion / Hypothese gekennzeichnet oder die Befundsituation und ihre historische Rekonstruktion wird durch eine Folie überlagert (meist im Darstellungsverfahren eines archäologischen Lebensbildes). Letzteres, sehr

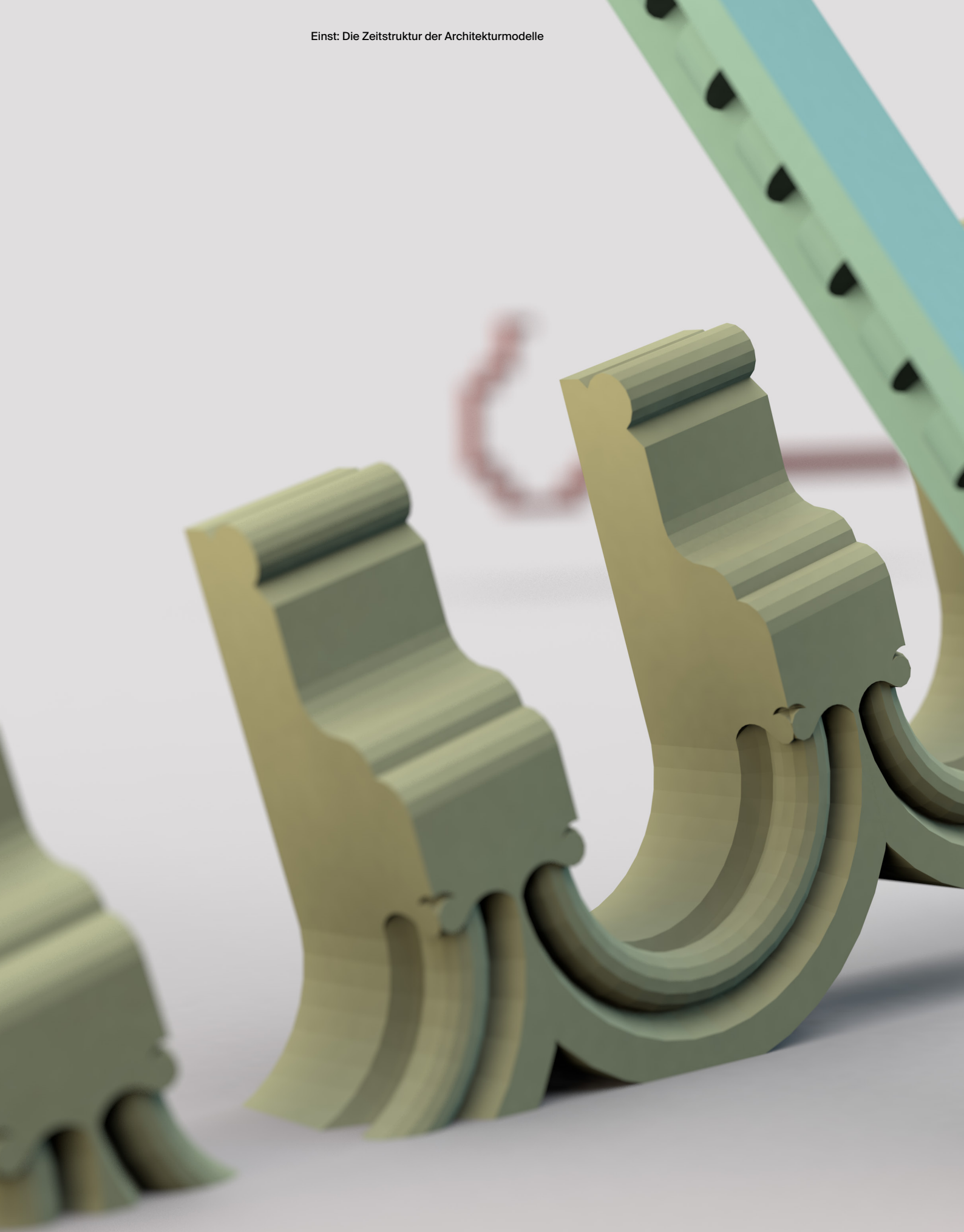
eindrückliches Verfahren ist vor allem bei den populären Touristenführer zu den antiken römischen Fundstätten in Rom, Ostia, Pompeij, Herculaneum usw. üblich. 33 Es ist gleichzusetzen mit dem Verfahren der unmittelbaren Gegenüberstellung von Fundstätte, rekonstruiertem Modell und rekonstruiertem historischen Lebensbild, wie es andere Führer zu archäologischen Fundorten mehr bevorzugen. 34 Ungeachtet dessen dürfte bei all diesen Methoden der Erkenntnisgewinn über die ursprünglichen historischen Zustände wohl ziemlich gleichwertig sein, wobei sie dabei bevorzugt populärwissenschaftlichen Anforderungen gerecht zu werden suchen.

In den virtuellen Welten der 3D-Rekonstruktionen wird in Analogie zu diesen traditionellen Verfahrensweisen die Zerstörung der Bauwerke in digitaler Animation rückgängig gemacht. Indem die Bauten als stereometrische Körper erneut **aufwachsen**, treten die Betrachter scheinbar in eine historische Welt ein, die längst Vergangenheit ist. Im Interesse einer betonten Wissenschaftlichkeit, die nicht auf eine populärwissenschaftliche Zielgruppe des Edutainments Rücksicht zu nehmen braucht, sind auch Konstruktionen von virtuellen 3D-Modellen denkbar, die ähnlich wie schon die gestrichelten Rekonstruktionsmöglichkeiten zweidimensionaler Darstellungen die hypothetischen Bestandteile in transparenten bzw. fehlfarbigen Strukturen wiedergeben und so gleichzeitig Befund und Rekonstruktionsmodell nebeneinanderstellen und leicht voneinander unterscheidbar machen.

In der Quintessenz lässt sich feststellen, dass ohne Voraussetzung der ästhetischen Konventionen in den analogen Medien der bildenden Kunst die bislang erreichten wirklichkeitsnahen Bildgebungen in den virtuellen 3D-Rekonstruktionen so nicht möglich gewesen wären. Dabei wird deutlich, dass die von dort stammenden Darstellungsmuster / Konventionen der ästhetischen Illusion der Wirklichkeit vielfach auch von den neuen technischen Verfahren der Digitalisierung übernommen wurden. Allerdings zeigen sich dabei in verschiedenen Bereichen — etwa dem der Illusion von Atmosphäre oder von Materialechtheit wie auch von Bewegungsabläufen — noch immer ästhetische Defizite gegenüber einer absolut realistischen Wirkung der durch Rekonstruktion wieder zu gewinnenden Bausubstanz samt deren historischem Umfeld. Die zukünftige Entwicklung wird deshalb darauf gerichtet sein, nach und nach diese Defizite zu überwinden.

■ **33**
Zum Beispiel Coletta 2013. Franciscis 1964. Luca Mozzati, Pompeji. Virtuelle Rekonstruktionen von Orten und Monumenten, Milano 2013. Staatliche Altertümerverwaltung Ostia 1981 (Hg.), Illustrierter Führer durch Ostia Antica, Roma 1981, vgl. auch: 06 07**.**

■ **34**
z. B.: Öcan Atalay, Ephesos, Antalya 2009; Daniel Castella (Hg.), Aventicvm. Eine römische Hauptstadt, Avenches 2015



Reinhard Wendler

E. Einst: Die Zeitstruktur der Architekturmodelle

→ Adolf Loos, Architekturmodelle, CAAD, Chicago Tribune Building, Modell des Modellseins, Modellkritik, Rekonstruktionsmodell, Zeitlichkeit

Dieser Beitrag untersucht die Zeitstruktur von Architekturmodellen anhand einer computersimulierten Ausführung von Adolf Loos´ Entwurf für das Chicago Tribune Building. Da dieser Entwurf nicht ausgeführt wurde, stellt das hier im Zentrum stehende Modell eine mögliche Zukunft von 1922 und eine alternative Gegenwart von heute vor Augen. Die komplexe zeitliche Beziehungsstruktur dieses Beispiels reicht vorwärts und rückwärts von der dorischen Säule der griechischen Antike bis zur erweiterten Gegenwart. Aufgrund der Vielzahl miteinander verbundener zeitlicher Verweise bietet dieses Beispiel reiches Anschauungsmaterial für eine exemplarische Untersuchung der Chronologik der Modelle. Methodische Grundlage ist dabei Bernd Mahrs Ansatz des Modells des Modellseins und die darin formulierte Vorstellung, dass Modelle stets eine Von- und eine Für-Beziehung aufweisen. Mittels dieses begrifflichen Rüstzeugs wird das Geflecht an Gegenständen und Verweisen des gewählten Beispiels bestimmt und insbesondere der Umstand reflektiert, dass die Beziehungen der beteiligten Elemente einander überlagern und beeinflussen, dass also von einem Wechselwirkungsgefüge gesprochen werden kann. Die Untersuchung kommt zu dem Schluss, dass die charakteristische Freiheit der Modelle von der Zeit einen chronologischen Spiel- oder Möglichkeitsraum eröffnet, dessen eingehende Analyse für eine historische und vergleichende Modellkritik von elementarer Bedeutung ist.

Dieser Aufsatz thematisiert anhand eines Beispiels aus der Architekturgeschichte der Moderne die Zeitstruktur von Rekonstruktionsmodellen historischer Bauten und Entwürfe. Solche Modelle **vermitteln** nicht nur zwischen der Vergangenheit, der Gegenwart und der Zukunft, sondern entwerfen und prägen zudem sie und ihre Beziehungen untereinander. Dabei bringt der Einsatz von Modellen neben einer Handlungsentlastung auch eine partielle Befreiung aus der Rigidität der Zeit. Auf diese Weise ermöglichen sie unter anderem einen tentativen Nachvollzug und eine spielerische Vorwegnahme, also in zwei unterschiedliche zeitliche Richtungen ausgreifende epistemische Operationen. Als Artefakte bezeugen sie darin zugleich die Ab- und Ansichten, Hoffnungen und Erwartungen der Modellierenden. Die Zeitstruktur der Modelle wurde in der modelltheoretischen Literatur vielfach anhand einer Kategorisierung bestimmt, die Modelle **von** etwas und Modelle **für** etwas voneinander unterscheidet. 01 Zu den Von-Modellen wurden üblicherweise sowohl materielle als auch theoretische Modelle in den Wissenschaften und Rekonstruktionsmodelle gezählt, zu den Für-Modellen beispielsweise Entwurfs- und Planungsmodelle. Diese Unterteilung hilft dabei, das unerhört große und heterogene Feld der Modelltypen und Modellierungskulturen vorläufig zu ordnen. Sie blendet aber aus, dass Modelle wichtige Einflussfaktoren in Werk-, Erkenntnis- und Vermittlungsprozessen sind und verunklärt darüber hinaus die komplexe zeitliche Logik der Modelle.

Im vorliegenden Aufsatz wird im Sinne von Bernd Mahrs **Modell des Modellseins** davon ausgegangen, dass Modelle stets Modelle von **und** für etwas sind. 02 Mahr spricht hier von der **Matrix** und dem **Applikat** des Modells, die in jedem einzelnen Fall unterschiedlich stark im Vordergrund stehen. Bei Rekonstruktionsmodellen und bei wissenschaftlichen Modellen wird üblicherweise explizit die Von-Seite im Vordergrund gesehen, bei Entwurfs- und Planungsmodellen die Für-Seite. Die jeweils andere Seite existiert auch, hat bisweilen sogar die wichtigere Rolle, wird aber zugunsten der pragmatischen Konzentration, aus bloßer Gewohnheit oder aus rhetorischem Kalkül vernachlässigt.

Die exemplarische Beschreibung solcher individueller Gewichtungen und ihrer Folgen ist eine der Grundlagen einer Modell**kritik**, die den engen Rahmen der Modell**optimierung** zu überschreiten und ein umfassenderes Verständnis der ablaufenden Prozesse zu entwickeln versucht. Insbesondere tritt aus diesem Blickwinkel die spezifische Zeitlichkeit der Modelle kontrastreich ins Licht, wie im Folgenden an der Rekonstruktion eines Entwurfs von Adolf Loos gezeigt wird.

■ 01
Vgl. etwa Evelyn Fox Keller, Models of and Models for. Theory and Practice in Contemporary Biology, in: Philosophy of Science 67 (Proceedings), 2000, S. 72–86.

■ 02
Bernd Mahr, Ein Modell des Modellseins – Ein Beitrag zur Aufklärung des Modellbegriffs, in: Ulrich Dirks, Eberhard Knobloch (Hg.), Modelle, Berlin 2008, S. 187–218; ders. Modelle und ihre Befragbarkeit. Grundlagen einer allgemeinen Modelltheorie, in: Erwägen Wissen Ethik, Heft 26 (2015), Heft 3, S. 329–342.

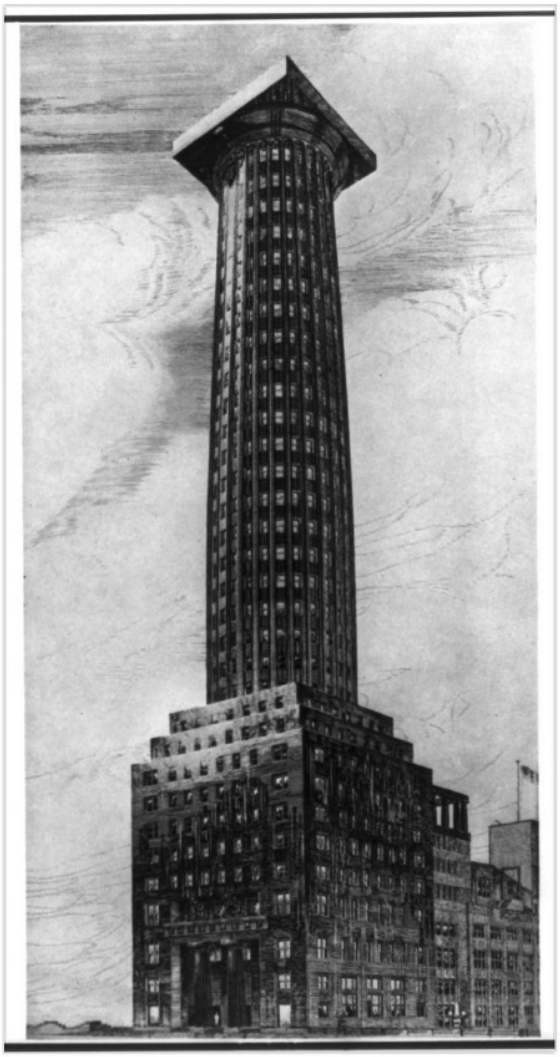
E.1 Das Von und Für der Modelle

Zwischen 1990 und 1992 ist im CAAD-Labor des Städtebaulichen Instituts der Universität Stuttgart unter der Leitung von Thomas Kemmer ein digitales Modell entstanden. Es stellt einen Entwurf von Adolf Loos aus dem Jahr 1922 für das Gebäude der **Chicago Tribune** dar. 03 Kemmer montierte es in eine Schwarz-Weiß-Fotografie von Howard N. Kaplan, die die stadträumliche Umgebung von Chicago um 1990 zeigt 01. 04 Das säulenförmige Gebäude ragt in der Bildmitte in den grauen Himmel, das Licht kommt von links hinter dem Betrachter, sodass auf dem Säulenschaft ein schmaler verschatteter Streifen zu sehen ist. Auf der linken Seite des Turmes ist das 1921 vollendete **Wrigley Building** und sein 1924 fertiggestellter Turm sowie im Hintergrund das 1929 gebaute **Intercontinental Building** zu sehen. Rechts erhebt sich das 1965 vollendete **Equitable Building**, im Mittelgrund die **DuSable Bridge** und im Vordergrund eine der historisierenden Straßenlaternen des **Wacker Drive**. Diese erscheint durch die größere Nähe zum Objektiv stark vergrößert, sodass sie wie ein eigenes Gebäude zwischen den anderen zu stehen scheint. Insgesamt ergibt sich ein Panorama unterschiedlicher Baustile und historischer Verweise, in dem der Säulenturm eine eigene Position behauptet: Während das **Wrigley** und das **Intercontinental Building** historisierende Fassaden aufweisen und das **Equitable Building** die modernistische Abkehr von solchen Formensprachen zur Schau trägt, erscheint der Loos'sche Turm als eine Hybridform, die historische Bauformen in einer modernen Radikalität aufnimmt und abwandelt. Das Stuttgarter Bild **erklärt** also in gewisser Weise den Entwurf von Adolf Loos.

■ **03**
Ich danke Thomas Kemmer für die großzügige Bereitstellung von Bildmaterial und Informationen.

■ **04**
Das Farbfoto findet sich etwa bei John Zukowsky (Hg.), Chicago Architektur 1872–1922. Die Entstehung der kosmopolitischen Architektur des 20. Jahrhunderts, Ausstellungskatalog, München 1987, S. 432 Taf. 96 und S. 352. Die von Kemmer benutzte Vorlage ließ sich nicht mehr lokalisieren.

□ 01
Das Gebäude der Chicago Tribune, entworfen im Jahre 1922 von Adolf Loos, als digitales Modell in eine Schwarz-Weiß-Fotografie von Howard N. Kaplan einmontiert. (John Zukowsky)



☐ 02
Zeichnung von Adolf Loos für den Architekturwettbewerb des Chicago Tribune Building. (Katherine Solomonson)

■ **05**
Katherine Solomonson, The Chicago Tribune Tower Competition. Skyscraper Design and Cultural Change in the 1920s, Chicago, London 2011; Robert Bruegmann, Als Welten aufeinanderprallten. Europäische und amerikanische Beiträge zum Wettbewerb der ›Chicago Tribune‹ von 1922, in: John Zukowsky (Hg.), Chicago Architektur 1872–1922. Die Entstehung der kosmopolitischen Architektur des 20. Jahrhunderts, Ausstellungskatalog, München 1987, S. 306–321 ; Wolfgang Pehnt, Die bewohnte Säule. Brauch und Mißbrauch einer Form, in: ders., Die Erfindung der Geschichte. Aufsätze und Gespräche zur Architektur unseres Jahrhunderts, München 1989, S. 30–36.

Der säulenförmige Turm bezieht sich auf eine Zeichnung, die Loos für den Architekturwettbewerb des **Chicago Tribune Building** angefertigt hatte 02. 05 Hier ist der Turm ohne das bereits bestehende **Wrigley Building** und daher freistehend gezeigt. Das Licht fällt von weiter seitlich herein als in der Stuttgarter Darstellung, sodass der Turm weitgehend verschattet erscheint. Auf diese Weise hebt er sich schärfer gegen den hellen Himmel ab, der so seinerseits eine größere Bedeutung bekommt. Dadurch und durch die forcierte Untersicht auf den Abakus wird das Gebäude als Himmelssäule inszeniert, die die Wolken **trägt** und nicht an ihnen wie ein Wolkenkratzer kratzt. Loos' **Chicago Tribune Building** spielt also, ähnlich wie der als Himmelbrücke lesbare Eiffelturm, mit einer architektonischen Vermittlung zwischen Erde und Himmel und lässt den Stadtraum so als eine Art Tempelraum erscheinen.

Der Loos'sche Entwurf ist doppeldeutig, denn er bezieht sich auf zweierlei: auf die Zeitungsspalte (engl. **column**, auch Säule) und — mit der dorischen Säule unverkennbar — auf eine der prominentesten Formen der europäischen Architekturgeschichte. Sie ist dabei nicht nach dem Vorbild einer spezifischen Säule eines realen griechischen Tempels, sondern als abstrakte Architekturform konzipiert. Hierbei handelt es sich um ein Gemenge aus konkreten Objekten, Bildern und Passagen in architekturtheoretischen Traktaten. 03 Der Gegenstand von Loos' Modellauffassung, die dorische Säule, bezieht sich als Modell seinerseits auf die Vergangenheit der langen Rezeptionsgeschichte der griechischen Säulenordnung. Die von Loos gezeichnete Ansicht ruft die bei den Betrachtenden der Wettbewerbszeichnung verfügbaren Kenntnisse und Vorstellungen von der dorischen Ordnung auf und bindet sie in ein Verweis- und Modifikationsspiel ein.

□ 03
Die dorische Säule als Gegenstand dreier unterschiedlicher medialer Präsenzen: einer Fotografie, einer schematischen Darstellung in einem Architekturtraktat und einer Beschreibung. Links: Dorische Säulen am Parthenon-Tempel, aus: Panayotis Tournikiotis, The Parthenon and its Impact in Modern Times, Athen 1994, Abb. 27. Mitte: Proportionen der dorischen Säulen, aus: Thomas Major, The Ruins of Paestum, otherwise Posidonia in Magna Graecia, London 1786, Tafel 12 (Detail). Rechts: Ausschnitt aus Christian Ludwig Stieglitz, Encyklopädie der bürgerlichen Baukunst, in welcher alle Fächer dieser Kunst nach alphabetischer Ordnung abgehandelt sind, Bd. IV, Leipzig 1797, S. 313.

Durch die rücksichtslose Transformation der Säulenform in eine Gebäudehülle und durch die ungeheure Vergrößerung wird die dorische Säule radikalisiert und damit der modernen amerikanischen Stadt des 20. Jhs. ostentativ angepasst. Damit überzeichnet der Loos'sche Entwurf den Aspekt der Umformung und Anpassung, der bei vielen Rekonstruktionen ebenfalls vorhanden ist, aber nur selten explizit gemacht wird. Indem Loos die dorische Säule entstellt, vergrößert und umfunktioniert, inszeniert er eine spezifische Form der Anverwandlung eines historischen Vorbilds. Eben dies geschieht auch durch das Stuttgarter Bild, das seine Referenz, den Loos'schen Entwurf, durch eine Reihe von Gestaltungsschritten als ausgeführt und abfotografiert vor Augen stellt: Der Himmel wurde mit einer computergenerierten grauen Schattierung versehen, das bestehende **Chicago Tribune Building** gelöscht und stattdessen das CAD-Modell eingefügt. Dieses wurde so gerendert, dass es der Loos'schen Zeichnung ähnelt. Das Foto des Stadtraums wurde so aufgenommen, dass es dem Blickwinkel der Loos'schen Zeichnung nahekommt. Ebenso wurde die Lichtquelle im Rendering dem Sonnenstand des Fotos angepasst, das, wie an der Uhr links oben zu erkennen ist, offenbar um 15:05 Uhr aufgenommen wurde. Die Intensität der Grautöne und der Kontraste wurde zwischen dem CAD-Modell und der Fotografie abgestimmt, sodass im Endergebnis der Turm ebenso fotografiert erscheint wie der Stadtraum. Auf diese Weise stellt das Bild eine alternative Gegenwart vor Augen, wie sie sich möglicherweise zeigen würde, wenn Adolf Loos den Wettbewerb gewonnen und das Gebäude errichtet hätte. Es zeigt eine **mögliche Zukunft** des Jahres 1922 und eine **alternative Gegenwart** von 1992.

In beiden Fällen, der Loos'schen Säule und der Stuttgarter Rekonstruktion, wird der Gegenstand der Von-Beziehung im Hinblick auf eine bestimmte **Wirkung** umgeformt und rekontextualisiert. Diese Wirkung liegt, von der Zeichnung und der Montage aus gesehen, in der Zukunft und gehört zur **Für**-Beziehung der beiden Modelle. Bei der Stuttgarter Rekonstruktion ist allerdings die Für-Seite weitaus schwächer sichtbar. Dies liegt unter anderem daran, dass sie nicht im Kontext eines Architekturwettbewerbs steht, also eines regulierten und anerkannten öffentlichen Vorgangs, sondern lediglich unausgesprochen als Vorbild oder Grundlage einer Vorstellungsbildung fungiert, die den Loos'schen Entwurf als ausgeführt imaginiert. Das Stuttgarter Bild liefert das visuelle Material **für** eine Vorstellung, die durch die Kontextkenntnisse vom abgelehnten Loos'schen Entwurf zu einem Bild **von** einer alternativen Gegenwart gemacht werden kann. Darüber hinaus bietet es sich gleichsam als Anstoß für eine neue Modellbildung an: Adolf Loos hatte in Reaktion auf die Zurückweisung seines Entwurfs behauptet, das Gebäude würde auf jeden Fall errichtet werden, wenn nicht in Chicago dann anderswo. Die Stuttgarter Rekonstruktion hat das Potenzial, als Modell für seine solche verspätete Ausführung aufgefasst und verwendet zu werden, erbt also von seinem Vorbild einen Abglanz seiner initiierenden Kraft.

Die dorische Säule, der Loos'sche Entwurf und die Stuttgarter Rekonstruktion sind jeweils unterschiedlich in zeitliche Dimensionen eingebunden. Alle drei sind aber als Modelle im Mahr'schen Sinne sowohl auf die Vergangenheit als auch auf die Zukunft bezogen: die dorische Säule rückwärts auf ein Konglomerat von Objekten und Medien und vorwärts auf alle möglichen künfti-

gen Rezeptionen, der Loos'sche Entwurf rückwärts auf die dorische Säule und das ebenso abstrakte Modell des Hochhauses sowie vorwärts auf die Vorstellungen der Jury von dem geplanten Gebäude. Die Stuttgarter Rekonstruktion schließlich ist rückwärts auf den Loos'schen Entwurf und vorwärts auf die Vorstellung einer alternativen Gegenwart bezogen. Im derart doppelt verknüpften Gefüge ergibt sich ein ebenso heterogenes wie enges Netz an chronologischen Dimensionen, an dem hier exemplarisch die Eigenzeit der Modelle beobachtet wird.

E.2 Die Eigenzeit der Modelle

Die Zeit der Modelle hat eigene, durch die Auffassungslogik des Modells bestimmte Regeln. So können Modelle das nicht Greifbare als begreiflich, das Abwesende als anwesend oder das nicht mehr oder noch nicht Existierende in spezifischer Form als existent erscheinen lassen. Für das Modell ist es zunächst einmal egal, warum genau die jeweiligen Bezugsgegenstände abwesend oder ungreifbar sind, und daher auch, in welcher zeitlichen Richtung sie liegen. Sie können, ebenso wie das Wort **einst**, in unterschiedliche Räume und zeitliche Richtung verweisen: **Einst** war ein Gebäude geplant, das **einst** gebaut werden soll. Wie die Stuttgarter Rekonstruktion exemplifiziert, können Modelle auch auf eine mögliche Zukunft der Vergangenheit und eine alternative Gegenwart verweisen, darüber hinaus auf alternative Vergangenheiten oder utopische Zukünfte. Die Auffassungslogik des Modells lässt alle diese Varianten zu und eröffnet somit zunächst einmal einen **Möglichkeitsraum**. In ihm lassen sich unterschiedliche zeitliche Bezüge im Als-ob-Modus realisieren und ihre spezifischen Eigenschaften bestimmen. Auf diese Weise erlauben Modelle Vertauschungen oder Amalgamierungen von Anfang und Ende, Start und Ziel, Gestern und Morgen, Jetzt und Einst.

Die Eigenzeit der Modelle ist in erster Linie durch solche und weitere Möglichkeiten charakterisiert, in zweiter Linie durch die Von- und Für-Beziehungen des Modells. Jedes konkrete Modell stellt in einer bestimmten Auffassungssituation eine spezifische Instanziierung der Von- und der Für-Beziehung, der Matrix und des Applikats dar und damit auch der chronologischen Rollen des Modells. Die zahllosen Möglichkeiten, die mit diesem epistemischen Muster 06 einhergehen, werden allein durch die Auffassungen und Handlungen der beteiligten Personen eingeschränkt. Diese Auffassungen sind in aller Regel klarer und eindeutiger als die Modellsituation selbst. Es handelt sich hierbei um ein epistemisches Manöver, durch das der jeweils fokussierte Aspekt betont, intensiviert und auf diese Weise aus der Reihe der anderen Aspekte herausgehoben wird. Unter- oder oberhalb dieser aus pragmatischen Gründen distinkten Auffassungen bleibt der Möglichkeitsraum erhalten und verfügbar. So kann sich das Modell unter den Augen verändern und damit den Möglichkeitsraum ausloten helfen. Bei der Stuttgarter Rekonstruktion bleibt es etwa den Betrachtenden vorbehalten, sie als ein mögliches Modell für eine zukünftige Realisierung des Projekts aufzufassen und so fundamental in das zeitliche Gefüge des Modells einzugreifen.

■ 06
Mahr 2008.

Festlegungen innerhalb des Möglichkeitsraums Modell erfolgen nicht nur aus pragmatischen Gründen, sondern auch aus Gewohnheit, begrifflichen und konzeptuellen Traditionen und verfestigten Routinen heraus. Diese haben zur Herausbildung der verschiedenen Modelltypen und ihren jeweils eigenen Chronologiken 07 geführt. So lässt man zum Beispiel Präsentationsmodelle in der Architektur ostentativ auf die Zukunft verweisen, im Schatten aber auch auf die Vergangenheit, wenn sie zum Beispiel als Modelle **von** den Überlegungen und Entwurfsarbeiten wirken. In architektonischen Präsentationsmodellen sieht man vielfach die Summe der im Entwurfsprozess gefundenen Lösungen gleichsam abgebildet. Die mit den Rekonstruktionsmodellen eng verwandten Prognosemodelle wie zum Beispiel digitale Klimamodelle werden ostentativ auf der Von-Seite auf eine gigantische Masse an Daten bezogen, auf der wiederum verschatteten Für-Seite aber unter anderem auf die Grenzen der menschlichen Sinne und Begriffe. Bei didaktischen Modellen wird eine Art Balance gesehen, in der die Von- und die Für-Seite halbwegs gleichberechtigt nebeneinander stehen: auf der einen Seite sollen sie den Daten und Erkenntnissen entsprechen, auf der anderen Seite für die Lehre geeignet, also für Studierende oder Museumsbesuchende begreiflich sein. Bei diesen Modellen muss ein Mittelweg zwischen der Abbild- und der Vorbildfunktion gefunden werden, wobei oftmals auf beiden Seiten Konzessionen vorgenommen werden müssen.

Solche und andere Modelltypen und ihre individuellen Chronologiken sind allein kraft ihrer sozialen und kulturgeschichtlichen Verfestigung stabil, bezeugen aber keine aus den Modellgegenständen selbst hervorgehenden **affordances**. 08 Dennoch handelt es sich um zentrale Faktoren des komplexen Wirkungsgefüges der Modelle, weil sie die konkreten Auffassungen und Handlungen und damit auch die individuelle Performanz der Modelle beeinflussen. Dies geschieht allerdings nicht, wie gesagt, durch einen vollständigen Ausschluss der von der jeweiligen Auffassung nicht explizierten Möglichkeiten, sondern durch eine produktive Differenz zu diesen. Würden die sozial- und kulturgeschichtlich verfestigten Chronologiken der verschiedenen Modelltypen den Möglichkeitsraum absolut rigide beschneiden, so würde die Produktivität des Modells und damit sein Status als solches verloren gehen. Deshalb können distinkte Modellauffassungen von einer zur anderen Möglichkeit streifen, ohne dabei ihren Charakter zu verlieren.

■ 07
Zu diesem Ausdruck siehe Metin Genç, Ereigniszeit und Eigenzeit. Zur literarischen Ästhetik operativer Zeitlichkeit, Bielefeld 2016, S. 103 und 284.

■ 08
James Jerome Gibson, The senses considered as perceptual systems, Boston 1966.

E.3 Epistemische Rochaden

Die mehr oder weniger starke Verschattung einer der beiden Hauptbeziehungen des Modells gehört ihrerseits zu den durch die Logik der Modellauffassung eröffneten Möglichkeiten. Dabei gilt, dass eine verborgene Modellbeziehung eine eigene, mitunter stärkere Wirkung haben kann als die offensichtliche oder explizit betonte. Dies ist vielfach bei Rekonstruktionsmodellen der Fall. Bei diesen, etwa in der Archäologie und der Kunstgeschichte, wird üblicherweise der zeitliche Rückbezug in den Vordergrund gestellt. So gehen in die Rekonstruktion alle verfügbaren Daten und die jeweils verfolgten Hypothesen ein und fundieren somit einen mehr oder weniger zuverlässigen Vergangenheitsbezug. Aber wie bei der Stuttgarter Montage tritt das Ergebnis der Rekonstruktion zunächst als ein **Vorbild** für eine Vorstellungsbildung auf. Erst das Ergebnis dieses Prozesses wird dann auf die Vergangenheit bezogen. Die unmittelbare Funktion von Rekonstruktionsmodellen liegt daher zunächst einmal in der Für-Beziehung. Nur vermittels dieser kommt der Vergangenheitsbezug solcher Modelle überhaupt zustande, sodass die Von-Beziehung fundamental durch die Für-Beziehung geprägt ist.

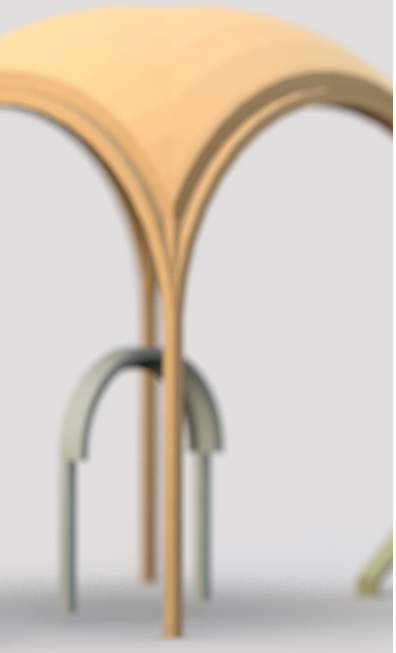
Die Betrachtung dieser gleichsam modellinternen Beziehungen eröffnet eine modellkritische Perspektive, weil sie den Blick auf die Abhängigkeit der Vorstellungen der Vergangenheit von der konkreten Machart und Präsenz von Rekonstruktionsmodellen lenkt. Sie sind in ihrer visuellen Präsenz auf Betrachtende ausgerichtet und zollen dieser Funktion Tribut. Dies bedeutet nicht nur, dass sie den Sehgewohnheiten, Erwartungen und ästhetischen Ansprüchen der Betrachtenden angepasst werden, sondern auch, dass sie Abschnitte wissenschaftlicher Argumentationen und Hypothesen übernehmen. Sie sollen Hypothesen plausibel machen, die Seriosität der geleisteten Arbeit verdeutlichen oder die Chancen auf eine namhafte Publikation respektive auf die Einwerbung von Drittmitteln erhöhen. Diese Ziele werden leichter erreicht, wenn sie nicht im Vordergrund stehen, und werden daher vielfach hinter der Von-Seite verborgen. Die Stuttgarter Rekonstruktion liefert auch hierfür geeignetes Anschauungsmaterial.

So wurden Ansicht, Größe und Belichtung des CAD-Modells dergestalt gerendert, dass dieses wie ein fotografiertes Gebäude erscheinen kann. Das **konstruierte Modell** bekommt dadurch das Antlitz eines **fotografischen Abbildes** aufgeprägt und wird damit in den Rang eines epistemischen Faktums erhoben. In der Stuttgarter Rekonstruktion bleibt das CAD-Modell noch schwach als solches erkennbar, was dem Stand der Technologie von 1992 geschuldet sein dürfte. In anderen, insbesondere neueren Fällen kann die Unterscheidung allerdings fast unmöglich werden. Hier treibt die Strategie der visuellen Autorisierung die Rekonstruktion ins Feld der Täuschung. Die dem Modell verliehene Erscheinungsweise der Fotografie, der sogenannte Fotorealismus, kann dabei exemplarisch für andere Strategien stehen, ein Modell nicht als ein solches, sondern als ein Abbild, eine Art **vera icon** eines historischen Sachverhalts erscheinen zu lassen. Die forciert optimierte Für-Beziehung verwandelt sich dabei scheinbar in eine direkte Von-Beziehung und entzieht sich so der kritischen Befragung. Auf diese Weise wird die persuasive Wirkung des Modells gesteigert, zu Lasten und auf Kosten der wissenschaftlichen Transparenz.

Um solchen suggestiven Wirkungen entgegenzuwirken, werden digitale Rekonstruktionsmodelle vielfach durch geeignete Verfahren gezielt als solche ausgewiesen. Anhand spezieller visueller Marker wie Gitternetze, Koordinaten, Farbgebung und dergleichen wird unübersehbar sowohl der mediale als auch der epistemische Status des Gesehenen ausgewiesen und so der Tatbestand der Täuschung zunächst vereitelt. Auf diese Weise wird insbesondere der zeitliche Status der Rekonstruktion unterstrichen und deutlich gemacht, dass es sich um eine zeitgenössische Konstruktion handelt. Damit wird auch das Verhältnis zwischen den Bildern, den Daten, der Situation vor Ort und dem historischen Sachverhalt transparent und beurteilbar gemacht.
Es wird sichtbar gemacht, dass die Vorstellung vom historischen Sachverhalt von der konkreten Präsenz des Modells erzeugt wird. Die Rekonstruktion weist sich so auf grafisch-visuellem Wege selbst als Modell aus und versieht sich zugleich mit der Signatur gewissenhafter, gleichsam modellhafter wissenschaftlicher Arbeit. Als solche können die visuellen Marker aber wiederum missbraucht werden und einer spekulativen oder fantastischen Rekonstruktion das Antlitz einer sauberen Forschung verleihen.

Die Offenheit der Modellbeziehungen für eine große Zahl unterschiedlicher Codierungen macht einen wesentlichen Teil des chronologischen Möglichkeitsraums der Modelle und damit auch ihrer spezifischen Chronologik aus. Um die Zeitlichkeit der Modelle zu verstehen, ist es notwendig, das seismografische Gefüge der Wechselwirkungen der jeweiligen Codierungen in seiner Struktur und Dynamik an Beispielen zu erkunden. Die großen, einfachen und distinkten Bestimmungen der wissenschaftstheoretischen Modelltheorie sind entfremdete Elemente der **Praxis** der Modelle, mittels derer die Performanz eines Modells beeinflusst wird. 09 Zur theoretischen und kritischen Erforschung des Modellseins können sie nur in identifizierter Form beitragen.

■ **09**
Reinhard Wendler, Modellbegriffe als Akteure, in: Erwägen Wissen Ethik, Jg. 26 (3) 2015, S. 417–419.



Georg Schelbert

F. Ein Modell ist ein Modell ist ein Modell — Brückenschläge in der Digitalität

→ Architekturmodell, Datenmodellierung, Digital Humanities, Kulturerbe-Dokumentation, Modelltheorie, Theoretisches Modell, Wissenschaftstheorie, Wissensmanagment

Unter dem Titel **Ein Modell ist ein Modell ist ein Modell**, der an Gertrude Steins poetische Einkreisungen eines Dings durch Wiederholung des Worts alludiert, versucht der Beitrag verschiedene, im praktischen Gebrauch oft ohne wechselseitigen Zusammenhang verwendete Konzeptionen von »Modell« aufeinander zu beziehen. Dabei wird die These vertreten, dass im digitalen Format ein entscheidender Zusammenschluss dieser Modellkonzepte stattfindet. Versuchsweise wird vorgeschlagen, Abbildungen, Beschreibungen und Datenmodelle sämtlich als abgeleitete formale oder sonstige Eigenschaften, Regeln oder Maße eines originalen Gegenstands zu begreifen. Aus der Perspektive der Dokumentation von Kunst- und Bauwerken — der Domäne des Verfassers — interessiert hier besondere das räumliche, abbildende Modell, für das nicht nur das Architekturmodell, sondern etwa auch der Gipsabguss von Skulpturen und im weiteren Sinn ebenso die verschiedenen zweidimensionalen Abbildungsformen wie die Fotografie stehen. Im Hinblick auf regelbasierte Beschreibungen von Kunstwerken, die durch digitale Datenformate und Arbeitsumgebungen auf eine veränderte Grundlage gestellt werden, kommt jedoch auch das theoretische, zumeist nicht-raumbezogene Modell in Form von Prozessen und Konzepten zum Tragen, etwa in Datenmodellen und Ontologien. Gleichwohl wird in der architektur- und kunsthistorischen Praxis allgemein immer noch vorwiegend der visuelle Aspekt von Modellen gesehen. Eine Einordnung in einen größeren und abstrakteren Kontext von Wissensdokumentation, die auch neue Publikationsformen einschließen könnte, ist demnach erst noch zu entwickeln.

Beim Umgang mit Kulturerbe im digitalen Format wird häufig von Modellen gesprochen. Jede Person, die in diesem Bereich tätig ist, weiß, dass es sich dabei je nach Kontext vorwiegend um zwei verschiedene Dinge handelt. Oft werden Bauwerke, aber auch Artefakte in Museen, in räumlichen Modellen nachgebildet, um am Bildschirm oder mit anderen Geräten betrachtet, gegebenenfalls auch bewegt oder manipuliert zu werden. Das ermöglicht, ähnlich wie bei einem Digitalfoto, eine Betrachtung der Objekte, auch ohne sich direkt zu dem Bauwerk, in die Sammlung oder in das Depot zu begeben. Gelegentlich dienen die Modelle auch dazu, Funktionsweisen zu zeigen, die am realen Objekt aus Gründen der Zugänglichkeit, der Sichtbarkeit oder auch aus konservatorischen Gründen nicht möglich sind: Gebäude können im Inneren betreten werden, fragile Musikinstrumente oder Maschinen in Funktion gesetzt werden, sehr kleine Strukturen, etwa Farbschichten eines Gemäldes oder einer Skulptur, eingehend betrachtet werden.

Im Zusammenhang mit der Digitalisierung von Kulturgut und der Dokumentation historischer Sachverhalte ist aber auch von einer anderen Art des Modells die Rede. Gemeint ist das Datenmodell, also eine Festlegung, welche Daten in welcher Form und Zusammenstellung erhoben, gegliedert, gespeichert und logisch miteinander verknüpft werden, um Objekte und Sachverhalte effektiv zu beschreiben. Bei diesem auch als Modellierung bezeichneten Prozess geht es in der Regel um eine Art Schema, mit dem man viele Objekte nach der gleichen Struktur beschreiben kann. Nur wenn eine solche systematische Struktur vorhanden ist, ist ein Vergleichen von Objekten oder ein Suchen nach bestimmten Kriterien möglich.

Die beiden **Modelle** scheinen zunächst wenig miteinander zu tun zu haben, insbesondere wenn man sich die sprachpraktische Situation ansieht, die gerade auch innerhalb der Digital Humanities gelegentlich Merkmale des Aneinander-Vorbeiredens hat. Ein Computerlinguist oder ein Architekturhistoriker beziehen sich mit dem Wort **Modell** und **Modellieren** auf völlig unterschiedliche Arbeitsgebiete, die aber möglicherweise doch enger verwandt sind, als es den Sprechenden jeweils bewusst ist.

Nicht zuletzt weil der Ausdruck **Modell** auch in seinen sonstigen Bedeutungen zu vielfältig ist, beansprucht der Beitrag keine definitive lexikalische und inhaltliche Klärung. 01 Aber er möchte die These aufstellen, dass sich zwei sehr unterschiedliche, jedoch gleichermaßen im Kulturerbe-Bereich relevante Bedeutungen des Wortes **Modell** gerade im digitalen Format nicht nur berühren, sondern in ihrer Verbindung ein überaus vielversprechendes Arbeitsgebiet bilden. 02

■ 01
Etymologisch betrachtet geht das Wort »Modell« auf lateinisch »modulus« zurück. Im architektonischen Kontext wurde es erstmals in Vitruvs Werk »De architectura« verwendet, dort allerdings noch stärker an die lateinische Grundbedeutung (»Maß, Maßstab«) angelehnt: Es bezeichnet bei Vitruv eine Grundeinheit, aus welcher sich die Bemessungen sämtlicher Teile eines Bauwerks durch Multiplikation und Division ableiten lassen. Eine der ersten systematischen Darstellungen des Themenfeldes Modell stammt von Herbert Stachowiak, Allgemeine Modelltheorie. Wien, New York 1973.

■ 02
Inge Hinterwaldner hat in ähnlicher Weise den engen Zusammenhang zweier Modelltraditionen — hier auch als computer model vs. computational model bezeichnet — dargestellt (Inge Hinterwaldner, das Systemische Bild-Ikonizität im Rahmen computerbasierter Echtzeitsimulationen, München 2010, S. 181–187).

F.1 Das abbildende Modell

Das abbildende Modell lässt sich am anschaulichsten ausgehend vom Architekturmodell 03 erklären. Architekturmodelle sind verkleinerte Repräsentationen von Bauwerken mit dem Ziel, diese in einem handhabbaren Maßstab und ortsunabhängig verfügbar zu haben. Häufig handelt es sich dabei um Modelle für Entwürfe, also für erst zu errichtende Bauten. Modelle zur Vorbereitung von eigentlichen Werken gibt es auch in anderen Bereichen der Kunstproduktion, so etwa den Bozzetto des Bildhauers oder die Skizze des Malers. Das Architekturmodell ist für die (hier in erster Linie interessierende) kulturhistorische Perspektive deswegen besonders relevant, weil es sich in der Regel um ein Modell von singulären, konkret situierten Gegenständen handelt. 04 Ein weiterer interessanter Aspekt der Architekturmodelle besteht darin, dass sie durch die Digitalisierung eine enorme Relevanzsteigerung erfahren haben. Die Zusammenführung des klassischen Architekturmodells, das bislang vorwiegend anschaulichen und allgemein städtebaulichen Zwecken diente, mit der Architekturzeichnung, die als eigentlicher Informationsträger sowohl für die Planung als auch für die Bauaufnahme fungierte, schuf ein neues Format, das digitale Modell, dessen praktisches Potenzial für die historischen Kulturwissenschaften trotz punktueller Adaptionen — vor allem in der Archäologie und der Bauforschung — insgesamt noch nicht ausreichend wahrgenommen wurde. Von besonderem Interesse ist dabei, dass sich in der Architekturpraxis unter dem Konzept des Building Information Modeling (BIM) inzwischen komplexe Datenmodelle und Workflows etabliert haben, mit denen nicht mehr nur Architekturmodelle erzeugt werden, die einen einzigen Zustand der Fertigstellung (im Fall einer Planung) oder den Zustand zum Zeitpunkt der Bauaufnahme darstellen, sondern Zeitschichten dynamisch repräsentieren können. 05

Unter den theoretischen Fragen, die im Zusammenhang mit Modellen diskutiert werden, nehmen die nach der Beziehung zur Realwelt und insbesondere nach dem Abbildcharakter großen Raum ein 06, auch wenn sie zunehmend kritisch diskutiert werden. Schon Wartofsky stellte fest, dass Modelle nicht intrinsisch, sondern durch Bezugnahme Modelle sind. Einen besonders überzeugenden Ansatz zu einer universellen Modelltheorie bietet Bernd Mahr, indem er das Problem der Modelldefinitionen durch einen eher funktionalen Ansatz löst: Das Modell wird durch Auffassungsakt zum Modell. Das bedeutet, je nachdem, aus welcher Perspektive man es sieht bzw. wofür man etwas einsetzt, kann nahezu alles ein Modell von etwas anderem sein. 07 Nach diesem Verständnis hat jedes Modell auch in unterschiedlichen Anteilen eine Von- und Für-Beziehung zum Gegenstand oder ein Konzept, auf das es sich bezieht. Dieses Beziehungsgeflecht versuchte Mahr in einem Konzept des **Modell des Modellseins** festzuhalten. 08

Wir bleiben hier aus Gründen der Anschaulichkeit bei einem vergleichbar statischen Modellbegriff und konzentrieren uns auf die abbildenden Aspekte von Modellen. Dabei gehen wir davon aus, dass ein abbildendes Modell immer Räumlichkeitsaspekte, entweder im Sinn konkreter Größen- und Raumangaben (als maßstäbliches Modell oder als Zeichnung) oder im Sinn relativer Raumangaben (einschließlich der nichtmaßstäblichen

■ 03
Überwiegend wird das Architekturmodell als Entwurfsmodell gesehen, auch wenn selbst beim Entwurfsmodell eine Gegenwart oder Vergangenheit der Zukunft enthalten ist (vgl. Beitrag Wendler (→ 125). Zur Geschichte des Architekturmodells s. Andres Lepik, Das Architekturmodell in Italien, Worms, 1994; hier wird der Zusammenhang mit digitalen Repräsentationen noch nicht gesehen. Zur Geschichte des digitalen Architekturmodells ist die Veröffentlichung von Heike Messemer: Entwicklung und Potentiale digitaler 3D-Modelle historischer Architektur. Kontextualisierung und Analyse aus kunsthistorischer Perspektive, Diss. 2018 München, angekündigt. Siehe auch den Beitrag von Messemer (→ 059) in diesem Band.

■ 04
Einzuschränken ist das, wenn bei Planungen von Typenbauten die Bindung an ein bestimmtes Objekt und einen bestimmten Ort aufgehoben ist. Dies ist auch bei Konstruktionsdetails der Fall, die sich dann eher auf serielle Lösungen als ein konkretes Objekt beziehen.

■ 05
Der Terminus Building Information Modeling wurde von der CAD-Software-Firma Autodesk geprägt und bezeichnet ein Verfahren, in dem die verschiedenen Elemente eines Bauwerks dreidimensional mit zahlreichen Metadaten und zugleich parametrisch gehandhabt werden. In diesem Modell lassen sich die Standzeiten bzw. Wartungs- und Austauschintervalle von Bauteilen im Vorhinein festschreiben, aus Messdaten immer wieder aktualisieren oder Maßnahmen rückwirkend dokumentieren; vgl. Bob Martens & Peter Herbert (→314)

Darstellungsform eines Bildes oder gar der diagrammatischer Reduktion) besitzt. Bekanntermaßen wird in den historischen Kulturwissenschaften in großem Umfang mit solchen abbildenden Modellen gearbeitet. Disziplinen wie die Kunstgeschichte basieren geradezu auf dem Vorhandensein von Abbildungen ihrer Gegenstände. Im weitesten Sinn können alle Formen von Abbildungen von Artefakten, einschließlich Fotografie oder Schemazeichnungen, als Modelle gesehen werden 09. Der Einfachheit halber sei im Folgenden immer an ein räumliches maßstäbliches Modell gedacht.

In den Bildwissenschaften herrscht derzeit eine Tendenz zur Ablehnung abbildender Aspekte zugunsten der Betonung funktionaler Aspekte oder gar Aktionspotenziale von Bildern und Modellen. Damit ist nicht nur die typische Rolle des Modells als Entwurfsinstrument, das beachtliches Beeinflussungspotenzial bei einem Bauprojekt haben kann, gemeint, sondern generell eine Interaktion provozierende Charakteristik oder gar **Eigensinnigkeit** von Modellen, die vor dem Hintergrund Bredekamp'scher Theorien des agierenden Bildes (**Bildakt**) zu sehen ist. 10 Mit den hier vorgestellten Überlegungen soll das Interaktionspotenzial von Modellen keineswegs negiert werden, jedoch zugunsten des Abbildungsaspekts — bzw. weiter gefasst: Repräsentationsaspekts — nicht im Vordergrund stehen. Letzterer ist auch für die Interaktion entscheidend, wie Inge Hinterwaldner bemerkte:

> »Die repräsentierende Seite unterscheidet sie von gewöhnlichen Instrumenten. Mit Modellen erreicht man in Analogie Phänomene, die sonst Eingriffen entrückt blieben, weil sie zu groß bzw. klein, langsam bzw. schnell, teuer oder gefährlich wären. Dies bedeutet, sie sind auf eine Handhabbarkeit und das anthropomorphe Maß hin orientiert. Sie befördern und befeuern Interaktionen, laden zum Probieren ein« 11

Das in den Naturwissenschaften verbreitete vergrößernde Modell (man denke etwa an das Bohr'sche Atommodell, die DNA-Doppelhelix von Watson / Crick, oder Insektenmodelle in Lehrsammlungen), das oft kein konkretes Objekt, sondern lediglich einen Typus abbildet, spielt im Bereich des Kulturerbes kaum eine Rolle. Kunsthistorische Artefakte sind per se zur visuellen Erfassung konzipiert und müssen als Ganzes nur selten vergrößert werden. Nur wenn es um sehr kleine Werke, etwa Gemmen, Münzen und Miniaturen, oder Teilaspekte geht, etwa Farbschichten, kommen vergrößernde Abbildungen zum Einsatz. Kunstwerke müssen zur Betrachtung jedoch oft verkleinert und schematisiert werden. Das beginnt bei Gemälden und Skulpturen, die sich in verkleinernden Fotografien besser vergleichend betrachten lassen, und endet bei Architektur in städtebaulichen Dimensionen, die im Original und aus der Nähe nicht mehr erfasst werden kann. Im digitalen Modell ist dabei die Bindung an einen bestimmten Maßstab aufgehoben. Da die digitale Repräsentation ohnehin eine Medienumgebung zur visuellen Umsetzung benötigt, kann sie sowohl in Verkleinerung gegenüber dem Original als Gesamtheit visualisiert werden, als auch — wenn die entsprechen-

■ 06
Die Problematik des Verhältnisses von Modell und Bild wurde beispielsweise diskutiert von Bernd Mahr, Cargo — Zum Verhältnis von Bild und Modell, in: Ingeborg Reichle, Steffen Siegel und Achim Spelten (Hg.): Visuelle Modelle, München 2008, S. 17–40, hier S. 25, der konstatiert, dass Modelle auch Bilder sein können und umgekehrt. Mahr unterscheidet zwischen »Modellsein« und »Bildsein«, macht diesen Unterschied jedoch vorwiegend von dem pragmatischen Kontext und der daraus folgenden epistemischen Umgebung abhängig. Gottfried Boehm, Ikonisches Wissen. Das Bild als Modell, in: Ders., Wie Bilder Sinn erzeugen. Die Macht des Zeigens, Berlin 42015, S. 114–140, unterscheidet zwischen simulativen Modellen und heuristischen Modellen, deren entscheidende Wirkmacht in ihrem Verweischarakter gesehen wird. Zum Verhältnis von Modellen und Bildern in Entwurfsprozessen vgl. Sabine Ammon, Inge Hinterwaldner (Hg.), Bildlichkeit im Zeitalter der Modellierung. Operative Artefakte in Entwurfsprozessen der Architektur und des Ingenieurwesens, München 2017.

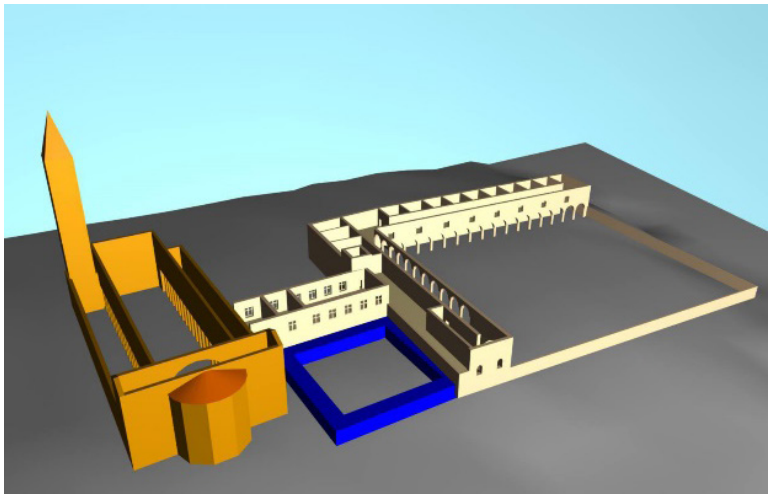
■ 07
Marx William Wartofsky, Models. Representation and the Scientific Understanding, Dordrecht, Boston, London 1979, Mahr 2008a und Bernd Mahr, Ein Modell des Modellseins — Ein Beitrag zur Aufklärung des Modellbegriffs, in: Ulrich Dirks und Eberhard Knobloch (Hg.), Modelle, Frankfurt am Main u. a. 2008, S. 187–218. Diesen Ansatz verfolgen u. a. Wendler und Hinterwaldner weiter.

■ 08
Mahr 2008b.

den Daten vorhanden sind — in Originalgröße oder weiter vergrößert betrachtet oder vermessen werden. Im letzteren Fall dient das Modell bereits als Datenspeicher und wird nicht mehr ausschließlich visuell rezipiert.

Wie beim materiellen Modell liegt auch beim digitalen Modell eine über die unmittelbare Abbildung hinausgehende Funktion darin, angenommene Situationen und Zustände, bspw. die Positionierung von erhaltenen Bestandteilen (bzw. deren entsprechenden Nachbildungen), auszuprobieren. Modelle von Bauwerken und städtebaulichen Situationen dienen als Grundlage für die Rekonstruktion von Raumnutzungen, wie etwa Zeremonien und Liturgien, oder akustischen Verhältnissen. Das Modell kann als eine Art **Spielwiese** kulturhistorischer Forschung fungieren, auf der vergangene oder auch in der Vergangenheit geplante Zustände und Nutzungen insbesondere hinsichtlich ihrer räumlichen Verhältnisse hypothetisch simuliert werden. Grundsätzlich ist Derartiges auch im materialgebundenen Modell möglich 12, jedoch meist zu aufwendig, da unterschiedliche Zeitzustände oder Varianten jeweils die Herstellung eines neuen oder gegebenenfalls stark veränderten Artefakts erforderten. Ähnlich wie in den Naturwissenschaften und der Medizin spielen Simulationen, teils in Echtzeit, zunehmend eine Rolle, wenngleich im Kulturerbe-Bereich die Blickrichtung fast immer die des rückwärtsgewandten Nachvollzugs ist — entweder zur Rekonstruktion vergangener (teils bis heute anhaltender) Zustände oder zur Rekonstruktion in der Vergangenheit geplanter Projekte. 13 Nicht zuletzt bieten sich im digitalen Modell weitaus mehr Möglichkeiten zur kollaborativen Arbeit. Diese werden derzeit jedoch bei Weitem nicht ausgeschöpft, weil sowohl die technischen Infrastrukturen als vor allem auch die Forschungskulturen in den Geisteswissenschaften darauf noch nicht eingestellt sind.

Das abbildende digitale Modell kann auf verschiedene Weise entstehen. In der architektonischen und baugeschichtlichen Praxis wird relativ streng zwischen dem **gebauten** und dem **gescannten** Modell, üblicherweise einerseits als **Rekonstruktion** und andererseits als **Digitalisierung** bezeichnet, unterschieden. Dies ist hinsichtlich der grundsätzlichen Differenzen in den Verfahren — im einen Fall automatisches Erfassen von Vorhandenem mit Scannern, im anderen Fall manuelles Konstruieren 14 — berechtigt. Während ein Scan zunächst **bedeutungslose** Messpunkte erzeugt, basiert das gebaute Modell auf gewählten, nach bestimmten Regeln angelegten Vektorelementen. 01



□ 01
Räumlich-visuelles Modell. Einfaches, aber maßhaltiges Architekturmodell des Papstpalastes bei S. Maria Maggiore in Rom im Zustand von ca. 1450, erstellt auf der Basis von Bauaufnahmen, Bild- und Schriftquellen. (Georg Schelbert 2002)

■ **09**
Die Rolle der Fotografie in der Kunstgeschichte und anderen kulturhistorischen Wissenschaften wurde in den letzten Jahren intensiv untersucht, vgl. dazu u. a. Lorraine Daston, Peter Galison, Das Bild der Objektivität, in: Peter Geimer (Hg.), Ordnungen der Sichtbarkeit: Fotografie in Wissenschaft, Kunst und Technologie, Frankfurt am Main 2002, S. 29–99, Angela Matyssek, Kunstgeschichte als fotografische Praxis. Richard Hamann und Foto Marburg, Berlin 2009. Weniger gesehen wurde hingegen eine Kontinuität zwischen dem bildgebenden Verfahren der Fotografie und digitalen Repräsentationen im weitesten, also auch jede Art von Modell einschließenden Sinn.

■ **10**
Zum Bildakt: Horst Bredekamp, Der Bildakt. Frankfurter Adorno-Vorlesungen 2007, Neufassung 2015, Berlin 2015. Zu einer Theorie des eigensinnigen Modells: Horst Bredekamp, Darwins Korallen. Frühe Evolutionsmodelle und die Tradition der Naturgeschichte, Berlin 2005; Reinhard Wendler, Das Modell zwischen Kunst und Wissenschaft, Paderborn/ München 2013; Inge Hinterwaldner, Prolog: Modellhaftigkeit und Bildlichkeit in Entwurfsartefakten, in: Sabine Ammon / Inge Hinterwaldner (Hg.), Bildlichkeit im Zeitalter der Modellierung. Operative Artefakte in Entwurfsprozessen der Architektur und des Ingenieurwesens, München 2017, S. 13–30.

Dieser Unterschied entspricht demjenigen zwischen einer Vektorgrafik und einer Rastergrafik. Aber es gibt auch Überschneidungen und die Betonung der Differenzen ist eher disziplinärer, gelegentlich auch disziplinlegitimierender Natur. Aus einer eher konstruktionsbezogenen Perspektive sind eher klar definierte Elemente, die im Modell gebaut werden, von Interesse, während eine formbezogene Perspektive vor allem an der Summe aller oberflächlich wahrnehmbaren Elemente wie sie der Scan liefert und aus der erst im Nachhinein Schlüssel gezogen werden, interessiert ist. In der Praxis ist oft eine Mischung der beiden Verfahren des Bauens und des Scannens festzustellen, sodass die Unterscheidung eher als graduell anzusehen ist. [15] Auch ein weitgehend von einer Maschine ausgeführter Scan impliziert — neben der Struktur der Maschine selbst — gewisse Voreinstellungen wie Dichte und Lage der Abtastung. Das **Bauen** von Modellen wiederum basiert auf entweder ebenfalls durch Messungen am Original erhobenen oder aus anderen Quellen entnommenen Maßen. In vielen Fällen sind bei der Rekonstruktion eines Bauwerks oder eines sonstigen Objekts Teile desselben vorhanden, die durch **gebaute** Anteile ergänzt werden, sodass wiederum beide Vorgehensweisen zum Tragen kommen. Auf der Ebene der sprachlichen Darstellung von Objekten könnte das zeichnende **Bauen** mit einem strukturierten Beschreiben verglichen werden, während das **Scannen** mit einem (automatischen) Auslesen von Merkmalen aus Textquellen gleichzusetzen wäre.

Die Auffassung des digitalen Modells als etwas über das Visuelle Hinausgehendes ist vor allem auch deswegen geboten, weil nicht nur die Sensorik der Erhebung durch technische Entwicklungen — Kameras, Lasermessgeräte, aber auch das Internet und die Möglichkeiten, darin publizierte Daten auszulesen — gewachsen ist, sondern die Messdaten im digitalen Format auch direkt gespeichert werden können. [16] Die Modelle sind daher zunächst Daten, die auf denkbar verschiedene Weise nachgenutzt werden könnten.

Wenn ein Objekt digital gescannt oder fotografiert wurde, tritt eine Rückbindung an die materiell-visuelle Welt erst dann wieder ein, wenn das repräsentierte Objekt als Bild oder Film betrachtet, als Objekt berührt oder auf andere Art sinnlich wahrgenommen werden soll und dafür entweder auf einem Bildschirm oder einem anderen visuell wahrnehmbaren Gerät angezeigt oder gar erneut dreidimensional ausgedruckt wird. [17] Auch wenn in der archäologischen und kunsthistorischen Arbeitspraxis — neben Beschreibungen in Textform — die bildliche Wiedergabe des Gegenstands eine herausragende Rolle spielt, ist das sichtbare Bild, also die Wiedergabe der Oberflächenerscheinung im für das menschliche Auge wahrnehmbaren Farbspektrum, nur **eine** der gegebenen Möglichkeiten der digitalen Repräsentation. Sie kann durch Materialanalysen oder weitere bildgebende Verfahren, die sich auf nicht sichtbare Bereiche beziehen, wie etwa Infrarotreflektografie oder Röntgenaufnahmen, ergänzt werden. [18]

In den historischen Kulturwissenschaften ist zumeist nicht nur die Dokumentation der Gegenstände selbst gefragt, sondern auch die ihres Kontexts, beispielsweise die Entstehungs- oder Restaurierungsgeschichte, oder — insbesondere bei Objekten mit Bildcharakter — die Aussageinhalte. Da solche mittelbaren **Eigenschaften** und **Inhalte** der Objekte nicht direkt — etwa im Sinn des Scannens — in digitale Formate verwandelt werden können, müssen

■ **11**
Ammon / Hinterwaldner 2017, S. 17.

■ **12**
Bereits im analogen, materiegebundenen Modell, sind mehrschichtige Zeitaspekte enthalten, vgl. Wendler in diesem Band.

■ **13**
Vgl. hierzu zuletzt Peter H. Jahn et al., Back to the Future, in: Stephan Hoppe und Stefan Breitling (Hg.): Virtual Palaces, Part II, arthistoricum.net, 2016, https://doi.org/10.11588/arthistoricum.83.79; Sander Münster et al., Von Plan- und Bildquellen zum virtuellen Gebäudemodell, in: Ammon / Hinterwaldner 2017, S. 255–287.

■ **14**
Derartiges reklamiert ausdrücklich die architektonische Teildisziplin Gestaltung, wie sie von Lengyel / Toulouse vertreten wird (vgl. Dominik Lengyel, Die Bauphasen des Kölner Domes und seiner Vorgängerbauten: Gestaltung zwischen Architektur und Diagrammatik, in: Dietrich Boschung, Julian Jachmann (Hg.), Diagrammatik der Architektur, München 2013, S. 327–352). Zu den durch das digitale Modell hervorgerufenen methodologischen Veränderungen in der Bauforschung s. z. B. Alexandra Riedel, Frank Henze, Andreas Marbs, Paradigmenwechsel in der historischen Bauforschung? Ansätze für eine effektive Nutzung von 3D-Informationen, in: Katja Heine u. a. (Hg.), Erfassen, Modellieren, Visualisieren. 3D in der historischen Bauforschung. Von Handaufmaß bis High Tech III. Darmstadt, Mainz 2011, S. 131–141.

■ **15**
Vgl. 14 und außerdem Ingeborg Reichle, Die Wirklichkeit visueller Modelle, in: Ingeborg Reichle, Steffen Siegel und Achim Spelten (Hg.), Visuelle Modelle, München 2008, S. 9–16, und Jens Schröter, 3D. Zur Theorie, Geschichte und Medienästhetik des technisch-transplanen Bildes, Paderborn, München 2009.

sie in intelligiblen Formaten herausgemessen und nachgebildet bzw. konstruiert werden. Das Digitalisieren von Artefakten ist daher immer eine weitreichende und interpretierende Transformation, sei es im Sinne des Untergliederns des Gegenstands, der Auswahl der zu erfassenden oder zu beschreibenden Eigenschaften oder des Verknüpfens mit weiteren Informationen. 19 Die Grenze zwischen der Extraktion von Eigenschaften eines Artefakts und dem Herantragen von Aussagen an dasselbe ist fließend.

Aus diesem Grund ist ein digitales Modell, das sich auf historische Artefakte bezieht, immer auch Teil eines großen gedanklichen Universalmodells. Ein solches besteht zumindest aus dem Konzept von Zeit und Raum sowie Kulturepochen oder anderer kultureller Kontrukte, ganz gleich, wie dicht diese tatsächlich mit Daten gefüllt sind, und ganz gleich, ob das Modell folglich eine konkret abbildende oder eine nur kartografische oder diagrammatische Qualität hat. 20 Die Materielosigkeit des digitalen Formats ermöglicht, dass dieses übergreifende Modell mit überschaubaren Mitteln gebildet werden kann. So ist das digitale Modell eines historischen Bauwerks in zeitlicher Hinsicht potenziell Teil einer universellen kulturgeschichtlichen Zeitschiene und in räumlicher Hinsicht Teil einer ganzen Stadt. Das digitale Modell könnte — sofern von Interesse — mit einem digitalen Modell des Erdglobus oder des Universums verbunden werden. Auch die digitale Repräsentation einer Skulptur oder eines Gemäldes ist — zumindest dann, wenn diese Repräsentation auch Daten zum Kontext des materiellen Objekts, seinem Standort und seiner Geschichte umfasst — Teil einer Sammlung, eines Museums und damit potenziell Teil der Repräsentation aller Sammlungen in Raum und Zeit. Was in einer Welt analoger, materieller Modelle — seien sie nun Fotografien oder Gipsabgüsse — absurd und unmöglich erscheint, ist im digitalen Format potenzielle Realität. Google Art&Culture etwa, zumal im Kontext von Google Maps und Street View, führt das bereits anschaulich vor Augen. 21

16
Lena Bonsiepen, Wolfgang Coy, Blicke auf das Digitalisat in der Sammlungserschließung, in: DHd- Digital Humanities im deutschsprachigen Raum, http://dhd-wp.hab.de/?q=content/blicke-auf-das-digitalisat-der-sammlungserschlie%C3%9Fung.

17
Mit der Möglichkeit, dass Menschen Zahlen und quantitative Informationen direkt — etwa über eine Schnittstelle zum Gehirn — verarbeiten können, ist vorerst nicht zu rechnen.

18
Vgl. das Bosch Project, bei dem fotografische Wiedergaben mit infrarotreflektografischen Aufnahmen direkt verglichen werden können. Das Objekt der Bildtafeln wird also gleichzeitig durch Bilder des normalen Wahrnehmungsspektrums wie durch in Schwarzweißwerte übersetzte Bilder im Infrarotbereich repräsentiert, http://boschproject.org/.

19
Ausschließlich automatisch erzeugte Wissensermittlung (Semantic Web) bleibt immer unbefriedigend. Aufgrund der Beschränkungen der Maschinenkapazitäten und der möglichen Komplexität logischer Operationen sollte — mit Gradmann — eher von einem »transactions web« oder einem »logic web« die Rede sein (vgl. z. B. Stefan Gradmann, Signal, Information, Zeichen. Zu den Bedingungen des Verstehens in semantischen Netzen, in: LIBREAS. Library Ideas 14 (2009)), S. 44–52.

20
Man stelle sich hierzu Umgebungen wie Google Maps oder — für das Universum — Stellarium vor, in einen präexistenten euklidisch gedachten Raum in unterschiedlicher Dichte Objekte eingehängt sind.

21
Das Google Cultural Institute bietet unter der Überschrift »Google Arts & Culture«, https://artsandculture.google.com/.
Vgl. auch 20.

F.2 Das konzeptionelle Modell

Ohne ein Set aus Vorannahmen, Fragestellung und definierten Verfahrensschritten lassen sich Ergebnisse, die durch den Einsatz eines Rechners erzielt werden, in der Wissenschaft nicht nutzbar machen. In den Natur- und Sozialwissenschaften werden Ergebnisse zumeist in Form eines Experiments oder einer Simulation erzeugt. In den historischen Kulturwissenschaften ist ein solches Vorgehen nur in wenigen Bereichen ohne größere Schwierigkeiten möglich. Es sind hier vorwiegend die Sprach- und Literaturwissenschaften, vor allem insofern sie direkt mit einer Textbasis arbeiten, die bislang den Rechner einsetzen. Zwar sind die Inhalte von Literatur — etwa eines Romans — selbstverständlich ebenfalls nicht ohne Weiteres quantitativ zu erfassen, aber der zugrunde liegende Text ist zumindest auf der Zeichenebene vergleichsweise einfach zu verarbeiten. Man kann beispielsweise statistische Stilanalysen (sog. Stilometrie) einer Epoche oder eines Autors unter Zugrundelegung eines definierten Modells betreiben. Das zugrunde liegende Modell enthält dabei nicht nur das Verfahren selbst (also etwa Worthäufigkeiten oder Wortkombinationen, die nach bestimmten Parametern definiert sind), sondern auch Festlegungen bzw. Vorannahmen zur Textstruktur oder zum Wortgebrauch in einer bestimmten Periode oder dergleichen.

In den Digital Humanities, wie das übergreifende Feld eines methodischen Einsatzes von Rechnern auf dem Gebiet der Geisteswissenschaften nunmehr genannt wird, spielen diese Modelle eine entscheidende Rolle. Sie definieren den methodischen Charakter der Arbeit und bedingen deren Ergebnisse. Digital Humanities können daher geradezu als Theorie und Praxis der Modellierung verstanden werden. 22

Dass Arbeitsgebiete wie die Architektur- und Kunstgeschichte und die Archäologie es deutlich schwerer haben, sich als Teil der Digital Humanities im engeren Sinn zu definieren, liegt wohl nicht zuletzt daran, dass sich eine verfahrensorientierte Methodologie bei Gemälden oder Bauwerken nicht ohne Weiteres anwenden lässt. Vor der Analyse nach einem formalisierten Verfahren steht hier erst die Erzeugung formal strukturierter Daten, die aus den oft heterogenen und vielteiligen Gegenständen extrahiert werden müssen. Ein Gemälde, eine Statue oder ein Bauwerk bieten von sich aus kaum Vorgaben für das — zunächst in Sprachform — zu erstellende konzeptionelle Modell. Sobald das Objekt im digitalen Format repräsentiert wird, ist ein solches aber unabdingbar. Es stellt sozusagen die allgemeine Beschreibung dieser Repräsentation dar. So ist es unmittelbar einleuchtend, dass bereits einer einfachen Abbildung eines Gegenstands ein **Modell** zugrunde liegen muss, etwa das des dreidimensionalen Raums oder das der Perspektivprojektion. Im digitalen Format besteht zudem die grundsätzliche Anforderung, die im Raum vorhandene analog-kontinuierliche Welt in diskrete Einzelheiten zu zerlegen, die der Computer berechnen kann. Würde beispielsweise kein konsistentes dreidimensionales Koordinatensystem als abstraktes Modell vorausgesetzt, könnten keine geschlossenen Formen gezeichnet bzw. die einzelnen Elemente einer **Punktwolke** nicht ihren genauen Positionen im Raum zugeordnet werden.

22
Michael Piotrowski, Digital Humanities, Computational Linguistics, and Natural Language Processing, Uppsala, 4. März 2016, S.7), vgl. auch Fotis Jannidis, Hubertus Kohle, Malte Rehbein (Hg.), Digital Humanities. Eine Einführung, Stuttgart 2017, S. 107: »Insgesamt kann man kaum überschätzen, wie wichtig Datenmodelle und die Datenmodellierung für die Digital Humanities sind. Es gibt einflussreiche Stimmen, die sie für den Kern der Digital Humanities halten [...], da die Modellierung der Punkt ist, wo das geisteswissenschaftliche Verständnis eines Weltausschnitts und die Kompetenz zur formalen Modellierung zusammentreffen und im besten Fall neue Fragestellungen und neue Forschungen ermöglichen.«

Ebenso unabdingbar wie der Raum ist in der kulturhistorischen Forschung — wie bereits mehrfach erwähnt — der Zeitfaktor. Ein Modell, das den Zeitfaktor dynamisch wiedergibt, wird als Simulation bezeichnet. 23 Ähnlich wie der Detailgrad in der Raumdarstellung könnte dieser theoretisch beliebig verfeinert werden. Während in der historischen Forschungspraxis die Quellenlage meist nur punktuelle Angaben ermöglicht (bspw., dass eine Skulptur zu diesem und jenem Zeitpunkt fertiggestellt wurde oder den Standort wechselte), ist theoretisch und bei entsprechender Datenlage eine Modellierung in kleinsten Zeitschritten denkbar. Derartiges findet bereits bei der Echtzeit-Erfassung und Visualisierung von Mobiltelefon-Standorten oder bei der Verkehrsüberwachung statt und wird nicht zuletzt im Zuge der Automatisierung des Straßenverkehrs wohl bald zu einer Selbstverständlichkeit werden; Auswirkungen auf kulturhistorische Anwendungen sind zu erwarten.

Im kulturhistorischen Kontext soll das Modell nicht nur die räumliche Ausdehnung und die Zeitlichkeit des Originals definieren, sondern weitere Qualitäten und Eigenschaften wie Materialität, Form, Typologie, Funktion etc. repräsentieren. Wissenschaftliche Dokumentation und Reflexion erfordert schließlich auch noch die Angabe des Wahrscheinlichkeitsgrads der zugrunde liegenden Informationen. Gerade die letzteren Aspekte unterscheiden sich von einfachen messbaren Größen wie Ausdehnung und Zeitpunkt und stellen konzeptuelle Aspekte dar, die von jeweils disziplinspezifischen Ordnungssystemen und Taxonomien bestimmt sind. 24

Die konzeptionellen Modelle können sich grundsätzlich unterscheiden, wie beispielsweise im Fall eines geografischen und eines architektur- oder kunsthistorischen Ansatzes. Digitale Karten und die zugrunde liegenden GIS-Daten als typische Form geografischer Dokumentation (und **Modellierung**) basieren vor allem auf einem Konzept räumlich-flächenhafter Elemente (in Form der sog. Shapefiles), die durch zumeist streng klassifizierte konzeptuelle Metadaten inhaltlich aufgeladen werden. 25 Flächendeckend vorhandene und vergleichbare Werte haben hier Vorrang vor der differenzierten Beschreibung von Einzelobjekten. 26 Auf dieser Grundlage lässt sich mit Verteilungsgrößen und anderen statischen Methoden arbeiten. 27 Bei den mit Artefakten arbeitenden historischen Kulturwissenschaften steht hingegen die Bildung eines geschlossenen Korpus, das dann quantitativ befragt werden kann, allenfalls am Ende eines oftmals komplexen Prozesses der Datenerzeugung. Zumeist kommt es jedoch gar nicht bis zur Erstellung eines abgeschlossenen Bestands und zu dessen Auswertung. Das Ziel wird in der Regel sein, das Modell für die Datenerzeugung so allgemein wie möglich und so spezifisch wie nötig zu halten, um eine Anschlussfähigkeit gegenüber eventuellen anderen Modellen zu ermöglichen. Erst die Verallgemeinerung der Konzepte zur Datenerzeugung macht diese zu konzeptionellen Modellen. De facto unterscheiden sich diese jedoch selbst bei gleichen Gegenstandsgattungen stark. So sind Beschreibungsmodelle von Kunstwerken immer noch weder national noch international vereinheitlicht. Dabei gehören sie als solche bereits der vordigitalen Zeit an, denn formalisierte Erfassungs- und Beschreibungsmethoden sind keineswegs an digitale Technologien gebunden, sondern wurden schon in vordigitalen Zeiten angewandt. Die bereits seit Langem übliche Form der Beschreibung von Kunstwerken nach Datierung,

23
Vgl. Sander Münster (→039) & Erik Malcolm Champion (→338) in diesem Band.

24
Zur Unterscheidung dieser beiden Anteile vgl. Nicolas Camerlenghi, Georg Schelbert, Learning from Rome: Making Sense of Complex Builtscapes in the Digital Age, in: JSAH 77.3. Bei der Anwendung fach- oder disziplinspezifischer Modelle spricht man von Domänenmodellen bzw. nach Eric Evans, Domain-Driven Design. Tackling Complexity in the Heart of Software, Boston u. a. 2003 von Domain-driven Design (DDD).

25
In der Tradition der Kartografie werden die Inhalte in der Regel streng klassifiziert und mit kodifizierten Flächenkennzeichnungen und Signaturen versehen.

26
Trotz einer Erweiterung hin zu einer raumzeitlichen Dokumentation (vgl. Thomas Ott, Frank Swiacny, Time-integrative GIS. Management and analysis of spatio-temporal data, Berlin / Heidelberg/New York 2001) bleibt die Karte mit ihren Flächeneinheiten in den GIS-Systemen noch die Basisgröße. Zu den jüngsten Erweiterungen des Konzepts unter den Schlagworten »thick mapping« oder »deep mapping« vgl. Todd Presner, David Shepard, Yoh Kawano, HyperCities — Thick Mapping in the Digital Humanities, Cambridge 2014 und David J. Bodenhamer, John Corrigan, Trevor M. Harris, Deep maps and spatial narratives, Bloomington 2011.

27
Diesbezüglich besteht eine Ähnlichkeit zu der Arbeit an Textkorpora in der Computerlinguistik, bei denen zwar keine Flächen oder andere räumliche Aspekte gegeben sind, aber definierbare Mengenanteile von Elementen innerhalb einer umgrenzten, mehr oder weniger homogenen Datenmenge, die einer solchen Fläche entspricht.

Gattung, ggf. Kunstlandschaft, Künstler und Ikonografie ist ein derartiges, freilich sehr allgemeines Modell. Formalisierte Beschreibungsmethoden bereiteten das algorithmische Berechnen mit dem Computer vor bzw. arbeiteten geradezu in Erwartung automatischer Rechenoperationen. Das trifft auf die seit den 1940er Jahren entwickelte Iconclass-Klassifikation für Bildinhalte 28 ebenso wie auf die etwa zur selben Zeit begonnene Kartei des **Census of Antique Works of Art Known in the Renaissance** zu. 29 Bereits zu einer Zeit, in der tatsächlich mit Computern gearbeitet wurde, jedoch vor der Etablierung des PC und des Internet, entstanden die **Categories for the Description of Works of Art** (CDWA) 30 und das Marburger System (MIDAS) zur Beschreibung von Kunstwerken aller Gattungen. 31 Diese und weitere, teils mit erheblichem institutionellem und finanziellem Aufwand eingeführten Beschreibungsschemata zeugen von der Bedeutung des Aufgabenfeldes der Objekterfassung bzw. — im Sinne unserer Überlegungen — der Modellerstellung oder digitalen Repräsentation, sie werden aber von der akademischen Fachwelt eher wenig wahrgenommen.

Das am weitesten ausgearbeitete Modell für die formale Repräsentation von Objekten und den mit ihnen verbundenen Sachverhalten stellt wohl das vom Comité International pour la DOCumentation (CIDOC) im internationalen Museumsverbund (ICOM) seit den späten 1990er Jahren entwickelte Conceptual Reference Model (CIDOC CRM) dar. 32 Als formales Wissensmodell handelt es sich um eine Ontologie im Sinn der Informatik. Derartige umfassende Wissensmodelle stellen nicht nur außerordentlich mächtige Rahmenkonzepte zur Beschreibung einer Realität dar, sondern sind auch die Voraussetzung für den Einsatz künstlicher Intelligenz. Nur bei Vorhandensein eines definierten Wissensmodells ist ein Schlussfolgern (Reasoning) denkbar, das über die in den vorhandenen Daten explizit festgehaltenen Sachverhalte hinausgeht. Mit den Möglichkeiten des Internets und Konzepten von Linked Open Data erweitern sich die Perspektiven auf diesem Gebiet zusätzlich. Aber auch für einfachere Anforderungen des Dokumentationswesens, etwa die Wiederauffindbarkeit von Daten oder die Relevanz von Suchergebnissen, ist ein zumindest minimales definiertes Wissensmodell bei der Katalogisierung notwendig. Mit dem CIDOC CRM können nun sowohl formale und materielle Eigenschaften als auch die historischen Begebenheiten minutiös **nachmodelliert** werden. Jedoch werden für einen in einem natursprachlichen Satz vergleichsweise einfach wirkenden Sachverhalt wie »Van Gogh schenkte das Gemälde ›Mandelblüte‹, das er 1890 gemalt hatte, seinem Bruder«, zahlreiche formalisierte Einzelaussagen notwendig, die wiederum untereinander zusammenhängen 02. 33

28
Iconclass ist eigentlich kein System zur Repräsentation von Bildobjekten, sondern von Konzepten, nämlich den Bildbedeutungen vorwiegend in der westlichen Kunst der Antike, des Mittelalters und der frühen Neuzeit. Damit lassen sich konzeptuelle Aspekte von Bildobjekten in formalisierter Weise benennen. Die Klassifikation steht online zur Verfügung, http://iconclass.org/.

29
Das heute »Census of Antique Art and Architecture Known in the Renaissance« genannte Projekt wurde 1946 am Londoner Warburg-Institut in Form von aufeinander referenzierenden Karteien begonnen, vgl. http://www.census.de/census/project. Derzeit wird das Projekt von der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften und der Humboldt-Universität zu Berlin getragen.

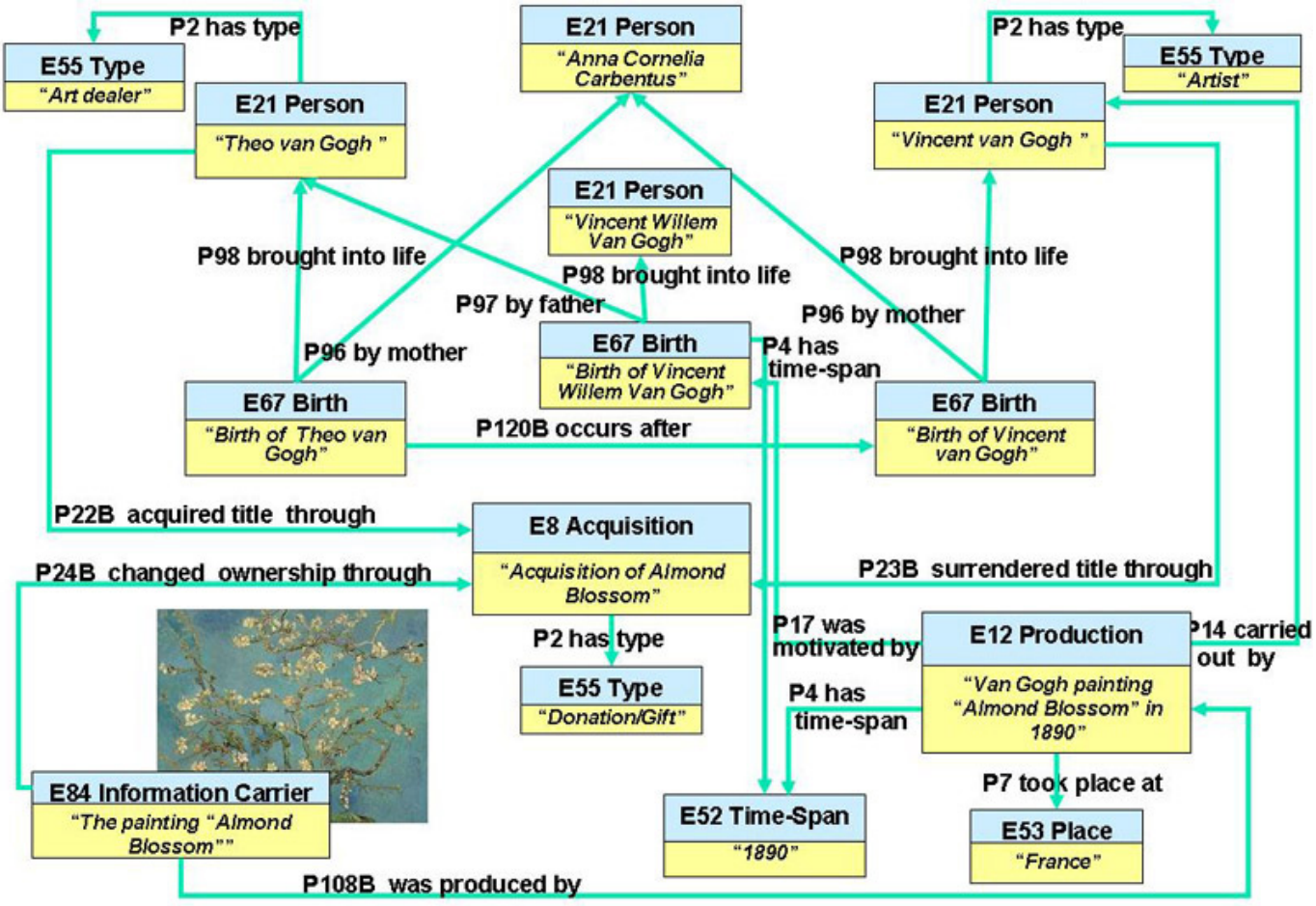
30
Categories for the description of work of art, http://www.getty.edu/research/publications/electronic_publications/cdwa/.

31
Überblick zur Geschichte von Midas und Diskus bei Fritz Laupichler, MIDAS, HIDA, DISKUS — was ist das?, in: AKMB-news 4.2–3 (1998), S. 18–24. Der Bildindex von Foto Marburg arbeitet noch heute auf der Basis von Midas.

32
Conceptual Reference Model, http://www.cidoc-crm.org/.

33
Vgl. Conceptual Reference Model, http://www.cidoc-crm.org/crm_core/core_virexamples/almond_blossom.htm.

☐ 02
Die Modellierung von Gegenständen und Sachverhalten nach einer definierten Ontologie: Die Mandelblüten von Van Gogh ausgedrückt im Cidoc CRM. (Cidoc CRM)



Für die Handhabung derart komplexer Aussagengeflechte waren lange Zeit kaum Softwareimplementierungen vorhanden. [34] Daher bestand die tatsächliche Bedeutung des CIDOC CRM bislang vor allem in der Funktion als Referenzontologie, die zum Austausch und Abgleich von Information diente, während für die Anwendung in der Sammlungspraxis abgeleitete, wieder **flach strukturierte** Metadatenschemata wie LIDO eingesetzt wurden, die letztlich nur Ausschnitte der Struktur des großen Wissensmodells CIDOC CRM repräsentieren. [35] Unternehmungen wie die Europeana versuchen weitere, mit CIDOC CRM kompatible und stärker den Praxisbedürfnissen angepasste Standards und Formate zu entwickeln. Mit derartigen Standards werden in formalisierter Weise bestimmte Grundmuster der Beschreibung historischer Sachverhalte nachgebildet, etwa **Person A hat Brief an Person B geschrieben**; **Person C hat Objekt D erworben Bauwerk E befand sich an Ort F** etc.

Durch die in gleicher Form organisierte Referenz auf jeweils zugrunde gelegte historische Quellen oder Forschungsmeinungen wird ein solches System zusätzlich in die Dimensionen wissenschaftlicher Dokumentation gebracht. [36]

Indem die Beschreibung von Sachverhalten hier auf Ereignisse fokussiert, kann auch die Zeitlichkeit als zentraler Aspekt modelliert werden. Im historischen Kontext tritt Zeitlichkeit eher als längere Zeitspanne auf (»Michelangelo hat die Figur des David von 1501 bis 1504 geschaffen«). Auf der Basis eines entsprechend differenzierten Datenmodells und hoher Datendichte wären schließlich auch Dokumentationen oder Simulationen möglich, die mit Zeitabläufen agieren. Während Vorhersagen einen eher randständigen Aspekt in der historischen Forschung ausmachen, hat Simulation jedoch durchaus eine Bedeutung für die rückblickende Rekonstruktion quellenarmer Zeitabschnitte. [37] Insgesamt bleiben die zeitabhängige Darstellung von Sachverhalten sowie die Berücksichtigung von Unschärfe und Wahrscheinlichkeit von historischen Sachverhalten eine Herausforderung in der Modellierung von Kulturgeschichte.

34
Eine der ersten Implementierungen von CIDOC CRM stellte das Erlangen-CRM, http://erlangen-crm.org/, im Einsatz mit der Forschungsumgebung WIssKi dar. Ferner fand die Ontologie im CLAROS-Explorer, http://www.clarosnet.org/, Anwendung und liegt ebenfalls der vom British Museum entwickelten Plattform ResearchSpace, www.researchspace.org, zugrunde. Letztere könnte der Ontologie CIDOC CRM als Standard zum Durchbruch verhelfen.

35
LIDO, http://network.icom.museum/cidoc/working-groups/data-harvesting-and-interchange/what-is-lido/, EDM (Europeana Data Model), http://pro.europeana.eu/page/edm-documentation; außerdem bspw. FRBRoo (Functional Requirements for Bibliographic Records — object oriented) VRA Core (Visual Resources Association Core Categories), https://www.loc.gov/standards/vracore/.

36
Dies ist insbesondere ein Anliegen des Konzepts der Datenbank ZUCCARO, die an der Bibliotheca Hertziana, Max-Planck-Institut für Kunstgeschichte entwickelt wird, vgl. Martin Raspe, Georg Schelbert, ZUCCARO. Ein Informationssystem für die historischen Wissenschaften, in: IT Information Technology 51 (2009), S. 207–215. und Elisabeth Kieven, Georg Schelbert, Architekturzeichnungen, Architektur und digitale Repräsentationen — das Projekt LINEAMENTA, in: Architecture on Display 4, 2014, http://edoc.hu-berlin.de/kunsttexte/2014-4/kieven-elisabeth-10/PDF/kieven.pdf.

37
Vgl. Frédéric, Kaplan, Lancement de la Venice Time Machine, 2013, https://fkaplan.wordpress.com/2013/03/14/lancement-de-la-venice-time-machine/, wonach die ältere, quellenarme Vergangenheit nur mit Simulation »simulated information« rekonstruierbar ist. Vgl. auch Matthew Lincoln, Predicting the Past: Digital Art History, Modeling, and Machine Learning, IRIS, http://blogs.getty.edu/iris/predicting-the-past-digital-art-history-modeling-and-machine-learning/.

F.3 Das digitale Modell als Synthese von Bild, Konzept und Information

Wir können zusammenfassen: Auch wenn man von der einfachsten Vorstellung des verkleinerten räumlichen Abbilds in der Tradition des Architekturmodells ausgeht, kommen im digitalen Format zum abbildenden Modellaspekt konzeptionelle und verfahrensmäßige Aspekte des Modellierens hinzu. Auch die tradierte Praxis der historischen Wissenschaften, die sich mit kulturellen Artefakten beschäftigen, ihre Gegenstände in regelhafter Weise zu beschreiben, fließt hier ein. Aus dieser Tradition speist sich im Wesentlichen die Datenmodellierung in Fachgebieten, die — mit bildgebenden Verfahren verknüpft — zu einem ganzheitlichen Konzept einer **Kulturtechnik Modell** im digitalen Format entwickelt werden kann. 38

Als umfassende informatische Repräsentation des Gegenstands gedacht, kann das digitale Modell wie eine materielle Nachbildung oder eine Fotografie eines Objekts visuell betrachtet werden. Es kann aber gleichermaßen — wie eine Datenbank — als Wissensspeicher und für rechnerische Auswertungen aller Art verwendet werden. 39

Zugleich ist die digitale Repräsentation materiell entgrenzt. Sie beschränkt sich nicht nur auf einzelne materielle Objekte, sondern kann sich auch auf komplexere Objektgruppen und zugehörige Sachverhalte beziehen. So lassen sich etwa ein Werkverzeichnis (catalogue raisonné), oder Sachverhalte wie eine Biografie oder ein Personennetzwerk in einem komplexen, partiell sowohl konzeptionelle als auch abbildende Elemente enthaltenden Modell darstellen. 40 Noch weiter gehend, könnte man umfassende Ansammlungen und Vernetzungen von Daten, wie sie etwa bei der Suchmaschine Google oder bei Wikipedia / Wikidata zu beobachten sind, als Aufbau eines übergreifenden, großen kulturhistorischen Modells lesen. Google führte im Jahr 2012 den sogenannten Knowledge Graph ein, der auf der Grundlage verschiedener Informationsquellen arbeitet, u. a. DBPedia, einem Projekt, das die Extraktion und Bereitstellung von Informationen aus der Wikipedia zum Ziel hat. Wikidata ist ein hierzu komplementäres Unterfangen, das Normdatensätze für Personen, Sachen etc. verfügbar macht. Mit dem **Reasonator** werden die einzelnen Statements eines Wikidata-Items zu möglichst aussagekräftigen Gesamtdarstellungen zusammengefasst. 41 Im Museumswesen und anderen Gebieten des Kulturerbe-Bereichs lassen sich ähnliche Bestrebungen feststellen, die in einem engen Wechselverhältnis mit der Etablierung von Normdaten, Formatstandards und interoperablen Datenmodellen stehen. 42

38
Der Erforschung der Geschichte des Modellgebrauchs sowie der Kulturtechnik des Modell — allerdings nicht im Besonderen bezogen auf das digitale Format — hat sich die am Hermann Helmholtz-Zentrum für Kulturtechnik der Humboldt-Universität angesiedelte Internationale Gesellschaft für Modellforschung verschrieben, https://www.kulturtechnik.hu-berlin.de.

39
Hubertus Kohle, Digitale Bildwissenschaft, Glückstadt 2013 und Jannidis / Rehberg / Kohle 2017.

40
Helmreich, Anne, Reimagining the Medieval Mediterranean, IRIS, http://blogs.getty.edu/iris/reimagining-the-medieval-mediterranean/, formuliert: »Studying the medieval past suddenly felt like putting together a complex puzzle that needs a team to assemble — finding the corner pieces, deciding which are the edge pieces, and then working together to form the picture in the middle«.

41
https://www.wikidata.org/. Das enorme Potenzial, das Wikidata bei der Erschließung von Kulturerbe besitzt, wird soeben erst entdeckt vgl. Jens Ohlig, Georg Schelbert, Datenpartnerschaften mit Wikidata: Projekt Durchblick, https://blog.wikimedia.de/2017/08/21/datenpartnerschaften-mit-wikidata-projekt-durchblick/.

42
Zuletzt Research-Space als Initiative des British Museum, http://www.researchspace.org/. Vgl. Abschnitt II. Das konzeptionelle Modell (CidocCRM).

Die Option, **Modelle** aufzubauen, wird im digitalen Format durch die Möglichkeit theoretisch unbegrenzter Verknüpfung radikal gesteigert: Indem erstmals eine Trennung von Daten und ihrer materiellen Repräsentation erfolgt, sind Informationen zeit- und raumunabhängig bearbeitbar. Angaben, die aus unterschiedlichen Quellen stammen und von unterschiedlichen Akteuren erhoben wurden, können theoretisch nahtlos miteinander verknüpft und überkreuzt werden. Informationen schließen sich »zu einem selbstverstärkenden Gefüge zusammen« [43] und lassen neue Erkenntnisse durch nicht vorhergesehene Koinzidenzen erwarten. Dabei ist das Erstellen des immer weiter wachsenden Kulturmodells freilich kein automatischer Prozess. Die selbstverstärkenden Momente basieren — vielleicht ähnlich dem hermeneutischen Zirkel — auf intellektuell basierten Vorannahmen, Entscheidungen und Bestätigungen. Der Arbeitsbereich der Übersetzung von historischen Artefakten in digitale Repräsentationen, der vielfach verkürzend bis abschätzig als **Digitalisieren** betrachtet wird, stellt tatsächlich einen hochkomplexen und intentionalen Prozess dar, der genuine Forschungsprozesse enthält und umfangreicher Reflexion bedarf. Die gern gepflegte Gegenüberstellung von **digitalisierter** und **digitaler** Kunstgeschichte, die vom Primat der an einem Korpus durchgeführten analytischen Verfahren ausgeht, ist daher irreführend. [44]

Wir haben unseren umfassenden Begriff des digitalen Modells, bestehend aus konzeptionellen und abbildenden Elementen, vor allem als **Repräsentation** von Objekten und mit ihnen verbundenen Sachverhalten charakterisiert. Das digitale Objekt stellt jedoch selbst wieder eine Realität dar. Es besitzt einen eigenen Wert und spricht für sich selbst, auch wenn es, wie jeder Sachverhalt, hinsichtlich seiner Grundlagen befragt werden muss. Es kann auf unterschiedlichste Weise ausgewertet und visualisiert werden. Der mögliche Rahmen der Perzeption reicht vom Lesen der Daten mittels quantitativer Visualisierungen bis hin zu einem immersiven quasi-realen Nacherleben räumlich-zeitlicher Situationen mit Datenbrillen oder anderen neuartigen Endgeräten.

So gesehen ist die räumliche Repräsentation als 3D-Modell lediglich eine besonders explizite Form der digitalen Repräsentation von Gegenständen unter vielen, die durch den **spatial turn** besondere Aktualität erhält. Im digitalen Format beschränkt sich die Repräsentation nicht auf eine Art Reduplikation des Objekts hinsichtlich seines Aussehens und seiner materiellen Beschaffenheit, sondern kann zusätzlich eine prinzipiell unbegrenzte Anzahl weiterer Informationen aufnehmen, einschließlich der Integration von Zeit- und Wahrscheinlichkeitsdimensionen bei so genannten 4D- oder 5D-Modellen. [45] Welche Optionen und Herausforderungen sich bei der Verknüpfung derartiger Informationen mit Bildern, Bildelementen und räumlichen Definitionen ergeben, ist noch auszuloten. Dies ist unter anderem das Forschungs- und Arbeitsfeld der **Arbeitsgruppe Digitale 3D-Rekonstruktion im DHd e. V.** und nicht zuletzt das Ziel dieses Bandes. [46]

43
Wolfgang Coy, Die digitale Verdoppelung der Welt, in: Kultur und Informatik — Aus der Vergangenheit in die Zukunft, Tagungsband, Boizenburg 2012, S. 101–108. Auf einfache Weise kann man das Prinzip des selbstverstärkenden Gefüges bei kollaborativ erstellten Karten, etwa Open- Street-Map, feststellen, wo partiell eine extreme Genauigkeit und Dichte erreicht wurde.

44
Vgl. Georg Schelbert, Digital Art History — Digitale Kunstgeschichte, Überlegungen zum aktuellen Stand. Digitale Kunstgeschichte — digital art history, in: Peter Bell, Lisa Dieckmann, Piotr Kuroczynski (Hg.): Computing Art Reader — eine Einführung in die digitale Kunstgeschichte, arthistoricum.net-ART-Boodks, Heidelberg 2018, S. 40–57, books.ub.uni-heidelberg.de/arthistoricum/reader/download/413/413-17-83319-2-10-20181210.pdf.

45
Zu 3D-Modellen vgl. u. a. M. Greengrass, L. M. Hughes, The virtual representation of the past, Digital research in the arts and humanities, Burlington 2008; Sander Münster, Entstehungs- und Verwendungskontexte von 3D-CAD-Modellen in den Geschichtswissenschaften, in: Klaus Meissner und Martin Engelien (Hg.), Virtual Enterprises, Communities & Social Networks, Dresden 2014, S. 99–108 (insbesondere zum Einsatz im historischen Kontext) und Messemer 2016. Zur Problematik der Beschreibung von Architekturmodellen Ina Blümel, Metadatenbasierte Kontextualisierung architektonischer 3D-Modelle, Berlin 2013.

46
http://www.digitale-rekonstruktion.info/.

Am ehesten lässt sich ein umfassendes und komplexes Modell wohl am Beispiel historischer Städte vorstellen. 47 Ein solches Modell bietet Daten und Anschauungsmaterial nicht nur aus architektur- oder kunsthistorischer Sicht, sondern aus der Perspektive verschiedenster weiterer Disziplinen. Je stärker das Modell strukturiert ist, desto mehr Disziplinen werden damit arbeiten können. In seiner Gesamtheit ist ein hochkomplexes digitales Modell nicht mehr visualisierbar. Selbst wenn man lediglich an die Zeitschichten denkt, wird deutlich, dass diese nur einzeln oder in partieller Überlagerung wahrgenommen werden könnten. Der Einsatz von Filtern je nach Perspektive und Fragestellung ist daher selbstverständlich. Theater- und Musikwissenschaft interessieren sich für die Aufführungsorte und die räumliche und soziale Struktur von deren Umgebungen. Sozial- und Wirtschaftsgeschichte benötigt für die Untersuchung städtischer Mikroräume unter anderem auch raumbezogene Daten. Für militärgeschichtliche Fragen sind Sichtfelder, Befestigungen und Simulationen von deren Beschuss interessant. Erhebungen zur Bevölkerungsstruktur, wie sie für viele Städte vorliegen — für Rom beispielsweise seit dem 16. Jh. nahezu lückenlos mit den »stati delle anime« 48 — lassen sich nicht nur allgemein hinsichtlich Altersstruktur, Berufsgruppen und Nationalitäten auswerten, sondern auch in ein umfassendes raumzeitliches Stadtmodell integrieren, da die Wohnadressen der Personen in regelmäßigen Zeitabständen erfasst wurden. 49

Wenn nun solche Größenordnungen an Daten aus der geisteswissenschaftlichen Perspektive als unbewältigbar umfangreich erscheinen, dann ließe sich vielleicht durch einen Seitenblick in andere Disziplinen wieder Mut schöpfen. So wurde bereits zu Beginn der 2000er Jahre die räumliche und zeitliche Modellierung praktisch der gesamten Milchstraße in Angriff genommen. 50 Auch die Kartierungsbestrebungen zur DNA der Lebewesen, insbesondere des menschlichen Genoms, 51 übertreffen die in der historischen Forschung gewohnten Mengen von Einzelelementen. Sicherlich sind Aminosäurenpaare oder physikalisch berechenbare Bewegungen von Festkörpern im Weltall ein einfacherer Gegenstand als die verschlungenen Pfade menschlicher Geschichte und ihrer kulturellen Hervorbringungen. Aber auch auf dem Feld der Kulturgeschichte lassen sich gewisse, relativ eindeutig beschreibbare Merkmale wie z. B. Lebensdaten von Personen, Standorte und Bewegungen von Bau- und Kunstwerken, Mitgliedschaften in Institutionen, Besitzübertragungen und dergleichen als Rahmenordnung für weitergehende kulturhistorische Forschung in einem großen Modell darstellen. In Teilmodellen, sei es in Wikipedia und anderen Enzyklopädien, sei es in Normdatenrepositorien, Bau- oder Kunstdenkmäler-Datenbanken, ist Derartiges ohnehin schon virtuell vorhanden und strebt vielleicht — sozusagen in einer Art reversivem Urknall — einer weitgehend bruchlosen Vereinigung zu. 52.

Wenn auch im kulturwissenschaftlichen Bereich nur selten in diesen Größenordnungen gedacht wird, kann doch eine Initiative, die sich definitiv solchen Dimensionen stellt, genannt werden. Die Venice Time Machine ist ein Verbundprojekt, das sich zum Ziel gesetzt hat, das gesamte venezianische Staatsarchiv zu digitalisieren, zu erschließen und historische Informationen aus den Akten zu extrahieren. Diese Informationen

47
Beispiele hierfür sind u. a. Rome reborn (ein archäolgisches Modell, das sich noch weitgehend auf die räumliche Nachbildung beschränkt), http://romereborn.frischerconsulting.com/, Bamberg 4D, https://www.uni-bamberg.de/bauforschung/forschung/projekte/digitales-stadtmodell/4d/, Visualizing Venice, http://www.visualizingvenice.org/visu/ und Venice Time Machine (s. 53).

48
Zu Geschichte und Umfang dieses Quellenbestandes siehe: Carla Sbrana, Rosa Traina, Eugenio Sonnino, Gli stati delle anime a Roma dalle origini al secolo XVII: origini, consistenza, contenuti : con appendice sulle altre registrazioni parrocchiali, Rom 1977. Bis heute konnte noch keine umfassende digitale Version dieses historischen Adressbuches der Stadt erstellt werden.

49
Beispiele für derartige komplexe Stadtmodelle sind zumeist noch im Aufbau, vor allem in den kulturhistorisch reichen Städten, allen voran Rom, Paris, London, Nürnberg, Köln etc. In diesem Zusammenhang sind auch die geografischen Informationssysteme, die von Stadtverwaltungen eingesetzt werden, zu nennen (bspw. FIS-Broker Berlin, http://www.stadtentwicklung.berlin.de/geoinformation/fis-broker/).

50
RAVE (RAdial Velocity Experiment), 2003–2011 https://www.rave-survey.org/project/, Gaia-Mission der ESA, seit 2013, http://gaia.ari.uni-heidelberg.de/.

51
Beispielsweise das Human Genome Project (HGP), 1990–2003.

52
Thomas Wiegand, Direktor des Fraunhofer Heinrich-Hertz-Instituts, drückte das auf dem Science Match 2017 in Berlin folgendermaßen aus: »Digital Future will be a timely and accurate model of the world« (Vortrag »Convergence of Communication and Machine Learning« am 12.05.2017).

werden auch mit einem räumlichen Modell — das teils auf diesen Informationen beruht — verbunden, um auf diese Weise ein Raum-Zeit-Gefüge zu erzeugen, in dem, mit Frederic Kaplan »so einfach durch die Zeit gereist werden kann, wie wir im Raum reisen«. 53 Das Projekt umfasst Entwicklungsarbeit auf den Gebieten der Bilderkennung, der Schrifterkennung, beschleunigter Scan-Workflows und der Datenmodellierung. Es ist nur konsequent, dass das Projekt zu einer alle Städte Europas umfassenden Initiative unter dem Namen **Time Machine** ausgebaut werden soll. 54 Die Übertragung auf einen globalen Maßstab ist noch nicht angekündigt, wäre aber lediglich ein weitere Skalierung des Konzepts.

Die maximal umfangreiche und zugleich maximal detaillierte digitale Repräsentation, wie sie gedanklich auch der time machine zugrundeliegt, erzeugt gewissermaßen die Karte im Maßstab 1:1, ja sogar noch darüber hinaus, da sie — neben einem über die menschliche Wahrnehmungsfähigkeit hinausgehenden Detaillierungsgrad — weitere Aspekte wie Zeitschichten, Hypothesen und Wahrscheinlichkeiten enthalten kann. Während eine solche Karte, wie sie Borges und Eco in satirischer Weise diskutiert haben, in der analogen Welt ein Absurdum darstellt, muss das im digitalen Format keineswegs der Fall sein. Daher taugt dieses Szenario auch nur bedingt als Einwand gegen ein vermeintlich unreflektiertes Datensammeln in der Digitalen Kunstgeschichte, wie ihn Ulrich Pfisterer anklingen ließ. 55 Zweifellos ergibt eine virtuelle Totalität von Daten per se noch keinen Sinn. Sie wäre auch nicht mehr visualisierbar oder anderweitig sinnlich wahrnehmbar, sodass das digitale Modell noch nicht einmal mehr als Bild zum **distant viewing** dienen könnte. Aber digitale Daten erlauben Filterungen und Befragungen aller Art, die je nach Fragestellung bestimmte Aspekte, Perspektiven und letztlich zunächst nicht wahrnehmbare Ergebnisse bringen (können).

Auch wenn sich neben allen Machbarkeitsproblemen — mögen sie eher im Speicherbereich, in der Durchsetzung von Standards oder in der zuverlässigen Bereitstellung von Online-Zugänglichkeit liegen — zweifellos die Frage stellt, ob hier nicht die Gefahr eines naiven Positivismus droht, kann diese wohl zunächst dahingehend beantwortet werden, dass Positivismus als solcher gar nicht vermeidbar ist, wenn mit digitalen Daten gearbeitet wird. Ein solcher muss — wenn er methodologisch kritisch reflektiert und auf eine heuristische Funktion eingegrenzt wird — aber keineswegs per se verwerflich oder schädlich sein. Im Gegenteil könnte es sowohl für eine methodologische Präzision als auch für die interdisziplinäre Verständigung von Vorteil sein, wenn die objektbezogenen kulturhistorischen Fächer wie die Kunstgeschichte sich ihrer empirischen Grundlagen wieder stärker bewusst werden. Unterstützende Stimmen hierfür gibt es auch jenseits der Szene der Digitalen Kunstgeschichte, etwa mit Rosenbergs Plädoyers für eine **Empirische Bildwissenschaft** und **Systematische Kunstwissenschaft**. 56 Umgekehrt betrachtet haben die Geisteswissenschaften wohl aber auch gar keine die Wahl, ob sie einer zunehmenden digitalen Repräsentation ihrer Gegenstände zustimmen oder nicht. Digitale Repräsentationen des Kulturerbes und der kulturgeschichtlichen Überlieferung entstehen ohnehin und sind auch zunehmend online präsent. Das ist eine Entwicklung, die unabhängig von der Haltung der Architektur- und Kunstgeschichte und verwandter Fächer

■ 53
Vgl. Abstract zum Vortrag auf der Tagung 3D Digital Heritage, Humboldt-Universität zu Berlin, 19. Juni 2017). Das Projekt Venice Time Machine ist ein Gemeinschaftsprojekt der EPFL und der Università Ca'Foscari in Venedig, https://vtm.epfl.ch/.

■ 54
Time Machine, http://timemachineproject.eu/.

■ 55
Ulrich Pfisterer, Big Bang Art History, in: Merkur 71, Mai 2017, S. 95–101, hier S. 99.

■ 56
Raphael Rosenberg, Blicke messen. Vorschläge für eine empirische Bildwissenschaft, in: Jahrbuch der Bayerischen Akademie der Schönen Künste 27.2013, 2014, S. 71–86 und Raphael Rosenberg, Bridging art history, computer science and cognitive science: a call for interdisciplinary collaboration, in: Zeitschrift für Kunstgeschichte, 79 (3) 2016, S. 305–314.

stattfinden wird. Damit aber diese Fächer möglichst zeitig davon profitieren können, ist ein weiterer Ausbau von Standards und Infrastrukturen nötig, damit es so einfach wird, historische Informationen, Abbildungen, Vermessungen in das **große Modell** einzugliedern, so wie es bereits möglich ist, eigene Fotos in Google Maps hochzuladen. Es bleibt dann vor allem die Frage, an welcher Stelle des Prozesses dem Material **Sinn gegeben** wird. Soll dies erst im traditionellen wissenschaftlichen Text geschehen, der über umfassendere oder spezifischere Fragestellungen reflektiert, aber das Material selbst kaum adäquat darstellen kann, wie man bereits seit Langem an den Problemen der Einbindung von Bildern und Modellen auch in Publikationen sieht — selbst wenn sie digital gespeichert werden? Oder soll eine wissenschaftliche Auswertung, Aussage und die diesbezügliche Kommunikation bereits unterhalb des traditionellen gelehrten Narrativs in strukturierten datenbankähnlichen Systemen stattfinden? **Sinn** ist hier freilich abgestuft zu verstehen. Denn Statements zu einzelnen, begrenzten kleinen Sachverhalten oder die Zuordnung von Attributen zu einem Gegenstand stellen selbstverständlich eine einfachere Stufe von **Sinnstiftung** dar als etwa die Charakterisierung eines ganzen Lebenswerks oder gar einer ganzen Epoche. Da aber in einer wissenschaftlichen Methodologie die großen Aussagen nicht ohne nachprüfbare kleine Aussagen möglich sind, spricht viel dafür, dass sich die Geisteswissenschaften verstärkt auch einer direkteren Handhabung von Daten zuwenden, damit diese kleinen Aussagen nicht, wenn sie überhaupt detailliert dokumentiert werden, ausschließlich in die Fußnoten oder Anhänge gedruckter Aufsätze verbannt bleiben. Zumindest dort, wo der Umgang mit historischen Dingen gepflegt wird, könnte das digitale Modell ein Schlüsselkonzept darstellen, das verschiedenste Aspekte eben dieser Dinge umfasst und sowohl zur hermeneutischen Betrachtung als auch zur rechnerischen Analyse bereitstellt.

Kapitel 2
→ Darstellungs- und Vermittlungsformen

Fabrizio Apollonio, **Oliver Hauck**

Darstellungs- und Vermittlungsformen der digitalen 3D-Rekonstruktion

Im Spannungsfeld von Illusion und Immersion existiert ein breites Spektrum von Darstellungs- bzw. Publikationsformen digitaler 3D-Rekonstruktionen, die sich nicht nur in ihrer Perzeption, sondern auch in ihren technischen Anforderungen sowie im Erstellungsaufwand massiv voneinander unterscheiden. Einleitend soll ein Überblick über die verschiedenen Darstellungsmöglichkeiten und die ihnen immanenten Eigenschaften und Anforderungen gegeben werden. Es soll der Frage nachgegangen werden, ob und inwiefern die Visualisierungsmethode Einfluss auf die Modellerstellung selbst hat und wo die Grenzen zwischen wissenschaftlich fundierbaren, nachvollziehbar zu machenden Entscheidungen und solchen rein künstlerischer Natur liegen. Erstaunlicherweise fand diese Frage bisher im wissenschaftlichen Diskurs wenig Beachtung, im Mittelpunkt des Diskurses stehen momentan hauptsächlich Fragen der Nachvollziehbarkeit der Modellierung (überwiegend dabei die Frage der Verknüpfung des Modells und seiner Quellen). Überleitend in die folgenden Teile soll schließlich die Frage diskutiert werden, ob die allgemein als Desiderata angesehenen Standards für digitale 3D-Rekonstruktionen überhaupt gebraucht werden oder ob es nicht vordringlicher wäre, Werkzeuge zur wissenschaftlichen Diskurseinbindung zu entwickeln, um insbesondere im Hinblick auf den rückwirkenden Umgang mit bestehenden 3D-Modellen und Visualisierungen diese zitierbar zu machen und damit den Rückgriff auf die existierenden Standards wissenschaftlicher Arbeit zu erlauben.

Die Visualisierung mittels Bildsynthese bzw. Rendering bildet die Grundvoraussetzung für den menschlichen Umgang mit digitalen 3D-Modellen. Dies beginnt bereits bei der Modellerstellung durch Echtzeitberechnung in der Grafikpipeline des Computers. Ohne sie wäre das Erstellen von Modellen — allein durch manuelle Eingabe von Punktkoordinaten und deren manuelle Verbindung zu Linien und Flächen — mindestens eine mühevolle Aufgabe, wenn nicht ein Ding der Unmöglichkeit. Aber auch zur finalen Präsentation von 3D-Modellen ist die Bildsynthese — im Standbild, im Film oder auch in immersiven, interaktiven virtuellen Umgebungen -zurzeit das Mittel der Wahl, wenngleich die Verbreitung des 3D-Drucks zur Herstellung haptischer Modelle immer weiter fortschreitet. In diesem Teil finden sich eine Reihe von Beiträgen, die sich mit vielfältigen Fragen und Standpunkten zum Thema

der 3D-Modellvisualisierung im Allgemeinen und zu Darstellungsformen von 3D-Rekonstruktionsmodellen im Speziellen auseinandersetzen.

Unter den vielfältigen Aspekten der digitalen 3D-Rekonstruktion nimmt die Visualisierung des **Endproduktes** zum Zwecke der Inhaltsvermittlung sicher eine Schlüsselrolle ein. Sie beeinflusst direkt den Umgang mit dem durch sie assoziierten Inhalt, sowohl durch den Rekonstruktionsprozess selbst als auch durch den Grad an Ikonizität in der Vermittlung von Information und Wissen über die Artefakte und Gebäude: Die Erinnerung im Bild ist eben standhafter als alles abstrakt Vorgetragene.

Dabei hat die digitale 3D-Rekonstruktion so viel mehr zu bieten als die bildhafte Visualisierung. Die Fragen nach Dokumentation, Analyse und Interpretation von Quellen und gar von Mitteln, Werkzeugen, Methoden und Techniken, die vor jedem visuellen Ergebnis entscheidend wirken, sind in den anderen Kapiteln dieser Publikation — und in etlichen vorangegangenen 01 — umfassend behandelt worden und sollten sich in der Forschung mittlerweile etabliert haben. Dennoch ist in der Regel ausschließlich das Bild als Endergebnis dem Sturm der Kritik ausgesetzt. Der zweite Teil dieses Buches beginnt darum mit einem sehr speziellen Thema (der **Lichtsimulation in der digitalen Rekonstruktion historischer Architektur**), anhand dessen **Andreas Noback** (**→ 163**) allerdings einige sehr grundsätzliche Fragen des Umgangs der Wissenschaft mit Bildern im Allgemeinen und der Methodik der digitalen Rekonstruktionsmodelle und ihrer Visualisierung im Speziellen erörtert. Er verweist dabei auf den häufig gebrauchten Begriff **artist's impression**, dessen Verwendung in vielen wissenschaftlichen Disziplinen den kritischen Abstand zum bildhaften Werk ausdrückt:

> »Dem nüchternen Naturwissenschaftler ist diese Form von **Science Fiction** unheimlich, deshalb verweist er sie lieber in die Welt der Kunst« (**→ 165**),

schreibt **Andreas Noback** zugespitzt in seinem Prolog.

Die historischen Wissenschaften können sich in der Auseinandersetzung mit Visualisierungen der Frage nach dem künstlerischen Anteil nicht so einfach entziehen. Lediglich auf die **artist's impression** zu verweisen, wie dies in anderen Disziplinen Usus ist, kommt nicht infrage, ist doch die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit Bildwerken eine der Kernkompetenzen zumindest von Bau- und Kunstgeschichte. Zudem sind bildhafte Quellen und ihre Kritik meist die wichtigste Grundlage für die Rekonstruktionen selbst. Einen wichtigen Beitrag zu diesem Themenfeld stellt die **London Charter for the Computer Based Visualisation of Cultural Heritage** (kurz: **London Charter)** dar:

> »The Charter defines principles for the use of computer-based visualisation methods in relation to intellectual integrity, reliability, documentation, sustainability and access.« 02

■ 01
Vgl. z. B. Oliver Hauck, Andreas Noback, Lars Grobe Computing the Holy Wisdom. In: Georg Bock, Willi Jäger, Michael Winckler (Hg.): Contributions in Mathematical and Computational Sciences 3. Scientific Computing and Cultural Heritage. Contributions in Computational Humanities. Berlin, Heidelberg 2013. Chapter 22 und Oliver Hauck The use of images as resources and output result in a computer-based light simulation of Justinian's Hagia Sophia in Istanbul. In: Agnieszka Seidel-Grzesińska, Ksenia Stanicka-Brzezicka: Obraz i metoda, Cyfrowe spotkania z zabytkami 4. Breslau 2014.

■ 02
The London Charter Interest Group, The London Charter, Preamble, http://www.londoncharter.org/preamble.html.

Ihre wichtigsten Ziele sind: intellektuelle und technische Stringenz (**rigour**) in der digitalen Visualisierung des Kulturerbes durchzusetzen, computergestützte Visualisierungsmethoden und -ergebnisse so zu dokumentieren und verbreiten, dass sie allgemein verstanden und bewertet werden können, zu ermöglichen, dass computergestützte Visualisierungen einen maßgeblichen Beitrag zum Studium von bestehenden Kulturgütern sowie deren Interpretation und Verwaltung beitragen, sicherzustellen, dass Zugangs- und Nachhaltigkeitsstrategien festgelegt und angewandt werden.

Damit wurde in den letzten Jahren eine Entwicklung aufgenommen und weiter befördert, die nicht nur darauf abzielt, Darstellungsmethoden zu entwickeln und zu nutzen, sondern den Rekonstruktionsprozess selbst — einschließlich seiner Quellen, seiner Unwägbarkeiten und seiner teils willkürlichen Festsetzungen in Visualisierungsstrategien und -methoden — offenzulegen und zu berücksichtigen. Von einem epistemologischen Standpunkt aus betrachtet muss man leider feststellen, dass es bis heute keine fixe Definition von Unwägbarkeit/Unschärfe/Verlässlichkeit/Ambiguität gibt und demnach auch keine standardisierte Methode zur Visualisierung dieser Unsicherheit im 3D-Rekonstruktionsmodell — auch nicht durch die London Charter. 03

■ 03
Karen M. Kensek, Survey of Methods for Showing Missing Data, Multiple Alternatives, and Uncertainty in Reconstructions, in: CSA Newsletter, 19 (3) 2007; Thomas Strothotte et al., Visualizing Knowledge about Virtual Reconstructions of Ancient Architecture, in: Proceedings of Computer Graphics International 1999, S. 36–43, Kristin Potter et al., From Quantification to Visualization, in: A. M. Dienstfrey et al., 10th Working Conference on Uncertainty Quantification in Scientific Computing (WoCoUQ), August 2011, Boulder, CO, United States, Heidelberg, Cham 2012, S.226–249; Marta Perlinska, Palette of possibilities. PhD Thesis. Lund University, Department of Archaeology and Ancient History 2014; Geeske Bakker et al., Truth and credibility as a double ambition., in: Journal of Visualization and Computer Animation, 14 (3) 2003, S. 159–167; Stefano Borghini et al., La restituzione virtuale dell'architettura antica come strumento di ricerca e comunicazione dei beni culturali, in: Disegnarecon, 4 (8) 2011, S. 71–79; Fabrizio Apollonio et al., 3D modeling and data enrichment in digital reconstruction of Architectural Heritage., in: Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-5-W2-43, 2013, S. 43–48; Maria. D. Vico Lopez, La »Restauración Virtual« según la interpretación arquitectonico constructiva, PhD thesis. Universitat Politecnica de Catalunya 2012; Ropertos Georgiou et al., A London Charter's visualization, in: Proceedings of International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage-Short and Project Papers, VAST'11, 2011, S. 53–56; Emanuel Demetrescu, Archaeological Stratigraphy as a formal language for virtual reconstruction, in: Theory and practice. 57, 2015, S.42–55; Fabrizio Apollonio, Classification schemes for visualization of uncertainty in digital hypothetical reconstruction, in: Sander Münster et al., 3D Research Challenges in Cultural Heritage II., Heidelberg, Cham 2016, S. 173–197 und Patricia Lulof et al., The art of reconstruction., in: Proceedings of the 2013 Digital Heritage International Congress, Marseille 2013, S. 333–336.

Der Beitrag von **Nikolaus Heeb und Jonas Christen** (→ **227**) zeigt anhand richtungsweisender Praxisbeispiele verschiedene Visualisierungsstrategien. Die Arbeiten von Dominik Lengyel und Catherine Toulouse behandeln ebenfalls den Umgang mit archäologischen Hypothesen und versuchen mit visuellen Strategien, das Phänomen der wissenschaftlichen Unschärfe in 3D-Rekonstruktionen subtil zu vermitteln. 04 Die visuelle Darstellung wissenschaftlicher Unschärfe ist für **Lengyel und Toulouse** eine Methode zur visuellen Repräsentation räumlicher Hypothesen, die auf den wissenschaftlich-hypothetischen Charakter, die Intuition und ihr gegenseitiges Wechselspiel Bezug nimmt. Es geht dabei sowohl um die Schaffung einer unmittelbaren räumlichen Umsetzung der wissenschaftlichen Hypothese selbst als auch ihres hypothetischen, unsicheren Charakters. Das Phänomen wird als darzustellende Unschärfe definiert.

Unscharfes, nicht voll umfänglich gesichertes Wissen ist ein essenzielles Kennzeichen von Wissenschaft, und so stellt sich grundsätzlich die Frage nach einer adäquaten visuellen Umsetzung dieses Problems. Dies gilt noch viel mehr für Projekte, bei denen die Grundlagen gar keine komplette Rekonstruktion eines wie auch immer gearteten ursprünglichen Zustandes ermöglichen. Vorgeschlagen und erprobt wird beispielsweise, mit Mitteln der tradierten Architekturdarstellungswerkzeuge Szenerien darzustellen, in denen die unterschiedlichen Grade von Unschärfe durch in unterschiedlichen geometrischen Abstraktionsstufen modellierten Bauteilen / Objekten ausgedrückt werden, um dann die Methoden der traditionellen Architekturfotografie zu nutzen, damit trotz der Abstraktion ein möglichst realistischer Raumeindruck erzeugt werden kann. Bezüglich der realistischen Raumwahrnehmung gehen **Dmitry Karelin und Maria Karelina** (→ **187**) noch wesentlich weiter: Sie diskutieren kritisch die üblichen Rendermethoden, die teilweise auf Techniken aus der Renaissance 05 bzw. der Antike 06 zurückgehen, und stellen, basierend auf dem Werk Boris Rauschenbachs, interessante Möglichkeiten der Anpassung von Renderings an die Besonderheiten des menschlichen Auges dar: der gewählte Bildwinkel, der von der Art der Präsentation sowie Größe und Form des zu visualisierenden Gebäudes abhängt, die Eigenheiten des Bildmittelpunktes, die Diskussion seiner Position im Raum und die Eigenheiten der räumlichen Komposition, die bis zum Ausblenden von Bauteilen führen, die zwar nach traditionellen (s. o) Perspektivregeln sichtbar wären, aber sich dennoch der Wahrnehmung durch den Menschen vor Ort entziehen würden. Ein interessanter Ansatz, wenn man bedenkt, wie weit sich z. B. antike Architekten und Ingenieure mit solchen Fragen befassten.

So fragt beispielsweise Heron von Alexandria in den sogenannten definitiones: »Was ist Skenografie?«, um dann sehr anschaulich die Anwendung der Enthasis bei Säulen und hohen Gebäuden zu erklären:

■ 04
Eric Laufer, Dominik Lengyel, Felix Pirson, Verena Stappmans, Catherine Toulouse, Die Wiederentstehung Pergamons als virtuelles Stadtmodell, in: Andreas Scholl, Volker Kästner, Ralf Grüssinger (Hg.), Antikensammlung Staatliche Museen Berlin. Pergamon. Panorama der antiken Metropole, Petersberg 2011, S. 82–86. Dominik Lengyel, Catherine Toulouse, Darstellung von unscharfem Wissen in der Rekonstruktion historischer Bauten, in: Katja Heine, Klaus Rheidt, Frank Henze, Alexandra Riedel (Hg.), Von Handaufmaß bis High Tech III. 3D in der historischen Bauforschung. Darmstadt, Mainz 2011, S. 182–186.

■ 05
Z. B. eine Darstellung des Raytracing – also der Strahlverfolgung – einer weit verbreiteten Rendermethode: Dürer, Albrecht: Der Zeichner der Laute. Aus der Folge »Die vier Zeichner«. Holzschnitt; 130 x 182 mm. 1525. Dresden: Kupferstich-Kabinett A 996, in der Deutschen Digitalen Bibliothek unter https://www.deutsche-digitale-bibliothek.de/item/CIMP33WXNW5SQQQPOTBURZHCIFBYIY7P.

■ 06
Zum Beispiel Heron von Alexandria, 1. Jh. n. Chr., der ähnlich wie 1400 Jahre später Dürer von »Sehestrahlen« schreibt und ebenfalls das Konzept des Raytracings vorwegnimmt. (Heron, definitiones, 103)

»Der skenographische Teil der Optik untersucht, wie man die Bilder von Gebäuden malen soll; denn da die Dinge nicht so erscheinen, wie sie sind, überlegt man, wie man nicht die vorliegenden Verhältnisse aufzeigen soll, sondern sie so ausführen, wie sie erscheinen werden. Und Ziel des Architekten ist es, das Werk für die Erscheinung harmonisch zu machen und, soweit möglich, Gegenmittel zu erfinden gegen die Täuschungen des Auges, indem er nicht nach der wirklichen Gleichheit und Harmonie strebt, sondern nach der für das Auge erscheinenden. So bildet er die zylindrische Säule, da sie für das Auge in der Mitte verjüngt und daher gebrochen erscheinen würde, an dieser Stelle dicker, und den Kreis zeichnet er zuweilen nicht als Kreis, sondern als Ellipse, das Quadrat gestreckt, und mehrere verschieden große Säulen in verschiedenen Proportionen nach Anzahl und Größe.« 07

■ 07
Hero Alexandrinus, Heronis Alexandrini opera quae supersunt omnia, Vol. 4, Heronis definitiones cum variis collectionibus, Heronis quae feruntur geometrica, Nachdruck, Stuttgart 1976.

Wie sehr sich die Architekten von diesen Einsichten leiten ließen, kann man an den Kanneluren der Säulen des Zeustempels von Olympia erkennen: diese wurden im Grundriss nicht als Kreisbogensegmente, sondern als Korbbögen mit in der Höhe variierenden Radien ausgeführt, um ein möglichst homogenes Schattenbild bei unterschiedlichen Lichteinfallswinkeln zu erzeugen. 08 Mit den Anregungen von **Dmitry Karelin und Maria Karelina** (**→ 187**) können solche Effekte in Renderprogrammen angemessen berücksichtigt werden, wenn die virtuellen Kameras entsprechend angepasst werden.

■ 08
Arndt Hennemeyer, Zur Lichtwirkung am Zeustempel Olympia, in: Peter I. Schneider, Ulrike Wulf-Rheidt, Licht-Konzepte in der vormodernen Architektur, Diskussionen zur Archäologischen Bauforschung, Schriftenreihe des Architekturreferates des Deutschen Archäologischen Instituts, Bd. 10, Regensburg 2011, S. 101–110.

Sebastian Hageneuers (**→ 203**) Beitrag verdeutlicht, dass das Bild schon immer Begleiter der Archäologie war, das Spektrum an Bildgenerierungsmöglichkeiten sich jedoch durch die Entwicklung digitaler Technologien stark verbreitert hat (wenngleich es seit jeher von einfachen Zeichnungen zur Illustration essenzieller Aspekte bis zu wahren opulenten künstlerischen Meisterwerken reichte). **Hageneuer** argumentiert klar gegen den scharfen Kontrast zwischen architektonischen 3D-Rekonstruktionen, wie sie als Zutaten in architektonischen Fachpublikationen aber auch coffetable books zu finden sind, und wissenschaftlicher Arbeit. Er plädiert dafür, Rekonstruktion als nie finalisierbaren work in progress zu betrachten, dem immer neue Erkenntnisse und Sichtweisen hinzugeführt werden. Am Beispiel der Rekonstruktion der Eanna-Zikkurat in Uruk illustriert er seine Auffassung von Rekonstruktion als sich zunehmend weiter verfeinerndem Prozess. Er schlägt vor, unterschiedliche Rekonstruktionsversionen, die auf verschieden breiter Quellenlage und unterschiedlich umgesetzten Interpretationsspielräumen basieren, vergleichend nebeneinander zu stellen. So entstünden Ergebnisse, die den wissenschaftlichen Diskurs erweitern und vorantreiben.

Martin Papirowski (**→ 216**) gewährt Einblicke in die Perspektive des Fernsehmachers auf den visuellen Output digitaler 3D-Rekonstruktionen in Dokumentarfilmen. In seinem Beitrag **Visuelle Echos der Vergangenheit — 3D-Rekonstruktionen im Dokumentarfilm** erläutert er die Vorbehalte, die viele Filmemacher und Filmtheoretiker — insbesondere unter dem Einfluss der 68er Revolution und ihren strengen Anforderungen an den **Wahrheitsgehalt** von Dokumentationssendungen — dem Format Doku-Drama gegenüber hegten: In ihm vereinten sich die Nachteile des Kinos wie des Dokumentarfilms,

> denn »wo Hollywood die vermeintliche historische Wahrheit auf dem Altar der Opulenz und Dramaturgie opfert, muss das Doku-Drama in jeder Szene den Anspruch auf historische Korrektheit erfüllen.« (**→ 218**)

In den letzten zwanzig Jahren sei die digitale 3D-Rekonstruktion zum festen Bestandteil des Genres geworden. Dabei kämen zwei unterschiedliche Formen zum Einsatz: die didaktische Animation und die 3D-Konstruktion, das Reenactment aus dem Computer. **Papirowski** stellt klar, dass die digitale Rekonstruktion niemals hundertprozentig authentisch sein könne und dass kein einziges historisches Monument existiere, das über einen längeren Zeitraum kontinuierlich dokumentiert worden wäre. Hier nähert sich **Papirowski** an das prozessuale Denken **Hageneuers** an:

> »Die perfekte Rekonstruktion bleibt indessen eine Illusion, Ziel ist eine Annäherung, die die Illusion der Zeitreise nicht zerstört und den Charakter und die Anmutung eines Bauwerkes trifft«. (**→ 221**)

Es wurde von uns bewusst auf den Versuch verzichtet, alle visuellen Aspekte der digitalen 3D-Rekonstruktion und deren technische Anforderungen vorzustellen. Stattdessen haben wir uns für eine Präsentation verschiedener Positionen und Möglichkeiten entschieden. Dabei haben wir die Felder des 3D-Druckes und der virtuellen Realität / Augmented Reality (inklusive der Welt der 3D-Computerspiele) außen vor gelassen, um die in der aktuellen Diskussion vertretenen Positionen zu Wort kommen zu lassen. Zudem war und ist es unser Anliegen aufzuzeigen, dass es im Bereich der Visualisierung selbst ganz verschiedene Techniken und Herangehensweisen gibt, deren Anwendung allesamt auch Einfluss auf die Modellierung selbst hat und die für jedes Projekt neu abgewogen und strategisch in den Projekten angemessenen chaînes opératoires eingesetzt werden müssen. Dabei gibt es auch in als einigermaßen gesichert geltenden Feldern, wie den Kameraeinstellungen beim Rendering, noch einiges an Forschung zu leisten — ebenso im Bereich des Lichtes und der Materialeigenschaften, wobei ein besonderer Fokus auf den historischen Materialien liegen wird. Wenn es uns gelungen ist, mithilfe der Beiträge dieses Kapitels ein Bewusstsein dafür zu schaffen, dass die methodischen Fragen nicht nur auf die Modellerstellung begrenzt sind, sondern

die Visualisierungsmittel selbst methodische Fragestellungen aufwerfen, die für jedes Projekt bzw. Objekt der Rekonstruktion neu bewertet werden müssen, ist viel erreicht.

Computergrafik ist eine Wissenschaft. Wie dieser zweite Teil zeigt, sind es sind nicht die Standards, die fehlen, sondern deren Anwendung durch die Digital Humanities auf diesem Feld. Dazu müssen jedoch zunächst Werkzeuge entwickelt werden, die es den geisteswissenschaftlich orientierten Disziplinen leichter machen bzw. in vielen Fällen überhaupt erst ermöglichen, in diesem Bereich die bestehenden Standards wissenschaftlichen Arbeitens anzuwenden. So ist es bereits heute möglich, ausschließlich aus Open-Source-Software Modelle zu erstellen und fortzuentwickeln, die professionellen Anforderungen genügen. Eine weitere, beinahe banal anmutende Frage ist, warum es bis heute keinen Metadatenstandard für Renderings gibt. Jede Digitalkamera speichert heute die Prozessdaten der digitalen Bildgenese automatisch in dafür vorgesehenen Metadatenformaten mit ins Bild. Warum ist dies bei Renderings nicht möglich? Die Render-Algorithmen sind in allen Softwarepaketen letzten Endes die gleichen, allesamt wissenschaftlich publiziert. Es könnte eine künftige Aufgabe für die AG Digitale Rekonstruktion sein, die Schaffung eines solchen Metadatenformates anzustoßen und die Softwarehäuser dazu zu bewegen, dieses in die Programme zu implementieren.

Andreas Noback

G. Lichtsimulation in der digitalen Rekonstruktion historischer Architektur

→ Baugeschichte, Computervisualisierung, Lichtsimulation, Predictive Rendering

Bilder rekonstruierter Architektur sind allgegenwärtig. Weithin spürbar ist der Wunsch, historische Architektur als Lebenswelt stimmungsvoll zu vermitteln. In der Baugeschichte werden solche Darstellungen als Bildquellen verstanden und immer wieder dafür kritisiert, dass die photorealistische Darstellungsweise die Unsicherheiten der Rekonstruktion historischer Bauten verschleiert. In der Computergrafik steht hingegen die verlässliche Herstellung der computergenerierten Bilder selbst im Vordergrund. Unter dem Begriff Predictive Rendering hat sich dafür eine Pipeline etabliert, die von der Herstellung geeigneter Computermodelle optischer Materialeigenschaften über die Simulation der Lichtverteilung im Raum zur menschlichen Wahrnehmung einer Szene fortschreitet. Dabei ist jeder Schritt mit einem Fehlermanagement verbunden.

Dieser Artikel unternimmt den Versuch einer Erweiterung dieser Pipeline zu einer experimentellen Methode der Lichtsimulation für die Untersuchung der Beleuchtung und Wahrnehmung historischer Architektur. Die erweiterte Pipeline beginnt mit der Formulierung geeigneter Forschungsfragen. Sie schreitet fort über die geometrischen Rekonstruktion und die Messung der optischen Eigenschaften historischer Baumaterialien zur Simulation selbst. Sie endet mit einer vierstufigen Analyse: der Auswertung der numerischen Ergebnisse, der Untersuchung dieser Ergebnisse im Kontext visueller Wahrnehmung, einer Diskussion der historischen Rezeption der Szene und schließlich der Interpretation der Ergebnisse für die Baugeschichte.

☐ 01
Lichtsimulation als experimentelle Methode: Rekonstruktion der Lichtstimmung morgens an einem Weihnachtstag in der Hagia Sophia des 6. Jahrhunderts. Die computergestützte Rekonstruktion historischer Architektur kann sich nur weiterentwickeln, wenn sie sich nicht mehr als bloße Visualisierung begreift. Lichtsimulation als experimentelle Methode in der historischen Bauforschung bietet die Chance, die Lichtgestaltung vergangener Architektur zu untersuchen und wieder erlebbar zu machen.

G.1 Prolog: An artist's impression

Illustrationen, die geplante Weltraum-Missionen erläutern oder die Arbeit der Weltraumteleskope veranschaulichen, tragen häufig Titel, die die Worte **An artist's impression** enthalten. Sie zeigen Szenen aus fernen Welten, die Menschen niemals werden sehen können, von denen man ihnen aber eine Vorstellung geben möchte. Dem nüchternen Naturwissenschaftler ist diese Form von **Science Fiction** unheimlich, deshalb verweist er sie lieber in die Welt der Kunst. Dessen kognitive Dissonanz gegenüber der stimmungsgeladenen Darstellungsweise und ihrer medialen Funktion findet ihre Paralle in den Bedenken der historischen Wissenschaften im Umgang mit fotorealistischen Darstellungen rekonstruierter Architektur bei Computervisualisierungen verlorener Bauten. 01

Genauer betrachtet sind die Bilder, die den Ausgangspunkt dieser Betrachtung bilden, fotorealistische perspektivische Darstellungen rekonstruierter historischer Architektur, die teils verändert, teils verloren ist. Die Anfertigung dieser Bilder auf Basis von computergestützten dreidimensionalen Modellen ist ein Betätigungsfeld von Architekten in der Bauforschung und ein Anwendungsbereich moderner architektonischer Darstellungsmethoden, die sich aus der Architekturperspektive entwickelt haben. Diese Bilder zeigen mehr als geometrische Rekonstruktionen von Räumen, sonst würden zur Darstellung Linienzeichnungen in orthogonalen Projektionen (Grundrisse, Schnitte und Ansichten) genügen. Die Perspektive dieser Bilder impliziert den Augpunkt eines menschlichen Betrachters und ihre fotorealistische Darstellung impliziert Eigenschaften des menschlischen Sehens. Um die Architektur so zu zeigen, wie Menschen sie sehen würden, muss die Geometrie der Szene durch Oberflächenqualitäten wie Farbe, Struktur und Glanz ergänzt und mit computergrafischen Methoden **ins Licht gesetzt** werden.

Die computergrafischen Methoden, die hier zur Anwendung kommen, berechnen die Verteilung von Licht und Schatten im Raum, ferner Lichteffekte wie Strahlen, Reflexionen und Glanzpunkte. Diese Verfahren gleichen denen **technischer Lichtsimulationen**, nur dass die numerischen Resultate zu Bildern weiterverarbeitet werden. Jede dieser **artist's impressions** ist eigentlich das Ergebnis der Anwendung präziser mathematischer Methoden, auch wenn die Voraussetzungen, Einschränkungen und Potenziale dieser Methoden im bauhistorischen Kontext selten reflektiert werden. 02

■ 01
Als Beispiel lese man zwischen den Zeilen: International Forum of Virtual Archaeology, The Seville Principles, Internet, ohne Jahr, https://web.archive.org/web/20160117033144/, vgl. http://www.arqueologiavirtual.com/carta/wp-content/uploads/2012/03/BORRADOR-FINAL-FINAL-DRAFT.pdf

■ 02
Das seit 2015 laufende Dissertationsprojekt des Autors »Lichtsimulation verlorener Gebäudezustände am Beispiel der Hagia Sophia Justinians« soll diese Arbeit leisten. Diese Arbeit stützt sich dabei auf Erfahrungen mit einer Lichtsimulation der Hagia Sophia, siehe: Lars Grobe, Oliver Hauck, Andreas Noback. Das Licht in der Hagia Sophia – Eine Computersimulation, in: Falko Daim, Jörg Drauschke (Hg.), Byzanz – Das Römerreich im Mittelalter, Volume 2,1 Schauplätze, Mainz 2010.

G.2 Licht als konstituierendes Element historischer Architektur

Licht und Architektur stehen in einem unlösbaren Zusammenhang: Beleuchtung als Voraussetzung menschlichen Sehens ist eng mit allen funktionalen Aspekten von Architektur verknüpft und zugleich ist Licht das dominante Medium, in dem wir Architektur erleben. 03 Beleuchtung erschließt die Elemente des architektonischen Entwurfs und dynamisiert ihn durch die natürliche Veränderung des Lichts psychologisch im Tages- und Jahresverlauf und unter dem Einfluss des Wetters. Künstliche und natürliche Beleuchtung bieten unzählige Möglichkeiten zur Inszenierung von Räumen, Objekten und Handlungen und nicht selten sind Lichteffekte selbst Mittelpunkt architektonischer Inszenierung. Licht steht damit in enger Beziehung zur kulturellen Bedeutung von Architektur. 04 Folglich sind **Lichtkonzepte** für die Erforschung historischer Gebäude von großem Interesse. 05 Erkenntnisse zum Stand technischer und wirtschaftlicher Möglichkeiten der Beleuchtung, zu gestalterischen Vorlieben und zu metaphysischen Vorstellungen von Licht erweitern das Verständnis typologischer Entwicklungen und des individuellen historischen Entwurfs. **Lichtsimulation** im Kontext der historischen Bauforschung kann helfen, Lichtkonzepte von Gebäuden zu klären, die verloren oder nur in veränderter Form erhalten sind.

■ 03
Für den Zusammenhang von Licht-Wahrnehmung und Architektur siehe insbesondere: Christian Bartenbach, Walter Witting, Handbuch der Lichtgestaltung: Lichttechnische und wahrnehmungspsychologische Grundlagen, Wien 2009; Willian M. C. Lam, Perception and lighting as formgivers for architecture, New York 1992; Grundlagen in: James J. Gibson, The perception of the visual world, Cambridge 1950; Lam and Ripman 1992.

■ 04
Überblick in Lam and Ripman 1992, Rüdiger Ganslandt, Harald Hofmann, Handbuch der Lichtplanung, Braunschweig, Wiesbaden 1992; und Richard Kelly, Light as an Integral Part of Architecture, in College Art Journal 12 (1) 1952, S. 24–30.; zur metaphysischen und mystischen Bedeutung von Licht: Peter Sloterdijk, Lichtung und Beleuchtung: Anmerkungen zur Metaphysik, Mystik und Politik des Lichts, in: Willfried Baatz (Hg.), Gestaltung mit Licht, Ravensburg 1994, S. 14–38.

■ 05
Für einen Überblick bieten sich zwei Tagungsbände an: Daniela Mondini und Vladimir Ivanovici (Hg), Manipulating light in pre-modern times. Architectural, artistic and philosophical aspects, Mendrisio 2014; Peter Schneider und Ulrike Wulf-Rheidt, Licht-Konzepte in der vormodernen Architektur, Diskussionen zur Archäologischen Bauforschung 10, Regensburg 2010.

■ 06
The London Charter Interest Group, The London Charter, http://www.londoncharter.org/fileadmin/templates/main/docs/london_charter_2_1_en.pdf, Hugh Denard, A new Introduction to The London Charter, in: Anna Bentkowska-Kafel et al., Paradata and Transparency, in: Virtual Heritage, Digital Research in the Arts and Humanities, Farnham 2012, S. 57–71.

G.3 Auseinandersetzung mit der Computervisualisierung in der Computergrafik und in den historischen Wissenschaften

Bilder haben keine Fußnoten und keine argumentative Struktur, die wissenschaftliches Arbeiten nachvollziehbar und kritikfähig macht. Das fotorealistische Erscheinungsbild von Computervisualisierungen evoziert eine Sicherheit, die im Gegensatz zu den Unsicherheiten der Rekonstruktionen steht. Die Auseinandersetzung mit den Visualisierungen in den historischen Wissenschaften zielt daher vornehmlich auf eine nachhaltige Qualitätssicherung der Modelle und deren Herstellungsmethoden und entwickelt Vorschläge für Annotationen, die den hypothetischen und unvollständigen Charakter des Modells transportieren, Quellen aufzeigen und Entscheidungsprozesse nachvollziehbar machen. 06 Selten sind allerdings Arbeiten, die computergrafische Methoden einsetzen, um Fragen der Beleuchtung historischer Architektur selbst zu klären, und sich in diesem Kontext theoretisch mit diesen Methoden auseinandersetzen. 07

Dem steht mit der Computergrafik ein mit Forschungsmitteln aus der Unterhaltungs-, Automobil- und anderen Branchen gut ausgestatteter Wissenschaftszweig gegenüber, der intensiv an der Verbesserung von Simulationsmethoden, Modellen zur Darstellung komplexer Materialeigenschaften, an der Untersuchung menschlicher Wahrnehmung und Vielem mehr arbeitet. 08 Auf der Suche nach Anwendungsmöglichkeiten hat auch der Einsatz computergrafischer Methoden im Kontext historischer Architektur aus dieser Richtung bereits eine theoretische Reflexion erfahren.

Ein systematischer Vorschlag, wie man bei der Darstellung historischer Architektur vorgehen kann, wird in **Cultural Heritage Predictive Rendering** von Happa et al. formuliert. 09 Die Autoren schlagen eine Abfolge von Arbeitsschritten vor, um Bilder historischer Szenen herzustellen und dabei ihre Angemessenheit zu untersuchen T1:

■ 07
Einzelne Beträge finden sich in den Tagungsbänden: Mondini and Ivanovici 2014, Schneider and Wulf-Rheidt 2010; weitere Beispiele: Mehlika Inanici, Lighting Analysis of Hagia Sophia, in: Direktorium des Hagia Sophia Museums (Hg.), Annual of Ayasofya Museum, Istanbul 2014, S. 166–202; Eva Zányi et al., Lighting and byzantine glass tesserae, in: Proceedings of the 2007 EVA London conference, 2007; Kate Devlin et al. Predictive lighting and perception in archaeological representations, in: UNESCO World Heritage in the Digital Age, 30th Anniversary Digital Congress, 2002; Jassim Happa et al., Illuminating the past: state of the art, in: Virtual reality 14 (3) 2010, S. 155–182.

■ 08
Allein Disney unterhält weltweit fünf große Forschungsinstitute und arbeitet beispielsweise mit der Carnegie Mellon University oder der ETH Zürich zusammen.

■ 09
Jassim Happa et al., Cultural heritage predictive rendering, in: Computer Graphics Forum, 31, 2012, S. 1823–1836.

☐ T1
Arbeitsschritte des Cultural Heritage Predictive Rendering

Arbeitsschritt Untersuchungsgegenstand	Ergebnis	Validierungsmethode	Fehlermetrik
1. Reflexionsverhalten der Oberflächen und Lichtquellen	Emmisionsgeometrie Materialmodelle	Goniometrischer Vergleich Oberflächeneigenschaften	Goniometrischer Fehler
2. Simulation des Lichttransports	Radiometrische Werte	Radiometrischer Vergleich	Radiometrischer Fehler
3. Visualisierung der Berechnungsergebnisse	Wahrgenommenes Bild	Vergleich der Wahrnehmung	Wahrnehmungsfehler
4. Historische Eigenschaften	Plausibles Bild	Historischer Vergleich	Abschätzung historischer Fehler

- → Dabei erweitern sie das in der Computergrafik etablierte **Predictive Rendering**, das auf perzeptuell und physikalisch korrekte Bilder abzielt, um eine historische Komponente: Durch Vergleich mit historischen Quellen und etablierten Annahmen soll die Plausibilität der Bilder ermittelt bzw. verbessert werden. Diese Aufgabe kommt einem historischen Experten zu. Der historische Vergleich lässt sich als dreistufiges Verfahren darstellten:
- → Am Anfang steht die vergleichende Untersuchung historischer Aufzeichnungen und bekannter Annahmen. Dabei wird eine **Timeline** der Veränderungen an **historischen Ankerpunkten,** beginnend mit dem derzeitigen Zustand, aufgestellt und dabei ein Graph von Hypothesen (Varianten) entwickelt. Die Veränderungen werden als Filter, verstellende Elemente und Beleuchtungsattribute kategorisiert.
- → In der Implementierungsphase werden notwendige Daten gewonnen und berechnet. Dabei werden die im ersten Schritt gewonnenen Erkenntnisse in Form von Beleuchtungs- und Materialeinstellungen und geometrischen Szenen integriert.

Die gewonnenen Resultate (wahrnehmungsoptimierte Bilder) werden mit den historischen Erkenntnissen verglichen. Dabei werden die Hypothesen als wahr, falsch oder unsicher bewertet. Je nach Ergebnis werden die Hypothesen überarbeitet und es wird wieder beim ersten Schritt der Untersuchung begonnen. Schließlich liegen Bilder vor, die als plausibel bezeichnet werden können.

Die Computergrafik bietet sich mit diesem Framework als Hilfswissenschaft an, verlangt aber nach einem historischen Experten, der ihre Arbeit bewertet. Aus dem Blickwinkel der historischen Bauforschung steht eine theoretische Auseinandersetzung mit den methodischen Voraussetzungen der Lichtsimulation in ihrem Feld noch aus und soll im Folgenden versucht werden.

G.4 Verankerung der Lichtsimulation in der historischen Bauforschung

Die Frage nach dem Nutzen fotorealistischer Computervisualisierungen historischer Architektur für die Bauforschung und damit ihrer **Kritikfähigkeit** kann nur im **Kontext der Untersuchung von Beleuchtung** als Teildisziplin der historischen Bauforschung beantwortet werden. Hier können die Verfahren der Visualisierung als **Lichtsimulation** begriffen und als experimentelle Methode verankert werden. Das heißt, die historische Bauforschung sollte die Lichtsimulation nicht als Beitrag externer Experten auffassen, z. B. in der Weise, wie sie dendrologische Untersuchungen für ihre Arbeit nutzt, sondern sie muss sich die Methode zu eigen machen. Die Bauforschung muss dazu eine eigne Sicht auf physikalische, physiologische und wahrneh-

mungspsychologische Aspekte der Beleuchtung in ihrem Feld entwickeln. Um Lichtsimulation sinnvoll nutzen zu können, ist zu klären:

- → für welche Fragen der historischen Bauforschung die Lichtsimulation Antworten liefern kann,
- → wie sie dafür geeignete Hypothesen formulieren muss,
- → wie sie die Expertise natur- und ingenieurwissenschaftlicher Akteure für ihre Formen der Wissensgewinnung integrieren kann,
- → in welcher Beziehung die Lichtsimulation zur Rekonstruktion historischer Architektur mittels computergestützter Modelle steht,
- → wie die computergrafischen Methoden der Lichtsimulation Legitimität gewinnen,
- → mit welchen besonderen Unsicherheiten bei der Anwendung der Lichtsimulation im historischen Umfeld zu rechnen ist, wie die Ergebnisse der Lichtsimulation für die Bauforschung interpretiert werden können.

G.5 Methodik der Lichtsimulation in der historischen Bauforschung

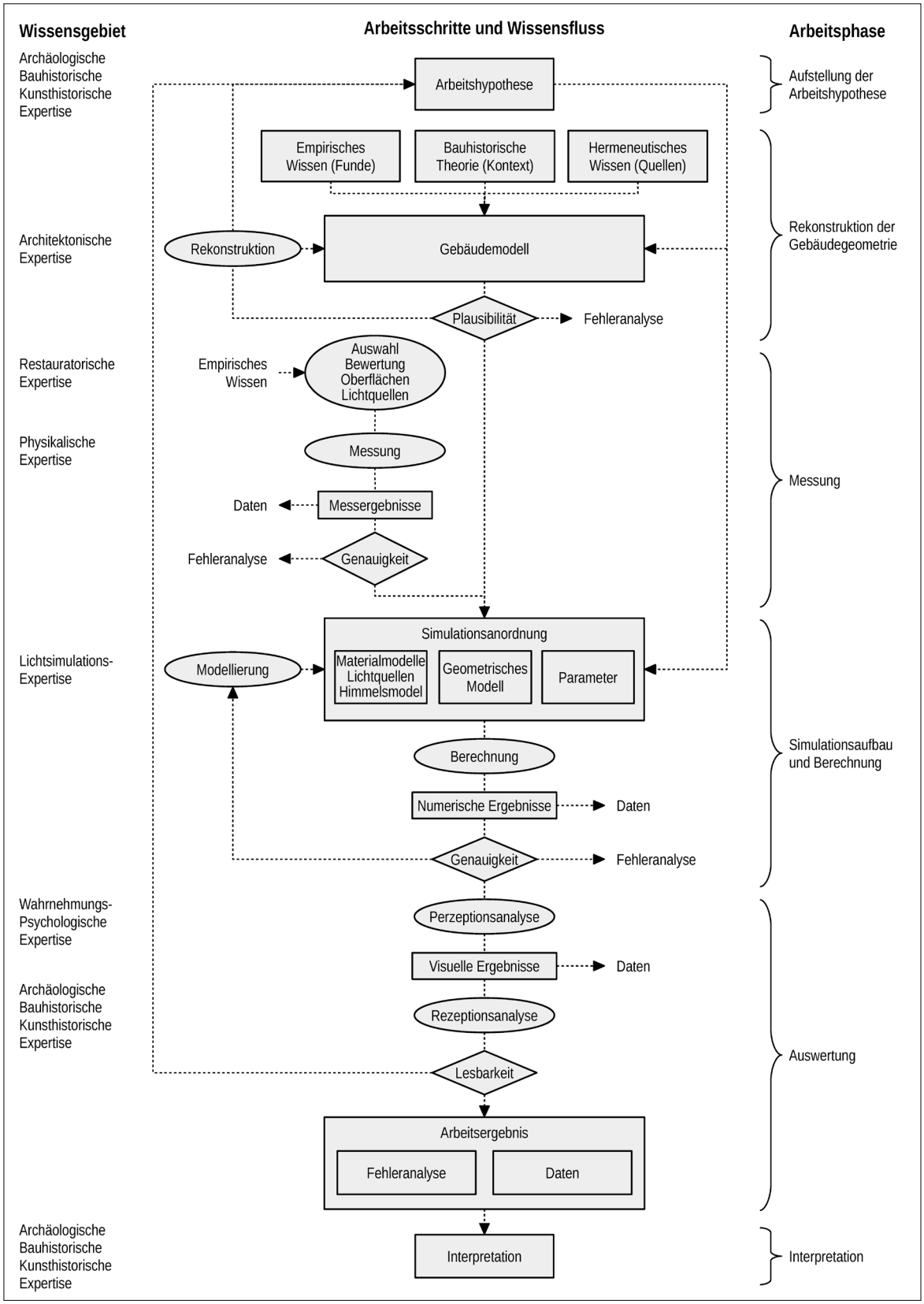
In der London Charter wird der Begriff **computer-visulisation** verwendet. Damit wird die Erzeugung dreidimensionaler Modelle historischer Bauzustände über ihr Produkt definiert. 10 Hier sollen zur Klärung der Methodik drei Begriffe verwendet werden: **Rekonstruktion, Visualisierung** und **Simulation**. Die Herstellung eines Gebäudemodells wird hier als Methode aus eigenem Recht verstanden: die computergestützte **Rekonstruktion** ist ein Verfahren, Erkenntnisse empirischer, quellenanalytischer und theoretischer Herkunft in die räumliche Sphäre zu übersetzen und dabei Kohärenz herzustellen. Sie verfolgt also einen **holistischen** Ansatz. Dadurch treten Widersprüche und Lücken im vorhandenen Wissen zutage und idealerweise entstehen durch das Zusammenfügen der Teile neue Vorstellungen vom Gebäude als Ganzem. **Visualisierung** wäre dann eine Methode zur medialen Vermittlung von Ergebnissen, die aus der Rekonstruktion gewonnen wurden. Die **Rekonstruktion** kann aber auch ohne das Ziel, visuelle Ergebnisse herzustellen, betrieben werden, sie kann zum Beispiel dazu dienen, akustische oder statische Fragen zu klären.

■ **10**
London Charter 2009.

Im Gegensatz zur Visualisierung wird die Lichtsimulation hier als **Experiment** an einem virtuellen Objekt verstanden, mit dem sich **Hypothesen** überprüfen lassen. Im Gegensatz zum holistischen Ansatz der Rekonstruktion untersucht sie möglichst **spezifische** Fragen der Beleuchtung historischer Architektur. Die **Lichtsimulation** ist von der Rekonstruktion abhängig, sie kann ohne ein geschlossenes geometrisches Modell nicht durchgeführt werden. Die Auseinandersetzung mit den Resultaten der Rekonstruktion ist daher integraler Bestandteil ihrer Methodik, dem besondere Aufmerksamkeit gebührt, weil in der Rekonstruktion die größten methodischen Unsicherheiten

vermutet werden dürfen. Die Lichtsimulation führt die Rekonstruktion mit dem **Modellieren der Oberflächen und Lichtquellen** fort und integriert dazu die Ergebnisse **physikalischer Messungen** als zusätzliches empirisches Wissen. Die Lichtsimulation liefert zunächst numerische Ergebnisse wie die Verteilung von Beleuchtungsstärken. **Visuelle Ergebnisse** werden als Teil der Auswertung dieser numerischen Resultate auf Basis wahrnehmungspsychologischer Erkenntnisse verstanden. Lichtsimulation stellt ein Bindeglied zwischen der empirischen und der quellenanalytischen Wissensgewinnung dar, indem sie die Wahrnehmung räumlicher Szenen durch den historischen Betrachter rekonstruiert. Die Lichtsimulation lässt sich in folgende Arbeitsphasen unterteilen 02:

1. Die Aufstellung einer Arbeitshypothese
2. Erstellung des Gebäudemodells mittels computergestützter Rekonstruktion der Gebäudegeometrie
3. Die Messung der Oberflächen und Lichtquellen
4. Simulationsaufbau und Berechnung
5. Auswertung der numerischen Ergebnisse
6. Interpretation der visuellen und numerischen Ergebnisse



☐ 02
Ablaufschema Lichtsimulation mit Arbeitsschritten

G.6 Aufstellung der Arbeitshypothese

Für den wissenschaftlichen Arbeitsprozess ist das Aufstellen einer Hypothese unerlässlich. Die Möglichkeiten für das Zusammenspiel von Licht und Architektur sind mannigfaltig, wenn nicht unendlich. Das Aufstellen einer Arbeitshypothese hilft, die **spezifischen Beleuchtungscharakteristika** eines Bauzustands zu erkennen und genauer zu untersuchen. Darüber hinaus soll sie Annahmen bewusst machen, die zwangsläufig troffen werden, wenn Perspektiven ausgewählt, Materialien definiert, eine Tageszeit festgelegt oder über geometrische Unsicherheiten entschieden wird.

Auch wenn Hypothesen möglichst spezifisch sein sollen, geschieht ihre Findung im Kontext des Ganzen. Die Hypothese verbindet daher Fragen der Beleuchtung mit jenen der Bautechnik, der Statik, der Kosten, der Nutzung, des Handwerks, der Symbolik, des Narrativs etc. Dazu soll sie Textquellen oder Befunde interpretieren und entwickelte Theorien auf den Bauzustand anwenden, die Wirkung auf den historischen Betrachter antizipieren, die Rolle des Lichts für die Inszenierung und funktionale Nutzung des Gebäudes interpretieren und die dynamisierende Wirkung veränderlicher Beleuchtung für die Architektur erfassen.

Die weiter ausgearbeitete **Arbeitshypothese** sollte in Relation zum Umfang der Kenntnisse über den Bauzustand stehen. Je weniger über den Bauzustand bekannt ist, desto stärker sollte man die Hypothese einschränken, entweder auf allgemeine Aussagen zur Lichtverteilung oder auf Lichteffekte, die sich auch bei großen Unsicherheiten zeigen lassen. Dabei ist es hilfreich zu wissen, dass für die menschliche Wahrnehmung relative Helligkeitsunterschiede entscheidend sind und nicht absolute Werte. Eine weiter ausgearbeitete Arbeitshypothese sollte Ideen formulierten, unter anderem:

- → zu Einsatz und Verhältnis von Tageslicht und Kunstlicht,
- → zu Lichtrichtungen und herausgehobenen Orten,
- → zu Anzahl, Platzierung und Größe von Öffnungen und Lichtquellen,
- → zum Zusammenhang zwischen der Veränderung des Sonnen- und Himmelslichts im Tages- und Jahresverlauf und der Ausrichtung und Gestaltung des Gebäudes,
- → zum Zusammenhang zwischen Materialwahl und Lichtverteilung,
- → zu erwartenden Effekten wie Glanz, Blendung, Dunkelheit,
- → zum erwarteten Verhältnis zwischen direkter und indirekter Beleuchtung.

Ein weiterer Schritt bei der Aufstellung der Arbeitshypothese ist, die architektonischen Gestaltungsmöglichkeiten von Licht, Raum, Material und Form mit den physikalischen Größen der Lichtsimulation in Relation zu setzen, also Metriken zu finden, mit denen sich gestalterische Entscheidungen im Ergebnis zeigen lassen.

G.7 Rekonstruktion der Gebäudegeometrie

Wie oben formuliert, ist die Lichtsimulation einer historischen Szene nicht ohne eine Rekonstruktion des Bauzustandes denkbar. Zugleich kann die Lichtsimulation in einem iterativen Prozess zur Rekonstruktion eines Bauzustandes beitragen, indem sie ihre Ergebnisse einbringt und mögliche Varianten ausschließt. Die Lichtsimulation stellt sich dabei neben andere Möglichkeiten der Untersuchung mittels eines computergestützten Modells wie die akustische und thermische Simulation, statische Untersuchungen, Massenermittlung für Massenflüsse und wirtschaftliche Untersuchungen etc.

Zunächst muss aber vorhandenes Wissen zusammengeführt werden, um dabei Lücken und Widersprüche durch weitere Nachforschungen zu schließen. Bei einem existierenden Bauwerk kann es sinnvoll sein, sich, wie bei Happa et al. beschrieben, schrittweise vom derzeitigen zu früheren Zuständen vorzuarbeiten. [11] Varianten zu formulieren hilft, Lücken und Widersprüche zu konkretisieren.

■ **11**
Happa et al. 2012.

1. Empirisches Wissen ist alles Wissen, das aus der Anschauung materieller Spuren, also Funden und Befunden am Bau, gewonnen werden kann. Dazu gehört auch all das, was durch Messung, Fotografie etc. in das Modell einfließt. Modelle auf Basis empirischer Erkenntnisse lassen sich an der Realität überprüfen; sie zeigen gleichzeitig jedoch auch die Lücken empirischer Erkenntnis und müssen diese schließen. Es ist nicht immer wünschenswert, dass empirische Erkenntnisse ungefiltert in ein Modell einfließen. Beispielsweise kann ein Laserscan Verformungen einbeziehen, die in einem früheren Bauzustand nicht belegt sind, ein Foto zeigt Altersschäden und Schmutz oder eine Oberfläche unter einer untypischen Beleuchtung. Ein Modell sollte das **Wissen** über einen Bauzustand darstellen und möglichst wenig Zufälliges und Unreflektiertes mitschleppen.

2. Die Quellenanalyse von Texten, Bilder etc. liefert weitere Erkenntnisse über einen Bau. Aussagen über Architektursind nicht selten unpräzise oder in metaphorischem Stil verfasst und daher interpretationsbedürftig. Quellen können generell ideologisch gefärbt sein und eigenständige Interpretationen der Architektur darstellen, sie verraten dadurch Zusammenhänge zwischen der Wahrnehmung der zeitgenössischen Betrachter und den mit der Architektur verknüpften Narrativen. In jedem Fall muss das Ergebnis einer ausreichenden Quellenkritik in die Rekonstruktion einfließen.

3. Der Stand der bauhistorischen Forschung zum räumlichen und zeitlichen Kontext des Gebäudes ist bei der Rekonstruktion einzubeziehen. Theorien zu Bautraditionen und Bautypentwicklung, von den Fähigkeiten und Methoden der Bauleute, zu regionalen Besonderheiten und den Rollen der Baubeteiligten zur Entstehungszeit helfen die empirischen und quellenanalytischen Erkenntnisse zu verstehen und Lücken im Modell deduktiv zu schließen.

4. Wesentlich für eine computergestützte Rekonstruktion ist, dass sie Wissen aus verschiedenen Wissensgebieten miteinander verbindet, die jeweils andere Erkenntnismethoden anwenden. Dabei überprüft sie gegenseitig empirisch, quellenanalytisch und theoretisch gewonnene Erkenntnisse. Sie unternimmt den Versuch, diese Erkenntnisse mithilfe eines virtuellen dreidimensionalen Modells ineinander zu integrieren, d. h. das akkumulierte Wissen erhält räumliche Form und Ausdehnung. In einem solchen Modell ist ein Weg von A nach B nicht nur eine gedachte Verbindung, sondern muss von einem Menschen geometrisch beschritten werden können. Dadurch erhalten Bauteile Dimensionen und damit ein Volumen, das Gewicht, Statik, Kosten etc. impliziert.

Rekonstruktionsmodelle müssen wie die architektonischen Modelle kohärent sein. Die Erstellung eines Rekonstruktionsmodells gleicht insofern der Herstellung eines Modells im architektonischen Entwurf. Um eine architektonische Idee baubar zu machen, müssen Widersprüche funktionaler, technischer und geometrischer Natur aufgelöst werden, Kosten, Materialflüsse und Ansprüche der verschiedenen Gewerke antizipiert und der Bauherr überzeugt werden. Architekten suchen in diesem Prozess nach Synergien und Optimierungen. Der Architekt lernt, Entscheidungen nicht monokausal zu begründen und an Narrative anzuknüpfen. Seine Herangehensweise ist davon geprägt, Komplexität zu reduzieren und Kohärenz herzustellen. 12

Bei der Rekonstruktion der Gebäudegeometrie und der Modellierung für die Simulation selbst werden Arbeitsmittel und Methoden angewandt, auf die Architekten im Entwurfsprozess und der Entwurfspräsentation zurückgreifen. 13 Tatsächlich sind es häufig ausgebildete Architekten, die Computervisualisierungen historischer Bauten herstellen. Sie dürfen diese Methoden daher durchaus als Teil ihrer Disziplin beanspruchen, müssen dazu aber ihre Rolle im interdisziplinären Kontext verstehen, die Unterschiede zwischen historischen und heutigen Bauprozessen und Denkweisen reflektieren und ein Gleichgewicht zwischen dem Einbringen eigener Entwurfserfahrung und dem wissenschaftlichen Zweifel an den Ergebnissen finden.

■ 12
Eine Analyse des architektonischen Entwurfs: Jörg Potthast, »Sollen wir mal ein Hochhaus bauen?«: das Architekturbüro als Labor der Stadt, Schriftenreihe der Forschungsgruppe »Metropolenforschung« des Forschungsschwerpunkts Technik-Arbeit-Umwelt am Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung, Berlin 1998, Nr. FS II 98–502.

■ 13
Eine Beschreibung dieser Arbeitsweisefindet sich in: Jörg Potthast, 'Sollen wir mal ein Hochhaus bauen?': das Architekturbüro als Labor der Stadt, Schriftenreihe der Forschungsgruppe »Metropolenforschung« des Forschungsschwerpunkts Technik–Arbeit –Umwelt am Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung, Berlin 1998, Nr. FS II 98–502, S.63–65.

Die computergestützte Rekonstruktion bedient sich der architektonischen Expertise also gleich doppelt: Erstens, indem sie Methodenwissen der Architektur adaptiert, um komplexe bauhistorische Wissenszusammenhänge zu organisieren und im dreidimensionalen Raum auf Kohärenz, Vollständigkeit und Realisierbarkeit zu überprüfen. Zweitens bedient sie sich der Erfahrung des Architekten, um Bauentscheidungen ihrer historischen Vorgänger nachzuvollziehen und Entscheidungen zu treffen, wo historisches Wissen nur lückenhaft vorhanden ist. 03

☐ 03
Rekonstruktion des Entwurfs der Hagia Sophia: Schnitt durch das Modell überlagert mit einer Schnittzeichnung der Bauaufnahme von Robert van Nice. Die idealisierte Geometrie der Rekonstruktion weicht insbesondere in den höher liegenden Teilen des Gebäudes deutlich von der tatsächlichen Geometrie des Gebäudes ab. Das Gebäude hatte sich schon während der Bauzeit verformt und die Geometrie der höher liegenden Bauteile wurde angepaßt (unter Verwendung von: Robert L. van Nice: Saint Sophia in Istanbul. An architectural survey. I. II. Washington DC, 1965 / 1986.

5. Ergebnis der Erstellung des Gebäudemodells und Iteration des Rekonstruktionsprozesses: Die Erstellung des Gebäudemodells liefert die Basis für das geometrische Modell in der Simulationsanordnung. Es beinhaltet die Verteilung von Materialen und Lichtquellen, die Umgebung und Ausrichtung des Gebäudes etc. Darüber hinaus lässt sich anhand der dokumentierten Widersprüche und Lücken die **Plausibilität** oder Wahrscheinlichkeit des Modells abschätzen. Kriterien dafür sind die Kohärenz und Vollständigkeit des zusammengefassten Wissens sowie die Realisierbarkeit des Gebäudezustandes in technischer, wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Hinsicht. Ist das Resultat nicht ausreichend plausibel, ist die Arbeitshypothese anzupassen, nach weiteren Erkenntnissen zu suchen, womit die Iteration des Rekonstruktionsprozesses beginnt. 14

■ **14**
Genauer untersuchen sollte man die Frage, wie zu verfahren ist, wenn sich das Ergebnis quellenanalytischer und empirischer Wissensgewinnung widersprechen. Generell wird der Wahrheitsgehalt von Aussagen in unterschiedlichen Wissenschaftsdisziplinen nach jeweils anderen Kriterien bestimmt, die nicht immer miteinander kompatibel sind. Daher ist nicht im Vorhinein klar, welche Rolle die gemeinsam gewonnenen Erkenntnisse in der Wissensgewinnung der Einzeldisziplinen spielen können.

G.8 Messung der Oberflächen und Lichtquellen

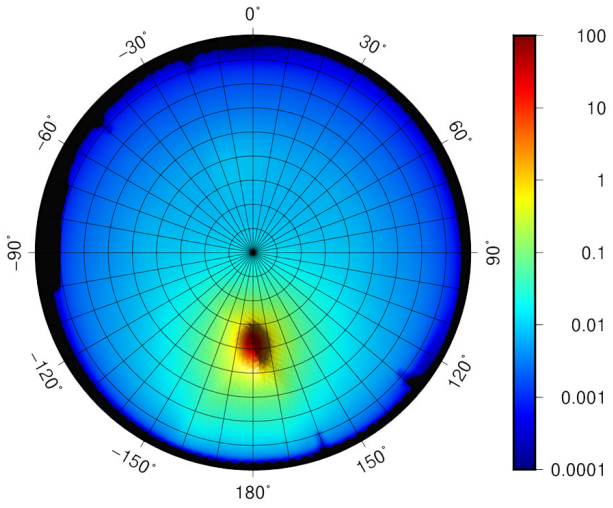
Zu den Voraussetzungen einer Lichtsimulation gehören **Materialmodelle**, die die optischen Eigenschaften der Oberflächen und Lichtquellen beschreiben:

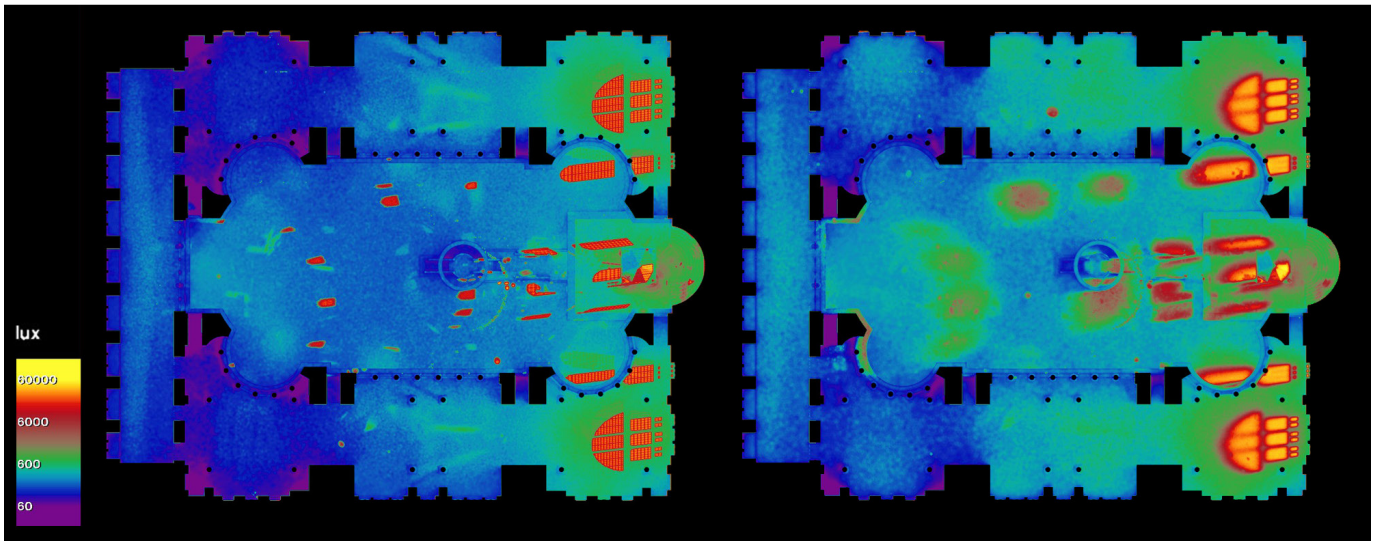
- → Farbe bzw. Absorptionsgrad, Muster (albedo map)
- → Winkelabhängiges Reflexions- und Transmissionsverhalten (Bidirectional Scattering Distribution Function (BSDF) 15) als Maß für Glanz und Streuung. 04
- → Oberflächenrelief bzw. Selbstverschattung (height map) für Lichtquellen räumliche Abstrahlcharakteristik (Lichtstärke-Verteilungskurve (LVK)

Diese Daten müssen an geeigneten Proben gemessen werden. Auf Basis dieser Messung werden die Materialmodelle gewählt und parametrisiert.
Um die Genauigkeit der Modellierung zu ermitteln, muss das Resultat mit den Messungen verglichen werden.

■ **15**
Fred E. Nicodemus, Joseph C Richmond, Jack J Hsia, Irving W Ginsberg, Thomas Limperis, Geometrical considerations and nomenclature for reflectance, Washington 1977.

☐ 04
Typische Probe von zylindergeblasenem römischem Fensterglas und Messungen ihres Streuverhaltens bei 40 Grad Einfallswinkel. Darunter die Auswirkung des Streuverhaltens auf die Lichtverteilung im Inneren der Hagia Sophia. Die optischen Eigenschaften historischer Materialien sind zumeist unbekannt. Alterungserscheinungen erschweren zusätzlich ihre Messung. Für die Lichtverteilung in Innenräumen sind die Eigenschaften der Verglasung und der Oberflächen aber von entscheidender Bedeutung. (TU Darmstadt / Hochschule Luzern)





Bei historischen Gebäuden ist mit komplexen Oberflächeneigenschaften zu rechnen, die sich aus der handwerklichen Fertigung, der Verwendung natürlicher Materialien und dem Qualitätsanspruch der Bauten ergeben. Moderne Büroumgebungen hingegen, die das Hauptanwendungsgebiet technischer Lichtsimulationen darstellen, werden zumeist mit einfachen matten Oberflächen gestaltet. Für historische Gebäude kann daher nicht auf gut überprüfte Materialmodelle zurückgegriffen werden. Das stellt eine besondere Anforderung an diesen Arbeitsschritt dar und macht die Lichtsimulation historischer Bauten es zu einem wichtigen Feld der Grundlagenforschung. Gleiches gilt entsprechend auch für historische Lichtquellen. 16

1. Auswahl geeigneter Oberflächen durch konservatorische Bewertung: Um geeignete Oberflächen für die Vermessung zu finden, sind Funde oder Bauteile einer **konservatorischen Bewertung** zu unterziehen. Dabei ist zu klären, inwieweit sich die Oberflächeneigenschaften einer Probe durch Alterung oder Verschmutzung verändert haben. Zum Vergleich kann es sinnvoll sein, historische Herstellungsverfahren und Oberflächenbearbeitung nachzuvollziehen und Proben nachzufertigen. Auch in diesem Bereich ist Grundlagenforschung nötig.

2. Messung: Die in der Visualisierung häufig angewandte Praktik, Oberflächen mit fotografischen Aufnahmen zu füllen, ist für eine Simulation der Lichtwirkung unter wechselnder Beleuchtung unzureichend. Fotos enthalten neben Farben und Mustern auch die Selbstverschattung strukturierter Oberflächen und Glanzeffekte einer bestimmten Beleuchtung. Um die oben aufgeführten optischen Eigenschaften von der Beleuchtung unabhängig zu messen, gibt es zwei grundsätzliche Verfahren: die gemeinsame Erfassung der Eigenschaften als Bidirectional Texture Function (BTF) 17 oder deren separate Erfassung. Erstere bedient sich eines Arrays von Kameras und Leuchten und rechnet die gewonnenen Daten um. Dieses Verfahren ist an ein Labor gebunden und eignet sich vor allem für dreidimensionale Bauteile bis zu ca. 1 m Kantenlänge.

Bei der separaten Erfassung werden Farben und Reflexionsgrade mit einem (mobilen) Spektrometer gemessen. Muster können mit polarisiertem Licht erfasst werden 18, Oberflächenreliefs mit Laserscans, Nahfeldphotogrammetrie oder Reflectance Transformation Imaging (RTI). 19 Für eine exakte Erfassung der winkelabhängigen Reflexion bzw. Streuung ist mit der **Goniophotometrie** 20 allerdings auch hier eine laborgebundene Messung nötig. 21 Proben müssen folglich transportiert werden.

3. Genauigkeit der Messungen: Messgeräte und ihre Anordnung beeinflussen die Genauigkeit der Messung. Besonders hervorzuheben sind jedoch Unsicherheiten, die durch die Alterung und Verschmutzung historischer Oberflächen verursacht werden. Diese zu quantifizieren ist ein wichtiger Teil der Fehleranalyse.

16
Zu spektralen Eigenschaften historischer Lichtquellen: Kate Devlin, Alan Chalmers, Duncan Brown, Predictive lighting and perception in archaeological representations, in: UNESCO World Heritage in the Digital Age, 30th Anniversary Digital Congress, 2002.

17
Christopher Schwartz, Michael Weinmann, Roland Ruiters, Reinhard Klein, Integrated High-Quality Acquisition of Geometry and Appearance for Cultural Heritage, in: VAST: International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage, Eurographics Association, Goslar 2011, S. 25–32; Christopher Schwartz, Ralf Sarlette, Michael Weinmann, Reinhard Klein, DOME II: A Parallelized BTF Acquisition System, in: Proceedings of Eurographics Workshop on Material Appearance Modeling: Issues and Acquisition, Zaragoza 2013, S. 25–31.

18
Wil Hershberger, Taming those Annoying Highlights: Cross-Polarization Flash Macro Photography, https://web.archive.org/web/20061104203652/ und vgl. http://www.naturescapes.net/042004/wh0404.htm.

19
Lindsay W. MacDonald, Visualising an Egyptian Artefact in 3D: Comparing RTI with laser scanning, in: Proceedings of the 2011 international conference on Electronic Visualisation and the Arts, , S. 155–162.

20
Peter Apian-Bennewitz, New scanning gonio-photometer for extended BRTF measurements, in: SPIE Optical Engineering + Applications, 77920O–77920O. International Society for Optics and Photonics, 2010; J. Kohler, T. Noll, G. Reis, D. Stricker, A full-spherical device for simultaneous geometry and reflectance acquisition, in: 2013 IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, 2013, S. 355–362; und D. Hünerhoff, U. Grusemann, A. Höpe, New robot-based gonioreflectometer for measuring spectral diffuse reflection, in: Metrologia 43 (2) 2006, S. 11.

G.9 Simulationsaufbau und Berechnung

Die Simulationsanordnung ist als Erweiterung und Spezifizierung des Gebäudemodells zu verstehen. Dabei wird aus dem Rekonstruktionsmodell insbesondere die makroskopische Geometrie übernommen und ergänzt T2. Insgesamt besteht die Versuchsanordnung aus folgenden Teilen, die entsprechend der Arbeitshypothese zu parametrisieren sind:

- → Geometrisches Modell auf Grundlage der Rekonstruktion (inkl. Ort, Ausrichtung, verschattende Umgebung),
- → Himmelsmodell,
- → künstliche Lichtquellen,
- → Materialmodelle auf Grundlage der Messungen, Einstellungen für die Berechnung, wie die Wahl von Perspektiven und Messpunkten.

Als Himmelsmodelle können standardisierte synthetische Modelle zum Einsatz kommen, die mit Ortsangaben und Tageszeiten eingestellt werden. 22 Interessant können aber auch individuelle, mit speziellen fotografischen Verfahren erfasste Himmelslicht-Situationen sein, mit denen sich zeigen lässt, wie Architektur durch Licht dynamisiert wird. 23

■ 21
Experimentelle portable Ansätze: Peiran Ren, Jiaping Wang, John Snyder, Xin Tong, Baining Guo, Pocket Reflectometry, in: ACM SIGGRAPH 2011 Papers, 2011, S. 45:1–45:10; Westlund and Meyer 2001.

■ 22
Richard Perez, Robert Seals, Joseph Michalsky, All-weather model for sky luminance distribution — preliminary configuration and validation, in: Solar energy 50 (3) 1993, S. 235–245.

■ 23
Paul Debevec, Making »The Parthenon«, in: VAST05. The 6th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage, Eurographics Association, 2005; Jessi Stumpfel, Chris Tchou, Andrew Jones, Tim Hawkins, Andreas Wenger, Paul Debevec, Direct HDR Capture of the Sun and Sky, in: AFRIGRAPH '04 Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Graphics, Virtual Reality, Visualisation and Interaction in Africa, New York 2004, S. 145–149.

□ T2
Maßstäbe und Rekonstruktionsverfahren

Maßstab	Ungefähre Größe	Rekonstruktion	Eigenschaft	Datenerhebung Messung
Makro	größer als 10mm	Architektur Umgebung	Geometrie Lichtquellen Himmel	Bauaufnahme Quellenauswertung Befundanalyse Laserscans Photogrammetrie Wetterbestimmung
Meso	10mm bis 0.1mm	Oberflächengestaltung	Material- und Farbverteilung Oberflächenprofil	Restauratorische Befundanalyse Nahfeldphotogrammetrie Fotografie Laserscan
Mikro	klener als 0,1mm	Materialauswahl Finish	Reflexionseigenschaften	Restauratorische Befundanalyse Goniophotometrie Spektroskopie

1. Modellierung: Für die Versuchsanordnung muss das Rekonstruktionsmodell angepasst und mit Materialmodellen versehen werden. Die meisten Berechnungsverfahren verstehen Geometrie nur als einfache ebene Flächen. Die Geometrie muss zudem vollkommen geschlossen sein und sie muss an die Aufteilung von Oberflächenmaterialien angepasst und mit Materialmodellen verbunden werden. Letztere beschreiben die Oberflächen auf dem meso- und mikroskopischen Maßstab T2.

Diese Eigenschaften der Oberflächen können mit Parametern und mathematischen Formeln gefasst werden (parametrische bzw. analytische Modelle) 24 oder direkt aus gemessenen Daten interpoliert werden (datenbasierte Modelle). 25 Datenbasierte Modelle sind dabei universeller und häufig genauer, analytische Modelle sind dafür einfacher zu handhaben und können auch für Oberflächen verwendet werden, für die nur gealterte Proben verfügbar sind, also wenn keine guten Messergebnisse vorliegen. Zudem liegt in der Übersetzungsleistung der Parametrisierung auch ein wissenschaftlicher Gewinn: Man muss die Eigenschaften der Oberflächen verstanden haben. Analog zu dem Gebäudemodell repräsentiert ein parametrisiertes Materialmodell das Wissen über die Oberfläche. Dennoch sollten die parametrisierten Modelle auf Messungen basieren und mit ihnen verglichen werden. 26

2. Berechnung: Um herauszuarbeiten, welche Fragen die Lichtsimulation beantworten kann und nach welchen Kriterien ein Modell als ausreichend zu betrachten ist, lohnt es sich, die Berechnungsverfahren genauer anzusehen:

Numerische Simulationen kommen zum Einsatz, wenn sich Probleme nicht mehr analytisch lösen lassen, d. h. wenn ein Zusammenhang nicht mehr in einer Gleichung mit einer lösbaren Zahl von Unbekannten beschrieben werden kann. Dazu wird das Problem in analytisch fassbare Teile zerlegt (die sich also mit Gleichungen lösen lassen). Bei der Verbindung der Teile werden **stochastische Verfahren** eingesetzt. Untersucht man eine ausreichend große Anzahl von Einzelfällen (Proben), kann man Aussagen über das Gesamtproblem machen. Es stellt sich dabei ein Zusammenhang zwischen der Komplexität des Problems, der erreichten Genauigkeit und der Anzahl der Proben ein. Die mögliche Anzahl von Proben ist dabei häufig der limitierende Faktor, der über die mögliche Komplexität und die erreichbare Genauigkeit entscheidet. Probleme müssen so formuliert werden, dass sie sich in gegebener Zeit berechnen lassen.

Im Fall der Lichtsimulation ist das zu lösende Gesamtproblem zumeist die Frage, wie sich das Licht gegebener Lichtquellen in einer Szene verteilt; das Teilproblem entspricht den einzelnen Reflexions-, Berechnungs- und Absorptionsprozessen an den einzelnen Oberflächen. Die Probe ist ein einzelner Lichtstrahl, der Quelle und Ziel verbindet und dabei abgelenkt und abgeschwächt wird. Durch Aufsummieren der Strahlen, die unterschiedliche Wege im Raum genommen haben, ergeben sich Leuchtdichten und Beleuchtungsstärken.

■ 24
Überblick: Julie Dorsey, Holly Rushmeier, François Sillion, Digital Modeling of Material Appearance, San Francisco 2008.

■ 25
Greg Ward, Computing and applying variable-resolution data for bidirectional scattering distribution functions. Technical report, United States Department of Energy 2011.

■ 26
Beispiele: Arne Dür, David Geisler-Moroder, Validation of Radiance against CIE171:2006 and Improved Adaptive Subdivision of Circular Light Sources. http://radiance-online.lbl.gov/community/workshops/2008-fribourg/Content/Geisler-Moroder/RW2008_DGM_AD.pdf; Gregory J. Ward, Measuring and modeling anisotropic reflection, in: ACM SIGGRAPH Computer Graphics 26 (2) 1992, S. 265–272; Mashhuda Glencross, Gregory J. Ward, Caroline Jay, Jun Liu, Francho Melendez, and Roger Hubbold, A Perceptually Validated Model for Surface Depth Hallucination, in: ACM SIGGRAPH conference proceedings, Los Angeles 2008, S. 27:59:1–59:8 und Greg Ward, Mashhuda Glencross, A case study evaluation: perceptually accurate textured surface models, in: Proceedings of the 6th Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization, 2009, S. 109–115.

Die Schwierigkeit liegt dabei darin, den Zusammenhang von Lichtquelle und einem Messpunkt herzustellen. Den Lichttransport im Modell ermittelt man nach den physikalischen Gesetzen der **geometrischen Optik.** [27] Im für die technische Lichtsimulation gängigsten Verfahren, dem **Backward Raytracing**, geht man bei der Strahlverfolgung vom Messpunkt aus. [28] Über das Schicksal eines Lichtstrahls an den Orten von Reflexion oder Brechung entscheidet hierbei eine Mannigfaltigkeit von Materialmodellen. Diese verbinden Materialeigenschaften zu einer Wahrscheinlichkeitsfunktion, welche die Ablenkung oder Absorption eines Lichtstrahls bestimmt. Wenn sich im Strahlengang diffus reflektierende Oberflächen befinden, die Licht aus vielen Richtungen reflektieren, müssen ausreichend viele Strahlen in diese Richtungen geschickt werden, um Lichtquellen oder weitere (helle) Flächen zu finden. Mit der Anzahl der Reflexionsvorgänge steigt dabei die Zahl der zu untersuchenden Strahlen exponentiell an. Je kleiner dabei Lichtquellen oder wichtige helle Flächen sind, desto zeitaufwendiger muss die Berechnung gewählt werden, sonst vergrößert sich die Gefahr, dass Lichtquellen übersehen werden und damit das Ergebnis verfälscht wird. Es muss also genau geprüft werden, ob die mögliche Anzahl von Proben ausreicht, um ein Problem adäquat zu lösen.

3. Numerische Ergebnisse: Die Simulation liefert numerische Resultate in folgender Form:

- → Lichtverteilung auf den Oberflächen (Beleuchtungsstärken) oder an spezifischen Messpunkten,
- → Helligkeitsverteilung in einem Blickfeld (Leuchtdichten),
- → Alternative Metriken wie Lichtfelder.

Technische Lichtsimulationen liefern diese Werte in absoluten photometrischen Einheiten mit einen großen Kontrastumfang (HDR) und zumeist für drei Farbkanäle (oft RGB). Diese können im Fall der Leuchtdichten zu Bildern weiterverarbeitet werden. Insbesondere mit Beleuchtungsstärken lassen sich aber auch **nicht bildbasierte Analysen** erstellen, wie zum Beispiel Untersuchungen, wie eine bestimmte Materialwahl die Lichtverteilung beeinflusst oder ob mit der Helligkeitsverteilung Räume hierarchisiert werden.

4. Genauigkeit der Berechnung: Die erreichte Genauigkeit der Berechnung ist von der Anzahl der Strahlen und der Eignung der Materialmodelle für die zu erwartenden Lichteffekte an den Oberflächen bestimmt. Die technische Lichtsimulation weist die Eignung ihrer computergrafischen Methoden für einen Anwendungsfall durch den Vergleich zu Messungen nach. [29] Solche Nachweise finden sich ausschließlich für zeitgenössische Wohn- und Bürogebäude und moderne Baumaterialien. Historische Gebäude weisen aber häufig eine komplexere Geometrie und komplexere Materialien als die heutige Architektur auf. Dies ist ein weiteres Feld für die Grundlagenforschung. [30]

■ 27
Dabei werden eine Reihe von Erscheinungen wie Polarisation, Lumineszenz, Beugung etc. vernachlässigt, die für manche historische Materialien relevant sein können. Ein Beispiel wäre der Glanz von Perlmutt-Oberflächen, der durch Interferenz zustande kommt.

■ 28
Andere Verfahren gehen von der Lichtquelle aus oder kombinieren beide Richtungen (Bidirectional Raytracing, Photon Mapping), weiterentwickelte Verfahren speichern Pfade zwischen Lichtquelle und Messpunkt und versuchen auf dieser Basis weitere zu finden (z. B. Metropolis Light Transport). Siehe: Toshiya Hachisuka, Shinji Ogaki, Henrik Wann Jensen, Progressive Photon Mapping, in: ACM SIGGRAPH Asia 2008 Papers, ACM 2008, S. 130:1–130:8; Henrik Wann Jensen, Niels Jørgen Christensen, Photon maps in bidirectional Monte Carlo ray tracing of complex objects, in: Computers & Graphics 19 (2) 1995, S. 215–224; Eric Veach, Leonidas J. Guibas, Metropolis Light Transport, in: Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1997, S. 65–76.

■ 29
Christoph F. Reinhart, Marilyne Andersen, Development and validation of a Radiance model for a translucent panel, in: Energy and Buildings 38 (7) 2006, S. 890–904; Andreas Noback, Lars O. Grobe, Stephen Wittkopf, Accordance of Light Scattering from Design and De-Facto Variants of a Daylight Redirecting Component, in: Buildings 3 (30) 2016.

■ 30
Ausführlicher dargelegt in: Andreas Noback, Mosaics – Dealing with precious material, 11th International Radiance Workshop, Copenhagen 2012, https://www.radiance-online.org/community/workshops/2012-copenhagen und Andreas Noback und Stephen Wittkopf, Complex Material Models in Radiance, 13thRadiance Workshop, London 2014, https://www.radiance-online.org/community/workshops/2014-london.

Liegen nach der Simulation numerische Ergebnisse vor, ist zu prüfen, ob diese eine Überprüfung der Hypothese erlauben. Ist das nicht oder nur unzureichend der Fall, sind in der nächsten Iteration drei Verbesserungen denkbar:

→ Verbesserung der Simulationsmethode durch höhere Genauigkeit, Einsatz geeigneterer Verfahren oder Verbesserung der Materialmodelle,
→ Erweiterung des empirischen Wissens, insbesondere durch die verbesserte Messung von Materialeigenschaften,
→ Verbesserung des Interpretation der Quellen und Schärfung der Hypothese.

G.10 Auswertung der numerischen Ergebnisse

1. **Die Perzeptionsanalyse** ist der erste Teil der Interpretation. Sie verarbeitet die numerischen Ergebnisse und erzeugt mittels High Dynamic Range (HDR) **visuelle Ergebnisse.** 31 05

■ **31**
Gregory Ward Larson, Holly Rushmeier, Christine Piatko, A visibility matching tone reproduction operator for high dynamic range scenes, in: IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 3 (4) 1997, S. 291–306; Überblick: Erik Reinhard, Wolfgang Heidrich, Paul Debevec, Sumanta Pattanaik, Greg Ward, Karol Myszkowski, High dynamic range imaging: acquisition, display, and image-based lighting, Burlington 2010.

☐ 05
Perzeptionsanalyse: Visualisierung der menschlicher Wahrnehmung nach dem Verfahren von Larson et al.: Das Gegenlicht der Fenster in der Apsis führt zur Blendung und damit zu einem Verlust der Sehschärfe.

2. Dazu bedient sie sich physiologischer und psychologischer Erkenntnisse zur menschlichen Wahrnehmung. 32 Charakteristisch für sie ist, dass sie als kulturell universell aufgefasst werden können und sich zum Teil mathematisch bzw. statistisch formulieren lassen. Die Perzeptionsanalyse umfasst die Untersuchung:

- → der relativen Helligkeitswahrnehmung,
- → der relativen Farbanpassung,
- → der Anpassung des Auges an die Lichtverhältnisse (das impliziert eine Zeitkomponente),
- → der Blendung 33,
- → der Veränderung der Wahrnehmung von Farben und Kontrasten im Dunkelsehen,
- → die Lenkung der Aufmerksamkeit,
- → der Formerkennung und Sehschärfe im Zusammenhang mit vorhandener Helligkeit und Kontrast.

3. Die Perzeptionsanalyse geht in **die Rezeptionsanalyse** über. Sehen ist ein erlernter und kulturell geprägter Prozess. In der Rezeptionsanalyse werden die Ergebnisse der Perzeptionsanalyse im Kontext historischer Sehgewohnheiten und künstlerischer Vorstellungen befragt. Dazu sind sie mit den Textquellen in Beziehung zu setzen. Durch diesen Vergleich lassen sich Erkenntnisse zu künstlerischen Mitteln und deren Tradition gewinnen. Die Rezeptionsanalyse betrachtet:

- → die Aufmerksamkeitslenkung,
- → aus dem jeweiligen Alltag besonders herausstechende Effekte,
- → Identifikation von sichtbaren Effekten in den Quellen.

4. Bewertung der Lesbarkeit von Lichteffekten: Perzeptions- und Rezeptionsanalyse liefern Aussagen zur **Lesbarkeit** der Lichteffekte. Auf dieser Grundlage kann die Arbeitshypothese angepasst werden.

5. Die Ergebnisse lassen sich in einen Datenteil und eine Fehleranalyse zusammenfassen:

- → Daten,
- → Messergebnisse,
- → numerische Ergebnisse der Berechnung
- → Visuelle Ergebnisse, abgeleitete Daten zu Blendung etc.,
- → bei der Herstellung des Modells und der Materialmodelle gewonnenes Wissen,
- → Fehleranalyse,
- → Abschätzung der Plausibilität des Modells oder einzelner Varianten,
- → Genauigkeit der Messungen,
- → Genauigkeit der Berechnung und der Materialmodelle,
- → Abschätzung der Lesbarkeit der Lichteffekte.

■ **32**
Christian Bartenbach, Walter Witting, Handbuch der Lichtgestaltung: Lichttechnische und wahrnehmungspsychologische Grundlagen, Wien 2009; Lam and Ripman 1992; Gibson 1950.

■ **33**
siehe: Jan Wienold, Jens Christoffersen, Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras, in: Energy and Buildings 38 (7) 2006, S. 743–757.

G.11 Die Beurteilung der Arbeitshypothese und Interpretation der Ergebnisse

Im letzten Schritt wird die Arbeitshypothese aufgrund der zusammengefassten Ergebnisse bewertet und die Bedeutung von Architektur und Beleuchtung im historischen Kontext interpretiert. Hier werden Bezüge zur (kunst-) historischen Forschung, Baugeschichte und Archäologie hergestellt, und es wird die entsprechende Expertise eingebunden. Zur Interpretation gehören unter anderem:

1. die Untersuchung der **gestalterischen Mittel**, d. h.

   → des Einflusses der einzelnen Oberflächen und Lichtquellen auf die Lichtverteilung,
   → der Direktionalität der Beleuchtung und der daraus resultierenden Schattenbildung,

2. die Identifikation **künstlerischer Strategien**,

   → der Hierarchie der Orte entsprechend der Helligkeitsverteilung,
   → der Manipulation der Formwahrnehmung durch Herausbildung von Helligkeitsverläufen,
   → der Manipulation der Fokusfindung,
   → der Manipulation von Adaptionsverhalten und Helligkeitswahrnehmung, um eine spezifische Lichtstimmung herzustellen.

3. **die Berücksichtigung des Überbaus**, d. h. der architektonischen und künstlerischen Ziele im Kontext

   → religiöser Vorstellungen,
   → politischer und gesellschaftlicher Ziele,
   → zeitgenössischer Wissenschaft und Philosophie,
   → kunstgeschichtlicher Entwicklungen.

G.12 Fazit und Ausblick

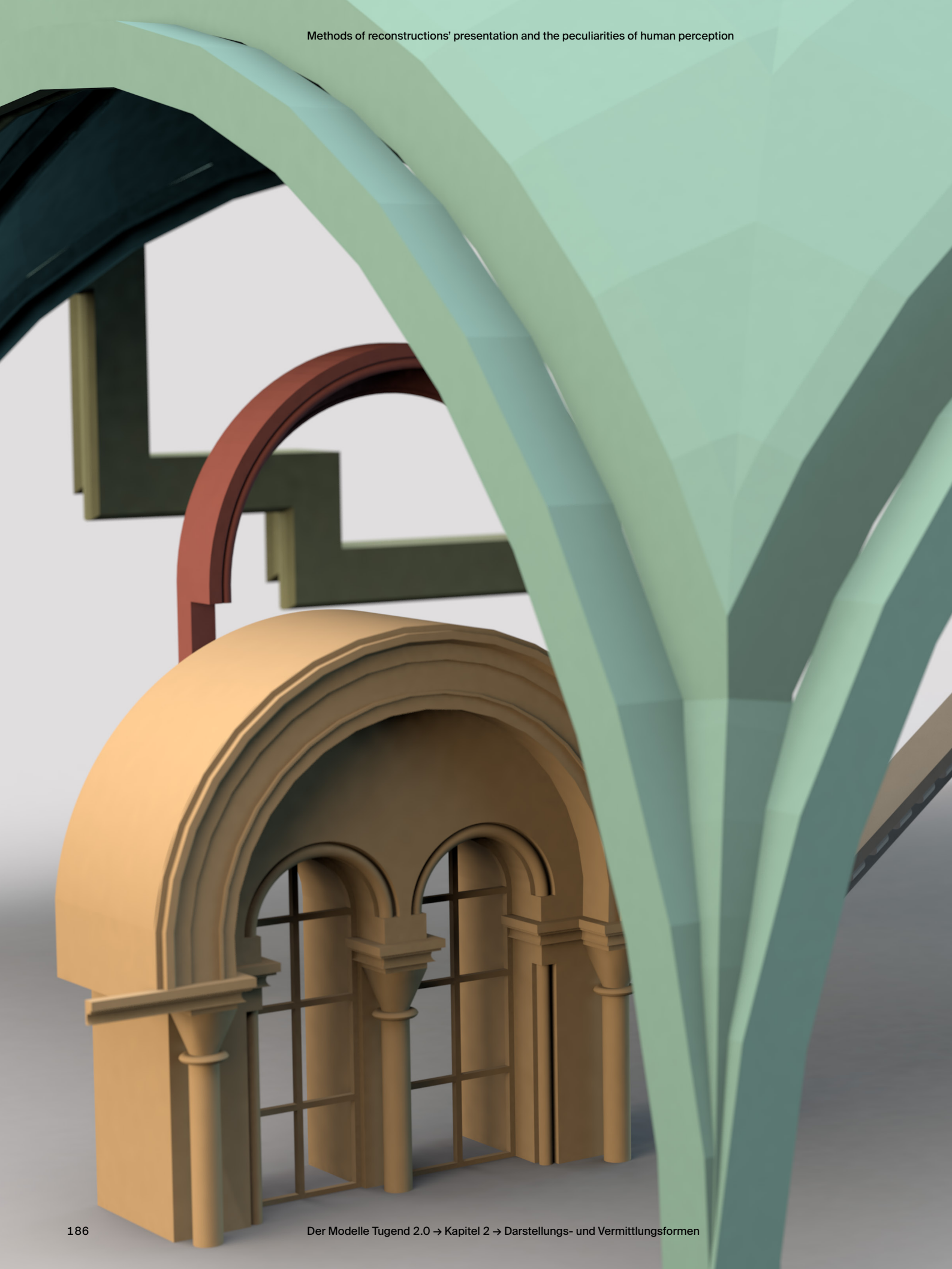
Die Abhängigkeit von der Rekonstruktion impliziert die Integration derLichtsimulation in breiter angelegte Studien. Ein Rekonstruktionsversuch wird das Wissen aus möglichst vielen Gebieten des Bauens einsammeln, um einen hohen Grad an Vollständigkeit und Kohärenz zu erreichen.

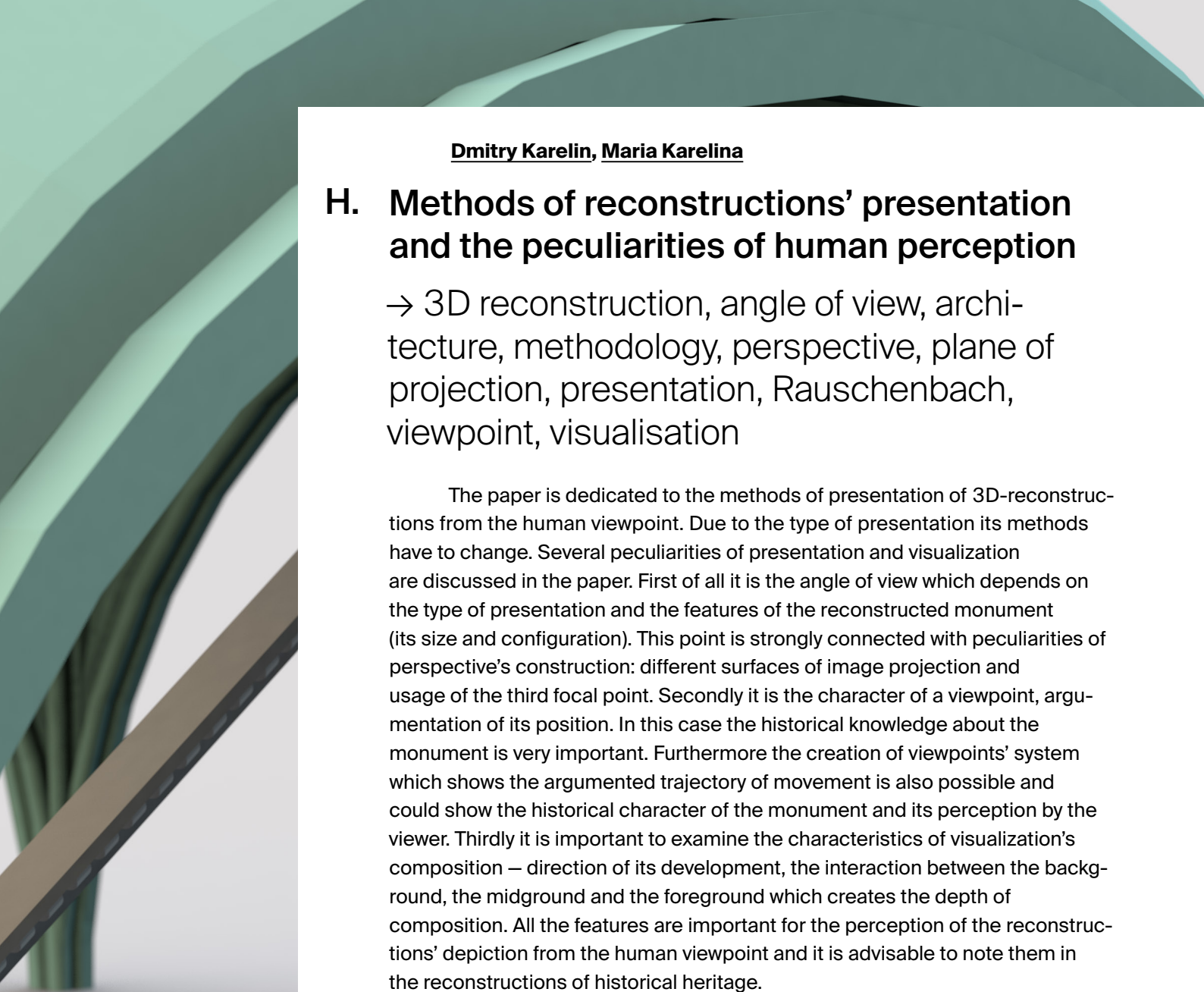
Gegenüber der in der Einleitung dargestellten Methode des **CHPR** setzt der hier vorgeschlagene Ansatz auf eine Trennung von Rekonstruktions- und Simulationsmodell. Das geschieht im Sinne wissenschaftlicher Arbeitsteilung, aber auch mit Hinblick auf die Erschließung von Wissensquellen jenseits der Untersuchung der Beleuchtung, insbesondere bei der Einbettung in größer angelegte Studien und als Vorarbeit für die Weiterverwendung des Modells. Ein wichtiger Unterschied ist die Betonung der Messung historischer Proben mit ihren Schwierigkeiten. Insgesamt lässt sich zeigen, dass die Besonderheiten ihrer Anwendung im historischen Kontext alle Aspekte der Lichtsimulation beeinflussen.

Bei allem Aufwand bleibt die Lichtsimulation historischer Bauzustände ein heuristisches Verfahren. Ihre Unsicherheiten sind groß. Wären sie kleiner, müsste sie vermutlich anderen Verfahren weichen, wie Messungen am Gebäude selbst. Sie ist ein Austesten von Möglichkeiten im Rahmen dessen, was durch die schrittweise Auseinandersetzung mit unterschiedlichen Wissensquellen und Expertisen ausgeschlossen werden kann. Sie sollte daher als offener, variantenreicher und iterativer Prozess betrieben werden. Eine Qualität der Methode ist, dass sie in ihren Ergebnissen mehr Antworten liefert als Fragen gestellt wurden. Sie sollte also ihre Arbeitshypothesen anpassen und erweitern.

G.13 Epilog: An artist’s impression

Nicht nur mit Blick auf die Finanzierung des notwendigen Aufwandes von Rekonstruktion und Lichtsimulation sollten die medialen und musealen Produkte dieser Arbeit und ihre kreativen Aspekte nicht gering geschätzt werden. In der gesellschaftlichen und kreativen Auseinandersetzung mit der historischen Architektur liegt selbst ein Wert. In der Untersuchung historischer Artefakte vertiefen wir uns in die menschliche Vergangenheit mit ihren unauflösbaren Rätseln. Im Nachempfinden historischer Ideen erweitert sich unsere Vorstellung von uns selbst und unserer heutigen Welt. Die wissenschaftliche Methodik soll Fehler vermeiden, die Auseinandersetzung selbst ist aber ein kreativer Prozess, der sich durchaus in spielerischen Varianten niederschlagen darf. Wir betrachten in der vergangenen Architektur schließlich Resultate künstlerischer Arbeit. Ohne die Entwicklung unserer eigenen apperzeptiven Fähigkeiten werden wir diese kaum verstehen können. In diesem Sinne darf das Ergebnis der skizzierten Methode auch genau das sein: **An artist’s impression**.





Dmitry Karelin, Maria Karelina

H. Methods of reconstructions' presentation and the peculiarities of human perception

→ 3D reconstruction, angle of view, architecture, methodology, perspective, plane of projection, presentation, Rauschenbach, viewpoint, visualisation

The paper is dedicated to the methods of presentation of 3D-reconstructions from the human viewpoint. Due to the type of presentation its methods have to change. Several peculiarities of presentation and visualization are discussed in the paper. First of all it is the angle of view which depends on the type of presentation and the features of the reconstructed monument (its size and configuration). This point is strongly connected with peculiarities of perspective's construction: different surfaces of image projection and usage of the third focal point. Secondly it is the character of a viewpoint, argumentation of its position. In this case the historical knowledge about the monument is very important. Furthermore the creation of viewpoints' system which shows the argumented trajectory of movement is also possible and could show the historical character of the monument and its perception by the viewer. Thirdly it is important to examine the characteristics of visualization's composition — direction of its development, the interaction between the background, the midground and the foreground which creates the depth of composition. All the features are important for the perception of the reconstructions' depiction from the human viewpoint and it is advisable to note them in the reconstructions of historical heritage.

H.1 Introduction

This work develops and continues the paper be several authors made for the Conference on Cultural Heritage and New Technologies, November 2–4, 2015, and the article, which was published later and based on it. The article was dedicated to the methods and approaches of the visualization of 3D reconstructions 01. In the paper we've mentioned we considered the criteria of applying either orthogonal / axonometric images or real points of view, as well as a number of other aspects. There were made the following provisions:

→ The methods of visualization mainly depend on the aim of reconstructions and images which we create. If we need to show the architectural features of an object (planning, structure, constructional peculiarities or type of structural organization and building phases) the best way is to use axonometric views, orthogonal projections and perspectives from the high viewpoints. If we need to show peculiar architectural features of the monument, if any, some viewpoints, which could be important, or show the impression which the building could make on spectators, one could suppose that the perspective views from a real viewpoint with real light and so on is the best way to do it.
→ Criteria as ones used in photography or art should be used for the reconstructions too. In modern studies on historical reconstructions the main idea is to show the authentic features of a building (details, materials and architecture) and to express the impression which the monument could produce upon the viewer using realistic light, comfort angle of view and it is of no less importance that we understand which visual methods should help us 02.

■ 01
Dmitry Karelin, Serjey Klimenko, Julia Klimenko, The methods and approaches of the visualization of 3D reconstructions, in: Proceedings of the 20th International Conference on Cultural Heritage and New Technologies 2015, Vienna 2015, http://www.chnt.at/wp-content/uploads/eBook_CHNT20_Karelin_etal_2015.pdf

■ 02
Karelin et al. 2015, p. 10.

The aim of this work is to focus on the peculiarities of presenting visual information in the case of using static perspective views from real points of view. Before we proceed to the main topic of the work we need to establish some fundamentals on which we are going to base our study.

We can single out several ways of presenting a scientific reconstruction:

1. A drawing on paper (in a book or an article).
2. An image on the computer / smartphone screen (in a book or an article, on a website).
3. A video sequence (on a website or web article).
4. Virtual reality headsets and some other technologies of the same kind when the image is shown via interactive pre-rendering rather then complete rendering.

In this work we will analyze only static images on plane surface (points 1 and 2), as virtual reality headsets and other new technologies are still used indirectly especially in presenting information on scientific reconstructions; nowadays it is mainly publications in scientific and popular literature and on websites.

Besides, when we see an image on plain surface an interesting thing happens which is of a special interest, in our opinion, and which is actually the subject of our article. A human brain has to perceive a plane image as a 3-dimensional one, and there occurs the phenomenon when a person is able to consider the part of the image, which is on its periphery, in the area where peripheral distortion emerges. When dealing with natural eyesight we never see a peripheral area distinctly. While wearing virtual reality headsets it is also unlikely because when we use such equipment we actually emulate natural human eyesight; besides, when we turn the head in such a headset we look at the point we need and the periphery of the image becomes not important.

It is very probable that using devices which create the illusion of virtual reality generate and will generate more different problems connected with human perception. Although in this case we arrive to the conclusion that a human brain does not have to perceive an image on plane surface constructed according to the rules of linear perspective, and this is what makes it difficult to perceive something, and even more difficult in case the laws of constructing perspective and human perception are ignored. Considering that nowadays a flat image is the major way of presenting information in scientific reconstructions, we should pay a special attention to this problem.

H.2 Boris Rauschenbach studies

The essential breakthrough in this field was made by the Russian scientist Boris Rauschenbach. In one of his first works he thoroughly examined the problem of perception of human vision with regard to the rules of constructing perspective 03. He composed the differential equation of a human brain's work at visual space perception and gave all mathematical calculations. In his further research paper he considered this problem from a different point of view and applied it to the criteria of evaluating works of art, without the already published mathematical part 04. He also showed what a great meaning axonometry has and proved that ancient and medieval art, which, in general opinion, didn't use perspective, was not primitive, and explained obverse (inverted) perspective from mathematical point of view. The part of our work about perception of human vision is mainly based on the research of Boris Rauschenbach.

However, in Europe and the US there have been done a lot of research on visual perception of space 05. It is necessary to note some of them which are of a particular interest to us. First of all, the works of J. J. Gibson 06, one of the apologists of the theory of visual perception in the US and the scientist who created a new ecological approach to visual perception. This author paid special attention to the problem of connection between motion and visual perception, which we do not cover in this article, because Gibson began his researches as a visual perception psychologist in U. S. Air Force, so he mainly worked on training of pilots during World War II, although in his works he singled out and gave a thorough description of the criteria of **ground surface**.

■ **03**
Boris Rauschenbach, Systems of perspective images in art: general theory of perspective, Moscow 1986.

■ **04**
Boris Rauschenbach, Geometry of picture and visual perception, Saint Petersburg 2002.

■ **05**
Harold A. Sedgwick, Visual space perception, in: E. B. Goldstein (Ed.), Blackwell handbook of perception, Oxford 2001, pp. 128–167.

■ **06**
James J. Gibson, The perception of the visual world, Boston 1950a; James J. Gibson, The perception of visual surfaces, in: American Journal of Psychology, 63, 1950b, pp. 367–384; James J. Gibson, The senses considered as perceptual systems, Boston 1966; James J. Gibson, The ecological approach to visual perception, Boston 1979.

He pointed out that more detailed surface of the ground could improve human visual perception of scale and dimensions 07. If in an image we see the elements we can recognize — any details or textures or objects — it can help us to assess the distance between those objects as well as their size.

We should also note the work of Jennifer Polack 08, where she carefully examines geometrical systems of constructing perspective on cylindrical and spherical surfaces of projection, both from the point of view of their geometrical basis and the peculiarities of their perception. Having conducted a lot of tests and surveys, the author comes to the conclusion that perspective with Cylindrical surface of projection is better from the point of view of visual perception than planar and spherical ones 09.

The keystone of the problem examined in the article is the fact that a human brain transforms a real image created on the retina, so a person would perceive a mathematically correct perspective relocated in a flat surface and made from the same viewpoint in a different way. The rest of our work will be dedicated to the following task: how we can achieve the maximum similarity of a scientific reconstruction, made on a flat surface from real view points, to human perception.

For a long time the perspective invented by the artists of the Renaissance served as a standard to other artists. However in the 20th century the scientists doubted that renaissance perspective took into consideration the work of a human brain which substantially changed the image when it was created on the retina 10. Many artists instinctively broke the rules, trying to make a painting or drawing look more similar to how a person actually saw it. According to Rauschenbach's theory 11, we can describe the process taking place in a brain in the following way:

- → There exists an object or space (A).
- → The optics of a human eye creates its image on the retina (C), and the image is close to the one which is constructed according to the rules of geometrical perspective (E).
- → On the basis of the information it gets the brain creates an image (B) in the head, using which an artist can draw or paint a picture (D). If the artist is talented and / or understands the rules of human visual perception, then a different person, when they see the picture (D) they will get an image that looks like a real object (A).

It is important that when making planar scientific reconstructions of the real views an author has to create an image which is as close to the one perceived by a human brain as possible. However, as Rauschenbach prove 12, it cannot be done if the methods of geometrical perspective are used, because as the author corrects **mistakes** 13 and distortions, there emerge other mistakes. In his work he gives several variants of scientific perspective constructions and three common types of **mistakes**:

■ **07**
Gibson 1950a.

■ **08**
However we should note that the author's statement that she created a mathematical model of constructing perspective on cylindrical and spherical surfaces of projection sounds very strange (See Jeniffer A. Polack, Perception of Images Using non Planar Perspective, PhD dissertation, University of South Florida, Tampa 1997, p. 132), as a model of constructing perspective on any kind of surface is included into many text-books on descriptive geometry.

■ **09**
See Polack 1997, pp. 132–135.

■ **10**
Rauschenbach 2002, p. 8.

■ **11**
Rauschenbach 2002, pp. 15–17, fig. 1.

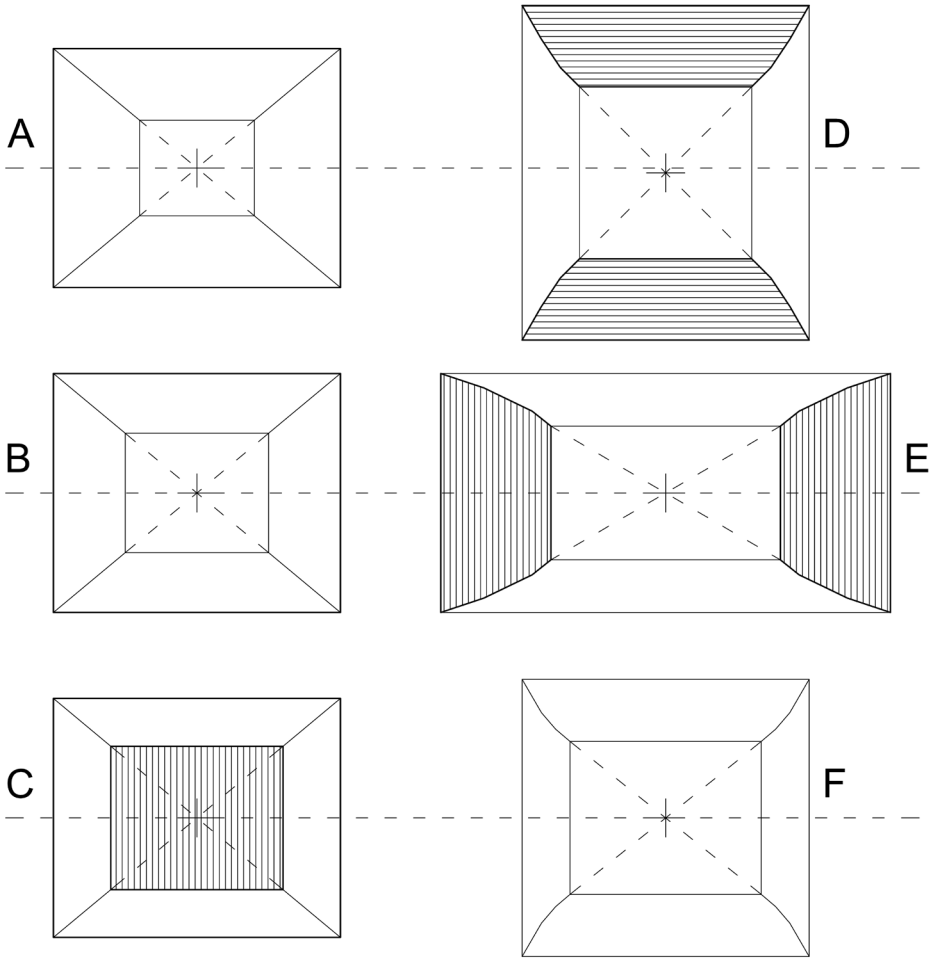
■ **12**
Rauschenbach 2002, pp. 22–28, 34.

■ **13**
We should point out that by the term »mistake« Rauschenbach does not mean a mistake literally, but the difference between real perspective and its image created by the brain (Rauschenbach 2002, p. 48).

■ **14**
Rauschenbach 1986, p. 53, figs. 8–9.

Six main views 14 01 that depend on the distance between the scene and the viewpoint (L_0) and its position relative to the depth of the scene (L) and the surface on the basis of which the perspective is constructed.

- → Renaissance perspective (A), L_0=L, gives a correct similarity of objects (the shape and the characteristics of an object, that is, a square looks like a square).
- → Linear perspective (B), L_0=2L, gives a correct similarity of objects and the depth of the space.
- → Linear perspective (C), L_0=4L, gives a correct scale (the distance between foreground, midground and background objects). There are problems with giving the correct depth of the scene.
- → The variant which considers (D) that the retina of the eye is not flat. The projection plane of the perspective has cylindrical shape with a horizontal axis. This variant shows some floor and ceiling which helps to paint them better, but it distorts the similarity and scale of vertical elements.



□ 01
The main variants of interior perspective. The planes that are not distorted are marked with hatching (Rauschenbach 1986, fig. 9)

→ The variant which considers (E) that the retina of the eye is not flat. The projection plane of the perspective has cylindrical shape with a vertical axis (a panoramic view based on the same principle that used in panoramic cameras when filming some scenery). This variant shows more of the borders, but distorts the similarity and scale of horizontal elements. We should point out that, so as to paint a visually correct image of a floor and ceiling an artist needs to show them in two contradicting ways, which cannot be used in one picture 02.
→ The variant (F) which combines the last two variants. But it still distorts similarity.

All these variants help to avoid one type of **mistakes** but at the same time lead to making other ones. All **mistakes** can be divided into three general types 15:

→ **The mistake of showing depth** 16, as a rule, is made when using a too narrow or too wide angle of vision and the image looks either too flat or too deep.
→ **The mistake of wrong scaling** 17 is usually made due to the difference of scales between foreground, midground and background. It occurs when a too narrow or too wide angle of vision is used. We must point out here that human vision tends to enlarge objects that are further and to diminish those that are nearer to the observer 18.
→ **The mistake of showing similarity** 19 occurs because of distortion of perspective at the borders of an image at angles wider than 30 degrees. The origin of this **mistake** is the phenomenon of constancy of shape due to which a human brain corrects all distortions of the image of an object trying to make it ideal 20.

■ **15**
Rauschenbach 2002, pp. 36–44.

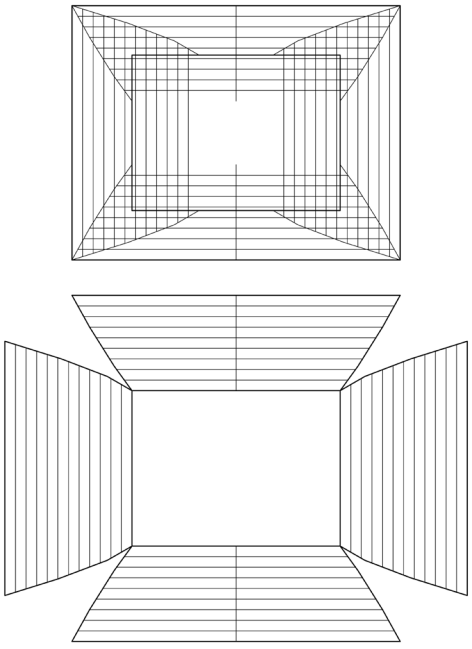
■ **16**
Rauschenbach 2002, p. 49.

■ **17**
Rauschenbach 2002, p. 50.

■ **18**
Rauschenbach 2002, p. 17.

■ **19**
Rauschenbach 2002, p. 52.

■ **20**
Rauschenbach 2002, pp. 22–31. This is vividly demonstrated by the example with the stool (Rauschenbach 2002, p. 22).



□ 02
Scheme of undistorted depiction of floor, ceiling and walls in interior (Rauschenbach 1986, fig. 8)

H.3 Methods and Rules for Views from real Viewpoints

It is true that if we look at the same architectural monument showed at different angles 03 we will see that at an angle of 100 degrees the image appears too deep, the difference between the scales of its foreground, midground and background is not natural, the elements at the borders (the capitals of columns) are painted with mistakes of showing similarity. At an angle of 60 degrees we see less mistakes and the image looks more natural, but there are still some distortions at the borders of the frame which demonstrate the mistake of wrong scaling. The image shown at an angle of 30 degrees is, probably, the most natural in this very case, and at the angle of 15 degrees we can see the mistake of showing depth — the image is not deep enough — and it again leads to wrong scaling: the foreground and the background are hardly different from the midground. Having made constructions like this B, Rauschenbach arrived to the conclusion that the most natural angles of vision range between 40 and 20 degrees.

The most important conclusion we can make is the following. As it is impossible to get an ideal image (from the point of view of human perception) we need to choose the variant with the minimum mistakes that distort the most important and typical features and elements of an object. If we speak about painting, then, for example, Paul Cézanne became one of the first artists who deliberately stretched the objects of the foreground and midground in his landscapes (as if he were looking at them from a viewpoint which was situated higher) 21. It is quite acceptable in reconstructions as well, for instance, if we are making the reconstruction of a building with a mosaic floor. We can either use the algorithm of constructing perspective on a curved surface, to show the floor, or deliberately raise the viewpoint so that it was a little higher than human eye level 22. If we deal with a lengthy object it seems right to use a panoramic view or zoom the viewpoint out.

■ **21**
Rauschenbach 1982; Raucshenbach 1986, pp. 77–85; Rauschenbach 2002, pp. 61–73.

■ **22**
It is quite possible in this situation to give an objective and unreal axonometric view from the top, which will tell the specialists more than a perspective image from a real viewpoint (Karelin et al. 2015, pp. 2–5).

100°

60°

30°

15°

☐ 03
The example of difference in perception at the different angles of view (100, 60, 30, 15). Perspective views of Via Praetoria at Dionysias fortress (D. Karelin, T. Zhitpeleva, M. Karelina)

Analyzing the methods that could allow us to consider peculiarities of human visual perception when making scientific reconstructions we need to point out an important thing. An artist can quite easily break the rules of perspective on the canvas, but when one works with a computer model it is much more difficult, as the image is built with the help of mathematical algorithms set in the program, and they are based on linear perspective. Only two main ways are possible in this case: either to use the peculiarities of linear perspective considering all the aforementioned factors, or look for the algorithms that will make it possible to distort perspective constructions according to our needs.

We can single out several basic principles which seem important:

- → Not to use visual angles that do not fit into the range of 60–20 degrees unless it is absolutely necessary. Thus one can avoid gross **mistakes** of showing scale, depth and similarity.
- → Not to use the third vanishing point except the cases when an observer is rather looking up than down, because if the third vanishing point is not very distinct a human brain always ignores it. It can be done both in 3D-programs and raster graphics editors.
- → If it is necessary one can deliberately narrow down the visual angle (zooming it out in one's mind), or slightly distort foreshortening. We can find a lot of examples like this in art 23. If the viewpoint is situated inside the interior (when painting the interior), according to the rules of perspective, the distortion becomes too noticeable and the depth is shown incorrectly. We have already given the example which demonstrated that this method can be used in making reconstructions 24. This example 04 shows that if the angle is too wide, it isn't good for the perception of the object either, and we think that it is possible to correct and narrow down the angle by ignoring some objects of the scene. For example this is the real and geometrically correct view from this viewpoint 04 (a, b), and because of a wider angle there are very significant distortions at the borders of the frame. Also the spectator could perceive the proportions incorrectly. If we move the viewpoint back and ignore the wall we will create a geometrically incorrect view 04 (c, d), though it is more comfortable for the viewer. It is important that our eyes percept the picture not by the rules of geometrical perspective, but differently. Usually we turn our head and then our brain corrects all these distortions. Thus the second frame must be closer to the picture which our brain creates. It is important that in the case of using the actual viewpoint (an observer standing at the doorframe), we can not only show similarity in the wrong way (the capitals in the corners of the picture), but we will also distort the visual depth of the space and correspondence between scales — the gate in the background seems too small and lose its architectural meaning, and the image looks very unnatural.

■ **23**
Rauschenbach 2002, p. 56.

■ **24**
Karelin et al., p. 6, fig.6.

→ It is necessary to consider J. J. Gibson's recommendation on depicting the context, that is, the surface of the ground. It should not be too in contrast with the image and distract the attention, but it must be painted accurately enough to serve an appropriate background for the image. One should also keep in mind that the texture of the ground and the textures and character of other objects in the picture are able and should give some idea about the scale 25. Using wrong textures and objects will distort the scale.

→ One should not make composition mistakes, for instance, those connected with optical contact 26, when objects that do not contact physically touch each other's contours. This can make a wrong impression that they are actually adjoining objects.

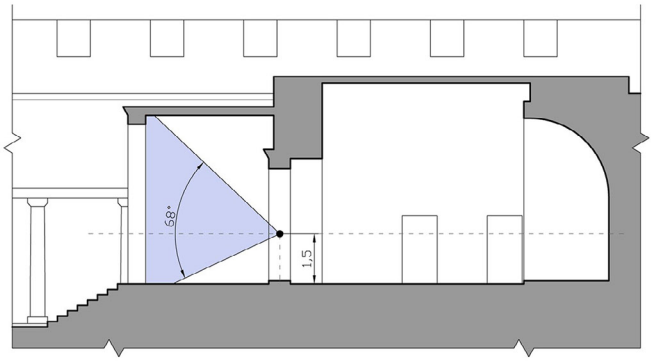
→ If necessary, it is quite possible to use the algorithms of construction perspective where the image is built not on a flat surface, but on a cylindrical, spherical and other projections.

■ 25
Sedgwick 2001, p. 133.

■ 26
Sedgwick 2001, p. 137.

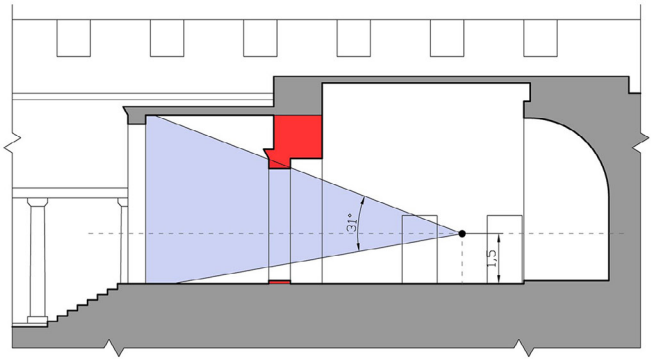
☐ 04
The possibility of narrowing down the angle of view along with ignoring of some elements of the building in order to create a more comfortable view for human vision. Views of Via Praetoria at Dionysias fortress from the chapel (D. Karelin, T. Zhitpeleva, M. Karelina)

a



b

c



d

The last point needs to be analyzed in particular. In the case of 3D reconstructions created by the method of computer camera modeling modern 3D editors cameras, as a rule, have all technical characteristics of real photo cameras. They can regulate the angle of vision, focal length, exposure time and film speed, which allows to create a physically correct image. They are also able to construct a geometrical perspective not only on a projection plane but on a surface, for example, a surface of revolution 27. Besides, we have a number of possibilities of constructing not a physically realistic perspective, but the one having artistically justified distortions.

As we have already mentioned, if it is impossible to provide necessary borders of vision at an adequate angle of vision from the given position of an observer 03. The simplest method of correcting it would be moving the camera back till we reach the position where an adequate angle of vision can be achieved, and applying the so called **clipping plane** which is possible, for example, in V-Ray 28 — that is, some plane which can be adjusted to a particular camera. The objects situated nearer than it is would be ignored by the camera at calculating.

The correction of the third vanishing point appears very relevant in visualizing architecture, and this is the reason why there exist both automatic and non-automatic tools (e. g. **camera correction modifier** and **camera vertical shift** in V-Ray).

Among physical cameras in V-Ray 29 there is also a number of cameras which project the image not on a plane but on a surface of revolution. Usually this type of cameras is used for creating panoramic views, but they can be also used for creating different variants of perspectives 05. This is the so called **spherical camera** 05 (b, e) which projects rays of light coming from its centre on a spherical surface. It can serve as the example of variant F 01. Cylindrical (point) camera 05 (c, f) builds an image by projecting it on a cylindrical surface with a vertical axis in the viewpoint, which allows one to create the perspective of variant E 01. Apart from that, V-Ray makes it possible to construct fish-eye perspective with a visual angle of 180 degrees. However we must note that this type of perspective is not natural at all and should be used only when a visual angle of 180 degrees is absolutely necessary.

■ 27
In theory, it is possible and interesting to use different surfaces such as an ellipsoid or others (Polack 1997, pp. 132–134).

■ 28
We show some methods and peculiarities of perspective correction (the so called »clipping plane« or using of different surfaces of projection) on the example of V-Ray 1.5 for 3DMAX 2010, however the same possibilities could be given by the other programs, which we didn't use. All the renders in the article (fig. 3–5) were made on V-Ray 1.5 for 3DMAX 2010 for Windows.

■ 29
VRay for 3ds Max Manual. Camera Examples. https://www.vray.com/vray_for_3ds_max/manual/vray_for_3ds_max_camera_examples.shtml.

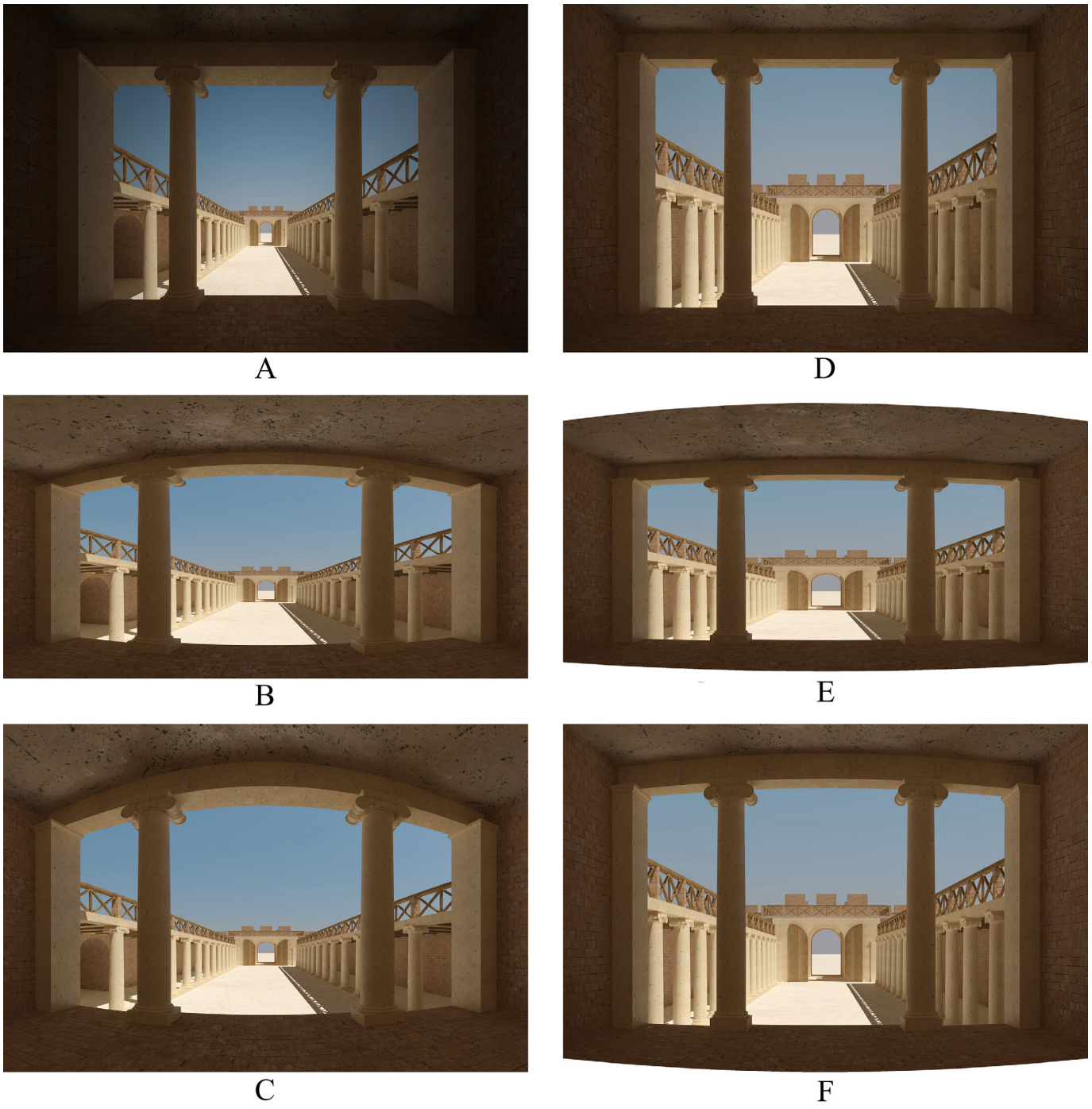
Visual perception of the perspective systems we have described is demonstrated in the pictures below 05, and we can make the following conclusions:

→ The observations we have made about zooming out the viewpoint when dealing with a too wide visual angle seem quite relevant.
→ A spherical camera distorts (diminishes) vertical size, as it was pointed out by Boris Rauschenbach (see 01) and the image looks the least natural.
→ The images taken by cylindrical (point) camera look more natural, and notwithstanding the mistakes of similarity, when the lines which are straight in reality appear not straight on illustrations, seem as natural as planar perspective. Jennifer Polack's conclusion 30 that such perspective is more natural than the other two are quite well grounded, though this statement will be always subject to doubt in relation to planar perspective due to the aforementioned mistake of similarity of the straight lines.

■ **30**
Polack 1997, pp. 132–135.

In our opinion, the examples we give allow us to recommend cameras with cylindrical surface of projection for the visualization of reconstructions of architectural monuments, in cases when it is necessary to show the borders of the interior and when geometrical distortions are irrelevant for perception.

☐ 05
Types of perspective with using of planar (a, d), spherical (b, e) and cylindrical (c, f) »plane« (surface) of projection from the real point of view (a, b, c, see fig 4b) and the moved back point of view (d, e, f, see fig. 4d). Views of Via Praetoria at Dionysias fortress from the chapel (D. Karelin, T. Zhitpeleva, M. Karelina)



All the aforesaid shows that when creating images with perspective from real points of view one must very carefully choose a viewpoint and a visual angle, and also take into account a number of factors like avoiding the third vanishing point, perspective distortions, the mistakes of correlation between the scales of foreground, midground and background and even choosing the system of constructing perspective in general. Rauschenbach told about it a lot:

»It is possible that the illustrations will attract the attention of architects who prefer to construct images strictly keeping to the rules. Now they will have the opportunity to choose the variant of the system of perspective that will help them to emphasize the features they consider the most important.« 31

■ 31
Rauschenbach 2002, p. 60.

H.4 Conclusion

The facts we have examined let us to make some conclusions. In the previous article 32 we made an assumption that when creating and presenting reconstructions it is necessary to follow the criteria applied to art, and it seems reasonable and well grounded as in this work we confirmed it from the point of view considering peculiarities of human visual perception and the perception of things we see by our brain.

■ 32
Karelin et al. 2015, p. 10.

However, at the moment the authors could only formulate several general recommendations relating optimal visual angles, a number of details and the possibility of shifting a viewpoint if necessary. It is quite improbable to give exact recommendations that would work in every case and contain exact figures. It seems that the best possible way is to take into consideration all peculiarities of an object and attract to making reconstructions not only specialists in 3D modeling, but also professionals who specialize in graphic presentation and space design, architects and designers 33. Boris Rauschenbach gave a very good definition of this problem:

■ 33
It is worth mentioning that this problem is more widely and commonly expressed than the absence of any idea of how human vision percepts space. For example, technical specialists often do not pay any attention at how different textures look in the places of joining or changing the shape of a model, while an architect would immediately notice that masonry or brickwork cannot exist in this way physically.

»Aesthetics intruded into, as it seemed, strictly mathematical field where nobody expected it. It determines the choice of an appropriate variant of constructing perspective. It is aesthetics that help to find that very option which is the best for solving the artistic problem among other numberless ones that are offered by mathematics. No wonder that artists looking for the most perfect way of conveying the idea of spatiality can prefer different variants«. 34

■ 34
Rauschenbach 2002, p. 54.

We can only add that those aesthetical criteria are primarily based on scientific researches that explain how a human brain works, so they are at the very least justified. But considering that studying a human brain is one of the most mysterious fields in science we understand there cannot be any definite and explicit formulae here.

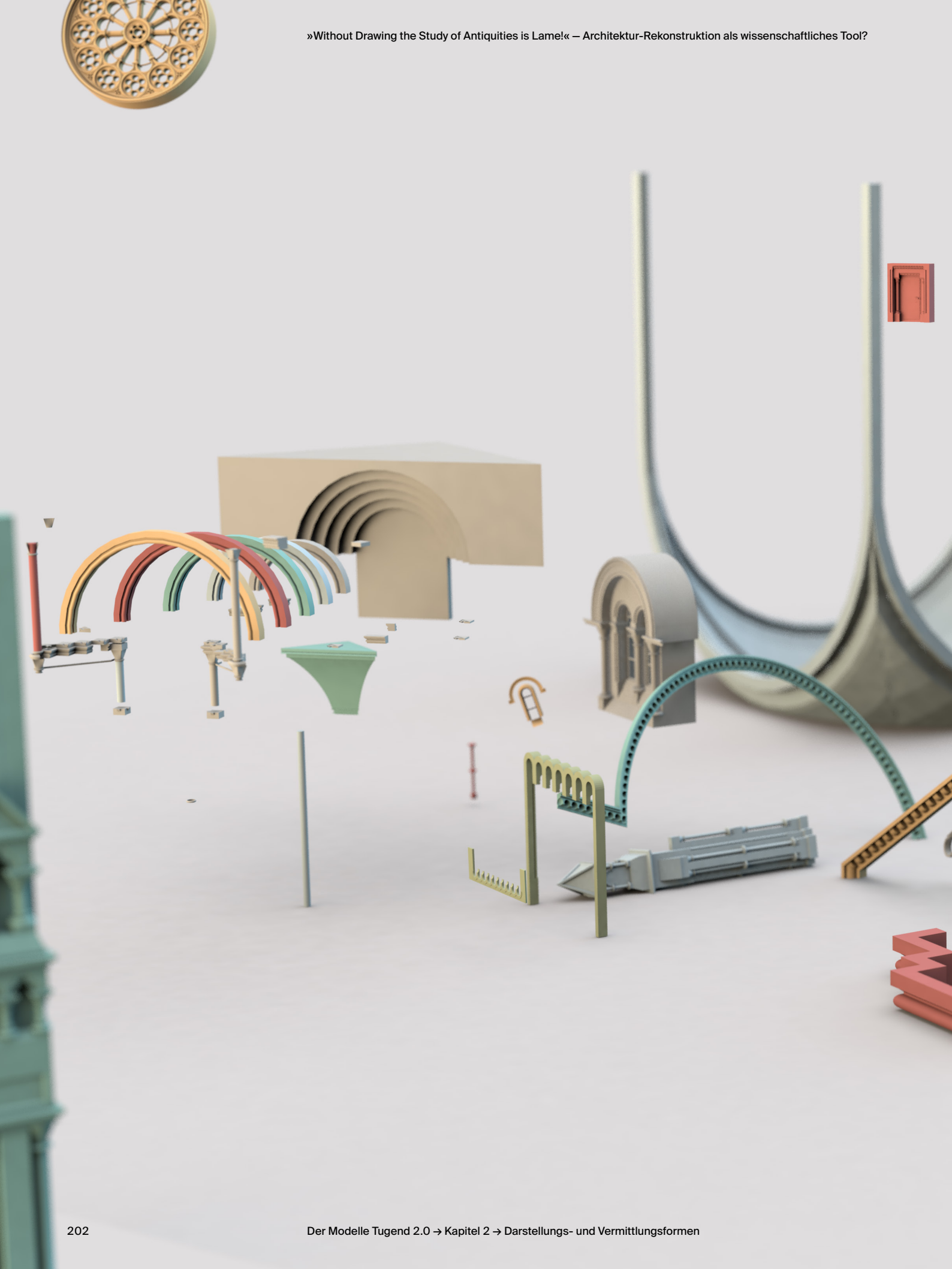
Moreover, it is known that in his studies Rauschenbach relied on **experimental data by psychologists for some ›average‹ person** [35]. But every person is unique and the specialists for whom, first of all, these scientific 3D reconstructions are created — architects, historians and archaeologists — usually have some professional deformations when it comes to perception of space.

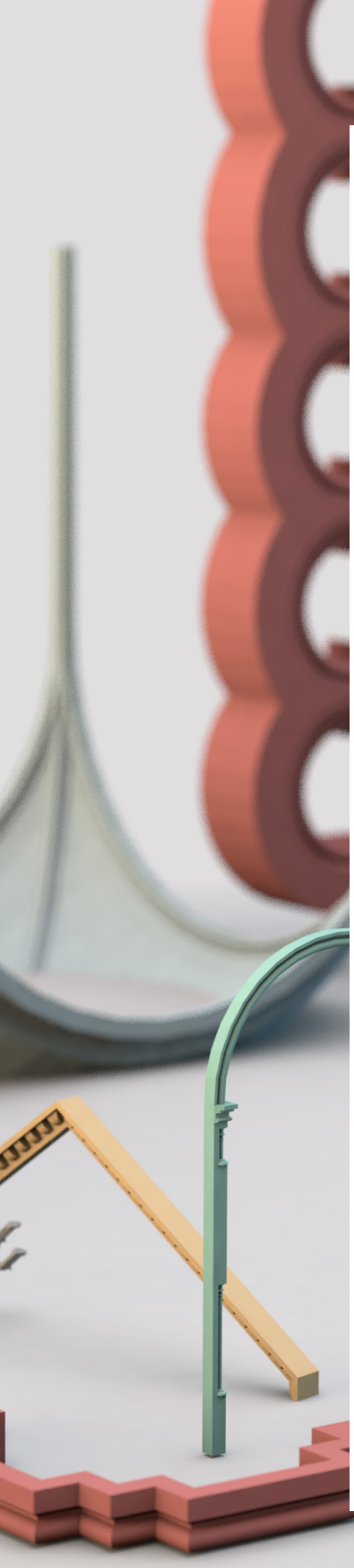
■ **35**
Rauschenbach 2002, p. 9.

All the aforesaid points out that the problem of considering human perception of space at presenting scientific reconstructions is very complicated and not thoroughly studied. It demands further research with the help of cognitive science and the theory of composition in visual arts.

H.5 Acknowledgement

The paper was prepared as a part of project 15-04-00349 »From a maquette to a virtual model. Scientific reconstruction in the architectural history considering the newest technologies (on the example of ›classical‹ architectural monuments)«.





Sebastian Hageneuer

I. »Without Drawing the Study of Antiquities is Lame!« — Architektur-Rekonstruktion als wissenschaftliches Tool?

→ Architektur, Dokumentation, Präsentation, Rekonstruktion, Visualisierung

Ein oft diskutiertes Problem im Bereich der wissenschaftlichen 3D Rekonstruktion ist die Form der Präsentation. Auf welche Weise lassen sich wissenschaftliche Daten und Ergebnisse ansprechend vermitteln? Je elaborierter und detailreicher eine Rekonstruktion ausgeführt wird, desto glaubwürdiger wird diese. Dieses Problem bezieht sich im Speziellen auf die Präsentation in Museen oder in Zeitschriften. Diese verwenden lieber visuell ansprechende Grafiken, als wissenschaftlich korrekte. Beides muss sich jedoch nicht ausschließen. Es ist daher wichtig, dass wir a) einen Weg finden die grundlegenden Quellen einer wissenschaftlichen Rekonstruktion zu verstehen, b) die Verlässlichkeit dieser Quellen quantifizieren und c) einen Weg finden, diese Rekonstruktionen in einer Art zu präsentieren, dass der Betrachter (völlig gleich ob Wissenschaftler oder Museumsbesucher) diese richtig versteht und nicht als unanfechtbare Wahrheit annimmt.

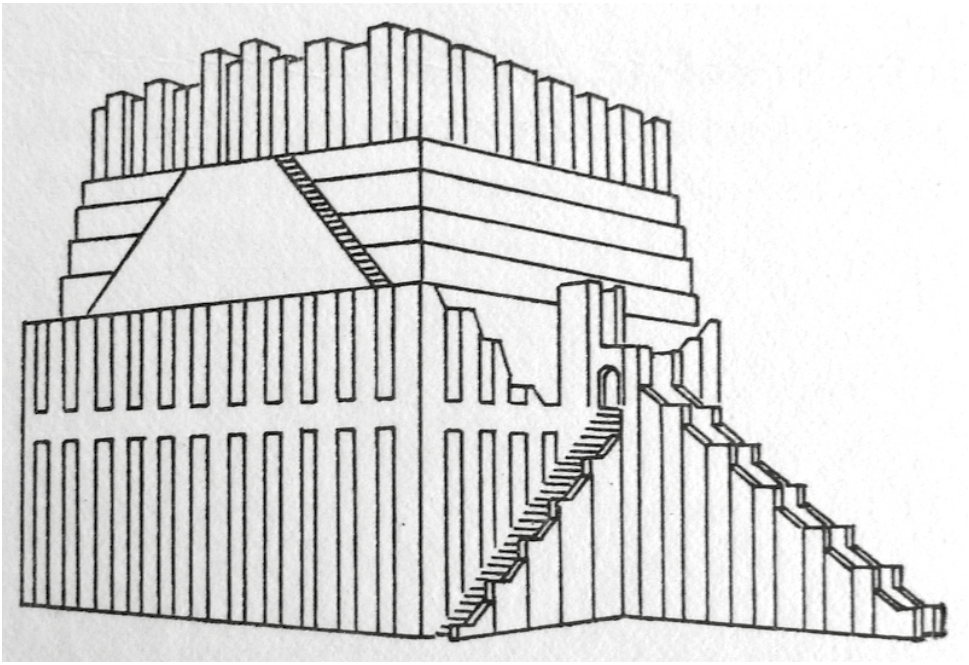
I.1 Einleitung

Der Titel dieses Aufsatzes ist Teil eines Zitats von William Stuckeley, einem britischen Antiquar und Mitglied der Royal Society, aus dem Jahr 1717:

»Without drawing or designing the Study of Antiquities or any other Science is lame and imperfect.« 01

■ **01**
Stuart Piggott, Antiquity Depicted: Aspects of Archaeological Illustration, London 1978, S. 7.

Sein Zitat unterstreicht die Bedeutung visueller Kommunikationsmittel in den Geschichtswissenschaften und damit in der Archäologie.



□ 01
Rekonstruktion der Zikkurrat von Babylon / Irak (gezeichnet von Robert Koldewey)

Im Bereich der archäologischen Wissenschaften stellen visuelle Medien ein breites Feld dar. 02 Mein persönliches Interesse liegt im Bereich der Architektur-Rekonstruktion, also dem bildlichen Ausdruck (Zeichnung, Gemälde, Rendering oder Print) rekonstruierter antiker Architektur. Seit dem Beginn der archäologischen Forschungen sind Architektur-Rekonstruktionen ein Teil davon, sind sie doch bestens geeignet, archäologische Daten und insbesondere Interpretationen darzustellen. Diese reichen von sehr einfachen Ansätzen 01 bis zu künstlerischen Meisterwerken 02 Die heutige Technologie ermöglicht einen immer größeren Hyperrealismus solcher Bilder 03, da die Nutzung moderner 3D-Software immer einfacher und beliebter wird.
Die Anzahl von professionell aussehenden Rekonstruktionen nimmt daher stetig zu.

■ **02**
Für Beispiele: Lesley Adkins, Roy A. Adkins, Archaeological Illustration, Cambridge 2009.

■ **03**
Mark Gillings, The Real, the Virtually Real, and the Hyperreal: The Role of VR in Archaeology, in: Sam Smiles, Stephanie Moser (Hg.), Envisioning the Past. Archaeology and the Image, Blackwell, Oxford 2005, S. 223–39.; D. H. Sanders, A Brief History of Virtual Heritage, in: Jack Green, E. Teeter, J. A. Larson (Hg.), Picturing the Past. Imaging and Imagining the Ancient Middle East, Chicago 2012, S. 95–103.

□ 02
Rekonstruktion von Nimrud / Irak (gezeichnet nach James Fergusson)

So schön diese **Meisterwerke** auch sind, haben sie einen gravierenden Nachteil: **Subjektivität**. Um genauer zu sein, ist es die unbekannte Menge an Subjektivität, die bei ihrer Erstellung eine Rolle spielte. Wir wissen nicht, wie gut der Künstler war oder welche Teile einer Rekonstruktion auf tatsächlichen archäologischen Fakten beruhen. Wir wissen demnach auch nicht, wie sehr wir uns auf sie verlassen können. 04 Hinzu kommt, dass elaborierte Rekonstruktionen 02 eine gewisse Autorität erhalten, welche auf eine nicht existierende Realität oder **Validität** zurückgeführt werden kann. Dabei sollten wissenschaftlich fundierte Rekonstruktionen lediglich ein Vorschlag sein und auch bleiben. 05 Zeigt man diese in einem Museum oder im Fernsehen, können Rekonstruktionen schnell von einem Publikum akzeptiert werden, ohne dass sie überhaupt kritisch hinterfragt wurden. 06

■ **04**
Adkins / Adkins 2009, S. 147.; J.-C. Golvin, Drawing Reconstruction Images of Ancient Site, in: Jack Green, E. Teeter, J. A. Larson (Hg.), Picturing the Past. Imaging and Imagining the Ancient Middle East, Chicago 2012, S. 77–82.; Jack Green, Introduction, in: Jack Green, E. Teeter, J. A. Larson (Hg.), Picturing the Past. Imaging and Imagining the Ancient Middle East, Chicago 2012, S. 13–23.

■ **05**
John Hodgson, Archaeological Reconstruction: Illustrating the Past, Reading 2002, S. 16.; D. T. Pitcaithley, Forword, in: John H. Jameson Jr. (Hg.), The Reconstructed Past. Reconstructions in the Public Interpretation of Archaeology and History, AltaMira Press, Lanham 2004, S. ix.; Joyce Wittur, Computer-Generated 3D-Visualisations in Archaeology, Oxford 2013, S. 20.

■ **06**
Brian Davison, Picturing the Past through the Eyes of Reconstruction Artists, London 1997, S. 2.; Hodgson 2002, S. 16.; Brian Leigh Molyneaux, The Cultural Life of Images. Visual Representation in Archaeology, London 1997, S. 3.

Es verwundert also nicht, dass Architektur-Rekonstruktionen immer noch als nichtwissenschaftlich oder gar als Kunst angesehen werden. Visuelle Rekonstruktionen werden daher immer noch mehr als illustratives Beiwerk in archäologischen Publikationen genutzt, anstatt sie für die wissenschaftliche Arbeit selbst zu verwenden. 07 Dieser Artikel möchte gegen diese Argumentation appellieren und zeigen, wie Architektur-Rekonstruktionen genutzt werden sollten, um uns als Archäologen hilfreich zu sein. 08 Zudem möchte er auf die Verantwortung aufmerksam machen, die uns als Produzenten solcher Bilder obliegt. Dies betrifft nicht nur die Tatsache, dass wir diese Bilder als wissenschaftliches Tool nutzen wollen, sondern auch, dass sie als wichtiges Mittel der Kommunikation mit der Öffentlichkeit dienen.

■ 07
Ebd.

■ 08
Adkins / Adkins 2009, S. 131.; Green 2012, S. 13.; Hodgson 2002, S. 4.

I.2 Die drei Bausteine jeder Architekturrekonstruktion

Bevor wir uns einige Beispiele ansehen, müssen wir zunächst verstehen, wie Rekonstruktionen organisiert sind und wie dieses Wissen uns helfen kann, sie besser zu verstehen. Zuerst müssen wir uns klarmachen, dass Rekonstruktionen stets zwei Augenblicke in der Zeit darstellen. Der erste Augenblick wird durch das Dargestellte selbst definiert. So kann eine Rekonstruktion zum Beispiel die Eanna-Zikkurrat des 21. Jh. v. Chr. in Uruk oder die zweite Phase des Concordia-Tempels im antiken Rom im Jahre 121 v. Chr. darstellen. Von größerem Interesse ist hier allerdings der zweite Moment: Es handelt sich um den Moment der Erstellung einer Rekonstruktion. Er zeigt den aktuellen Stand der Forschung, die Verfügbarkeit der bekannten oder verwendeten Quellen sowie die Fähigkeit des Bildautors selbst. Zudem hat es sich gezeigt, dass die Wahl der verwendeten Quellen sowie deren Interpretation und Nutzen in einer Rekonstruktion von äußerlichen Faktoren mitbestimmt wird. 09 Ältere Rekonstruktionen können einen andauernden Einfluss auf neue Versuche ausüben und somit Fehler oder Fehlinterpretationen weiterleben lassen. 10 Abhängig von diesen Faktoren kann sich eine Rekonstruktion jederzeit durch externe Einflüsse oder neue Daten ändern 11 und ist somit nichts weiter als eine Simulation oder ein Vorschlag, welcher nur auf diesen zweiten Augenblick in der Zeit fixiert ist. Dies alleine macht es für uns schwierig, die Verlässlichkeit einer Rekonstruktion zu verstehen. Wie können wir damit umgehen?

Zuerst müssen wir die Rekonstruktionen in ihre Bestandteile oder Bausteine aufspalten, um zu verstehen, welche Struktur zugrunde liegt, und um zu sehen, in welcher Abhängigkeit oder Balance diese Bausteine zueinander stehen. Grundlegend bestehen alle Rekonstruktionen aus drei Teilen: Primärquellen, Sekundärquellen und Spekulation. 12

Primärquellen stellen die tatsächlich vorhandenen Architekturbefunde dar, welche in archäologischen Grabungen gefunden werden und welche wir zu rekonstruieren versuchen. So finden wir zum Beispiel bei Grabungen im

■ 09
Sebastian Hageneuer, The Influence of Early Architectural Reconstruction Drawings in Near Eastern Archaeology, in: Rolf A. Stucky (Hg.), Proceedings of the 9th International Congress on the Archaeology of the Ancient Near East 1, Harrassowitz, Wiesbaden 2016, S. 359–70.; James 1997.; Maria Gabriella Micale, European Images of the Ancient Near East at the Beginnings of the Twentieth Century, in: N. Schlanger, J. Nordbladh (Hg.), Archives, Ancestors, Practices: Archaeology in the Light of Its History, New York — Oxford 2008, S. 191–203.

Vorderen Orient Spuren von Lehmziegelmauern und, wenn wir Glück haben, Überreste von Verputz, Fußböden und manchmal auch zusammengestürzte Dächer oder Stockwerke. Meistens haben wir es mit einer schlechten Erhaltung zu tun und können gerade noch so den groben Architekturplan eines Gebäudes erkennen 03. Normalerweise haben wir keine Kenntnis darüber, wie ein Gebäude oberhalb der gegrabenen Architekturreste aussah, geschweige denn, wie hoch es einst anstand. Zu den Primärquellen gehören auch Laserscans von Befunden, da diese ebenfalls den erhaltenen Zustand dokumentieren. Die **Validität** von Primärquellen ist äußerst hoch, da wir über konkrete archäologische Befunde sprechen. In anderen Regionen ist die Erhaltung antiker Architektur besser als im Vorderen Orient, sodass mehr Primärquellen für eine Rekonstruktion zur Verfügung stehen.

Sekundärquellen stellen ein viel breiteres Feld dar. Dieses beinhaltet architektonische Analogien, Texte, welche bestimmte Merkmale beschreiben, Architekturmodelle, Survey-Daten, Abbildungen oder ethnografische Parallelen. Die Sekundärquellen stellen prinzipiell alles dar, was nicht in situ erhalten und während der Ausgrabung gefunden wurde. Sie formen sämtliche indirekten Quellen, welche man für eine Rekonstruktion verwenden kann. Obwohl diese also nicht direkt mit dem zu rekonstruierenden Objekt verbunden sind, können sie von hohem Wert sein, insbesondere in den Fällen, in welchen sich die Primärquellen nicht gut erhalten haben. Wir haben es hier mit einer geringeren **Validität** der Quellen zu tun. Dies hat mehrere Gründe:

1. Die Quelle muss bekannt sein;
2. Es muss sich dafür entschieden werden, die Quelle zu nutzen;
3. Man muss die Quelle interpretieren.

Diese Gründe sind natürlich höchst subjektiv, da zumindest die Wahl und Interpretation der Sekundärquellen stark vom Wissen und Können des Bildautors, dem intendierten Nutzen des Ergebnisses und verschiedenen anderen Faktoren, wie zum Beispiel der politischen oder religiösen Orientierung, dem Forschungstrend oder der verfügbaren Technologie, abhängt. Obwohl wir nicht die Menge an Subjektivität messen können, die hier anfällt, können wir doch deutlich von einer Abhängigkeit von **Validität** und **Subjektivität** sprechen.

■ 10
Maria Gabriella Micale, Designing Architecture, Building Identities. The Discovery and Use of Mesopotamian Features in Modern Architecture between Orientalism and the Definition of Contemporary Identities, in: P. Matthiae (Hg.), Proceedings of the 6th International Congress on the Archaeology of the Ancient Near East, Harrassowitz, Wiesbaden 2010, S. 93–112.; Stephanie Pratt, The American Time Machine: Indians and the Visualization of Ancient Europe, in: Sam Smiles, Stephanie Moser (Hg.), Envisioning the Past. Archaeology and the Image, Blackwell, Oxford 2005, S. 51–71.; Paul Privateer, Romancing the Human: The Ideology of Envisioned Human Origins, in: Sam Smiles, Stephanie Moser (Hg.), Envisioning the Past. Archaeology and the Image, Blackwell, Oxford 2005, S. 13–28.

■ 11
Davison 1997, S. 2.; Hodgson 2002, S. 13.; Nicholas Stanley-Price, The Reconstruction of Ruins: Principles and Practice, in: Alison Richmond, Alison Bracker (Hg.), Conservation: Principles, Dilemmas and Uncomfortable Truths, Elsevier, Oxford 2009, S. 37.

■ 12
Adkins / Adkins 2009, S. 132.; Golvin 2012, S. 80.; Green 2012, S. 15.

□ 03
Reste des Gebäude C in Uruk / Irak
(Deutsches Archäologisches Institut)

Hat man jeglichen archäologischen Befund **(Primärquellen)** und Analogien **(Sekundärquellen)** genutzt, muss man letztlich zur **Spekulation** greifen. Dies passiert in jeder Rekonstruktion, problematisch ist lediglich, dass wir erneut nicht wissen, in welchem Umfang dies geschieht. Simon James schrieb:

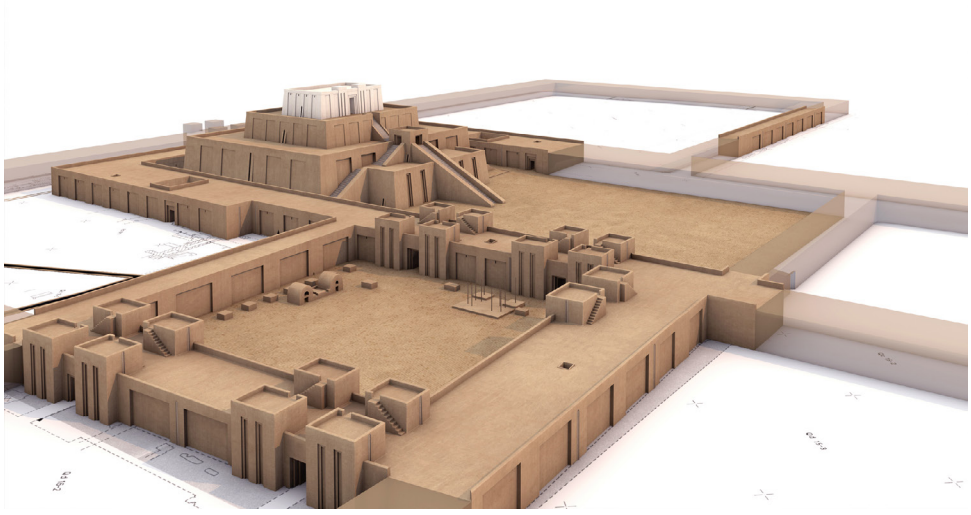
»[...] the only certain thing about any reconstruction drawing is, that it is wrong. The only real question is, how wrong is it?« 13

■ 13
James 1997, S. 25.

Wir können mit Sicherheit behaupten, dass dieser dritte Baustein der Spekulation die höchste **Subjektivität** innehat, welche die **Validität** bei Weitem übersteigt.

Um die drei Bausteine besser zu verstehen, möchte ich sie an drei Beispielen veranschaulichen. Idealerweise würden wir versuchen, für die Rekonstruktion eines Gebäudes so viel **Primärquellen** wie möglich heranzuziehen und die Verwendung von **Spekulation** weitestgehend zu vermeiden. Solch eine Rekonstruktion würde gewisse **Löcher** aufweisen, also Teile besitzen, die nicht rekonstruiert werden könnten. Ein Beispiel einer hauptsächlich auf Primärquellen basierenden Rekonstruktion wird in 04 gezeigt. Sie zeigt die Rekonstruktion der Eanna-Zikkurrat Uruks 14 des späten 21. Jahrhunderts vor Christus. Nur Strukturen, die sicher nachgewiesen werden konnten, wurden vollständig rekonstruiert. Teile die sicher vorhanden, aber nicht nachgewiesen werden konnten, wurden semi-transparent dargestellt. Für diese Rekonstruktion wurde versucht, so wenig Sekundärquellen zu nutzen und auf Spekulationen so weit wie möglich zu verzichten. Ganz vermeiden lassen sich Spekulationen allerdings nicht, da sich sonst die Rekonstruktion der sichtbaren Architektur nicht vollenden ließe. In Anbetracht des Verhältnisses zwischen den drei Bausteinen können wir einen höheren Anteil an Primärquellen als an Sekundärquellen oder Spekulation erkennen und daher eine Tendenz zu höherer **Validität** als zur **Subjektivität** feststellen.

■ 14
Uruk / Warka liegt im heutigen Irak und war eine der ersten Städte der Welt. Uruk war beinahe ohne Ausnahme vom 4. Jt. v. Chr. bis zum 1. Jt. n. Chr. kontinuierlich besiedelt. In der sogenannten 3. Dynastie von Ur (21. Jh. v. Chr.), wurde das Zentrum Uruks durch eine Zikkurrat dominiert, welche der Göttin Eanna geweiht war.



□ 04
Technische Rekonstruktion der Eanna-Zikkurrat in Uruk / Irak (©artefacts-berlin.de; Wissenschaftliches Material: Deutsches Archäologisches Institut)

Wenn man diese Rekonstruktion nun einen Schritt weiterentwickeln möchte, benötigt man eine große Menge an **Sekundärquellen** und **Spekulation.** Die erweiterte Rekonstruktion derselben Szene [05] nutzt Satelliten- und Surveydaten, welche ein grobes Bild der Stadtstruktur zeichnen. [15] Wir sind damit in der Lage, die Umgebung, die Lage der Wohnviertel, der Gärten und anderer öffentlicher Gebäude zu rekonstruieren oder den Verlauf der Stadtmauer zu bestimmen. Aus Sekundärquellen wissen wir, dass die Sumerer in einigen Städten am Morgen des sumerischen Neujahrs ein Fest veranstalteten. [16] Die der Festivität zugeordneten Aktivitäten sind der Rekonstruktion hinzugefügt. Obwohl die textlichen Quellen das Fest in anderen Städten beschreiben, wissen wir, dass dieses in Uruk ebenfalls stattfand und der Ablauf übertragbar ist. [17] Auch hier wurde versucht, den spekulativen Anteil gering zu halten, und wir konnten somit eine Rekonstruktion erstellen, die hauptsächlich auf **Sekundärquellen** beruht. Durch die Einbeziehung von Sekundärquellen und mit etwas Spekulation ist aus einer technischen Rekonstruktion [04] eine erweiterte Rekonstruktion geworden [05].

■ 15
H. Becker et al., Uruk: Urbane Strukturen im Magnet- und Satellitenbild, in: N. Crüsemann, M. van Ess, M. Hilgert, B. Salje (Hg.), Uruk – 5000 Jahre Megacity. Ausstellungskatalog, Imhof, Petersberg 2013, S. 355–361.; H. Bruckner, Uruk – Aus Geoarchaologischer Sicht, in: N. Crüsemann, M. van Ess, M. Hilgert, B. Salje (Hg.), Uruk – 5000 Jahre Megacity. Ausstellungskatalog, Imhof, Petersberg 2013, S. 343–351.; M. van Ess, Uruk – Die Forschungsgeschichte, in: N. Crüsemann, M. van Ess, M. Hilgert, B. Salje (Hg.), Uruk – 5000 Jahre Megacity. Ausstellungskatalog, Imhof, Petersberg 2013, S. 95–101.; U. Finkbeiner, Uruk: Kampagne 35–37. 1982–1984. Die archaologische Oberflachenuntersuchung (Survey), Mainz am Rhein 1991.

■ 16
A. Nunn, Kulttopographie und Kultablaufe in mesopotamischen Tempeln: drei Beispiele, Tübingen 2006, S. 167–195.; S. A. Pallis, The Babylonian Akitu Festival, Copenhagen 1926.; W. Sallaberger, Der kultische Kalender der Ur III-Zeit, Berlin / New York 1993.

■ 17
Sallaberger 1993, S. 209ff.

□ 05
Erweiterte Rekonstruktion der Eanna-Zikkurrat in Uruk / Irak. (©artefacts-berlin.de; Wissenschaftliches Material: Deutsches Archäologisches Institut)

Selbstverständlich basiert nicht jede erweiterte oder elaborierte Rekonstruktion hauptsächlich auf Sekundärquellen. Diese kann ebenso auf Spekulation beruhen. Bei 02 handelt es sich um eine Rekonstruktion, die von James Fergusson für Sir Henry Austen Layard erstellt wurde. Sie zeigt die Rekonstruktion von Nimrud / Irak und beruht zum größten Teil auf Spekulation. Dies hängt freilich damit zusammen, dass die Visualisierung im Jahre 1853 veröffentlicht wurde, also in den frühen Anfängen der Vorderasiatischen Archäologie. Zu dieser Zeit existierten nur sehr begrenzte Primärquellen und so gut wie gar keine Sekundärquellen, da kaum Ausgrabungsdaten aus dieser Zeit vorhanden waren. Dadurch mussten die Bildautoren hauptsächlich mit Spekulationen arbeiten. Am Ende des 19. Jahrhunderts bedeutete dies sich an der damals bekannten gräko-romanischen Architektur zu orientieren.

I.3 Das Problem der Subjektivität und Validität

Es dürfte klar geworden sein, dass mit zunehmendem Einsatz von **Spekulation** auch der Grad an **Subjektivität** bei der Erstellung einer Rekonstruktion steigt. Selbstverständlich ist die Interpretation von Primärquellen als auch die Wahl der Sekundärquellen ebenfalls subjektiv. Dennoch sind wir uns sicher einig, dass eine Rekonstruktion, welche hauptsächlich auf Primärquellen beruht, sicherer ist, als eine, die hauptsächlich auf Spekulation beruht. Wir müssen demnach Wege finden, die Menge an Subjektivität zu reduzieren und somit die **Validität** zu stärken. Meiner Meinung nach gibt es vier Punkte, die zu beachten sind.

Der erste Punkt ist selbsterklärend: Wir dürfen so wenig subjektive Quellen wie möglich nutzen. In Bezug auf unsere drei Bausteine bedeutet dies, dass wir unsere Rekonstruktionen auf so vielen **Primärquellen** wie möglich und auf so wenig **Spekulation** wie nötig stützen.

Der zweite Punkt bezieht sich auf die **Dokumentation** des Rekonstruktionsprozesses. Es ist von größter Dringlichkeit, dass der Prozess der Rekonstruktion in klar strukturierter Weise dokumentiert wird. Diese Dokumentation beinhaltet nicht nur jede Entscheidung, welche während des Prozesses getroffen wurde, sondern auch alle Diskussionen, Uneinigkeiten oder unklaren Elemente. Die Dokumentation sollte eindeutig über den Prozess informieren, sodass dieser rückwirkend nachvollzogen und somit die Verlässlichkeit der einzelnen Elemente nachträglich verstanden werden kann. Sie sollte so angelegt sein, dass sie auch von Projektfremden verstanden und nachvollzogen werden kann, und sie sollte zu einem gewissen Zeitpunkt publiziert werden. Es gibt verschiedene Ideen, wie dies zu bewerkstelligen ist. Wittur argumentiert für einen **bottom-up approach,** um sowohl existierende als auch neue Rekonstruktionen zu dokumentieren. 18 Die London Charter legt sich nicht eindeutig fest, schlägt aber vor, nicht nur die verwendeten Quellen, sondern auch die Unsicherheiten während des Rekonstruktionsprozesses zu dokumentieren. 19 Verdiani spricht von einem **Reverse Design**, bei dem

18
Wittur 2013, S. 37–41.

19
Hugh Denard, The London Charter — For the Computer-Based Visualisation of Cultural Heritage, 2009.

ein Rekonstruktionsprozess vom Ist-Zustand bis hin zur Interpretation dokumentiert wird. [20] Was auch immer man für eine Methode nutzt, eine eindeutige Dokumentation ist der Schlüssel für eine gute Rekonstruktion und sollte den Leser in die Lage versetzen, einen Rekonstruktionsprozess komplett nachvollziehen zu können. [21]

Der dritte Punkt betrifft die **Kommunikation.** Diese meint hier, dass das Ergebnis eines Rekonstruktionsprozesses eindeutig kommuniziert werden sollte. Daher ist es wichtig, dass wann und wo auch immer eine Rekonstruktion genutzt wird, deutlich gemacht werden sollte, wer diese spezielle Rekonstruktion angefertigt hat, wo man die erklärende Dokumentation finden kann und dass es sich hierbei nur um eine von vielen Möglichkeiten handelt, diese Rekonstruktion also nur einen Vorschlag darstellt. Dies kann auf vielen Wegen geschehen, mit einfachen Beschriftungen (**Rekonstruktion**, **Versuch einer Interpretation**) oder mit längeren Erklärungen sowie durch Vergleiche mit anderen möglichen Rekonstruktionsvorschlägen. Wichtig ist auch die Art und Weise, in der eine Rekonstruktion präsentiert wird. Einzelbilder oder Animationsflüge, interaktive Modelle oder audiovisuelle Kommunikation sind nur einige wenige Beispiele, wie man eine Rekonstruktion präsentieren kann. [22]

Der letzte und vierte Punkt ist die **Methode**. Wir müssen spezifische Methoden für spezifische Rekonstruktionen finden, da es nicht die eine Methode geben kann, die sowohl auf die Rekonstruktion von Lehmziegelarchitektur des Vorderen Orients als auch auf die Steinarchitektur des alten Rom anwendbar ist. Auch hier finden wir verschiedene Möglichkeiten, dies zu tun. Wichtig ist, dass ein geeigneter Weg gefunden wird, welcher gut dokumentiert wird und somit kohärent und diskutabel bleibt.

■ **20**
Giorgio Verdiani, Reading the Project and »Reverse Design«: An Architectural Approach to Digital Reconstruction, in: Wolfgang Börner, Susanne Uhlirz (Hg.), Proceedings of the 20th International Conference on Cultural Heritage and New Technologies 2015, Vienna 2016, S. 2.

■ **21**
Sorin Hermon, Reasoning in 3D: A Critical Appraisal of the Role of 3D Modelling and Virtual Reconstructions in Archaeology, in: B. Frischer, A. Dakouri-Hild (Hg.), Beyond Illustration: 2D and 3D Digital Technologies as Tools for Discovery in Archaeology, Archaeopress, Oxford 2008, S. 40.

■ **22**
Wittur 2013, S. 26ff.

I.4 Fazit

Rekonstruktionen, die den oben genannten Punkten folgen, können einen wichtigen Beitrag für die wissenschaftliche Erforschung antiker Architektur leisten. [23] Problematisch ist allerdings, dass der Grad an Subjektivität einer Rekonstruktion nicht erkennbar ist und somit nicht eindeutig zu bestimmen ist, wie verlässlich diese gestaltet wurde. Hinzu kommt, dass Rekonstruktionen umso mehr Autorität (und damit eine Art künstliche **Validität**) erlangen, je elaborierter sie sind. Um dem entgegenzuwirken, schlage ich vor, die verfügbaren Quellen in drei Arten, Primär-, Sekundärquellen und Spekulation, zu unterteilen, um dadurch ein besseres Verständnis für die Balance zwischen **Validität** und **Subjektivität** zu erlangen. Darüber hinaus empfehle ich, zumindest die folgenden vier Punkte zu berücksichtigen, um die Subjektivität zu verringern: verantwortungsbewusster Umgang mit Quellen, eine solide Dokumentation des Rekonstruktionsprozesses, zielgruppenorientierte Kommunikation und Nutzung einer kohärenten Methode, die diskutiert werden darf. Natürlich ist dies nur ein Anfang. Mir ist jedoch wichtig, den Blick für die Verantwortung bei der Erstellung solcher Bilder zu schärfen. Dies bringt mich zu meinem letzten Punkt.

Als Wissenschaftler haben wir die Verantwortung für eine gute Wissenschaftskommunikation, sowohl fachintern als auch mit der breiten Öffentlichkeit. Wittur weist zu Recht darauf hin, dass die Erstellung von Rekonstruktionen durchaus auch ethische Fragen impliziert. [24] Um dieser Verantwortung gerecht zu werden, müssen wir demnach beim Erstellen von Rekonstruktionen einen erhöhten Aufwand betreiben. Sicherlich ist es viel einfacher, einen Stift (oder Computer) zu nehmen und mit einer Rekonstruktion zu beginnen. Ein solches Arbeiten können wir uns jedoch nicht erlauben. Wenn wir im Gegensatz dazu das in diesem Artikel geschilderte beachten, ist es uns möglich, unsere erstellten Modelle tatsächlich als wissenschaftliches Tool, ganz ähnlich einer visualisierten Theorie [25], zu verwenden. Diese können ebenso wie jeder wissenschaftliche Artikel diskutiert und kritisiert werden. So können auch visuelle Rekonstruktionen ihren Weg in den wissenschaftlichen Diskurs finden. Die Vorteile einer wissenschaftlich korrekten Rekonstruktion sind vielfältig. [26] Übernehmen wir die Verantwortung tatsächlich nicht, bringen wir unser kulturelles Erbe in Gefahr. Stanley-Price nennt dies sogar kriminell. [27]
In jedem Fall wäre es — um auf das Zitat zu Beginn dieses Beitrags zurückzukommen —

»lame and imperfect«.

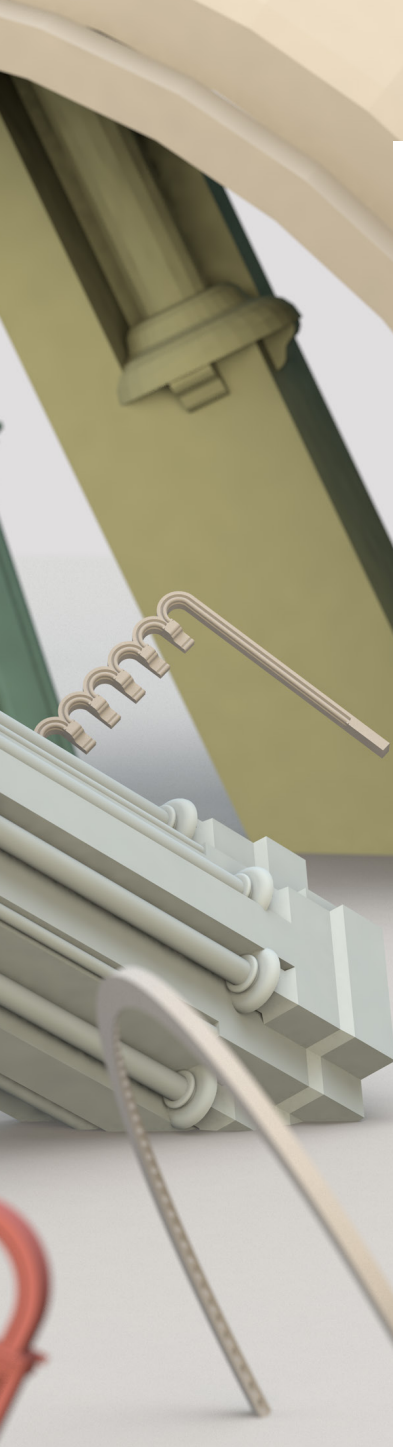
■ 23
Wittur 2013, S. 51.

■ 24
Wittur 2013, S. 16–17; Sebastian Hageneuer, The Visualisation of Uruk — First Impressions of the First Metropolis in the World, in: Wolfgang Börner, Susanne Uhlirz (Hg.), Proceedings of the 18th International Conference on Cultural Heritage and New Technologies 2013, Wien 2014, S. 6–7; Hodges 2002, S. 13–14; Stanley-Price 2009, S. 38.

■ 25
Hageneuer 2014, S. 6–7.

■ 26
Stanley-Price 2009, S. 35ff.; Wittur 2013, S. 30ff.

■ 27
Stanley-Price 2009, S. 42.



Martin Papirowski

J. Visuelle Echos der Vergangenheit — 3D-Rekonstruktionen im Dokumentarfilm

→ Prime-Time-Dokumentationen, 3D modelling, compositing, crowding, Paradigmenwechsel, 68er Revolution, Reenactment, Virtuelle Rekonstruktion, Virtuelle Welten, production value

Diente das Bewegtbild in den 1960er Jahren als visuelle Unterstützung des Kommentartextes, nähern sich aktuelle Dokumentationen der Illusion der Zeitreise. Nicht die Vermittlung historischer Fakten steht im Vordergrund, sondern die sinnliche Vermittlung vergangener Epochen und Kulturen — zumindest in der Welt der Prime-Time-Dokumentationen. Möglich gemacht durch ein Konzert virtueller Technologien, vom 3D-Modelling historischer Erlebnisräume, über die Kombination von Realität und virtuellen Inhalten (Compositing), die Multiplikation von Protagonisten (Crowding) bis zur Virtuellen Realität, stereoskopische 360° Wahrnehmung, der Rezipient nicht mehr nur Betrachter sondern Bestandteil einer computergenerierten Wirklichkeit. Über die Gründe für diesen Paradigmenwechsel in der medialen Aufbereitung von Geschichte kann man nur mutmaßen. Der Imperativ der Vermittlung (möglichst) unverfälschter Informationen im Zuge der 68 er Revolution, verurteilte jedwede Form der visuellen Manipulation. Zudem eine Epoche, in der historische Inhalte vor allem in Buchform vermittelt wurden. Doch spätestens seit den 1990er Jahren ist Reenactment, die szenische Rekonstruktion von geschichtlichen Ereignissen, aus den Prime-Time-Programmen nicht mehr wegzudenken. Ein wachsendes Publikum wünscht sich weniger wissenschaftliche Fakten, als eine Idee davon, **wie es gewesen sein könnte**. Gleichzeitig gewann die virtuelle Rekonstruktion historischer Realitäten eine Qualität, die bis dato allein Kinoproduktionen vorbehalten war. In der Kombination von computergenerierten Handlungsorten und Reenactment entstehen virtuelle Welten, die natürlich abhängig von der Qualität der Fachberater, zumindest als Anmutungen vergangener historischer Realitäten taugen. Die sogenannte Production Value ist demzufolge weniger von der faktischen und inhaltlichen Qualität einer Dokumentation geprägt, sondern von der (vermeintlichen) **Realitätsnahe** ihrer Zeitreisen. **Histotainment** erreicht Millionen Fernsehzuschauer, Faktenfernsehen blieb indessen Spartenprogramm.

Die virtuelle Rekonstruktion historischer Monumente oder Szenarien ist keine Errungenschaft des Computerzeitalters, sie ist (fast) so alt wie das Medium Film selbst. Die dramaturgische Intention ist dieselbe, was sich geändert hat, ist die Technologie. Sogenannte Matte Paintings (bemalte Glasscheiben vor der Kameraoptik), halbdurchlässige Spiegel oder, bis in die frühen 90er Jahre, Filmmodelle: Hilfsmittel und Werkzeuge im Dienste einer möglichst perfekten Illusion — für das Kino, für die Welt der Geschichten und der Phantasie. Das Medium der Fernsehdokumentation ging traditionell sparsam mit diesen Instrumenten um, vorrangig aus finanziellen Gründen. Möglicherweise mag auch journalistische Ethik ein Grund für die Distanz gewesen sein. Denn spätestens seit der 68er-Revolution galt die unverfälschte Wiedergabe der Realität als dokumentarischer Imperativ. Das galt auch für die historische Dokumentation, auf dem Planeten Fernsehen das Haupteinsatzgebiet für 3D-Rekonstruktionen.

J.1 Die Entdeckung des Doku-Dramas

Doch dann — Ende der 80er Jahre — kam es zu einem Paradigmenwechsel. Das Medium Dokumentation wandelte sich, wenn nicht plötzlich, so doch binnen weniger Jahre. Die Dramaturgie veränderte sich, die Bildsprache veränderte sich, die visuellen Bausteine veränderten sich.

Um heute die Bedeutung virtueller Rekonstruktionen historischer Bauwerke für das Medium Fernsehen beurteilen zu können, müssen die Veränderungen des Mediums fokussiert werden.

Bis in die frühen 90er erfolgte die Nacherzählung historischer Ereignisse zumeist auf einem Bilderteppich des historisch Vorhandenen. Auf Kameraeinstellungen der Ruinen des Forum Romanum erklärte uns der Kommentartext der klassischen Dokumentation die Machtstrukturen im Reiche eines Kaiser Nero. Gestützt auf Fresken, Büsten der Protagonisten, Museumsstücke und Expertenaussagen, basierte die Dramaturgie auf **real Vorhandenem**. Keine falsche Illusion trübte die Lauterkeit der Vorführung.

J.2 »Unverfälscht« ist der Imperativ der 68er-Bewegung

Dokumentarisches musste pur sein, ohne Manipulation, ohne artifizielles Beiwerk, es musste reine Realität widerspiegeln. Die visuelle Gegenbewegung zur Propaganda der Nationalsozialisten und der Heimatfilme der frühen 50er und 60er Jahre.

Heute wirken diese **unplugged**-Dokumentationen mit ihren Handkameras, vorhandenem Licht, Einstellungslängen von 20–30 Sekunden befremdlich, amateurhaft — vor 50 Jahren beeinflusste diese **Gestaltungsschule** das Genre

Dokumentation insgesamt. Man kann darüber spekulieren, ob jedwede 3D-Animationstechnik, hätte sie den Filmemachern der späten 60er Jahre zur Verfügung gestanden, überhaupt Eingang in die Filmtechnik gefunden hätte. Es handeltes sich um eine kurze Phase, denn der visuelle Stil ist wie die Mode im Fluss, auch wenn der Rhythmus der Veränderung ein langsamerer ist. Kameramänner gestalten ja oftmals einen Film und sie kommen zumeist aus der Fotografie. Seitenlicht ist beispielsweise optimal für Bauwerke jedweder Art, weil es durch den Schattenwurf die Baudetails, die Proportionen betont und dem Monument mehr Volumen verleiht. Fotografen wissen das und wählen sorgfältig nach dem Sonnenstand die Aufnahmeposition ihrer Motive. Doch schon das war — aus Sicht der 68er-Avantgarde — Manipulation bzw. Verfälschung. Dies ist längst Vergangenheit. Die Dokumentation näherte sich wieder dem Film, den TV-Serien und damit dem, was der Rezipient visuell gewohnt ist. Mit dem Genre des Musikvideos hielten Montagen, hielt der offensive Musikschnitt Einzug in den Gestaltungskanon der Dokumentation.

Erlaubt waren nun Allegorien, unvergessen die Visualisierung des Verrats an Julius Caesar in der ZDF-Reihe **Quo Vadis** 01 Anfang der 90er Jahre. Sechs betagte Römer im engagierten Gespräch am Rande der Piazza Venezia in Rom. Großaufnahmen temperamentvoller Gesten, vor ihnen sechs gefüllte Gläser Campari, blutrot. Im Hintergrund erzählt der Kommentator vom Komplott der Senatoren, im Kopf werden die römischen Rentner der Gegenwart zu Verrätern in der Antike.

■ **01**
Quo Vadis, List und Verrat, »Cäsar«, Regisseur Günther Klein, ZDF, 1999.

J.3 Die Entdeckung des Reenactments

Doch dann wurde alles ganz anders. Die Flaggschiffe der historischen Dokumentation, allen voran das ZDF Format **Terra X**, inszeniert nach, **reenactet**. Statt Rentner von heute Darsteller im Kostüm, statt Ruinen Kulissen, und an die Stelle der gemalten Visionen des Turmbaus zu Babel, an die Stelle abgefilmter Gemälde aus vier Jahrhunderten tritt ein cineastisches Modell. Was ist passiert? Es ist die Geburt eines neuen Genres, des sogenannten Doku-Dramas. Was es auszeichnet, ist die Verbindung von Inszenierung, der szenischen Nachstellung historischer Ereignisse, mit wissenschaftlichen Inhalten, das Ganze mit dem Anspruch journalistischer Korrektheit.

Anfang der 90er gibt es noch keine 3D-Technologie, keine virtuelle Rekonstruktion, die perfekte Illusionen schafft. Die Prime-Time-Dokumentationen der BBC international oder des ZDF mit dem Flaggschiff **Terra X** suchen nach adäquaten Visualisierungstechnologien ihrer großen Themen. Quotenbringer sind die Pyramiden, sind Rom, sind Weltwunder, sind große Namen wie Alexander, Cäsar, Karl der Große oder Napoleon. Doch große Namen fordern große Settings — woher nehmen?

Hollywood setzt auf riesige Filmkulissen und zunehmend auf Modelle und auf die Technik, die Protagonisten mühevoll **frame by frame** ausschneiden, um sie in die Kulissensets zu positionieren — die Geburtsstunde des analogen Compositings. Das Genre Dokumentation, oder — wie man es jetzt auch

nennt — **Doku-Drama**, kann da nicht mithalten. Allein die Produktion der Filmmodelle liegt schon am Rande des realistischen Produktionsbudgets. Die Technik ist kompliziert und das Verfahren aufwendig. Prinzipiell steht der Aufnahmemodus im Verhältnis zur Modellgröße. Das heißt, eine Kamerafahrt um ein Modell im Maßstab 1:2 sollte mit 50%er Zeitlupe aufgenommen werden. Großmodelle, wie beispielsweise der Cheops-Pyramide mit einem Basismaß von 230 Metern, werden üblicherweise in einem Maßstab von 1:48 erstellt, aber in den 90ern existierten noch keine Zeitlupenkameras, die mehr als 150 Bilder pro Sekunde aufnehmen, das heißt, mit mehr als sechsfacher Zeitlupe aufzeichnen konnten. Zudem sind Modelle tückisch: Spinnweben — der Tod der perfekten Illusion, weil sie das Modell als solches entlarven, werden — und das ist ein Klassiker — erst nach Ansicht des Filmmaterials aus dem Kopierwerk entdeckt. Dazu sind Modelle teuer, weil nur wenige diese Kunst beherrschen, Preise von 30.000 bis 40.000 DM für eine ägyptische Grabanlage, einen Großtempel mit Nebenbauten beispielsweise, sind durchaus realistisch. Doch zumindest in einem Punkt korreliert das haptisch gebaute Modell mit dem 3D-Modell der Animation: Einmal konstruiert, lässt es eine unendliche Zahl von Kameraflügen aus allen Blickwinkeln zu. Generell ist sein Einsatz jedoch begrenzt, denn mehr als 1–2 Großmodelle kann sich auch eine Prime-Time-Produktion nicht leisten. Dazu bedarf es kostenintensiver Aufnahme- und Beleuchtungstechnik.

J.4 Anspruch Unmöglichkeit

Unter Prime-Time-Produzenten reicht man das Bonmot, das Medium Doku-Drama verbinde die Nachteile des Kinos mit den Nachteilen einer Dokumentation: Wo Hollywood die vermeintliche historische Wahrheit auf dem Altar der Opulenz und Dramaturgie opfert, muss das Doku-Drama in jeder Szene den Anspruch auf historische Korrektheit erfüllen. Zumindest in der Theorie. Denn was bedeutet **Reenactment**?

»Die bestmögliche, detailgetreue Wiedergabe einer Begebenheit in ihren Abläufen, historisch oder modern, möglichst am Originalschauplatz und zu den gleichen Bedingungen, die beim Originalereignis herrschten« 02,

■ **02**
Wikipedia, Reenactment, https://de.wikipedia.org/wiki/Reenactment.

so Wikipedia. Diese Forderung ist zu erfüllen ist mehr als nur schwer, sie ist unmöglich. Man kann nicht zweimal in denselben Fluss steigen, selbst Ereignisse, die nur wenige Wochen, Monate zurückliegen sind sehr schwer rekonstruierbar — nach Jahrhunderten, Jahrtausenden gar, ist es unmöglich. Und dennoch ist Reenactment unverzichtbarer Bestandteil des Doku-Drama-Genres, auch wenn über den Anteil der szenischen Elemente innerhalb einer Dokumentation immer wieder diskutiert wird, über die Frage, wie viel Reenactment verträgt eine Dokumentation, oder wo hört die Dokumentation auf, wo fängt der Spielfilm an? Das so genannte **Full-Doku-Drama**, wie die

■ 03
Colosseum, Regisseur Tilman Remme, BBC History Documentaries, 2003.

■ 04
Pompei, Regisseur Peter Nicholson, BBC History Documentaries, 2003.

Großproduktionen **Colosseum** 03 oder **Pompei** 04, sind im eigentlichen Sinne Spielfilme, jedoch mit dem Anspruch historischer Authentizität. Doch sie alle funktionieren heute nicht ohne virtuelle Rekonstruktion, wie sie vor zwanzig Jahren nicht ohne Modellbau funktioniert hätten.

Es ist diese drastische Veränderung der visuellen Erzählweise, die die virtuelle Rekonstruktion zu einem wichtigen Bauteil in der Illusionsmaschine Doku-Drama macht.

Doch welche Funktion erfüllen virtuelle Rekonstruktionen historischer Monumente oder Orte im Doku-Drama? Im Wesentlichen sind es zwei Spielarten von Computer-Generated Imagery (CGI), die in Varianten und unterschiedlichen Kombinationen im Theater der Dokumentation vorkommen.

J.5 Die didaktische Animation

Was dem Print-Magazin Grafiken, Karten oder stilisierte Darstellungen, abstrakte Architektur, ist dem Fernsehen die 3D-Grafik. Die Allzweckwaffe der wissenschaftlichen und — in ganz besonderem Maße — der historischen Dokumentation. Abstrakte, d. h. nicht texturierte, einfach illuminierte 3D-Animationen helfen uns, Funktionen von Vorderladern, Zugbrücken oder Dampfmaschinen zu erklären. Die Burg als **Verteidigungsmaschine** oder die Belüftung moderner Atom-Bunker: alles perfekte Einsatzgebiete für die **didaktische Animation**. Das ist nicht neu. Schon Dokumentarfilm-Kalkulationen der 70er Jahre kannten die Position **Grafik**, auf sogenannten **Tricktischen** wurden bewegte Schriften oder Karten animiert, per Einzelbild. Ihre Funktion ist jedoch nicht die Illusion, sondern die Information.

J.6 3D-Konstruktion — Reenactment aus dem Rechner

Die virtuelle Rekonstruktion, beispielsweise eines historischen Palastes, ist, wie die szenische Darstellung einer Schlacht mit Stuntmen und Akteuren, Rauch, Nebel und Pyrotechnik, der Versuch einer (möglichst) perfekten Illusion von Vergangenheit: Computergeneriertes Reenactment — wenn man so will. Perfekt dann, wenn es vom Betrachter nicht als **animiert**, d. h. computergeneriert, empfunden wird. Es muss **real** aussehen, um gut zu sein. Doch was heißt in diesem Zusammenhang **real**? Ist es die historische Authentizität, die möglichst korrekte Wiedergabe von Maßen, Proportionen, dem baulichen Zierrat, den Elementen, den Texturen des historischen Originals? Sie hat Grenzen, zumal wenn das historische Monument nicht mehr existiert, der 3D-Operator sich auf Quellen stützen muss. Grenzen, die auch die szenische Rekonstruktion kennt. Darsteller kennen nicht die Todesangst, den Wahnsinn des Kanonengewitters …

Die große Herausforderung der virtuellen Rekonstruktion ist die Dokumentation, denn Bauwerke stehen im Fluss der Veränderung. Paläste, Verteidigungsanlagen, Wohngebäude, ganz sicher aber religiöse Bauwerke waren nie statisch. Sie wurden verändert, restauriert, renoviert, dem Zeitgeschmack angepasst. Wie sah ein Bauwerk wann aus? Hollywood arbeitet nach dem Prinzip **schöner, größer, höher** … und lässt historische Stätten wie Babylon, Memphis oder Rom **bigger than life** rekonstruieren. Das kann sich eine Dokumentation nicht leisten, sie kann aber ebenso wenig die exakte Punktlandung zum historischen Ereignis liefern. Denn wer weiß heute detailgenau, wie beispielsweise das Forum Romanum am 17. September 67 ausgesehen hat? Es ist ein Axiom der virtuellen Rekonstruktion, dass es keine 100%ige Authentizität gibt. Dazu ist die Herausforderung zu komplex und nicht nur in aller Regel, sondern immer sind die Quellen, Pläne, Zeichnungen, Gemälde nicht hinreichend aussagekräftig. Ich glaube nicht, dass auch nur ein einziges historisches Monument existiert, das über einen Zeitraum von Jahrhunderten monatlich dokumentiert wurde …

J.7 Kampf dem Muster

Doch, Gott sei Dank, existiert die Diffusion und die Trägheit der menschlichen Wahrnehmung. Filmnebel, Kanonenrauch, Stakkatoschnitte, Kamerafahrten, -flüge und Kamera-Unschärfen, ganz bewusst eingesetzt, schaffen eine visuelle Symphonie, eine Anmutung, die der Transmitter dafür ist, zumindest eine Idee von Zeitreise beim Betrachter zu erzeugen.

Mittel, die auch in der virtuellen Rekonstruktion, sei es eines Bauwerks, einer Stadt oder einer Landschaft, zum Einsatz kommen. Das rekonstruierte Bauwerk ist im Film Teil einer visuellen Komposition aus Landschaft, vielleicht Nebel, Gegenlicht, gefilmt mit bewegter Kamera und bewussten Unschärfen. Oberstes Gesetz ist die Vermeidung von Gleichförmigkeit, das gilt für Umgebung, städtische Bebauung und Texturen. Selbst im Sekundentakt erkennt der Mensch Muster, und Muster entlarven Welten als virtuell. Gut ist eine virtuelle Rekonstruktion im szenischen Sinnzusammenhang nur dann, wenn man sie nicht als solche erkennt. Das hört sich banal an, ist es aber nicht. Texturen, wie Steinoberflächen, werden nur dann als realistisch empfunden, wenn sie variieren, in Muster und Maserung, der Schattierung, wenn sie Spuren der Witterung oder der Vegetation wie Kletterpflanzen oder Vermoosung aufweisen. Der Zuschauer vergleicht im Unterbewussten Rekonstruktion mit Realität. Dabei spielen Licht und Reflektion eine bedeutende Rolle. Global Illumination (GI) war ein Durchbruch, weil es zumindest in Ansätzen die mannigfaltige Reflektion von Licht simulierte, eine elementare Grundvoraussetzung für die Anmutung von Wirklichkeit.

J.8 3D — Die Zukunft

3D-Rekonstruktionen werden zum Ersatz für Kulisse. Das hat ganz unterschiedliche Gründe: Selbst dann, wenn eine historische Stätte noch existiert, das Schloss von Versailles beispielsweise oder die Marksburg am Rhein, noch wie in einer Zeitkapsel erhalten ist, gestalten sich Dreharbeiten in einem solchen Set nicht selten als undurchführbar. Das kann an den oft überzogenen finanziellen Forderungen der Verantwortlichen liegen oder an logistischen Hürden oder schlicht und ergreifend an Vorschriften scheitern, beispielsweise am Verbot von historischem Reenactment in geweihten Gotteshäusern.
Nicht selten existieren auch technische Gründe für ein **No go!**. Im Zeitalter der 4K-Handy-Kameras haben selbst Museumsbetreiber oft keine Idee vom Aufwand eines szenischen Drehtages.

Demgegenüber erlaubt Compositing — das ist, wenn man so will, die Verwendung **virtueller Matte-Technik** — eine realistische Umsetzung.
Das heißt, der Set wird dokumentiert, kleinteilig fotografiert und mit Blue- oder Greenscreen-Szenen kombiniert. Compositing und Crowding sind die Allroundwerkzeuge des Kinos. Bald auch in der Dokumentation. Doch die Herausforderung ist zu komplex, als dass sie von einem Operator erfüllt werden könnte: Schon jetzt zeichnet sich ein Prozess wachsender Spezialisierung ab, 3D-Operator sind spezialisiert jeweils auf Bauwerke, Menschen, Tiere, Landschaften, Elemente wie Feuer und Wasser, davon getrennt Composing-Spezialisten und dann — in Ermangelung eines besseren Begriffes — die **Finalisten**, die durch visuelle Vignetten, Diffusion und Colour-Matching helfen, jenen **realen Look** erzeugen, der für diese Sekunden Realität vorgaukelt.
Noch findet sich der Zuschauer vor der Szenerie, die er wie durch ein Fenster betrachtet. Dank Virtueller Realität (VR) findet er den Weg hinein. Die Verbindung des klassischen Mediums Dokumentarfilm mit den Möglichkeiten der Virtuellen Realität ist zwingend. Dabei dient der Film als Teaser für den Wunsch, eine historische Location via VR-Brille zu besuchen.

Die perfekte Rekonstruktion bleibt indessen eine Illusion, Ziel ist eine Annäherung, die die Illusion der Zeitreise nicht zerstört und den Charakter und die Anmutung eines Bauwerkes trifft.

☐ 01
Rückkehr von den Toten: Die Darstellerin bewegt sich in einem virtuellen Raum. Das Make-up ist computer-composed, lediglich die Pupillen sind ein »realer« Make-up-Effekt. (3-D Construction by Guido Leuck, compositing by Alin Gurita)

☐ 02
Mord als Matrix-Effekt: Nur die Kamera bewegt sich, alle Darsteller sind eingefroren. Die im Raum stehenden Blätter und Wasserspritzer sind composed. (Compositing by Alin Gurita)

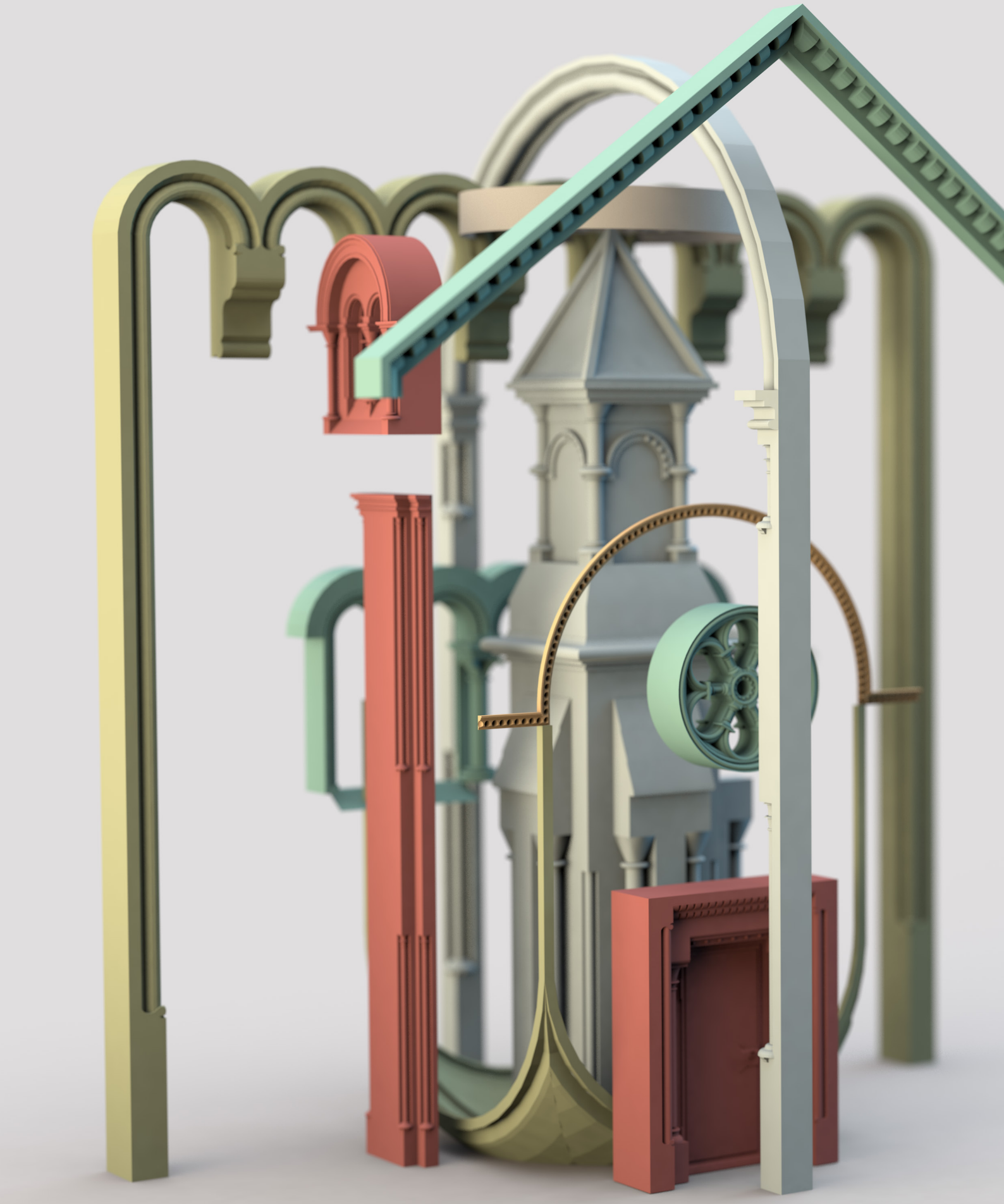
☐ 03
Palast in 3-D: Alle Großkulissen der Dokumentation über den römischen Kaiser Nero sind rein virtuell. (3-D-Construction by Guido Leuck, compositing by Alin Gurita)

☐ 04
Circus Maximus virtuell: Das Bild kombiniert das 3-D-Modell der Kaiserloge mit dem Compositing der Darsteller. (3-D-Constructioin by Guido Leuck, compositing by Alin Gurita)

☐ 05
Pantheon in 3D: 3D-Animation des römischen Pantheons mit der Statue Kaiser Augustus' (3-D-Constructioin by Guido Leuck).

☐ 05
Gestanzte Ordensritter: Ein in Ebenen separiertes Foto der gotischen Kathedrale in Lincoln / GB wird zum Filmset. Die Darsteller wurden composed und somit multipliziert. (Compositing by Alin Gurita und Photobearbeitung bei Maria Valentir)

☐ 06
Wiederauferstanden in Bits und Bytes: Die Königsschlösser Ostpreußens als 3D-Rekonstruktion (oben: 3D-Rekonstruktion Schloss Schlodien, Herder-Institut, 2016; unten: historische Aufnahme Schloss Schlodien, Elisabeth Dreischhoff)



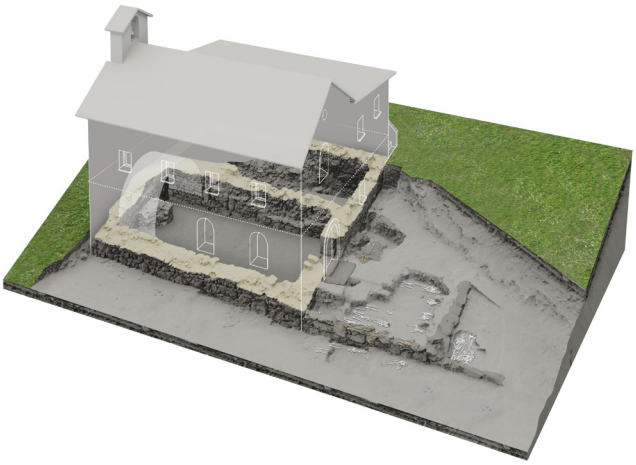
Niklaus Heeb, Jonas Christen

K. Strategien zur Vermittlung von Fakt, Hypothese und Fiktion in der digitalen Architektur-Rekonstruktion

→ Archäologische Rekonstruktion, 3D-Modellierung, Geschichtsvermittlung, Gestaltungsmittel

Digitale Architektur-Rekonstruktion basiert auf wissenschaftlichen Erkenntnissen und fügt die zu vermittelnden Sachverhalte in eine visuelle Form. Eine Rekonstruktion beinhaltet jedoch niemals nur ein reines Abbilden von Wissensinhalten, denn Nichtwissen und Halbwissen sind immanente Bestandteile einer Architektur-Rekonstruktion und jede Rekonstruktion ist ein Prozess der Annäherung an die Realität. Gestalter beeinflussen entscheidend Inhalt und Wirkung eines Bildes durch ihren Umgang mit Wissensanteilen, die auf Fakten basieren, und solchen, die eine Hypothese oder gar eine spekulative Erfindung darstellen. Unterschiedliche Vermittlungsziele erfordern unterschiedliche Vermittlungsstrategien: So lassen sich zum Beispiel Wissenslücken kaschieren oder der Stand des Wissens kann in seiner Unvollständigkeit transparent und lesbar dargelegt werden.

Im Artikel werden fünf wesentliche Strategien zur visuellen Vermittlung von Fakt und Hypothese vorgestellt und deren Einsatzmöglichkeiten anhand konkreter Bildbeispiele erläutert. Die Vermittlungsstrategien beinhalten grundlegende konzeptionelle Entscheide und geben den Einsatz von passenden Gestaltungsmitteln vor. Acht Gestaltungsmittel wie Farbe, Transparenz oder Detaillierungsgrad werden identifiziert und anhand von Bildbeispielen besprochen. Der Artikel leistet jedoch keine rezeptartige Anleitung sondern präsentiert vielmehr eine Art Werkzeugkasten, aus dem sich Gestalter und Wissenschaftler für Lehre und Praxis bedienen können und Inspiration für eigenständige Bildlösungen finden. Weiterführend wäre mittels empirischer Studien den Fragen der Rezeption und Glaubwürdigkeit nachzugehen. Bis zum Zeitpunkt solcher Untersuchungen wird die vorliegende Zusammenführung Gestaltern von digitaler Architektur-Rekonstruktion helfen, die Mittel zur Darstellung inhaltlicher Unschärfe zu vergleichen, auszuwählen und bewusst einzusetzen.



☐ 01
Rekonstruktionsdarstellungen von »Sonch Antöni«, einer Kapelle mit Friedhof und Hospiz aus dem 12. Jh. im schweizerischen Val Müstair. Aus der BA-Diplomarbeit von Simeon Schaffner, 2016. Darstellung des Befunds (3D-Oberflächenscan der Ausgrabungssituation) in Kombination mit hypothetischer Volumendarstellung der Architektur in abstrahierter Form. (Simeon Schaffner)

☐ 02
Rekonstruktion mit gesteigertem Modellcharakter: Das Objekt zeigt sich zwar im Kontext eines Stücks Landschaft umgeben von Vegetation. Der Landschaftsfleck ist dekontextualisiert und wird so aus dem historischen und geografischen Zusammenhang herausgeschnitten. (Simeon Schaffner).

☐ 03
Inszenierung der rekonstruierten Kapelle als erzählendes Bild, belebt mit Figur und dramatisch erhöht durch eine Nebelstimmung. (Simeon Schaffner).

K.1 Einführung

1. **Wissenschaft und Design** — Die Darstellung einer Rekonstruktion ist das Resultat der Zusammenarbeit von Wissenschaftler und Gestalter.
Sie basiert auf wissenschaftlichen Erkenntnissen und fügt die zu vermittelnden Sachverhalte in eine visuelle Form. Die Art der Formulierung beruht auf gestalterischem Wissen und benötigt gestalterische Kompetenzen. Die wichtigsten Aspekte sind die Bildgestaltung, die Inszenierung der Inhalte und die Narration. Eine zentrale Bedeutung kommt den vermittlungsstrategischen Absichten zu, welche über die reine Inhaltsvermittlung hinausgehen. Diese geben den Rahmen vor, mit welcher Intention und mit welchen gestalterischen Mitteln die Ziele erreicht, also die jeweiligen wissenschaftlichen Fakten vermittelt werden sollen. Im Idealfall werden alle diese Aspekte, Auswahl der Wissensinhalte, Vermittlungsziele und -strategie sowie die Gestaltung im gemeinsamen Dialog zwischen Gestalter und Forscher erarbeitet und umgesetzt.

2. **Fakten und Hypothesen** — Eine Rekonstruktion beinhaltet niemals nur ein Abbilden, denn Nichtwissen und Halbwissen sind immanente Bestandteile jeder rekonstruierten Architekturdarstellung. Weil sich eine Rekonstruktion immer nur auf unvollständiges Wissen stützen kann, beeinflusst und verantwortet der Gestalter oftmals entscheidend den Inhalt und die Wirkung eines Bildes. Erforderlich ist ein bewusster und differenzierter Umgang mit denjenigen Wissensanteilen, die auf Fakten basieren, und solchen, die eine Hypothese oder gar eine spekulative Erfindung darstellen. Denn es gilt:

> »Even if you follow the rules, the only real certain thing about any reconstruction drawing is that it is wrong. The only real question is, how wrong is it?« 01

■ 01
Simon James, Drawing Inferences — Visual Reconstruction in Theory and Practice, in: Brian Leigh Molyneaux (Hg.), The Cultural Life of Image — Visual Representation in Archaeology, London 1997, S. 22–48.

Die Fachrichtung Knowledge Visualization der Zürcher Hochschule der Künste erachtet diese Herausforderung als eines der zentralen Themen im Feld der Rekonstruktionsvisualisierung. Schließlich ist die Frage nach Richtig und Falsch — und damit die Suche nach der Wahrheit — die treibende Kraft eines jeden Rekonstruktionsprozesses. Die Fachrichtung behandelt diese Thematik bereits in der Ausbildung zum Wissenschaftlichen Illustrator, entwickelt visuelle Lösungen in Kooperationsprojekten und untersucht diese mit forschendem Ansatz in Form von BA- und MA-Diplomprojekten.

Der Aufklärungs- und Bewusstseinsprozess seitens der Wissenschaften ist zu fördern, auch wenn bereits ein Verständnis für die Relevanz dieser Vermittlungsstrategien sowie, besonders im didaktischen Kontext, eine gewisse Nachfrage besteht. Zudem steht eine akkurate Analyse und Synthese der Vermittlungsstrategien zu dieser Fragestellung aus. Zusammenführende Betrachtungen stellen einen wichtigen Beitrag zur Unterstützung der Lehre und der Praxis dar. Diese Abhandlung will hierzu einen Beitrag leisten.

3. **Das wissenschaftliche Bild** — Zu wissenschaftlichem Arbeiten gehört, neu erworbene Erkenntnisse glaubwürdig und nachvollziehbar abzubilden. Was heißt **wissenschaftlich** im Zusammenhang mit der Rekonstruktion? Es bedeutet: Dokumentationen zu erstellen, die sich nachvollziehen lassen, Datenaufnahmen und -analysen zu generieren, die reproduzierbar sind, sowie plausible Thesen zu formulieren. Die Thesenbildung und die dafür notwendige Interpretation der Quellen ist Teil der wissenschaftlichen Methodik und insbesondere für Rekonstruktionsprozesse von wesentlicher Bedeutung. Sie gilt aber erst im eigentlichen Sinne als wissenschaftlich, wenn transparent und nachvollziehbar veranschaulicht wird, was weshalb wie interpretiert wird. An ebendiesem Anspruch sollte sich auch die wissenschaftliche Visualisierung der Rekonstruktion messen. Wünschenswert wären Darstellungsformen, welche den Weg von der Ausgrabung über den Befund und dessen Interpretation bis zum Vergleich unterschiedlicher Thesenbildungen und deren Wahrscheinlichkeiten nachvollziehbar veranschaulichen. Diese Anforderungen können von einem statischen Einzelbild kaum eingelöst werden. Dennoch lässt sich dieser Anspruch über ein intelligentes Gestaltungskonzept wenigstens ansatzweise einlösen und ausgewählte Aspekte von Rekonstruktionsprozessen können visuell nachvollziehbar vermittelt werden. Die Konzepte, die dahinterstehen, werden im weiteren Verlauf als Strategien zur Vermittlung oder Vermittlungsstrategien bezeichnet.

Unterschiedlich gelagerte Vermittlungsziele erfordern unterschiedliche Strategien: das Unwissen lässt sich kaschieren, die Wissenslücken können ausgeschmückt oder der Wissensstand kann bezüglich seiner Unvollständigkeit transparent und lesbar vermittelt werden.

4. **Fokus und Abgrenzung** — Bilder, die Wissen vermitteln, und deren Rezeption sind komplex und vielschichtig. Das Bild spricht auf mehreren Ebenen gleichzeitig und vielfach sind Fragen zu Form und Inhalt darin verwoben. Damit sind Analysen schwierig und bleiben oft unscharf. Die Bildrezeption wird von zahlreichen Faktoren der Psychologie bestimmt und steht in Abhängigkeit von individuellem Vorwissen, Motivation und Erwartungshaltung. Damit ist die Wirkung auf den individuellen Betrachter schwierig zu erfassen. Allgemeingültige Aussagen zu Form und Wirkung und zur Lesbarkeit eines Wissensbildes sind nur sehr eingeschränkt möglich.

In der vorliegenden Abhandlung befassen wir uns ausschließlich mit gestalteten Rekonstruktionsdarstellungen. Nicht berücksichtigt werden die primären Bilder des Forschungsprozesses wie dokumentarische Bilder aus bildgebenden Verfahren, Grabungs- und Funddokumentationen und Befundbilder. Im Zentrum stehen gestaltete und inszenierte populärwissenschaftliche Rekonstruktionsdarstellungen, die zum Ziel haben, beim Leser das Interesse an wissenschaftlichen Erkenntnissen zur Rekonstruktion generell zu wecken und Informationen zu spezifischen Aspekten der Rekonstruktion zu vermitteln. Über eine ansprechende Gestaltung, eine Aufsehen erregende Konzeption oder packende Narration versuchen sie den Betrachter auch emotional anzusprechen. Einer genaueren Betrachtung unterzogen werden also im Folgenden Bildtypen im Rekonstruktionsprozess (in der Reihe Fundbild → Befundbild → Rekonstruktion), die nach Befundaufnahme, Analyse und

Rekonstruktion den Wissensstand didaktisch oder populärwissenschaftlich aufbereiten und mittels einer fortgeschrittenen künstlerischen Schöpfungshöhe auch ein fachfernes Publikum ansprechen und informieren wollen.

Nicht unterschieden wird zwischen analog und digital hergestellten Bildern. Denn in allen Bildformen geht es letztlich um dieselben Fragen von Gestaltung und Lesbarkeit. Zudem halten wir diese Unterscheidung für nicht mehr zeitgemäß, weil letztlich alle Bilder spätestens in der Phase der Reproduktion und Verbreitung digital bearbeitet werden.

Rekonstruktionsvisualisierungen werden in aller Regel im Kontext von Publikationen (Artikeln, Monografien, Ausstellungen, in der Wissenschaftskommunikation, in Webportalen) eingesetzt und auch so rezipiert. Sie werden dort von wissenschaftlichen oder populärwissenschaftlichen und didaktischen Texten begleitet, welche die Illustration erklären. Umgekehrt unterstützen die Illustrationen ihrerseits die Texte, indem sie Inhalte als Übersicht darstellen, präzisieren, vereinfachen, erweitern und kontextualisieren. »Ein Bild sagt mehr als tausend Worte.« 02 Das begleitende Wort seinerseits steuert aber entscheidend, wie ein Bild gelesen wird. Bereits eine einfache Bildlegende mit dem einen Begriff **Rekonstruktion spricht mehr als tausend Worte**.
Auf diesen Dialog der Text / Bild-Interaktion wird hier bewusst nicht eingegangen. Der Anspruch soll sein, dass das Bild alleinig die übergeordneten Ansprüche der Vermittlung leistet. Damit soll das Potenzial erörtert werden, in welchem Ausmaß visuelle Strategien über den Informationstransfer hinaus Erkenntnisse vermitteln können.

Alle vorgestellten Arbeiten stammen aus der Fachrichtung Knowledge Visualization. Sie sind Resultate aus Unterrichtsprojekten, die in Kooperation mit archäologischer Forschung entstanden sind oder aus BA- und MA-Diplomarbeiten. Einzelne Arbeiten wurden von Abgängerinnen und Abgängern oder auch von Dozierenden in der Praxis im Rahmen von Auftragsverhältnissen erstellt.

■ 02
Das Sprichwort stammt laut Wikipedia von Fred R. Barnard: »Am 8. Dezember 1921 veröffentlichte Fred R. Barnard in einer Fachzeitschrift der Werbebranche, Printers' Ink, eine Anzeige mit dem Slogan, ›One Look is Worth A Thousand Words‹. …Am 10. März 1927 erschien eine zweite Anzeige mit der Phrase ›One Picture is Worth Ten Thousand Words‹. Dort wird behauptet, es handele sich um ein chinesisches Sprichwort. Das Buch The Home Book of Proverbs, Maxims, and Familiar Phrases zitiert den Autor Barnard, der sagte, er habe den Slogan, als chinesisches Sprichwort betitelt, damit die Leute es ernst nehmen.« Wikipedia, Ein Bild sagt mehr als tausend Worte, https://de.wikipedia.org/wiki/Ein_Bild_sagt_mehr_als_tausend_Worte.

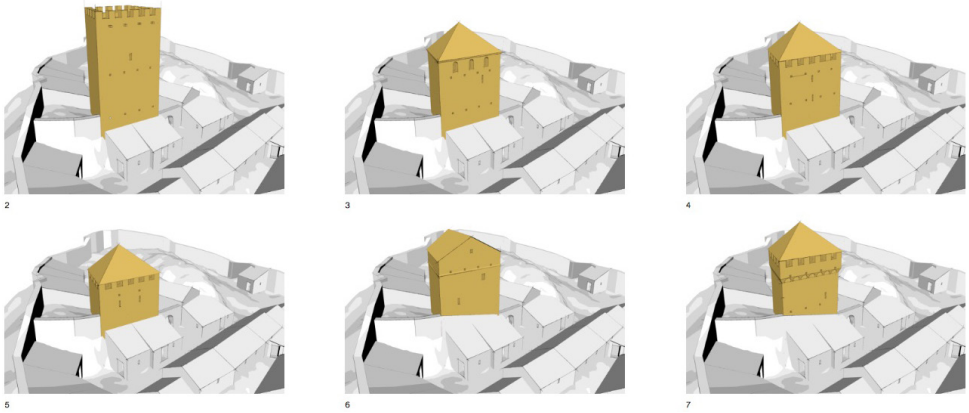
K.2 Vermittlungsstrategien

In der Folge sollen die aus unserer Sicht wesentlichen Strategien zur visuellen Vermittlung von Fakt und Hypothese vorgestellt werden. Viele der Strategien haben sich für den Bereich der Rekonstruktion bereits als eigentliche Konventionen etabliert. Sie stehen für die großen konzeptionellen Entscheide und legen die Ausrichtung von Bildkonzeption und -vermittlung fest und geben den Einsatz von passenden Gestaltungsmitteln vor.

1. **Die Variantenbildung** — Dies ist vielleicht die am einfachsten lesbare und deshalb vertrauteste Form der Darstellung unterschiedlicher Möglichkeiten einer Rekonstruktion. Dabei werden alternative Varianten der Rekonstruktion im direkten Vergleich nebeneinandergesetzt. Der Betrachter kann so unterschiedliche Hypothesen zur selben Fundsituation aufnehmen und nach eigenem Bedarf und Vorwissen miteinander vergleichen. Auf diese Weise

erschließt sich dem Betrachter ein flexibles vergleichendes Bild des Forschungsstandes. Er kann mögliche Hypothesenbildungen nachvollziehen und bezieht damit gedanklich eine aktive Rolle im Forschungsdiskurs.

Typisches Beispiel ist eine Bildserie, in der die rekonstruierte Architektur in Form von Variantendarstellung unterschiedliche Ausprägungen erfährt. Das aufgeführte Beispiel 04 wurde vom Gestalter während des Rekonstruktionsprozesses erstellt, um gemeinsam mit dem Wissenschaftler die wahrscheinlichste Hypothese zu eruieren. Ein weiteres wichtiges Grundprinzip ist die Gegenüberstellung von zwei zu vergleichenden Varianten ein und desselben Objekts, welche beispielsweise einen Vorher-nachher-Vergleich zulässt. Eine etablierte Konvention ist das Prinzip des Zeitsprungs, welche den heutigen Zustand der Ruinen-Situation demjenigen der Gesamt-Rekonstruktion des Bauobjekts gegenübergestellt 05.

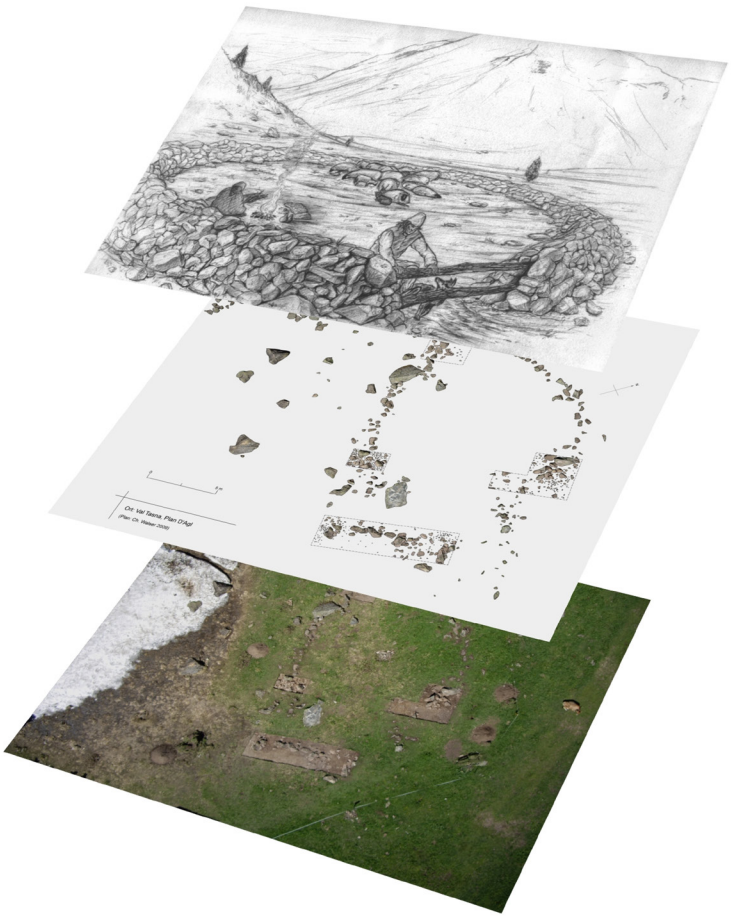


☐ 04
Turmvarianten. Prozessbilder aus der Entwurfs- und Entwicklungsphase der Rekonstruktion des Dorfes Tremona-Castello im Tessin im 13. Jh. Aus der BA-Diplomarbeit von Elia Marcacci, 2014. (Elia Marcacci)

☐ 05
Das Vorher-nachher-Prinzip. Gegenüberstellung von Befund und Rekonstruktionsversuch der Ruine Alt-Wartburg in Olten. Freie Arbeit von Joe Rohrer 2012. (Joe Rohrer)

2. **Prozessdarstellung** — Eine Rekonstruktion stellt stets einen Annäherungsprozess dar. Jede Rekonstruktion zeigt nur den aktuellen Stand der wissenschaftlichen Erkenntnis. Im Idealfall zeichnet die Forschung einen Weg, der kontinuierlich zu mehr und präziserer Erkenntnis führt. In zahlreichen Schritten nähert sich das Wissen den realen Sachverhalten an. Zu bedenken bleibt, dass auch eine neue Rekonstruktion niemals richtig, sondern bestenfalls wahrscheinlicher als die vorherige sein kann.

Eine visualisierte Rekonstruktion kann den Versuch unternehmen, den Prozess der Annäherung, der Thesenprüfung und -verwerfung visuell abzubilden. Ziel einer solchen Visualisierung ist es, dem Betrachter einen Einblick in die schrittweise Wissensakkumulation eines Forschungsprozesses zu gewähren. Auch unter dieser Vermittlungsstrategie führt die Kommunikation zwischen Bild und Betrachter über die reine Informationsvermittlung hinaus. Dem Betrachter wird bewusst gemacht, dass die Rekonstruktion auf Thesen beruht. Er kann den Prozess Schritt für Schritt nachvollziehen und wird angeregt, das Bild des rekonstruierten Objektes selbstständig zu vervollständigen. Eine Prozessdarstellung kann also die schrittweise Konstruktion einer Rekonstruktion darstellen 06. Sie kann aber auch die Evolution eines Rekonstruktionsprojektes über einen längeren Zeitabschnitt in Bildform bringen, indem sie die Produkte unterschiedlicher Autoren chronologisch aufreiht und so den wissenschaftlichen Annäherungsprozess offenlegt 07 08 09.



☐ 06
Rekonstruktionsprozess, dargestellt in Teilschritten, von der Fundsituation über die Fundzeichnung zum rekonstruierten Lebensbild. Unterrichtsprojekt von David Schürch, 2009. (David Schürch)

☐ 07
Die erste Gesamtrekonstruktion des Legionslagers Vindonissa wurde 1946 gezeichnet. Über den Vergleich der folgenden Bilder wird die Weiterentwicklung des wissenschaftlichen Kenntnisstandes ablesbar. Rekonstruktion von Hans Herzig, 1946. (Hans Herzig)

☐ 08
Die Darstellung der umliegenden Vici hat sich stark erweitert, der zivilen Bevölkerung kam hier seitens Wissenschaften mehr Aufmerksamkeit zu. Rekonstruktion vom Atelier Bunter Hund, 2006. (Atelier Bunter Hund)

☐ 09
Die Vici wurden aufgrund neuster Untersuchungen wieder redimensioniert dargestellt. Ein neuer Fund liess auf einen Circus schliessen; im linken, unteren Eck des Bildes. Rekonstruktion von ikonaut, 2016. (ikonaut)

3. **Differenzierung von Wahrscheinlichkeiten** — Der Einsatz mehrerer verschiedener Gestaltungsmittel in derselben Rekonstruktionsdarstellung ermöglicht es, dass ein Betrachter sich unterscheidende Wahrscheinlichkeiten ablesen kann. Die Abgrenzung von Gebäudeteilen durch eine andere Farbigkeit, durch den Einsatz von Transparenz oder durch unterschiedliche Abstraktionsgrade kann den hypothetischen Charakter ausgewählter Strukturen verdeutlichen [10].

Die Möglichkeiten, Gestaltungsmittel zu kombinieren, mit dem Ziel eine Differenz zwischen Bildteilen und Objekten zu erwirken, sind äusserst vielfältig. [11] Der Einsatz von Brüchen in der Bildsprache eröffnet großen gestalterischen Spielraum, birgt aber auch das Risiko, dass der Betrachter die zu vermittelnden Inhalte und deren Wahrscheinlichkeit nicht wie beabsichtigt liest. Zudem ist ein Bruch in der Bildsprache für die Gesamtwirkung (Einheitlichkeit und Ästhetik) eines Bildes nicht immer wünschenswert. Hier ist folglich ein differenzierter und reflektierter Umgang mit den gestalterischen Mitteln erforderlich.

☐ 10
Differenzierung durch unterschiedliche Abstraktionsgrade: gesicherte Anteile der Rekonstruktion wurden in realistischer Bildsprache ausgeführt und hypothetische Anteile als Drahtgittermodell eingefügt. Priorat auf der St. Petersinsel im Bielersee aus dem 12. Jh. Diplomarbeit von Joe Rohrer 2006. (Joe Rohrer)

☐ 11
Eine Rekonstruktionsdarstellung, welche heute noch bestehende Architektur-Anteile hervorhebt, indem diese im Kontrast zur hypothetischen Rekonstruktion mit den Gestaltungsmitteln Farbe und Materialität realitätsnah ausgearbeitet ist. Darstellung eines Bassins des römischen Bades im Bäderquartier Baden (Aargau) im 3. Jh. n. Chr., Auftragsarbeit durch ikonaut 2015. (ikonaut)

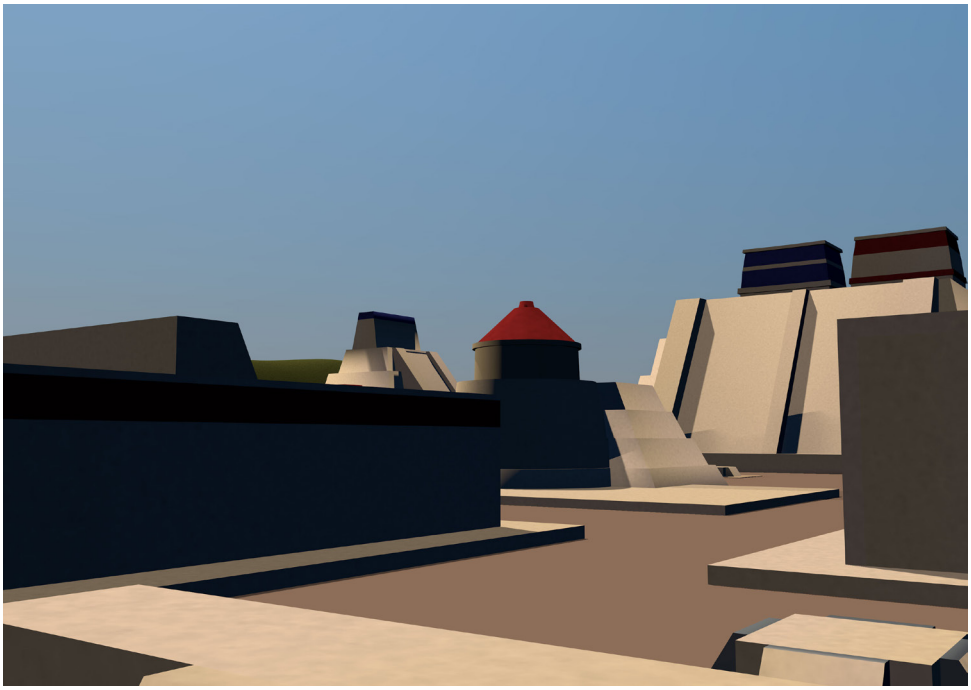
4. **Modellcharakter** — Im Sinne eines vereinfachten Abbilds der Wirklichkeit ist jede Rekonstruktionsvisualisierung als Modell zu verstehen. Sie veranschaulicht ausgewählte Aspekte oder Sachverhalte einer nicht mehr vorhandenen Wirklichkeit und ermöglicht damit Diskurs und Verständnis.
Das Modell repräsentiert das Original, umfasst jedoch nicht alle Attribute desselben, sondern nur diejenigen, die vom Erschaffer bzw. Nutzer als relevant erachtet werden.

Modelle sind Abstrahierungen und Konstrukte, die es ermöglichen, Sachverhalte zu beschreiben, zu verdeutlichen, sie zu erklären und verständlich zu machen. Der Modellbildungsprozess reduziert und vereinfacht, abstrahiert und idealisiert, er dekontextualisiert und stilisiert (durch Betonung der wesentlichen Grundzüge, Gestaltung nach formalen Prinzipien usw.).

All diese Prinzipien lassen sich im Bild durch gestalterische Mittel umsetzen. Zu nennen sind: Reduktion des Detaillierungsgrads, Reduktion von Farbe bis hin zum Graustufenbild, Abstraktion in Form einer rein linearen Umsetzung oder Dekontextualisierung (s. K.3 — Graustufenbild, Liniendarstellung, Reduzierter Detailgrad, Dekontextualisiert).

Im Falle des Modells lassen sich die gestalterischen Mittel in ihrer Eigenschaft so weit verstärkt einsetzen, dass in der Gesamtwirkung des Rekonstruktionsbildes der Modellcharakter nicht nur spürbar wird, sondern sich geradezu aufdrängt. So etwa in 02: Das Objekt zeigt sich zwar umgeben von Vegetation im Kontext eines Stücks Landschaft. Der Landschaftsfleck selbst ist jedoch überdeutlich dekontextualisiert und wird so aus dem historischen und geografischen Zusammenhang herausgeschnitten und gewissermaßen als Modell auf dem Silbertablett in die Gegenwart serviert.

5. **Skizzencharakter** — Die Skizze ist ein zentrales Grundprinzip in gestalterischen Prozessen und in der visuellen Kommunikation generell. Die Skizze vereinfacht und beschränkt sich auf das Wesentliche. Sie schärft das Wichtige, sie deutet dasjenige nur an, was weniger Bedeutung hat, und sie lässt offen, was nicht gesagt werden muss oder kann. Ihre zentrale Eigenschaft, unterschiedliche Ausführungsgrade zu kombinieren, ermöglicht es, Objekte als verschieden wahrscheinlich umzusetzen. Funde und gesicherte Fakten lassen sich getreu ihrer Wahrheitsnähe konkret, scharf und präzise lesbar darstellen, die hypothetischen Anteile der Rekonstruktion werden nur angedeutet. 12
Rein spekulative Ansätze der Rekonstruktion, welche aufgrund von Leerstellen und Unwissen erfolgen, können in einer Skizze entsprechend vage und unscharf anskizziert werden. 13 14



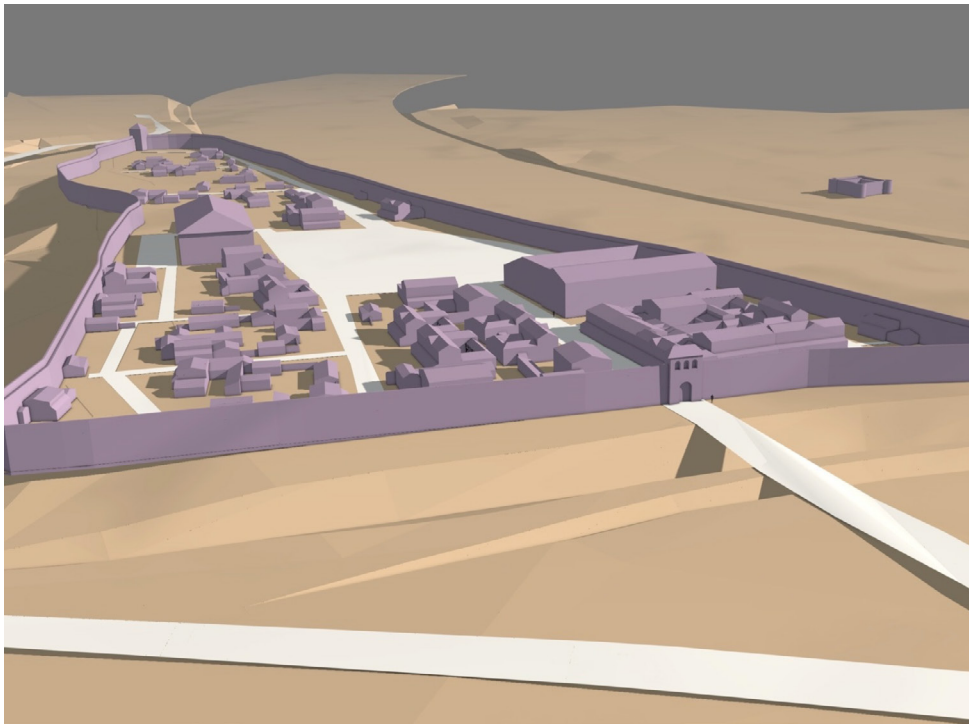
☐ 12
Dank einem einfachen 3D-Modell konnte die Komposition und Perspektive des Bildes mit wenig Aufwand eruiert werden

☐ 13
Per Bleistift
wurde skizzierend ausformuliert

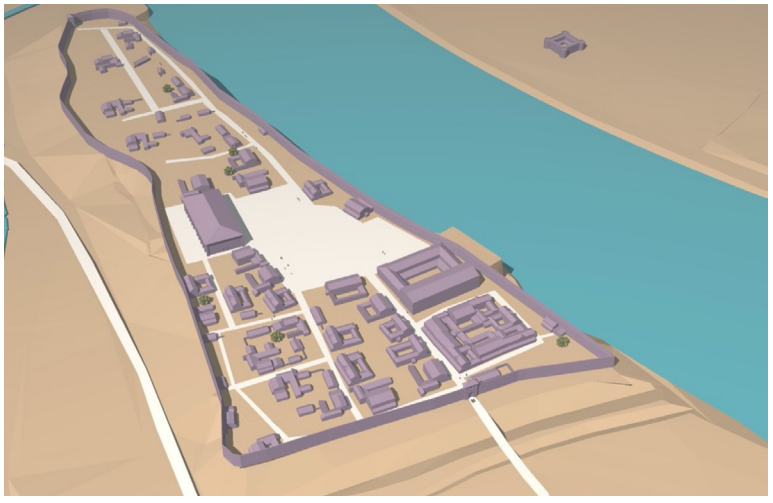
☐ 14
und schließlich eine schnelle digitale Kolorierung vorgenommen. Tenochtitlan im 16. Jh., aus der BA-Arbeit von Willy Schneider 2012. (Willy Schneider)

6. **Distanznahme** — Die Wahl des Standpunkts und des Bildausschnitts gegenüber dem darzustellenden Motiv sind wesentliche konzeptionelle Entscheide und haben einen großen Einfluss auf Bildwirkung und Vermittlung. Eine weite Zoomstufe schafft Distanz zwischen Betrachter und Motiv. 15 16 Die große Form, die wichtigen Proportionen und der Kontext der Rekonstruktion können so vermittelt werden, ohne dass zu viel Detail behauptet werden muss. Im günstigsten Fall wird auch die Wahrnehmung der zeitlichen Distanz zwischen der abgebildeten Situation und dem Betrachter unterstützt.

Über eine geschickte Kombination von Bildern mit sehr weiter und sehr naher Zoomstufe können Übersicht und Detail gleichzeitig vermittelt und unerwünschte Bereiche ausgeblendet werden.



□ 15
Abstand nehmen und die Siedlung aus der Vogelperspektive zeigen statt sich in der Nahaufnahme in Details zu verlieren. In der Konzeptionsphase wurde mit dem Auftraggeber über Variantenbildung von Standpunkt und Perspektive eine geeignete Ansicht gesucht. Rekonstruktionsdarstellung von Basel im 3. Jh. n. Chr. von Jonas Christen, 2011. (Jonas Christen)



☐ 16
In der abschliessenden Rekonstruktion ist die gesicherte Lage der Siedlung auf einer Anhöhe und zwischen Gewässern gut erkennbar. Details innerhalb der Mauern sind weitgehend unbekannt und sollten daher nicht hervorgehoben werden. Aus einer Praktikumsarbeit von Jonas Christen, betreut von Marco Bernasconi, 2011. (Jonas Christen und Marco Bernasconi)

K.3 Gestaltungsmittel

Im Anschluss an die Entscheidung für die Vermittlungsziele und -strategie folgt die Wahl der Gestaltungsmittel. Sie sollen die gewählte Vermittlungsabsicht optimal unterstützen. Ein einzelnes Gestaltungsmittel kann eine Vermittlungsstrategie zur Hauptsache umsetzen, in der Regel handelt es sich aber meist um ein komplexes Zusammenspiel mehrerer der hier genannten Gestaltungsmittel in einem Bild.

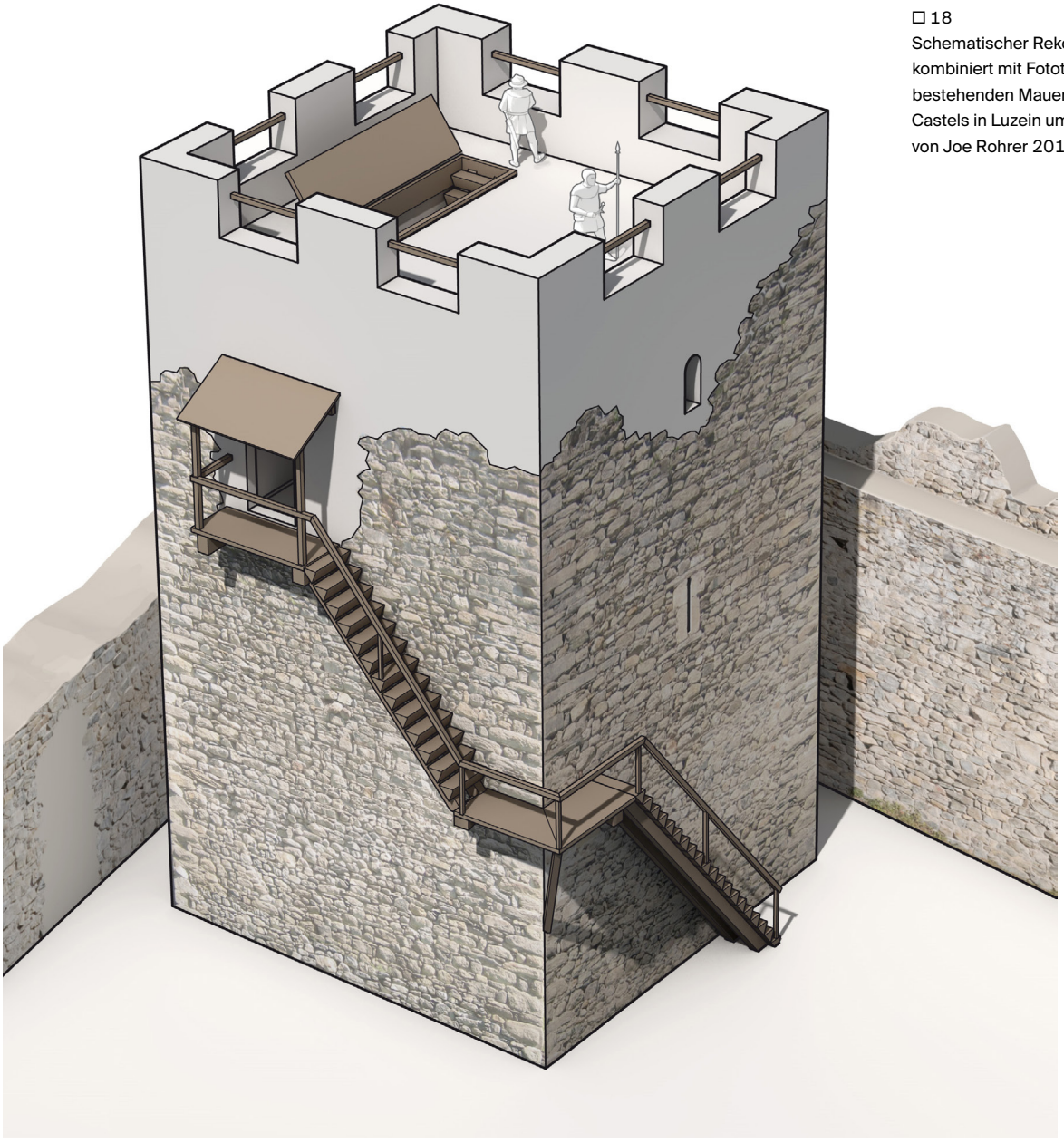
1. **Graustufenbild** — Bereits bevor computergenerierte Visualisierungen aufkamen, wurden Graustufenbilder in Form von Bleistift– oder Tuschezeichnungen in Schwarz und Weiß angefertigt. Diese stellten aber in erster Linie Umrisse dar. Die hier zu besprechenden Graustufenbilder aus computergenerierten Architekturrenderings imitieren eine realistische Licht– und Schattensituation auf Modellen mit einer einzigen, neutralen Farbe.

Das Graustufenbild macht sehr schnell deutlich, dass es sich beim Abgebildeten um eine abstrahierte Darstellung handelt. Die visuelle Sprache ist angelehnt an das klassische architektonische Gips- oder Kartonmodell, das auch für Laien räumlich klar lesbar ist. Die Bilder strahlen Professionalität aus: Was gezeigt wird, wirkt glaubwürdig. Durch den Verzicht auf Farbe und Materialität stehen die räumliche Wirkung und das Spiel von Licht und Schatten im Vordergrund 17 Die Möglichkeit zur Differenzierung von Materialität durch unterschiedliche Helligkeiten und Einsatz von Struktur bleibt dabei erhalten.

Ein weiterer Vorteil des Graustufenbildes ist, dass sich der Gestalter der Rekonstruktion weniger in Details verlieren muss, welche zudem von neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen widerlegt werden können. Weil die Darstellung als Graustufenbild auf Farbe verzichtet, kann sich allerdings beim Betrachter die Vorstellung verfestigen, dass die Objekte tatsächlich unfarbig waren. So können graustufenartige Rekonstruktionen unter ungünstigen Umständen zur verfehlten Vorstellung beitragen, dass die Antike ein farbloses Zeitalter war.

□ 17
Auslassung der rein hypothetischen Farbigkeit am Beispiel des Hauptportals des Basler Münsters im Zustand um 1270 von Marco Bernasconi und Serafin Pazdera 2011. (Marco Bernasconi und Serafin Pazdera)

2. **Farbigkeit** – Hervorhebung mittels Farbe ist eine sehr deutliche Form der visuellen Abtrennung. Sie wird üblicherweise für hypothetische Strukturen der Rekonstruktion eingesetzt [18]. Im Falle einer flächigen Einfärbung dieser Bildteile können jedoch allfällige zusätzliche Informationen nur erschwert dargestellt werden (z. B. ob eine Wand verputzt ist oder nicht). Probleme der Lesbarkeit der Anteile von Fakt und Fiktion ergeben sich auch, wenn mit unterschiedlichen, realitätsnahen Farben gearbeitet wird (z. B. Weiß für Wände und Braun für hölzerne Strukturen), da der Unterschied zwischen Befund und Rekonstruktion verschwimmt.



☐ 18
Schematischer Rekonstruktionsversuch, kombiniert mit Fototexturen des bestehenden Mauerwerks der Ruine Castels in Luzein um 1200. Auftragsarbeit von Joe Rohrer 2012. (Joe Rohrer)

3. **Transparenz** – Transparenz als Mittel zur gestalterischen Auszeichnung von unsicheren Bildinhalten wird ähnlich eingesetzt wie die Nutzung von Farbe. Dank der Reduktion von Kontrast und Detail in der Struktur ist die Transparenz ein sehr geeignetes Mittel, um hypothetische Strukturen auszuzeichnen. Transparente Objekte werden im Kontrast zu nicht transparenten Objekten und Strukturen intuitiv als vergänglich und unsicher empfunden [19] [20]. Der Einsatz von Transparenz erschwert jedoch das Raumverständnis, da transparente Körper durch die fehlende Information der Überschneidung räumlich weniger abzugrenzen sind:

»Instead of visualizing two options, transparency visualizes none of them, but informs about this uncertainty in a non-spatial, rather theoretic way.« [03]

Aber nicht nur die Lesbarkeit von transparenten Bildteilen ist limitiert, sondern auch die Darstellung von Details. So ist beispielsweise das Einfügen von Details wie Fenstern und Türen in die rekonstruierte Geometrie wenig praktikabel, da die dadurch entstehenden Überlagerungen den Betrachter verwirren können.

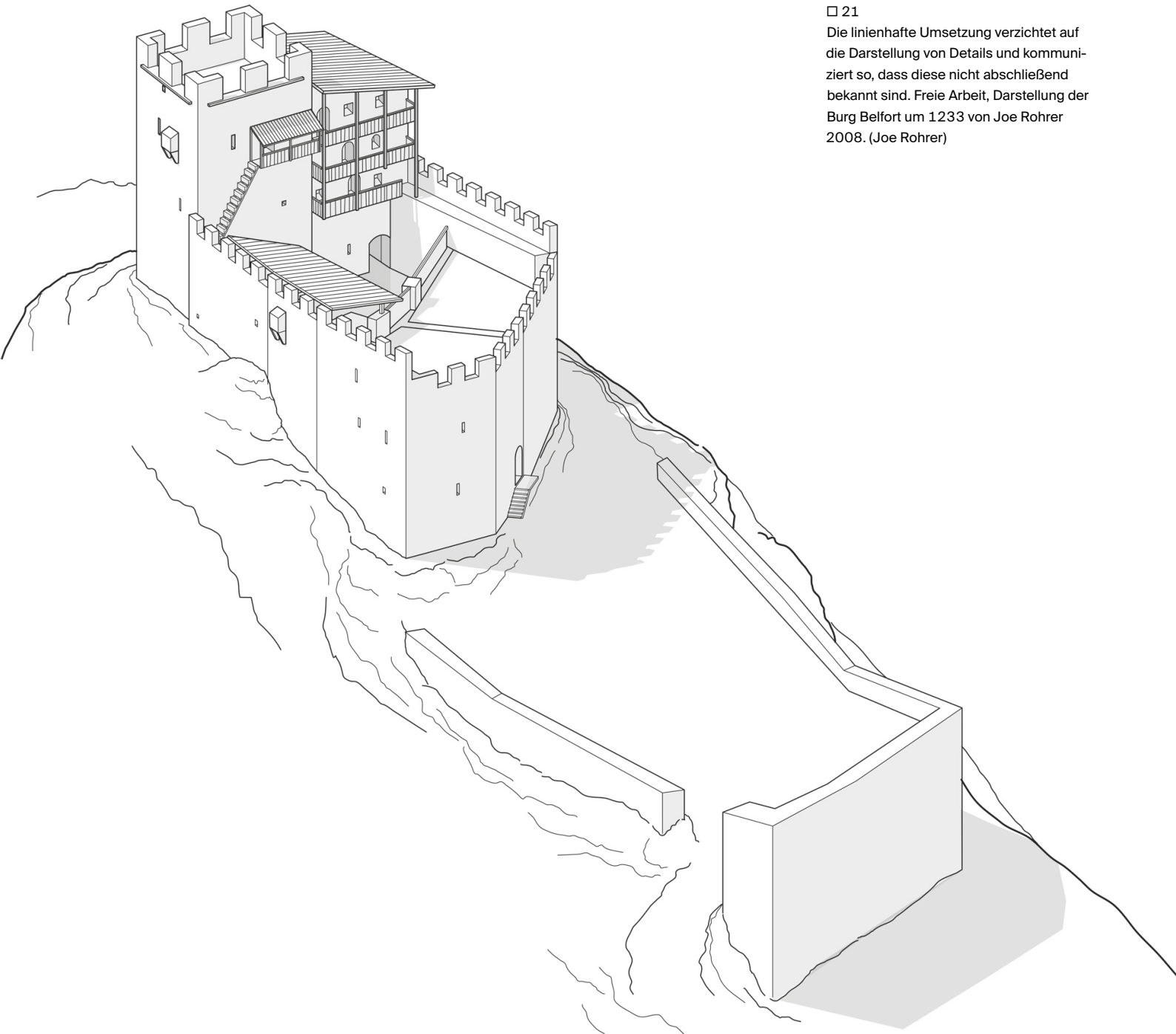
■ **03**
Dominik Lengyel, Catherine Toulouse, Visualisation of Uncertainty in Archaeological Reconstructions, in: Stephan Hoppe, Stefan Breitling (Hg.), Virtual Palaces, Part II, Lost Palaces and their Afterlife, München 2016, S.103–117.

☐ 19
Karolingisch-ottonischer Königshof Zizers vom 8. bis 11. Jh.: Hypothetische Gebäude der nahen Umgebung werden durch reduzierte, halbtransparente Strukturen angedeutet. Auftragsarbeit von ikonaut 2016. (Ikonaut)

☐ 20
Der untere Teil eines Wohnturms in Edisried im 13. Jh. wird halbtransparent dargestellt, um den Blick auf die nachgewiesene Struktur des Grundrisses und auf heutige Gebäude freizugeben. Auftragsarbeit von Joe Rohrer 2007. (Joe Rohrer)

4. **Liniendarstellung** – Die linienhafte Umsetzung ist eine weitverbreitete Form der Abstraktion von Architekturdarstellungen. In diese Kategorie gehören sowohl sehr stark reduzierte Bilder, welche das Objekt als reinen Umriss abstrahieren, als auch komplexe Darstellungen, welche durch Binnenlinien strukturiert auch architektonische Details als Linienzeichnung integrieren. Zudem kann die Architekturdarstellung auch versteckte Linien beinhalten, welche die hinter der geschlossenen Geometrie vorhandene Konstruktion sichtbar machen.

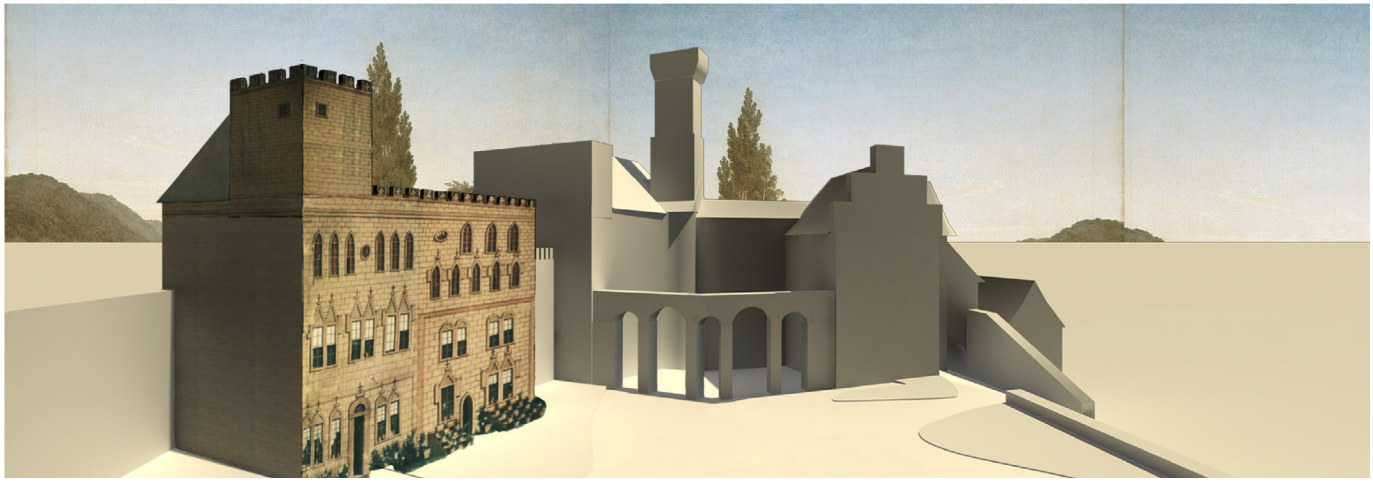
Die Vermittlung der räumlichen Dimension funktioniert sehr gut über die abstrakte, rein linienhafte Darstellungsform 21. Wie bei allen Gestaltungsmitteln, die den modellhaften Charakter hervorheben, wird auch hier der Aspekt des Vagen zum Ausdruck gebracht, indem auf Details der Struktur, Materialität und Farbigkeit verzichtet wird.



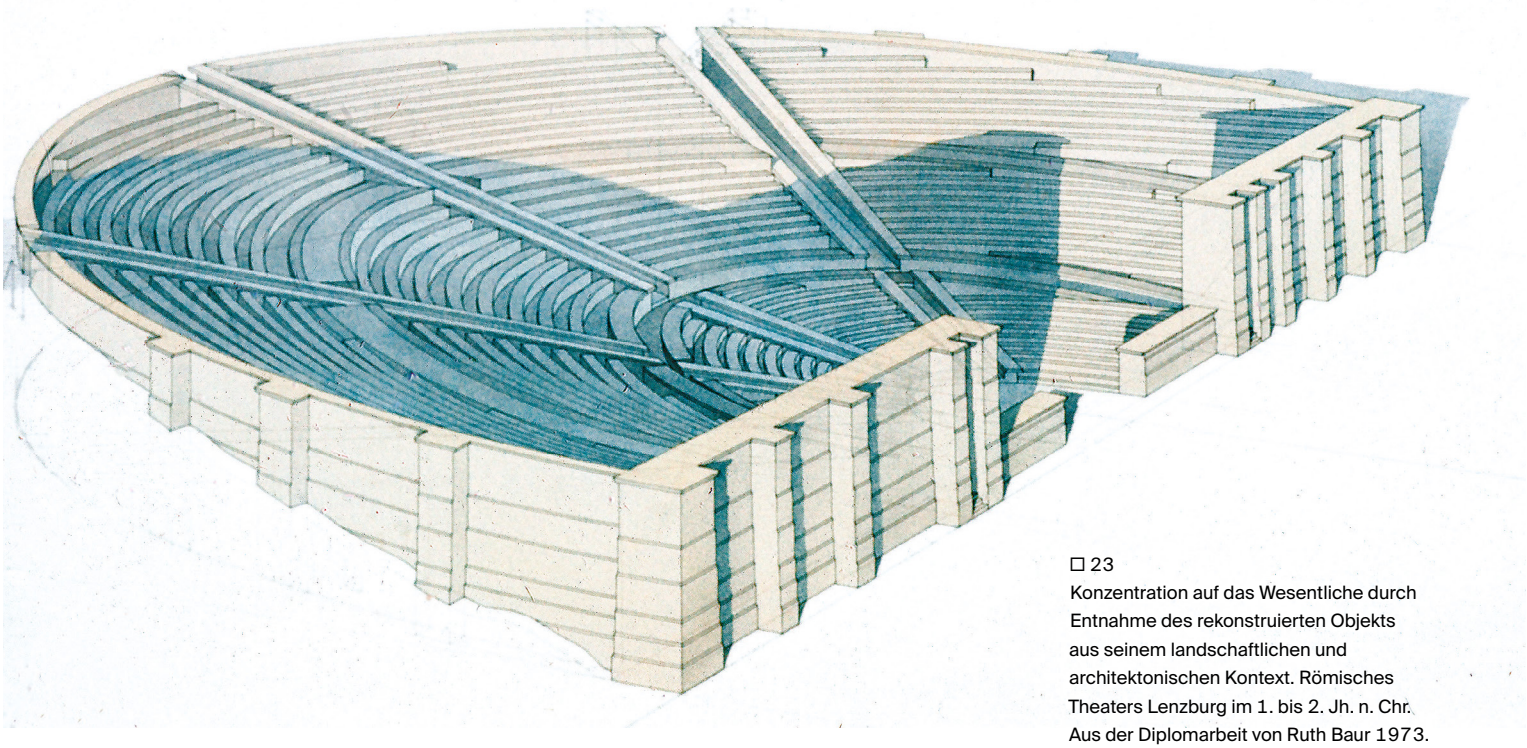
□ 21
Die linienhafte Umsetzung verzichtet auf die Darstellung von Details und kommuniziert so, dass diese nicht abschließend bekannt sind. Freie Arbeit, Darstellung der Burg Belfort um 1233 von Joe Rohrer 2008. (Joe Rohrer)

5. **Darstellung mit reduziertem Detaillierungsgrad** — Dieses Gestaltungsprinzip ist aus dem Prozess der Konstruktion ebenfalls bestens bekannt; über den Verzicht auf Details werden in Architektur und Städteplanung Entscheidungen vereinfacht. So können bei der Diskussion über Neubauten zum Beispiel Fassadenstrukturen von Fenstern oder Balkonen von der grossen Gebäudeproportion ablenken. Durch den Verzicht auf kleinteilige Strukturen werden die große Form, die zentralen Proportionen und Zusammenhänge prominenter und dadurch besser erkennbar. Gleichzeitig zeigt die Darstellung konsequent, dass Informationen zu den ausstehenden Strukturen nicht vorhanden sind [22].

☐ 22
Durch die Auslassung von Gebäudeöffnungen wird für den Betrachter klar, dass deren Rekonstruktion sich im hypothetischen Bereich bewegt. Die Bilder zeigen das Schloss Hartenstein im vermuteten Zustand um 1870. Aus dem Arbeitsprozess der BA-Arbeit Lino Dumont 2009. (Lino Dumont)



Dekontextualisierte Darstellung — Dekontextualisierung meint die Entnahme des Objekts aus seinem Kontext bzw. das Einfügen des Objekts in einen neutralen, meist farblosen Raum. Optisch entsteht dadurch eine klare Abgrenzung, ähnlich dem unter 3.2. aufgeführten Gestaltungsmittel **Farbigkeit**. Der für das Verständnis einer architektonischen Abbildung wichtige Bezug zur Umgebung geht dadurch jedoch leider verloren. Auch lässt sich die reale Größe und die Funktionalität des Objekts schwieriger einzuschätzen, weil die Referenzpunkte fehlen. Dekontextualisierung wird eingesetzt, wenn wenig Informationen zur Umgebung bekannt sind oder wenn die Darstellung explizit auf die Rekonstruktion eines bestimmten Gebäudes oder eines Gebäudeausschnitts fokussieren will [23].

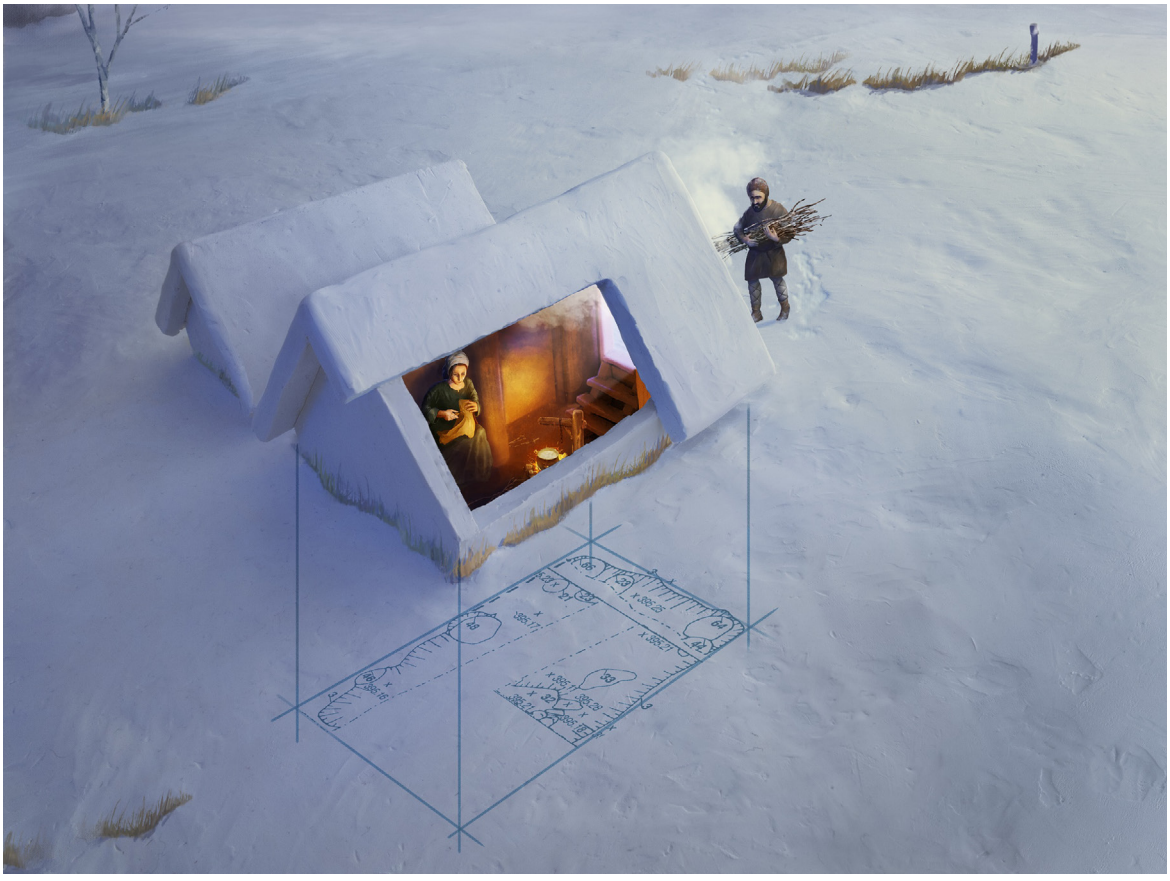


☐ 23
Konzentration auf das Wesentliche durch Entnahme des rekonstruierten Objekts aus seinem landschaftlichen und architektonischen Kontext. Römisches Theaters Lenzburg im 1. bis 2. Jh. n. Chr. Aus der Diplomarbeit von Ruth Baur 1973. (Ruth Baur)

6. **Integration von Bildquellen** – Mit ausgewählten Gestaltungsmitteln lassen sich Wissenslücken und Wahrscheinlichkeitsgrade diskret andeuten.
Wer hingegen die Möglichkeit nutzt, Befunddaten direkt ins Bild einzubeziehen, überlässt es dem Betrachter selbst zu erkennen, auf welchen real vorhandenen Daten oder Strukturen die Rekonstruktion der Architektur beruht. Dieses Vorgehen eignet sich, wenn die wissenschaftliche Basis der Rekonstruktion als Bildelement verdeutlicht und eine visuelle wie auch inhaltliche Verbindung zwischen Rekonstruktion und Befund geschaffen werden soll.

Um beides im gleichen Bild darzustellen, muss gegebenenfalls die Perspektive angepasst werden 24. Dies kann das räumliche Verständnis und das Abschätzen der realen Dimensionen erschweren. Außerdem besteht die Gefahr, dass das Publikum die Befunddaten nicht oder nicht richtig zu interpretieren weiß und die Gefahr besteht, dass die Bildelemente des Befunds zur Dekoration verkommen.

☐ 24
Die archäologische abstrakte Befundzeichnung wird als zusätzliche Informationsebene in die illusionistische Visualisierung eingebunden. Grubenhaus in Rheinau, datiert um 700–825. Unterrichtsprojekt von Maurus Zehnder 2016. (Maurus Zehnder)



7. **Fokus, Unschärfe, Perspektive** — Auch in Darstellungen, die eine einheitlich fotorealistische Bildformulierung zum Ziel haben, gibt es Möglichkeiten, um Hypothesen als solche erkennbar zu machen. Die Wahl der Perspektive ist ein mögliches Gestaltungsmittel dazu. Da diese vom wissenschaftlichen Experten festgelegt oder zumindest begleitet wird, erfolgt automatisch eine Fokussierung auf die wichtigen und damit besser erforschten Teile der Architektur. Naturgemäß werden dadurch weniger bekannte Inhalte weniger prominent ins Bild gesetzt.

Weitere Möglichkeiten sind der Einsatz von Tiefenschärfe, das Abdecken von Bildteilen durch andere Elemente oder die Nutzung atmosphärischer Effekte wie Nebel und Wolken 25. Wissenslücken lassen sich so kaschieren, Leerstellen können ausgeschmückt werden. Ein Nachteil dieser Methoden ist, dass für den Betrachter nicht erkennbar ist, was in den unsichtbaren oder unscharfen Bildteilen vermutet wird, beziehungsweise ob die jeweilige Methoden gewählt wurden, um inhaltliche Unschärfe und Nichtwissen zu verdecken, oder ob einzig ästhetische und bildkompositorische Entscheide zugrunde lagen.

☐ 25
In der historischen Müllhalde des Legionslager Vindonissa in Windisch (Aargau) sind wichtige Fundstücke erhalten geblieben. Die weniger bekannte Architektur im 1. Jh. n. Chr. ist undeutlich im Hintergrund erahnbar. Aus einem Unterrichtsprojekt von Joe Rohrer 2005. (Joe Rohrer)

K.4 Synthese

In der folgenden Tabelle sind die vorab erwähnten Vermittlungsstrategien und Gestaltungsmittel systematisch eingeordnet und deren wichtigste Eigenschaften aufgeführt. Die Gestaltungsmittel wurden zur besseren Übersichtlichkeit jeweils einer Vermittlungsstrategie zugeordnet, die meisten können jedoch unterschiedliche Strategien stützen. Die Tabelle ist als Vorschlag zu verstehen und soll als Diskussionsgrundlage für weitere Untersuchungen dienen. T1

☐ T1
Versuch einer Ordnung von Vermittlungsstrategien und Gestaltungsmitteln

Vermittlungsstrategien	Gestaltungsmittel	Eigenschaften
Variantenbildung	Bildserie	→ Weit verbreitetes Gestaltungsmittel. → Vermittelt klar Varianz. → Ermöglicht den Vergleich unterschiedlicher Hypothesen von Bild zu Bild.
-	Szenarienbild	→ Vermittelt klar Varianz. → Ermöglicht den Vergleich unterschiedlicher Hypothesen im selben Bild.
-	Vorher-nachher-Bild	→ Zeigt die Rekonstruktionsschritte. → Zeitsprung regt Vorstellung an.
Prozessdarstellung	Funddaten einbeziehen	→ Vermittlung von Befund und Rekonstruktion. → Zeigt den wissenschaftlichen Annäherungsprozess. → Macht Wege des Erkenntnisprozesses nachvollziehbar.
Differenzierung von Wahrscheinlichkeit	Farbigkeit	→ Gut lesbar. → Option von definierbaren Farbcodes.
-	Transparenz	→ Unterstützt die Wirkung von Wahrscheinlichkeit.
-	Kontraste, z. B. Scharf-Unscharf	→ Gut lesbar. → Unschärfe visualisiert Wahrscheinlichkeit.
-	Abstraktionsgrad	→ Gut lesbar. → Verstärkte Abstraktion lesbar als Hypothese.
-	Bildsprache	→ Bietet großes Spektrum für Differenzierungen.
Modellcharakter	Graustufenbild	→ Informationsreduktion kommt der Rekonstruktion entgegen.
-	Abstraktionsgrad & Reduktion Detail	→ Informationsreduktion kommt der Rekonstruktion entgegen.
-	Lineare Darstellung	→ dito
-	Dekontextualisiert	→ dito
Entwurfscharakter	Skizze	→ bietet grosses Spektrum für Differenzierungen → Reduktion der Information kommt der Rekonstruktion entgegen.

K.5 Ausblick — Animation und interaktive Medien

Seit rund einem Jahrzehnt werden Darstellungen rekonstruierter Architektur in Form statischer Illustrationen zunehmend durch Animationen und interaktive Applikationen auf Displays oder mobilen Geräten ergänzt bzw. ersetzt. Die dabei verwendete Hard– und Software, welche ursprünglich aus der Games-Branche stammt, wird stets günstiger und breiter verfügbar. Es ist abzusehen, dass immersive Technologien wie Augmented und Virtual Reality (AR / VR) in den kommenden Jahren großen Einfluss im Bereich der Vermittlung historischer Inhalte haben werden. Der Einsatz dieser neuen Medien bietet unzählige neue Möglichkeiten zur Vermittlung von Fakt und Hypothese. Die zuvor erläuterten Strategien und Gestaltungsmittel können kombiniert, in Bewegtbilder übersetzt interaktiv vermittelt und immersiv erlebt werden. Es liegt in der Natur der Sache, dass sich auch gänzlich neue Strategien und Konventionen entwickeln werden, wie neue Formen der Narration, die sich für interaktive und immersive Vermittlungskontexte anwenden lassen. Eine vollständige und tiefgründige Diskussion kann an dieser Stelle nicht geleistet werden, dennoch sollen ein paar zentrale Überlegungen vorgestellt werden.

Das Mittel der Animation ermöglicht es, jede beliebige Kombination von Gestaltungsmitteln in einem Visualisierungsprodukt zu verbinden. Ganze Gebäude oder Teile davon können durch zeitlichen Versatz abgegrenzt werden. Sorgfältig geplante Kamerafahrten können dem Betrachter dank des Parallaxeneffekts helfen, den dreidimensionalen Raum besser zu verstehen. Die Verbindung vom jetzigen zu einem vergangenen Zustand lässt sich durch Animationen einfach herstellen. In zeitlicher Verschiebung können die Funde und Quellen gezeigt werden, auf denen die Rekonstruktion basiert. Um derartige Zeitreisen zu ermöglichen, lassen sich diverse Gestaltungsmittel einsetzen, wie zum Beispiel Überblendung (vom Fund zur Rekonstruktion) und Aufbau (hypothetische Strukturen bauen sich über den sichtbaren Relikten von Architektur auf). In beiden Fällen erhält der Betrachter einen neuen Bezug zur Faktenlage der Vergangenheit. Dieses Mittel kann genutzt werden, um Aussagen zur Variantenbildung und Wahrscheinlichkeit zu machen [26].

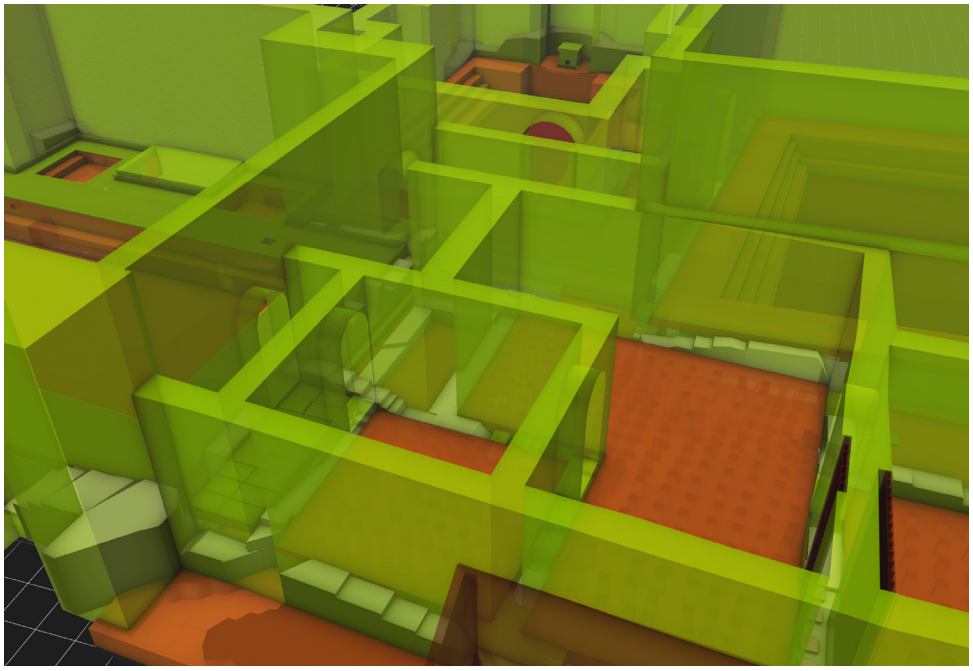
☐ 26
Nach der Vogelschau auf den rekonstruierten Zustand des Dorfes Tremona-Castello im 13. Jh. (Elia Marcacci) tritt der Zuschauer in die virtuelle Welt der Siedlung ein. Hypothetische Sachverhalte werden durch Transparenz differenziert angezeigt (Elia Marcacci). Aus der BA-Dplomarbeit von Elia Marcacci 2016.

Im statischen Bild kann Narration eine mehr oder weniger wichtige Bedeutung einnehmen — in der Animation ist ein narratives Konzept unabdingbar. Zur Unterstützung von Narration lassen sich Hilfsmittel wie Texteinblendung oder Begleitkommentar einsetzen, analog zu den Bildunterschriften oder zum Begleittext der statischen Darstellung.

Der Einsatz von Animation ermöglicht aber nicht nur zahlreiche zusätzliche Vermittlungsmöglichkeiten, er birgt auch Gefahren. Zum einen kann der übermäßige und unreflektierte Einsatz von unterschiedlichen Gestaltungsmitteln zu Unübersichtlichkeit führen und mithin der Vermittlungsabsicht entgegenwirken. Zum anderen kann bei Animationen die Abspielgeschwindigkeit (z. B. im Ausstellungskontext) nicht vom Betrachter gesteuert werden. Der Autor muss also eine Balance finden, die den Betrachter weder unter- noch überfordert. Angesichts des unterschiedlichen Wissensstandes eines heterogenen Publikums ist dies eine große Herausforderung. In bewegten und interaktiven Medien sollte daher die Benutzerführung sorgfältig geplant sein, damit möglichst alle Anwender ein auf ihr Vorwissen und Interesse abgestimmtes Erlebnis erhalten. Die Reduktion auf wenige Gestaltungsmittel ist in den meisten Fällen zu empfehlen, um visuelle und kognitive Überforderung zu vermeiden.

Gekonnt eingesetzt ist Interaktion sehr wertvoll: Der Benutzer kann die Geschwindigkeit des Lernerlebnisses selbstständig anpassen und zwischen Epochen, möglichen Varianten der Rekonstruktion oder der Darstellung von Fakt und Hypothese hin und her wechseln. Interaktivität kann die Aufnahme von Information individualisieren und vereinfachen. 04 Interaktive Visualisierungswerkzeuge können auch bereits in den Prozess der Rekonstruktion einbezogen werden und dabei nicht nur dem Gestalter, sondern auch dem Archäologen eine Hilfe sein [27].

■ **04**
Richard Lowe, Wolfgang Schnotz, Animation Principles in Multimedia Learning, in: Richard Meyer (Hg.), The Cambridge Handbook of Multimedia Learning, New York 2013, S. 513–546.



□ 27
Ein Rekonstruktionswerkzeug zur Hypothesendarstellung, welches bereits im Ausgrabungsprozess die Hypothesenbildung unterstützt. Diese interaktive Visualisierungsplattform entstand im Rahmen der MA-Arbeit von Esther Schönenberger 2013. (Esther Schönenberger)

AR und VR erlauben es, vergangene Architekturobjekte über Immersion erlebnisreicher denn je zuvor zu vermitteln. Ein offensichtlicher Vorteil ist hierbei, dass die Dimensionen der Gebäude unmittelbar erlebbar sind. Dadurch gelangt der Benutzer einfacher zu neuen Erkenntnissen und Bezügen — so lautet zumindest die gemeinläufige Hypothese. 05

■ **05**
Jan Plass, Ruth Schwartz, Multimedia Learning with Simluations and Microworlds, in: Richard Meyer (Hg.), The Cambridge Handbook of Multimedia Learning, New York 2013, S. 729–761.

Die am häufigsten eingesetzten Werkzeuge zur Erschaffung historischer Rekonstruktionen in AR und VR stammen aus der Games-Branche. Diese leisten einen Grad an Realismus, der noch bis vor Kurzem unerreichbar schien in der Geschichtsvermittlung. Allerdings muss Sorge dafür getragen werden, dass mit dem Ziel des maximalen Realismus die korrekte Wiedergabe der Datengrundlage nicht aus dem Blickfeld gerät. Hier ist der Gestalter gefordert, sich nicht ausschließlich an der Bildsprache von Games und Filmen zu orientieren, sondern auch die inhaltliche Richtigkeit und wichtige Vermittlungsabsichten — wie die Differenzierung von Fakt und Fiktion — im Auge zu behalten. 28

□ 28
In dieser VR-Applikation werden dem Benutzer die wissenschaftlich weniger gesicherten Aspekte der Architektur-Rekonstruktion durch eine Off-Stimme deutlich gemacht. Geschichte des Papenhofs in Barth über die letzten 500 Jahre, aus der BA-Diplomarbeit von Sandro Lochau 2016. (Sandro Lochau)

K.6 Diskussion

Fünf mögliche Strategien und acht Gestaltungsmittel zur differenzierten Darstellung von Fakt und Fiktion in der bildlichen Rekonstruktion von Architektur stehen zur Diskussion. Aufgrund der Komplexität des Phänomens Bild und der Unschärfe der einzelnen Konzepte kann hier keine stringente vergleichende Systematik vorschlagen werden. Auch beinhaltet diese Sammlung keine rezeptartige Anleitung, sondern ist als eine Art Werkzeugkasten zu verstehen, aus dem sich Gestalter und Wissenschaftler für Lehre und Praxis bedienen können und Zutaten sowie Inspiration für eigenständige Bildlösungen finden.

Alle Bildbeispiele stammen mit einer Ausnahme von aktuellen und ehemaligen Studierenden der Fachrichtung Knowledege Visualization. Sie wurden nicht explizit für diese Untersuchung erstellt. Das heißt, es ließen sich Visualisierungen mit mehr Aussagekraft erarbeiten, welche das Potenzial und auch die Schwachpunkte spezifischer Vermittlungsstrategien und Gestaltungsmittel belegen. Dieses Desiderat stellt eine interessante Aufgabe für kommende BA- und MA-Diplomarbeiten oder auch Forschungsprojekte dar. Ziel könnte ein umfassender illustrierter Katalog der wichtigsten Vermittlungsstrategien im Umgang mit Fakt und Fiktion und, damit verbunden, der Aufbau einer tauglichen Nomenklatur sein.

In der Regel setzen Auftraggeber und Autor im Dialog die Vermittlungsziele fest und definieren die Ansprüche an die Visualisierung. Wie die Wege dieser Entscheidungsfindung verlaufen, könnte einen weiterer Fokus möglicher zukünftiger Untersuchungen sein. Schließlich ist das Sichtbarmachen wissenschaftlicher Unschärfe nur eines von zahlreichen Vermittlungszielen. Genauso präsent sind neben der inhaltlich-wissenschaftlichen Richtigkeit auch Ansprüche an die Ästhetik, das Erlangen von Aufmerksamkeit beim Zielpublikum, hinzu kommt die Limitierung durch beschränkte Ressourcen wie Zeit und finanzielle Mittel. Der Diskurs zu diesen teilweise gegenläufigen Zielsetzungen ist Teil der Verhandlungen und führt in der Praxis oft dazu, dass bewusst auf eine differenzierte Darstellung von Fakt und Hypothese verzichtet wird.

Die Professionalisierung der Games-Industrie und die damit verbundene rasante Entwicklung im Bereich der Bilddarstellung hat in der breiten Öffentlichkeit zu gestiegenen Ansprüchen an realitätsnahe Darstellungsformen geführt. Das hat Auswirkungen auf die Erwartungen von Publikum und Auftraggebern im Bereich Cultural Heritage. Der Anspruch an die Bildformulierung in Richtung Fotorealismus kann dort allenfalls für Standbilder eingelöst werden, für Animation und Interaktion ist es aufgrund der beschränkten Budgets aber nicht möglich, mit der Unterhaltungsbranche mitzuhalten 06.

■ 06
Marc Grellert, Franziska Haas, Sharpness Versus Uncertainty in Complete Models, in: Stephan Hoppe und Stefan Breitling (Hg.), Virtual Palaces, Part II, Lost Palaces and their Afterlife, München 2016, S. 119–148.

Die Erwartungshaltung gegenüber einer realitätsnahen Bildsprache sehen wir als interessanten Gegenstand weiterer Untersuchungen. Gemeinläufig wird davon ausgegangen, dass Laien detailreichen Darstellungen oder ausgearbeiteten Details innerhalb einer Darstellung höhere Glaubwürdigkeit bezüglich der wissenschaftlichen Fakten zusprechen. Andererseits suggerieren schematische oder technische Darstellungen einen gewissen Wahrheitsgehalt, indem sie sich an formale Konventionen der Formulierung halten und Untersuchungen deuten darauf hin, dass Rezipienten mit einem Hintergrund in Cultural Heritage die Visualisierungen, die in einer realistischen Darstellungsweise gehalten sind für weniger wissenschaftlich und glaubwürdig halten. 07

Es wäre demnach interessant, diesen Fragen der Bildformulierung, Rezeption und Glaubwürdigkeit weiter nachzugehen. Wünschenswert sind empirische Studien, die einen direkten Vergleich der Rezeption des Wahrheitsgehaltes der oben erläuterten Strategien und Gestaltungsmittel zulassen. Für die praktische Anwendung wertvoll wäre auch der Vergleich der Rezeption von Experten- und Laienpublikum.

Eine fundierte Systematik mit spezifisch entwickelten Visualisierungen als Basiskatalog bietet eine geeignete Grundlage zur Befragung von Rezipientengruppen und verhilft zur weiteren Klärung von Bildformulierung und deren Lesbarkeit und Wirkung. Bis zum Zeitpunkt weiterer Untersuchungen soll die vorliegende Zusammenführung Gestaltern von digitaler Architekturrekonstruktion helfen, für die jeweilige Anwendung sinnvolle Mittel zur Darstellung inhaltlicher Unschärfe zu vergleichen, auszuwählen und diese bewusst einzusetzen.

■ 07
Tom Frankland, A CG Artist's Impression: Depicting Virtual Reconstructions Using Non-Photorealistic Rendering, in: Angeliki Chrysanthi, Patricia Murrieta Flores, Thinking Beyond the tool – Archaeological Computing and the Interpretative Process, Oxford 2010, S. 24–39.

Kapitel 3
→ Methodik

Sander Münster, Mieke Pfarr-Harfst

In den historischen Wissenschaften finden digitale Rekonstruktionen seit inzwischen mehr als 30 Jahren als Wissensträger, Forschungswerkzeuge und Darstellungsmittel Verwendung. Dabei hat nicht nur die Zahl der erstellten digitalen Rekonstruktionen in den vergangenen Jahren kontinuierlich zugenommen, ebenso weisen diese höchst unterschiedliche technische, grafische und inhaltliche Qualitäten auf. Der Einsatz von Methoden digitaler Rekonstruktion in der architekturgeschichtlichen Forschung wird daher seit jeher ambivalent gesehen. Eindrucksvollen Anwendungsbeispielen und Forschungspotenzialen steht eine ganze Reihe durchaus berechtigter wissenschaftlich-methodischer Vorbehalte und Desiderata gegenüber. Vor diesem Hintergrund soll der folgende Teil eine Übersicht methodologischer Grundprinzipien beleuchten und damit verbundene methodische Probleme sowie Lösungsansätze vorstellen.

Was sind Objekte der 3D-Rekonstruktion?

Wie bereits im Aufsatz zu **Begriffen** von Münster ausgeführt, steht im Mittelpunkt digitaler Rekonstruktion die Erschaffung eines räumlichen, temporalen und semantischen virtuellen Modells. Gegenstände digitaler 3D-Rekonstruktionen sind meist Objekte der Architektur und Kunst, zunehmend gewinnt jedoch auch die digitale Rekonstruktion immaterieller Objekte wie Bräuche, Riten oder Tänze an Bedeutung. Hinsichtlich des Arbeitsvorgehens ist zwischen der Rekonstruktion nicht mehr existenter oder nie realisierter Objekte wie beispielsweise von Planungsständen und der Dokumentation noch existenter Objekte zu unterscheiden. Allen Zugängen gemeinsam ist die Notwendigkeit zur **objektbezogenen Interpretation**, welche damit im Gegensatz zur Digitalisierung anhand von akquirierten Daten und semiautomatisch prozessierten Daten wie beispielsweise Laserscans und photogrammetrischen Ansätzen steht.

Werkzeug und Einsatzkontexte

Digitale Rekonstruktionen sind wie kaum ein anderer Bereich der **Digital Humanities** ein Querschnittsgebiet zwischen Forschung und praktischer Anwendung. Entsprechend existieren auch außerhalb von Forschung und Wissenschaft vielfältige Anwendungen — beispielsweise im Kontext von Lehre, musealer Präsentation, virtueller Touristik, Kulturmanagement oder Unterhaltungsmedien. In der Projektpraxis werden jedoch vor allem — und zumeist gemeinsam — Forschung und Vermittlung adressiert. Daneben stellt die Dokumentation von Bauwerken und Bauzuständen, welche häufig mit der Nutzung von Methoden jenseits der interpretativen Rekonstruktion wie beispielsweise einer digitalen Erfassung einhergeht, ein weiteres Anwendungsgebiet dar.

In **Wissenschaft und Forschung** unterstützen 3D-Rekonstruktionen sowohl die Untersuchung von Quellen als auch von historischen Objekten. So werden im Zuge einer digitalen Rekonstruktion Provenienz, Konsistenz und Korrespondenz von Quellen geprüft und beispielsweise Diskrepanzen zwischen Grund- und Aufrissen oder Veduten aufgedeckt. Im Hinblick auf die Erforschung historischer Objekte dienen 3D-Rekonstruktionstechnologien vor allem zur Veranschaulichung der Gestalt eines Objektes oder dessen Wirkung. 01 Doch es gibt noch viele weitere Einsatzgebiete für 3D-Rekonstruktionen im akademischen Bereich: Sie unterstützen die Erforschung von Geneseprozessen wie beispielsweise von historischen Entwurfsprozessen, Realisierbarkeiten oder Bauabfolgen. Sie ermöglichen die De- bzw. Rekonstruktion verschiedener Funktionen und Typologien von Bauwerksgliedern. Digitale Rekonstruktionen dienen als Grundlage verschiedener numerischer Simulationen wie beispielsweise von Wegeanalysen oder statischen Berechnungen. Ein interessantes Anwendungsfeld jenseits des konkreten Objektes stellt zudem der Entwurf hypothetischer Gebäude anhand von Architektursystemen dar, mit welchem sich, wie von Ling 02 beispielsweise für das traditionelle chinesische Architektursystem erprobt, Grenzen und Problemstellen von Architektursystemen ausloten lassen.

Eine wichtige Frage ist die nach **Modell oder Bild**. So steht im Erstellungsprozess die Modellgenese im Vordergrund, der sich daran anschließende Diskurs findet aktuell hingegen beinahe ausschließlich anhand von Bildern statt, welche ein Modell nur partiell und subjektiv abbilden können. Vor diesem Hintergrund ist zu erörtern, inwieweit Sehen und Wissen eine Rolle im Umgang mit 3D-Modellen spielen und ob 3D-Modellierung eine andere Diskursform — nämlich die eines unverfälschten Zugriffs auf das 3D-Modell — erfordert.

In diesem Zusammenhang ist auch zu diskutieren, ob und unter welchen Voraussetzungen **digitale Rekonstruktionen als wissenschaftliche Objekte** gelten können, enthalten sie doch stets Beiträge unterschiedlicher Autoren und eine Vielzahl intuitiver, auf Erfahrungswissen basierender Entscheidungen. Bisher fehlen sowohl eine akademische Kultur als auch konkrete Mechanismen, um digitale Modelle und generierte Bilder wissenschaftlich anknüpfbar und diskursfähig zu machen. Dazu gehören Zugang und Bewertbarkeit von Modellen und Bildern und die Transparentmachung von Autorschaft und Bezügen zwischen Rekonstruktion und Wissensgrundlagen

■ **01**
Hubertus Günther, Kritische Computer-Visualisierung in der kunsthistorischen Lehre, in: Marcus Frings (Hg.), Der Modelle Tugend. CAD und die neuen Räume der Kunstgeschichte, Weimar 2001, S. 111–122.

■ **02**
Zhu Ling, Shi Ruoming, Zhou Keqin, Rule-based 3d modeling for chinese traditional architecture, in: Fabio Remondino, Sabry El-Hakim (Hg.), 3D-ARCH 2007, Zürich 2007.

wie beispielsweise Quellen – Aspekte, welche beispielsweise im Beitrag von **Wacker & Bruschke** (→ **282**) beleuchtet und mit Werkzeugen unterlegt werden. Ferner umfasst dies die Zitierfähigkeit von Teilen oder Arealen in Modellen und Bildern und eine Modifizierbarkeit derartiger Medien durch andere. Hier knüpft auch direkt die Frage nach einer geeigneten Publikation und Verfügbarkeit sowohl des 3D-Modells selbst als auch der dahinterliegenden Daten, Informationen und des darin enthaltenen Wissens an.

Gerade vor diesem Hintergrund stellt es ein Problem dar, dass eine Fülle von **Standards** sowie **Leit- und Richtlinien zum Umgang mit kulturhistorischen Inhalten** existieren, diese jedoch nur eingeschränkte Praxisrelevanz besitzen. Einen spezifischen Rahmen für Rekonstruktionen setzen beispielsweise die Chartas von **London** 03 und **Sevilla** 04. Zwar hat sich das Konzept der Metadaten als Ansatz zur Klassifikation und Dokumentation von kulturgeschichtlichen Informationen inzwischen weitgehend etabliert, die existierenden Metadaten- und Dokumentationsstandards als auch deren Umsetzung sind jedoch nach wie vor höchst heterogen. Ebenso stellt sich die Frage, inwieweit Softwarealgorithmen und damit eine technische Prozessierung offengelegt sein müssen.

3D-Rekonstruktionen besitzen durch ihre Eigenschaften Digitalität, Bildsprache und Dreidimensionalität für die Kunst- und Baugeschichte in den drei Anwendungsfeldern Forschen, Vermitteln und Bewahren große Potenziale und – aufgrund der steten technischen Weiterentwicklung – eine Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten und technischen Applikationen. Im Erkenntnisprozess werden sie durch ihre Potenzial, Wissen im dreidimensionalen Raum zu fusionieren und zu generieren, zum digitalen Wissensträger und somit zum innovativen Arbeitswerkzeug. Darüber hinaus ist es durch diese 3D-Modelle möglich, Raum, Zeit, Inhalt und Objekte zusammenzuführen und den gegenseitigen Bezug zu überprüfen. Es können virtuelle Raumhypothesen erstellt, Fügungsprinzipien sowie Bau- und Ausgestaltungsphasen überprüft werden. Auch die Kontextualisierung von Objekten oder auch bildlichen Darstellungen wie Deckenmalerei zählt zu den Anwendungsmöglichkeiten im Erkenntnisprozess. Durch das Hinzuziehen des Faktors Zeit ist möglich, mittels Simulationen Bewegungsabläufe oder rituelle Handlungen im Raum sichtbar zu machen. Die Vielzahl an technischen Ausgabeformen und Darstellungsarten erlaubt es, passende Anwendungsfälle zu generieren und auf die individuelle Forschungsfrage abzustellen. 3D-Modelle können demnach mit Informationen angereichert, dynamisch weiterentwickelt und auf die unterschiedlichste Art ausgegeben werden.

■ 03
Richard Beacham, Hugh Denard, Franco Niccolucci, An Introduction to the London Charter, in: Marinos Ioannides, David Arnold, Franco Niccolucci, Katerina Mania (Hg.), Papers from the Joint Event CIPA / VAST / EG / EuroMed Event, 2006, S. 263–269.

■ 04
Sociedad Española De Arqueología Virtual, The Seville Charter, http://www.arqueologiavirtual.com/carta/, und Victor Manuel Lopez-Menchero Bendicho, The principles of the Seville Charter XXIII CIPA Symposium-Proceedings.

Verfahren und Vorgehen zur Modellerstellung

Die **Erstellungsprozesse** solcher digitaler Rekonstruktionen sind hochkomplex und unterliegen neben den technischen Eigenheiten der jeweils angewandten Software ständigen Entscheidungsprozessen. So ist es nicht möglich, von Erstellungsprozess zu sprechen und diesen als allgemeingültig zu definieren. Trotzdem können bei näherer Betrachtung und Gegenüberstellung einzelner Geneseprozesse Gemeinsamkeiten herausgefiltert werden. 05 Eine dieser Gemeinsamkeiten liegt in der Definition von **vier Projektphasen — Vorbereitung, Recherche, Datenverarbeitung und Finishing**, die immer durchlaufen werden. Die höchste Komplexität erreicht der Prozess in der Phase der Datenverarbeitung, in der heterogene Ausgangsdaten weiterverarbeitet und zu einem 3D-Modell fusioniert werden. Doch auch hier ist es durchaus möglich, gemeinsame Schritte und Parameter festzustellen und zu definieren. Die **Datenverarbeitung** besteht im Wesentlichen aus der Grundlagenrecherche, dem Modellierungsprozess selbst, der Verifizierung sowie dem Texturieren. Diese vier Schritte unterliegen einem zirkulierenden Verfahren und sind vom Input-Output-Prinzip geprägt — also durch ständige Entscheidungen und das Alternieren zwischen Modellieren und Verifizieren kennzeichnet. Ergebnis dieser Genese ist ein 3D-Datensatz, der in der Finishing-Phase für die Endanwendung weiterverarbeitet werden kann. Der Projekthintergrund in Form von Intention, Zielsetzung, Projektkontext, beteiligten Partnern, finanziellen Mitteln und der verfügbaren Zeit bildet den Rahmen für das Gesamtprojekt. Diese oben erwähnten Grundpfeiler des Erstellungsprozesses sind unabhängig von den angewandten Methoden oder der Software. Der Querschnitt der im Nachfolgenden dargestellten Methoden und Vorgehensweisen bei der Modellerstellung von **3D-Modelling** über **Building Information Management** (BIM) hin zur **parametrischen Modellierung** unterstreicht dies. So müssen bei allen erwähnten Methoden die oben genannten Phasen durchlaufen werden und der Prozess wird von unterschiedlichen Faktoren, die sich im Projekthintergrund manifestieren, beeinflusst.

■ 05
Mieke Pfarr-Harfst, Typical Workflows, Documentation Approaches and Principles of 3D Digital Reconstruction of Cultural Heritage, in: Sander Münster, Mieke Pfarr-Harfst, Piotr Kuroczyński, Marinos Ioannides (Hg.), How to manage data and knowledge related to interpretative digital 3D reconstructions of Cultural Heritage?, Cham 2016.

Visualisierungstypologien

Es erscheint als sinnvoll, zunächst die einzelnen **Visualisierungstypologien** und deren Anwendung in diesem Bereich vorzustellen, um eine verbindliche Basis für die folgenden Kapitel zu erhalten. Zu unterscheiden sind dabei **CAD- und CAAD-Anwendungen** einerseits und eine auf reiner **3D-Modellierung** basierende Methode andererseits. Die klassischen Computer-Aided Design (CAD)-Anwendungen sind linien- oder flächenorientiert und werden als digitale 3-Tafelprojektion oder elektronisches Reißbrett bezeichnet. Diese Anwendungen waren die ersten Visualisierungsmethoden für das Bauwesen und die Architektur. Sowohl 2D- als auch 3D-Anwendungen sind unter der Typologie des **Computer-Aided Architectural Design** (CAAD) zusammenzufassen. Diese Anwendungen sind objektorientiert, was bedeutet, dass der Computer auf eine Datenbank mit Architekturelementen und Objekten zurückgreift und somit, insbesondere für die Darstellung von komplexen Gebäudestrukturen, mehr Potenzial besitzt. So erstellt der Computer sowohl 2D-Zeichnungen als auch 3D-Modelle in einem Schritt und der Ersteller kann seinen Gebäudeentwurf direkt in der Dreidimensionalität überprüfen. Sowohl CAD- als auch CAAD-Anwendungen sind am Bedarf des Bauwesens orientiert und auf die dortigen Belange und Prozesse ausgelegt. 06 Daneben steht die Methode der **3D-Modellierung** mittels Non-Uniform Rational B-Splines (NURBS), Polygonen oder Volumina, hier wird die bauliche Form aus Flächen und Grundkörpern modelliert. Dieses Verfahren ist das bis heute am häufigsten angewendete im Bereich der Visualisierung nicht mehr vorhandener oder nicht mehr sichtbarer baulicher Strukturen im Kulturerbe. Die detaillierte Vorgehensweise ist dabei sowohl vom Ersteller als auch von der verwendeten Software und den zur Verfügung stehenden Werkzeugen abhängig. Grundsätzlich dienen als Datenbasis Grundrisse, Schnitte und Fotografien, mittlerweile aber auch 3D-Modelle aus Scanverfahren. Diese Quellen werden meist sowohl vor als auch während der eigentlichen Modellierungsphasen gesammelt und ausgewertet. Im Gesamtprozess alternieren diese Phasen des Modellierens, in denen die Quellen und die Datenbasis in die Dreidimensionalität transferiert werden, und Verifizierungsphasen, die eine wissenschaftliche Überprüfung des vorhandenen 3D-Modelles durch Experten impliziert. Am Ende des Prozesses entsteht ein 3D-Datensatz, der für die unterschiedlichen Applikationen ausgegeben werden kann.

Das parametrische Modellieren ist neben der oben beschriebenen Methode ein weiterer Ansatz, digitale Rekonstruktionen zu erstellen, der an dieser Stelle ebenfalls erwähnt werden soll. Während mit den bisher genannten Werkzeugen vor allem eine Objektgestalt und Oberfläche in verschiedener Güte nachgebildet wird, dienen Ansätze des BIM und **Geoinformationssysteme** (GIS) der Systematisierung und Prozessierung von Objektvolumina und Objektbeziehungen. Der Ansatz des BIM wird im Beitrag von Martens et al. näher erläutert. Nicht zuletzt bedingen numerische Simulationswerkzeuge wie Computational Fluid Dynamics (CFD), Finite-Elemente-Methode (FEM) oder Beleuchtungsanalysen wiederum spezialisierte Vorgehensweisen bei Modellaufbau und Analysen.

■ 06
Marco Hemmerling, Anke Tiggemann, Digitales Entwerfen. Computer Aided Design in Architektur und Innenarchitektur, Paderborn 2010, S. 14–18

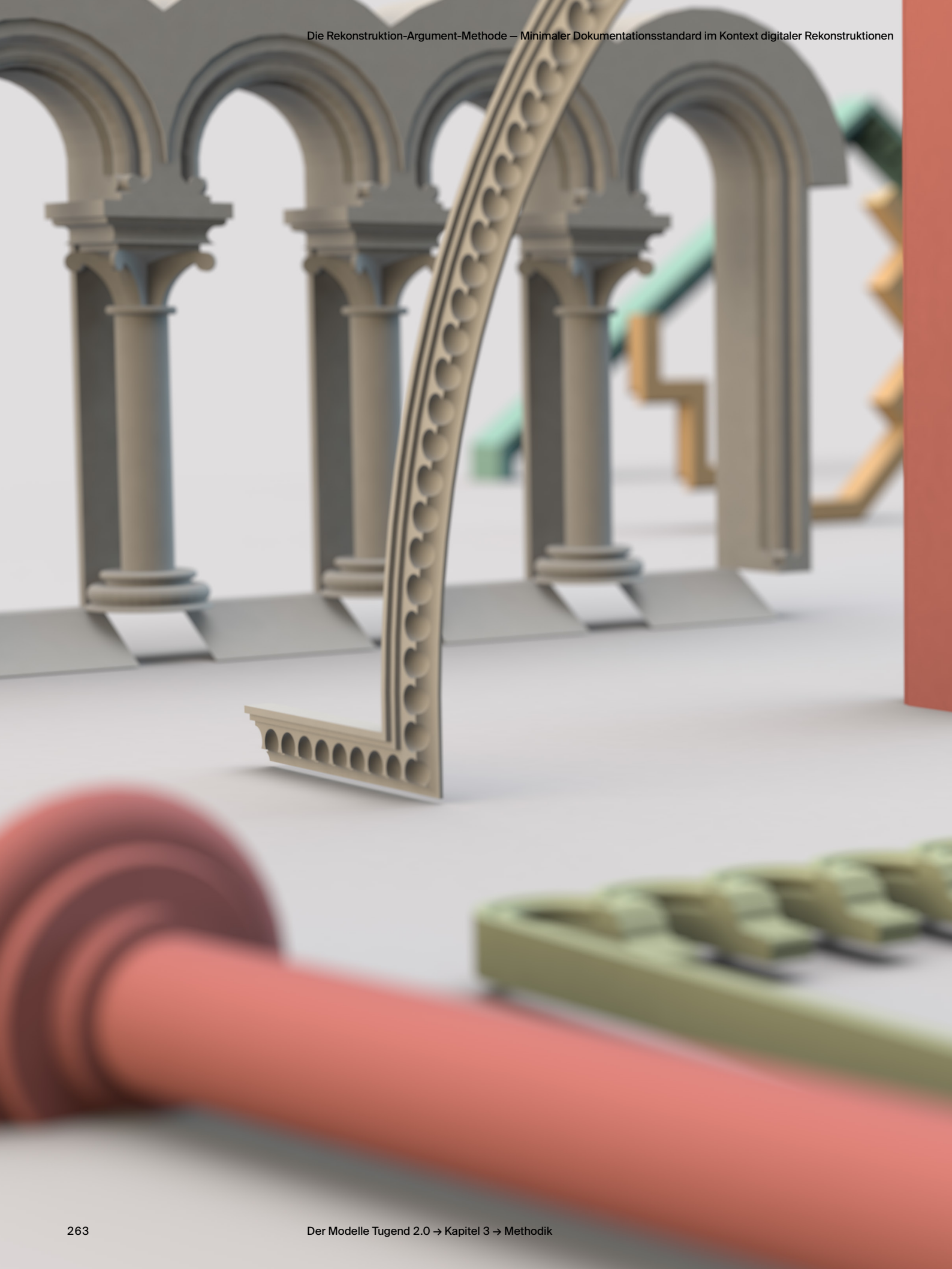
Dokumentation

Während des Entstehungsprozesses digitaler 3D-Rekonstruktionen entwickeln sich diese zu digitalen Wissensträgern, in denen unterschiedliche Ausgangsdaten und Wissensquellen miteinander fusionieren. Wissen, Daten und Informationen sind heterogen und variieren in ihrer Tiefe, sie bestehen aus Fakten, Interpretationen und personengebundenem Wissen. Durch die Vielzahl und der Heterogenität der Quellen, aber auch durch die während der Genese fortlaufend geführten interdisziplinären Diskussionen und Entscheidungen, werden die digitale 3D-Rekonstruktionen mit einer große Menge an Wissen aufgeladen und dadurch selbst zu einer wissenschaftlichen Quelle. Die Abbildung sowohl der Quellen und des Prozesses als auch des Projekthintergrundes sind von daher eine längst überfällige Pflicht im Sinne guter **wissenschaftlicher Praxis** 07 und der Erhaltung des **digitalen Kulturerbes** 08. Mit der Forderung nach einer adäquaten Dokumentationsstrategie sind gleichzeitig Themen wie Langzeitarchivierung und Langzeitverfügbarkeit, Publikationsstrategie, Nachhaltigkeit, webfähige Anbindung der 3D-Modelle, Qualitätssicherung sowie Usability verknüpft. Hier spielt zudem die Frage nach dem Anwendungskontext eine nicht unwesentliche Rolle. Das Thema der Dokumentation rückt daher gerade in den letzten fünf Jahren vermehrt in den Fokus. Unterschiedliche Lösungsansätze lassen sich erkennen:

Eine dieser Strategien stellen **Wacker & Bruschke** (**→ 282**) in ihrem **DokuVis-System** vor, einer Dokumentationsmethode, die von Beginn an in den Rekonstruktionsprozess integriert werden soll. Der Anspruch liegt hierbei in einer semi-automatisierten, intuitiven Lösung, die dem User neben einer umfassenden Dokumentation auch das Projektmanagement und die projektinterne Kommunikation erleichtern soll. Ein weiterer Ansatz von **Kuroczyński et al** (**→ 546**) ist die — im Kapitel **Projekt-Portfolio** (**→ 432**) — ausgeführte Erstellung **virtueller Forschungsumgebungen**, verbunden mit der semantischen Erschießung und der Anbindung der hinter einer 3D-Rekonstruktionen liegenden Quellen und Daten. Der Beitrag von **Grellert & Pfarr-Harfst** (**→ 264**) stellt dagegen eine eher **niedrigschwellige Lösung** vor, deren Kern die Gegenüberstellung von Quelle und Rekonstruktion und der jeweiligen Argumentation darstellt. Der Prototyp arbeitet hierbei entgegen den ersten beiden Ansätze lediglich mit einem Abbild des 3D-Datensatzes. Trotz aller Unterschiede in der finalen technischen Ausführung der Dokumentation ist feststellbar, dass die Sicherung und Abbildung von Quellen und Prozess als Kern einer digitalen Rekonstruktion allen Ansätzen gemein ist. Lediglich der Transfer in ein anwendbares und möglichst auch editierbares Verfahren und System variiert.

07
Deutsche Forschungsgemeinschaft, Grundlagen guter wissenschaftlicher Praxis, Weinheim 2013.

08
Unesco, Charta zur Bewahrung des Digitalen Kulturerbes, verabschiedet von der 32. UNESCO-Generalkonferenz am 17. Oktober 2003 in Paris, 2003.



Marc Grellert, Mieke Pfarr-Harfst

L. Die Rekonstruktion-Argument-Methode — Minimaler Dokumentationsstandard im Kontext digitaler Rekonstruktionen

→ Digitale Rekonstruktion, Standards, Online-Tool, Dokumentation, Gute Wissenschaftliche Praxis

Digitale Rekonstruktionen entstehen an der Schnittstelle zwischen Architektur, Archäologie sowie Kunst- und Baugeschichte und sind heute fester Bestandteil von Forschung und Vermittlung im Kontext der Digital Humanities. Basiert die Erstellung dieser digitalen Rekonstruktionen auf wissenschaftlichen Erkenntnissen ist eine Dokumentation im Sinne einer guten wissenschaftlichen Praxis unabdingbar. Hierbei stellt die Dokumentation der Entscheidungen, die im Laufe des Entstehungsprozesses getroffen werden und sich letztendlich im sichtbaren Ergebnis des 3D Modells manifestieren, eine große Herausforderung dar. In der aktuellen Forschungslandschaft existieren unterschiedliche Ansätze zur Dokumentation digitaler Rekonstruktionen, die von der wissenschaftstheoretischen Auseinandersetzung bis hin zu komplexen technischen Lösungen reichen.
Die meisten dieser Lösungsansätze entsprechen umfangreichen Maximallösungen mit komplexen Datenbankapplikationen und Annotationsmöglichkeiten an die 3D-Modelle. Solche Lösungen stellen aber gerade in der Praxis eine große Herausforderung bezüglich der Usability und den zur Verfügung stehend Ressourcen dar.

Ausgehend von einer Analyse des Status Quo, wurde ein, hinsichtlich der finanziellen und personellen Ressourcen praktikabler und einfach zugänglicher Minimalstandard entwickelt. Die vorgestellte Rekonstruktions-Argumentations-Methode zielt darauf ab, Bilder der Rekonstruktion den Quellen gegenüberzustellen und mit einem textlichen Argument zu verknüpfen. Kern ist ein Dreiklang aus Rekonstruktion–Argument–Quelle, der durch die Abbildung von Varianten mit den Attributen »gesichert«, »wahrscheinlich«, »möglich« und »hypothetisch« ergänzt werden kann.

Der folgende Beitrag setzt diesen Minimalstandard mit den Empfehlungen der DFG für gute wissenschaftliche Praxis in Beziehung.

L.1 Einleitung und Problemstellung

Digitale Rekonstruktion [01] kommen seit fast 30 Jahren an der Schnittstelle zwischen Architektur, Archäologie sowie Kunst- und Baugeschichte zum Einsatz. Die digitale Rekonstruktion von Cluny III aus dem Jahre 1989 gilt in diesem Zusammenhang sowohl aus technologischer als auch methodischer Sicht als Meilenstein. Zum ersten Mal wurde ein großes Bauwerk virtuell rekonstruiert. Aufgrund der historischen Bedeutung Clunys und dessen Größe haben die Medien ausführlich darüber berichtet und so rückten die neuen technischen Möglichkeiten auch erstmals in das Bewusstsein einer größeren Öffentlichkeit. Für den SWR entstand damals ein

»drei Minuten Film, in dem man um und in der Klosterkirche von Cluny im 12. Jahrhundert umhergehen konnte. Das sorgte damals für großes Aufsehen, es war ja das erste Mal, dass so etwas gemacht wurde. Und es gab die üblichen Diskussionen, ein Buch dazu und einen Kongreß in Cluny. Inzwischen ist es Standard und wird überall genutzt. Aber Cluny war 1989.« [02]

In den Anfangszeiten der digitalen Rekonstruktion stellte das technische System, bestehend aus Hard- und Software, noch einen kostenintensiven und damit limitierenden Faktor für eine große Verbreitung dar. Dies hat sich gerade in der letzten Dekade entscheidend geändert. Unterschiedliche, nutzerfreundliche und kostengünstige technische Lösungen für 3D-Anwendungen sind heute Standard und damit steigt auch die Anzahl an weltweit vorhandenen digitalen Rekonstruktionsmodellen stetig an. Ihr Anwendungskontext ist breit: Sie dienen gleichermaßen als vermittelndes, illustratives Medium für eine breite Öffentlichkeit (z. B. in Ausstellungen) sowie als Werkzeug für die Forschung. Versteht man digitale Rekonstruktionen als Ergebnis wissenschaftlichen Arbeitens, dann ist festzustellen, dass Grundpfeiler der **guten wissenschaftlichen Praxis** [03] oft nicht eingehalten werden (können). Allen voran stellt die Dokumentation der **Entscheidungen**, die während des Erstellungsprozesses getroffen werden und die sich letztendlich im sichtbaren Ergebnis des 3D-Modells manifestieren, eine große Herausforderung dar. Für dieses grundlegende Problem werden im Folgenden neue Lösungsansätze vorgestellt. Zu diesen gehören insbesondere die Etablierung eines niederschwelligen Dokumentationsstandards, eines **Minimalstandards**, für digitale Rekonstruktionen und ein dafür entwickeltes Onlinetool. Dieser Standard wurde zuerst in einem englischsprachigen Artikel im Kontext der Euromed-Konferenz November 2016 veröffentlicht. Für die Diskussion im deutschsprachigen Raum erscheint es sinnvoll, diesen Artikel in aktualisierter aber auch erweiterter Form nun auch in deutscher Sprache zu veröffentlichen. Gerade der Schritt von einem Offline-Prototyp zu einem Onlinetool ist eine entscheidende Veränderung und bietet nun erst die angedachte Möglichkeit von Kommunikation und Publikation. [04]

■ 01
Mieke Pfarr, Dokumentationssystem für digitale Rekonstruktionen am Beispiel der Grabanlage Zhaoling, Provinz Shaanxi, China, Darmstadt 2010, http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/2302/.

■ 02
Siehe das Interview mit Ulrich Best in Marc Grellert, Immaterielle Zeugnisse – Synagogen in Deutschland, Potentiale digitaler Technologien für das Erinnern zerstörter Architektur, Bielefeld 2007, S. 495–496.

■ 03
Deutsche Forschungsgemeinschaft (Hg.), Grundlagen guter wissenschaftlicher Praxis, 2013, http://www.dfg.de/download/pdf/dfg_im_profil/reden_stellungnahmen/download/empfehlung_wiss_praxis_1310.pdf.

■ 04
Siehe auch: Mieke Pfarr-Harfst, Marc Grellert: The Reconstruction – Argumentation Method. Proposal for a minimum standard of documentation in the context of virtual reconstructions, in: 6th International Conference, EuroMed 2016, Nicosia, Cyprus, October 31 – November 5, 2016, Proceedings, Part I. M. Ioannides, E. Fink, A. Moropoulou et al. Cham 2016.

Der prinzipiellen Frage nach der **Wissenschaftlichkeit** und deren **nachhaltigem Nachweis** seien einige prinzipielle Bemerkungen zu digitalen Rekonstruktionen und zu dem in den verwendeten 3D-Modellen gespeicherten Wissen vorangestellt: Die dreidimensionale digitale Rekonstruktion mittels manuell konstruierten Computermodellen ist das geeignetste Mittel, um historische Zustände experimentell zu erforschen, wenn man vom Nachbau 1:1 einmal absieht. Das 3D-Modell zwingt zur geometrischen und architektonischen Durchdringung. Bereiche, die in 2D vermeintlich noch funktionieren könnten oder nicht geklärt werden müssen, springen im 3D-Modell unmittelbar ins Auge. Man stellt mehr Fragen, betreibt mehr Recherchen und erhält dadurch auch mehr Antworten. Digitale Rekonstruktionen können so als Wissensspeicher oder auch Wissensmodelle verstanden werden, da sie Wissen — die **Gesamtheit der Kenntnisse** über ein Bauwerk — aus heterogenen Quellen fusionieren. 05 Als Quellen sind zunächst Befunde und die Dokumentation von Befunden zu nennen, dann datierbare Dokumentationen von Bauzuständen in fotografischer und zeichnerischer Form und nicht datierbare Abbildungen. Des Weiteren zählen dazu schriftliche Beschreibungen und Zeitzeugenberichte. Schließlich sind auch Analogien zu anderen Gebäuden bedeutend, deren Zuordnung aber nur über Interpretationen und besondere Kenntnisse erfolgen kann, meist durch wissenschaftliche beratende Personen anderer Disziplinen, beispielsweise aus der Archäologie, der Kunstgeschichte oder der Bauforschung. Gerade dieses personengebundene Wissen ist für den Erstellungsprozess solcher digitaler Rekonstruktionen oft unabdingbar. Die Transferierung des Wissens in die Dreidimensionalität eines Modells erfordert eine stete Konkretisierung bei der Interpretation dieser Grundlagen. So wird in einem interdisziplinären Prozess mittels der digitalen Rekonstruktionen neues Wissen generiert.
Als Folge dieses Prozesses lassen sich drei Kategorien von Wissen in digitalen Rekonstruktionen 06 definieren:

- → Wissen im Modell: gespeichertes Wissen aus den unterschiedlichen Quellen, das in die Dreidimensionalität transferiert wurde.
- → Wissen um das Modell: Wissen über den Kontext des Modells: wichtige Hintergrundinformationen zu Projekt, Projektpartnern, technischen Systemen, Intention und Ziel. Alles Faktoren, die indirekt Einfluss auf das Modell und das Endergebnis haben.
- → Wissen aus dem Modell: Wissen, das durch die Transferierung in die Dreidimensionalität und die Fusionierung der Quellen neu generiert wurde. 07

Wie für alle digitalen Daten gilt auch im Falle der digitalen Rekonstruktionen, dass durch fehlende Strategien zur Sicherung und Bewahrung dieses vielfältige und heterogene Wissen verloren geht. Selbst wenn die dreidimensionalen Daten des Modells erhalten bleiben, ist davon auszugehen, dass die Grundlage der Rekonstruktionen künftig nicht mehr greifbar ist und frühere Erkenntnisse der Forschung nicht mehr nachvollziehbar sind. Um eine solche Nachhaltigkeit dennoch zu gewährleisten, muss auf technischer Ebene die Zugänglichkeit der Datensätze und auf inhaltlicher Ebene die Sicherung des dahinter liegenden Wissens gewährleistet sein. Die **UNESCO** spricht in

■ 05
Vgl. die Definition von Wissen in: Nicolas Pethes, Jens Ruchatz (Hg.), Gedächtnis und Erinnerung, Hamburg 2001, S. 647.

■ 06
Siehe auch: Bernd Mahr, Das Wissen im Modell, http://www.tu-berlin.de/fileadmin/fg53/KIT-Reports/r150.pdf oder Mieke Pfarr-Harfst, Typical Workflows, Documentation Approaches and Principles of 3D Digital Reconstruction of Cultural Heritage, in: Sander Münster, Mieke Pfarr-Harfst, Piotr Kuroczynski, Marinos Ioannides, M. (Hg.), 3D Research Challenges in Cultural Heritage. How to manage Data and knowledge related to Interpretative Digital 3D Reconstructions of Cultural Heritage (Vol. 2), Heidelberg 2016.

■ 07
Dies wurde in dieser Form erstmals von Mieke Pfarr-Harfst definiert. Siehe auch: Mieke Pfarr-Harfst, Digital 3D reconstructed Models in museum context – Is there any authenticity?, in: Römisch Germanisches Museum Mainz (Hg.), Museen – Orte des Authentischen, Tagungsband, Mainz 2016.

diesem Zusammenhang von der Aufgabe der »Bewahrung des digitalen Kulturerbes« und mahnt an:

> »Dieses digitale Erbe (ist) in Gefahr … verloren zu gehen und seine Erhaltung (ist) für gegenwärtige und künftige Generationen eine dringende Aufgabe von weltweiter Bedeutung.« 08

Auch das BMBF nennt in einem **Memorandum zur Langzeitverfügbarkeit digitaler Informationen in Deutschland** »die Erhaltung digitaler Objekte […] eine Aufgabe von nationaler Bedeutung in internationalem Kontext« und fordert, dass die »digitale Langzeitarchivierung das gesamte Spektrum der digitalen Objekte« einbeziehen muss und die »Transparenz von Information im Sinne einer Wissenskartierung … gefördert werden sollte.« 09

Die technische Ebene der Zugänglichkeit von Datensätzen ist abhängig von beständigen Sicherungsstrategien sowie von der Art der hierfür einzusetzenden Hardware im Sinne einer Langzeitarchivierung. Um die Lesbarkeit der Datensätze nachhaltig garantieren zu können, müssen darüber hinaus die Datensätze in neue Generationen von Hard- und Software migriert werden. Dieser Bereich wird in diesem Paper allerdings nicht weiter vertieft, da er in enger Zusammenarbeit zwischen Anwendern und Erstellern der 3D-Modelle unter Einbeziehung der Informatik, aber auch der Archive, in umfassenden Verbundprojekten und aus der Community heraus gelöst werden muss. 10

Der Beitrag widmet sich vielmehr den Herausforderungen im zweiten Bereich, nämlich der **Sicherung des Wissens**, das hinter dem digitalen Datensatz steht und in Geometrie und Textur gespeichert ist. Hier liegt der Fokus auf der Sicherung der Grundlagen, also der heterogenen Quellen, die dem Modell zugrunde liegen, und der Sichtbarmachung des Rekonstruktionsprozesses und der darin getroffenen Entscheidungen. Entsprechend den Forderungen der **London** 11 und **Sevilla Charter** 12 müssen dazu für digitale Rekonstruktionen geeignete Dokumentationsverfahren und -strategien im Sinne der **Nachhaltigkeit, Nachweisbarkeit und Wissenssicherung** erarbeitet werden. In der Regel fehlen hierfür aber finanzielle und personelle Ressourcen — ein Hauptgrund für den drohenden Wissensverlust. Daneben mangelt es aber auch an einheitlichen Systematiken und Methoden der Dokumentation. Hier gilt es anzusetzen und Strategien und Lösungen zu finden, um eine digital rekonstruierte Architektur mit **Fußnoten** zu versehen. Im Sinne der Nachhaltigkeit ist es unabdingbar, praxisnahe wie auch leicht in den Arbeitsprozess integrierbare Verfahren zu entwickeln. Es gilt mithin, die Usability im Sinne der Definition der **Gebrauchstauglichkeit** nach **DIN ISO 9241**, also die einfache und effektive Anwendung im Arbeits- und Forschungsalltag zur Zufriedenheit der Anwender, für alle am Prozess Beteiligten zu beachten und in ein solches System, eine solche Strategie zu überführen. 13

Die allgemeine Zugänglichkeit der Dokumentation, aber auch der entwickelten Werkzeuge, z. B. durch Open-Access-Lösungen, sollte ebenso gewährleistet sein. Das prinzipielle Problem einer freien Veröffentlichung von

■ **08**
UNESCO (Hg.), Charta zur Bewahrung des Digitalen Kulturerbes, verabschiedet von der 32. UNESCO-Generalkonferenz am 17. Oktober 2003 in Paris, https://www.unesco.de/sites/default/files/2018-03/2003_Charta_zur_Bewahrung_des_digitalen_Kulturerbes.pdf.

■ **09**
BMBF und Nestor (Hg.), Memorandum zur Langzeitverfügbarkeit digitaler Informationen in Deutschland, 2006, http://files.dnb.de/nestor/memorandum/memo2006.pdf.

■ **10**
Deutsche Forschungsgemeinschaft (Hg.): Leitlinien zum Umgang mit Forschungsdaten, https://www.dfg.de/download/pdf/foerderung/antragstellung/forschungsdaten/richtlinien_forschungsdaten.pdf.

■ **11**
Hugh Denard, The London Charter for the computer-based Visualisation of cultural heritage. Draft 2.1, 7 February 2009, http://www.londoncharter.org/.

■ **12**
International Forum of Virtual Archaeology, 2011, http://smartheritage.com/seville-principles/seville-principles.

■ **13**
Europäisches Komitee für Normung (Hg.), EN ISO 9241 – Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten, http://www.interactive-quality.de/site/DE/int/pdf/ISO_9241-10.pdf.

Quellen im Kontext der wissenschaftlichen Dokumentation kann diese Anwendung aber nicht lösen. Hier müssen grundsätzliche Entscheidungen zur Erleichterung der Veröffentlichung von Quellen im Kontext wissenschaftlichen Arbeitens vom Gesetzgeber getroffen werden.

Festzuhalten ist, dass bei digitalen Rekonstruktionen die Entwicklung von Dokumentationsstandards für zwei Bereiche unerlässlich ist: **Das Fortschreiben der Wissensbasis** bei Aktualisierungsbedarf und das **wissenschaftliche Selbstverständnis**. So bieten digitale Rekonstruktionen im ersten Fall zwar das Potenzial, Aktualisierungen, z. B. bei neuen Forschungsständen, einfach zu realisieren. Hierfür muss aber die Nachvollziehbarkeit des früheren Rekonstruktionsprozesses gegeben sein. Versteht man digitale Rekonstruktionen als Werkzeug für die Wissenschaft, so erklärt sich die Forderung nach einer umfassenden Dokumentation schon aus dem wissenschaftlichen Selbstverständnis heraus. Gute wissenschaftliche Praxis verlangt in jeder wissenschaftlichen Disziplin eine Dokumentation der Forschungsergebnisse und der dahinterliegenden Prozesse [14], um Ergebnisse nachvollziehbar zu machen und Begründungen nachfolgenden Generationen als Grundlage der weiteren Forschung zur Verfügung zu stellen.

14
Deutsche Forschungsgemeinschaft 2013.

L.2 Status quo

15
Sander Münster, Entstehungs- und Verwendungskontexte von 3D-CAD-Modellen in den Geschichtswissenschaften, in: Klaus Meissner, Martin Engelien, M. (Hg.), Virtual Enterprises, Communities & Social Networks, Dresden 2011, S. 99–108 oder Sander Münster, (Hg.), Aktuelle Herausforderungen im Kontext digitaler Rekonstruktion. Beitrag der Arbeitsgruppe Digitale Rekonstruktion des Digital Humanities im deutschsprachigen Raum e. V. zum Agendaprozess »Zukunft sichern und gestalten« des BMBF, Dresden 2014, http://digitale-rekonstruktion.info/wp-content/uploads/2015/01/140831_Herausforderungen_Digitaler_Rekonstruktion.pdf.

16
Siehe hierzu auch: Celia Krause, Ruth Reiche, Ein Bild sagt mehr als tausend Pixel? Digitale Forschungsansätze in den Bild- und Objektwissenschaften, Glückstadt 2015, S. 39–40.

17
Münster 2011.

Das Thema der Dokumentation des in digitalen Rekonstruktionen vorhandenen Wissens ist nicht neu und beschäftigt die Forschung bereits seit mehreren Jahren. [15] Bei der bestehenden Situation ist davon auszugehen, dass sich bei den meisten digitalen Rekonstruktionen die Wissensbasis nicht oder kaum nachvollziehen lässt. Veröffentlichungen, die den Forschungsweg, den Erkenntnisgewinn, die Methodik und die Quellen dokumentieren, die also einer Dokumentation der wissenschaftlichen Ergebnisse in den klassischen Disziplinen gleichkommen, gibt es kaum. Die Präsentation der Projektergebnisse, nicht aber deren Herleitung, steht auch bei den meisten Konferenzbeiträgen immer noch im Fokus.

Digitale Rekonstruktionen sind in der derzeitigen Forschungslandschaft in den Bereich der **Digital Humanities** einzuordnen – ein relativ neues Forschungsfeld, das sich zwischen den Disziplinen bewegt und auf Entwicklung und Ausbau neuer Informations- und Kommunikationstechnologien in den Geisteswissenschaften und den Nachbardisziplinen beruht. Obwohl das gesamte Forschungsfeld der Digital Humanities in Deutschland immer mehr an Bedeutung gewinnt, steht die Grundlagenforschung auf dem Gebiet der digitalen Rekonstruktionen noch am Anfang. [16] Der derzeitige Forschungsstand ist daher als **inhomogen** zu bezeichnen. [17]

Stellen die digitalen Rekonstruktionen als Typologie eine Unterkategorie im Forschungsfeld der Digitalität in den Geisteswissenschaften dar, ist die Frage nach Dokumentationssystemen oder gar Standards als Unterthema der digitalen Rekonstruktionen zu verstehen.

Bereits 2003 hat die UNESCO in ihrer **Charta zur Bewahrung des digitalen Kulturerbes** angemahnt, Strategien und Lösungen für den drohenden Wissensverlust zu erarbeiten. [18] In der aktuellen Forschungslandschaft sind diesbezüglich zwei Herangehensweisen erkennbar. Zum einen Ansätze, die sich dieser Thematik vor allem auf einer **wissenschaftstheoretischen Ebene** widmen, [19] und zum anderen Ansätze, die Informationen und den Nachweis direkt **an das 3D-Modell annotieren**. Die **London** [20] und **Sevilla Charter** [21] sind in die erste Kategorie — die wissenschaftstheoretische Ebene — einzuordnen und können als theoretische Grundsatzpapiere definiert werden, die aber keine konkreten Lösungen darstellen. Darüber hinaus haben sich beide Papier noch nicht umfassend etabliert, da ihre Praxisrelevanz zu gering ist. Trotzdem haben sowohl die **London** als auch die **Sevilla Charter** dazu beigetragen, dass die Problemstellungen um die digitalen Rekonstruktionen und damit verbunden auch die fehlenden Dokumentationsstrategien stärker ins Bewusstsein rücken. Dennoch gibt es im Bereich der wissenschaftstheoretischen Auseinandersetzung mit diesem Thema einige, wenn auch wenige Publikationen. Einige Kongressbeiträge widmen sich in Ansätzen diesem Thema und stellen vor allem Aspekte wie Hypothese und Befund und deren detaillierten Nachweis auch mittels einer allgemeingültigen Darstellungsart in den Vordergrund. [22] All diesen theoretischen Thesenpapieren ist aber gemein, dass sie als Minimalanforderung für eine Dokumentation digitaler Rekonstruktionen die Transparenz des Prozesses und der Quellen sowie deren direkte Verknüpfung mit dem jeweiligen Rekonstruktionsobjekt fordern. [23] Die am Fachgebiet Digitales Gestalten der TU Darmstadt im Jahre 2010 entstandene Promotion **Dokumentationssystem für Digitale Rekonstruktionen am Beispiel der Grabanlage Zhaoling** ist ebenfalls den wissenschaftstheoretischen Projekten zuzuordnen. [24] Ausgehend von den Prinzipien der wissenschaftlichen Dokumentation und den speziellen Anforderungen für digitale Rekonstruktionen wurde eine allgemeingültige Vorgehensweise und Strategie erarbeitet. Das Dokumentationssystem, das auch als **Vier-Ebenen-System** bezeichnet werden kann, beinhaltet alle wichtigen Ebenen für eine allgemeingültige, nachvollziehbare und editierbare Dokumentation. Projektkontext und -hintergrund werden ebenso erfasst wie die zugrunde liegenden Quellen und der Rekonstruktionsprozess. In der Nachweisebene erfolgt eine Zuordnung der Quellen zu dem jeweiligen digitalen Modell, im Methodenkatalog wird der Prozess durch ein Input-Output-Prinzip dargestellt. So werden die unterschiedlichen Modellstände und die jeweiligen Entscheidungen und Argumente, die zu der Lösung geführt haben, nachgewiesen und sichtbar gemacht. Dieses theoretische System wurde anschließend an einem konkreten Beispiel erprobt, so dass in diesem Rahmen eine der ersten umfassenden Dokumentationen einer digitalen Rekonstruktion entstanden ist.

Neben dem wissenschaftstheoretischen Ansatz sind in der aktuellen Forschungslandschaft Projekte zu finden, die sich mit der Annotation der Informationen direkt an das 3D-Modell auseinandersetzen. [25] Die Bandbreite der Zielsetzungen und den damit verbundenen Themenstellungen ist bei diesen Projekten groß, trotzdem verfolgen sie alle den Anspruch einer paradigmatischen Lösung.

18
UNESCO 2003.

19
Pfarr-Harfst 2010; Marc Grellert, Franziska Haas, Sharpness Versus Uncertainty in ›Complete Models‹. Virtual Reconstructions of the Dresden Castle in 1678, in: Stephan Hoppe, Stephan Breitling, (Hg.), Virtual Palaces, Part II Lost Palaces and their Afterlife, Virtual Reconstruction between Science and Media, München 2016, S. 119–148, http://books.ub.uni-heidelberg.de/arthistoricum/reader/download/83/83-17-805-1-10-20160704.pdf; Anna Bentkowska-Kafel, Hugh Denard, Drew Baker (Hg.): Paradata and Transparency in Virtual Heritage, Farnham 2012.

20
Denard 2009.

21
International Forum of Virtual Archaeology 2011.

22
Grellert, Haas 2016; Bentkowska-Kafel, Denard, Baker 2012.

23
Mieke Pfarr-Harfst, A New Documentation System in the Context of Cultural Heritage, in: Arianna Traviglia (Hg.), Across Space and Time. Proceedings of the 41th International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA) Perth, 25–28 March 2013, Amsterdam 2015.

24
Pfarr-Harfst 2010.

25
Herder-Institut, Virtual reconstructions in transnational research environments — The portal: palaces and parks in the former East Prussia, http://www.herder-institut.de/index.php?id=585.

Das Projekt der Leibniz-Gesellschaft **Virtuelle Rekonstruktionen in transnationalen Forschungsumgebungen — Das Portal: Schlösser und Parkanlagen im ehemaligen Ostpreußen** [26] nutzt das 3D-Modell als Interface zu Navigation. Mittels semantischer Annotation und Integration diverser Meta- und Paradaten wird das 3D-Modell mit einer dahinter liegenden Datenbank verknüpft. In dieser Datenbank sind alle Quellen, Beteiligten und Prozessschritte hinterlegt. Die Eingabe der Informationen erfolgt über komplexe Masken, die sich an der speziell für dieses Projekt entwickelten Ontologie orientieren.

Ein weiteres, gerade abgeschlossenes Projekt in diesem Zusammenhang ist das Dokumentationssystem **DokuVIS** der HTW Dresden. Basierend auf **CIDOC CRM**, einer Ontologie speziell für das kulturelle Erbe, werden auch hier die Informationen zu Quellen und dem Rekonstruktionsprozess an das 3D-Modell annotiert. [27]

Zu erwähnen sind an dieser Stelle auch das Projekt **Oplontis** des King's College in London [28], das auf denselben Prinzipien basiert, oder die Projekte **MayaArch3D** [29] und **VSim**. [30]

Festzustellen ist, dass aktuelle Veröffentlichungen durchaus das Thema **Dokumentation** behandeln und, basierend auf der eigenen Projektarbeit, Vorschläge für Standards oder Leitlinien darstellen. Bis jetzt ist aber keine Verständigung auf eine allgemeine Verwendung dieser Vorschläge innerhalb der Community erfolgt.

Viele Projekte, die es sich als Ziel gesetzt haben, die Information an ein 3D-Modell zu annotieren, basieren auf hochkomplexen Systemen und **Ontologien**. Diese Prozesse laufen zwar im Hintergrund, doch wird die schnelle und effektive Eingabe der dafür notwendigen Daten wie Quellen, Prozessprotokollen usw. durch die Prozessbeteiligten im laufenden Rekonstruktionsprozess durch umfangreiche Eingabemasken mit speziellen Termini und Begrifflichkeiten erschwert, so dass zusätzliche finanzielle und personelle Ressourcen notwendig sind. Zu fragen ist, ob eine solche Form der Dokumentation nur in gut ausgestatteten Forschungsprojekten leistbar ist und ob sich der Ansatz von umfangreicher, globaler Vereinheitlichung mit Ontologien — auch im Kontext von Semantic Web — als praktikabel erweisen kann. Dies ist bisher noch nicht ausreichend wissenschaftlich evaluiert worden. Selbstverständlich ist es sinnvoll, neben den Rekonstruktionsergebnissen auch die Dokumentation des Rekonstruktionsprozesses bestehenden nationalen bzw. europäischen Plattformen zur Verfügung zu stellen. Im Falle der Dokumentation muss aber vorab ein Verständigungsprozess über Grundlagen und generelle Strategien stattfinden. Nur über eine breite Akzeptanz und einen praktikablen Ansatz wird es gelingen, Dokumentationen überhaupt zu etablieren und in einem zweiten Schritt das in den entstandenen Dokumentationen enthaltene digitale Kulturerbe nachhaltig zur Verfügung zu stellen.

26
Herder-Institut 2016 sowie Piotr Kuroczyński, Oliver Hauck, Daniel Dworak, Digital Reconstruction of Cultural Heritage — Questions of documentation and visualisation standards for 3D content, in: Marinos Ioannides, Nadia Magnenat-Thalmann, Eleanor Fink, Roko Žarnić, Alex-Yianing Yen, Ewald Quak (Hg.), Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage. Documentation, Preservation, and Protection, 5th International Conference, EuroMed 2014, Limassol, Cyprus, November 3–8, 2014, Proceedings, Heidelberg, 2014, http://www.academia.edu/9189049/.

27
Jonas Bruschke, Markus Wacker, Neuartige Werkzeuge für die Entwicklung und Dokumentation digitaler Rekonstruktionen, in: TU Dresden, Forschungsförderung und Transfer, TechnologieZentrumDresden GmbH, Industrie- und Handelskammer Dresden, GWT-TUD GmbH (Hg.), Dresdner Transferbrief, Dresden 2015, S. 9.

28
King's College London, The Oplontis Visualization Project, http://www.oplontisproject.org/index.php/people/the-oplontis-visualization-project/.

29
Deutsches Archäologisches Institut (DAI), MayaArch3D, http://www.mayaarch3d.org/language/en/sample-page/.

30
Institute for Digital Research and Education, VSim, https://idre.ucla.edu/research/active-research/vsim.

L.3 Neuer Ansatz für einen minimalen Dokumentationsstandard — Die »Rekonstruktion–Argument–Methode«

Basierend auf der Analyse des Status quo erscheint es deshalb sinnvoll, einen praktikablen und einfach zugänglichen **Minimalstandard** zu entwickeln, der sich mit vertretbarem finanziellen und personellen Aufwand umsetzen lässt. 31 Der vorgestellte Ansatz, im Folgenden **Rekonstruktion-Argument-Methode** genannt, zielt darauf ab, einem Screenshot oder Rendering des digitalen Modells die jeweils hierfür verwendete Grundlage gegenüberzustellen und beide durch ein textliches Argument zu verknüpfen 01 02. Dies kommt der Arbeitsweise des visuellen Vergleichs, die vor allem Kunsthistoriker und Archäologen anwenden, entgegen. 32 Das textliche Argument erläutert, auf welcher Basis und unter Hinzunahme welcher Quellen, Analogien etc. rekonstruiert worden ist. Kern ist also der Dreiklang **Rekonstruktion–Argument–Quelle**. Ein solcher Dreiklang ist immer einem selbst definierten Bereich des rekonstruierten Bauwerks zugeordnet. Die verschiedenen Bereiche werden jeweils bezeichnet und in einem Übersichtsbild im Gesamtmodell verortet. Von besonderer Wichtigkeit ist, dass jedem Bereich beliebig viele Varianten mit dem Dreiklang **Rekonstruktion–Argument–Quelle** zugeordnet werden können. Ein Bereich könnte beispielsweise die Dachform eines rekonstruierten Gebäudes darstellen. Als Varianten könnten dann z. B. **traufständig** oder **giebelständig** eingetragen worden sein. Jede Variante würde ein Bild der jeweiligen Rekonstruktion und eine Quelle, möglicherweise ein vergleichbares Bauwerk mit der jeweiligen Dachform, beinhalten. Mit der Argumentation kann dann die Plausibilität der Quellen erläutert werden. 05 06 07

Jede Variante wird in einer Bewertung als **gesichert**, **wahrscheinlich**, **möglich** und **hypothetisch** eingestuft. Diese Einteilung ist als erster praktischer Ansatz zu verstehen. Im wissenschaftlichen Diskurs soll dies weiterentwickelt werden. 33 Nachfolgende Gliederung veranschaulicht beispielhaft den Aufbau der Dokumentationsmethode:

Projekt

Bereich 1

Variante 1 → Rekonstruktion–Argument–Quelle

Bereich 2

Variante 1 → Rekonstruktion–Argument-Quelle
Variante 2 → Rekonstruktion–Argument-Quelle
Variante …

Bereich 3

Variante 1 → Rekonstruktion–Argument–Quelle

Bereich …

■ **31**
Pfarr-Harfst, Grellert 2016

■ **32**
Sander Münster, Images of the past. Using digital 3D reconstruction methods for digital humanities research and education, https://www.researchgate.net/publication/310292686_Images_of_the_past_Using_digital_3D_reconstruction_methods_for_digital_humanities_research_and_education.

■ **33**
Siehe hierzu beispielhaft: Fabrizio Apollonio, Classification Schemes for Visualization of Uncertainty in Digital Hypothetical Reconstruction, in: Sander Münster, Mieke Pfarr-Harfst, Piotr Kuroczynski, Marionos Ioannides (Hg.), 3D Research Challenges in Cultural Heritage. How to manage Data and knowledge related to Interpretative Digital 3D Reconstructions of Cultural Heritage (Vol. 2), Heidelberg 2016, S. 187.

Eine solche Dokumentationsmethode bietet den Vorteil, dass sie prinzipiell für jede Form der Architekturrekonstruktion — sei es ein haptisches Modell, eine Rekonstruktionszeichnung oder eine bauliche Rekonstruktion, anwendbar ist. Somit könnte der Diskurs über die wissenschaftliche Dokumentation von Rekonstruktionsprojekten auf eine breitere, allgemeingültigere Basis gestellt werden. Der Umfang der Dokumentation — im Sinne, wie viele Bereiche aufgenommen werden — kann individuell bestimmt und an die zur Verfügung stehenden zeitlichen, finanziellen und personellen Ressourcen angepasst werden. Technisches Ziel war eine an das Web angebundene Datenbank, die als Arbeits-, Publikations- und Diskussionsort eingesetzt werden kann. Jenseits einer Datenbankanwendung könnte die **Rekonstruktions-Argument-Methode** aber auch als einfaches Textdokument mit eingefügten Bildern umgesetzt werden. Bei der Überlegung, welche Informationen als minimale Basis dienen sollen, kommt eine Kombination aus Datenfeldern und freier Texteingabe zur Anwendung. Letztere bietet die Möglichkeit, nach Belieben weitere Information hinzuzufügen. Neben der Dokumentation der Entscheidungen gibt es Informationen zum Projekt 03 sowie die Möglichkeit, die Ergebnisse in Form von Renderings und Videos vorzustellen 04. Die für eine wissenschaftliche Dokumentation notwendigen Informationen ergeben sich zum einen aus der praktischen Projekterfahrung und zum anderen aus vorhandenen theoretischen Abhandlungen zu diesem Thema. 34 Nachfolgend eine Übersicht der Informationen, die die Dokumentationsmethode mindestens aufweisen soll:

■ 34
Siehe hierzu: Pfarr-Harfst 2010; Grellert, Haas 2016 sowie Sander Münster, Wolfgang Hegel, Cindy Kröber, A classification model for digital reconstruction in context of humanities research, in: Sander Münster, Mieke Pfarr-Harfst, Piotr Kuroczynski, Marinos Ioannides, M. (Hg.), 3D Research Challenges in Cultural Heritage. How to manage Data and knowledge related to Interpretative Digital 3D Reconstructions of Cultural Heritage (Vol. 2), Heidelberg 2016.

Projekt

- → Projektname
- → Zusatzinformation für die Projektbezeichnung
- → Kurzbeschreibung des Projektes
- → Ausführliche Beschreibung des Projektes
- → Repräsentatives Bild der Rekonstruktion
- → Entstehungszeit des Bauwerks/Stadtanlage
- → Laufzeit des Projektes
- → Institution, die die Rekonstruktion durchgeführt hat
- → Bearbeiterinnen / Bearbeiter
- → Wissenschaftliche Beratung
- → Auftraggeber/Kooperationspartner
- → Sponsoren
- → Eingesetzte Hard-/Software
- → Geokoordinaten des rekonstruierten Bauwerks/Stadtanlage
- → Website des Projektes
- → Name des Ansprechpartners mit E-Mail-Adresse/Telefonnummer
- → Weitere Angabe zur Institution: Allgemeine E-Mail-Adresse und Telefonnummer, Website, Anschrift, Kurzname der Institution
- → Renderings bzw. Filme des fertiggestellten Projektes

Bereiche

→ Anzahl der Bereiche (1: n)
→ Bezeichnung
→ Übersichtsbild, das den Bereich verortet, und Bildunterschrift
→ Anzahl der Varianten für einen einzelnen Bereich (1: n)
→ Wenn gewünscht, ausführlichere Beschreibung des Bereichs

Varianten

→ Bezeichnung der Variante (Standardbezeichnung 1)
→ Bewertung der Varianten in **gesichert**, **wahrscheinlich**, **möglich** und **hypothetisch**
→ Angabe, ob die Variante Bestandteil der Endpräsentation des Projektes ist
→ **Rekonstruktion–Argument–Quelle**

Rekonstruktion

→ Screenshot/Rendering (1: n)
→ Bildunterschrift

Argument

→ Freie Texteingabe

Quelle

- → Abbildung (1: n)
- → Bildunterschrift
- → Autorin/Autor
- → Entstehungszeit
- → Archiv
- → Signatur
- → Copyright
- → Direkt-URL, wenn vorhanden
- → Veröffentlicht von
- → Titel der Veröffentlichung
- → Herausgeber der Veröffentlichung
- → Titel des Sammelbands
- → Ort der Veröffentlichung
- → Jahr der Veröffentlichung
- → Seite
- → Eigener Kommentar für weitere Informationen
- → Art (3D-Laser-Scan, SFM-Bauaufnahme, Befundzeichnung, Befundskizze, Foto der archäologischen / architektonischen Reste, Fotos des bestehenden Bauwerks, Bauplan, Entwurfsplan, zeichnerische Bauaufnahme, haptisches Rekonstruktionsmodell, Rekonstruktionszeichnung, Textquelle, historische Zeichnung, historisches Gemälde, historische Filmaufnahme)

Zusätzlich ist es möglich, zu einem Argument einen Kommentar einschließlich eines Bildes hochzuladen. Somit ist eine gezielte Diskussion möglich.

Die vorgestellte **Rekonstruktion-Argument-Methode** wurde als Datenbank-Prototyp an der TU Darmstadt am Fachgebiet Digitales Gestalten (DDU) im Sommer 2016 zunächst als Offline-Tool entwickelt. Inzwischen ist eine Online-Version unter der Adresse **www.sciedoc.org** als Open-Access-Lösung verfügbar. Interessierte mit den unterschiedlichsten disziplinären Hintergründen können eigene Projekte unter der genannten Web-Adresse dokumentieren und die integrierte Diskussionsplattform im Rahmen eines laufenden Forschungsprozesses nutzen. Erstes großes Projekt ist die Rekonstruktion des mittelalterlichen Jüdischen Viertels und des Praetoriums in Köln.

L.4 Schlussbemerkung

Wie oben dargelegt, ist die Dokumentation des Entscheidungsprozesses im Kontext digitaler Rekonstruktionen sowohl im Sinne der Wissenschaftlichkeit wie auch im Sinne einer Sicherung des darin enthaltenen Wissens, dessen Generierung oft durch öffentliche Gelder erfolgt, bedeutsam.
Die Dokumentation der Entscheidungsfindungen ist Teil einer **guten wissenschaftlichen Praxis**, wie sie die DFG formuliert [35] und bereits mehrfach angeklungen ist. Ausgehend von den Empfehlungen der DFG sollen abschließend fünf Aspekte thematisiert und deren spezifische Umsetzung in Bezug auf digitale Rekonstruktionen und das neu entwickelte Onlinetool beleuchtet werden. Dies geschieht auch vor dem Hintergrund der seit einigen Jahren verstärkt geführten Diskussion, beispielsweise in der AG **Digitale Rekonstruktion**, über Methodologie, Nachhaltigkeit, Langzeitarchivierung und geeignete Dokumentationsverfahren.

Unter dem Gesichtspunkt der aktuellen Herausforderungen auf dem Gebiet der wissensbasierten digitalen Rekonstruktionen sind folgende Empfehlungen der DFG im Sinne guter wissenschaftlicher Praxis bedeutend: erstens **lege artis zu arbeiten**, zweitens **alle Ergebnisse konsequent selbst anzuzweifeln**, drittens **Resultate zu dokumentieren** (Empfehlung 1), viertens **Wissenschaftliche Veröffentlichungen sind das primäre Medium der Rechenschaft von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern über ihre Arbeit** (Empfehlung 12) und fünftens **die Sicherung und Aufbewahrung von Primärdaten** (Empfehlung 7). [36]

■ 35
Deutsche Forschungsgemeinschaft 2013.

■ 36
Ebd.

Lege artis heißt, nach dem aktuellen Stand der Wissenschaft zu arbeiten. Bezogen auf digitale Rekonstruktionen bedeutet dies, dass digitale 3D-Modelle den Anspruch erfüllen müssen, auf dem neuesten Forschungstand zu basieren. Hierbei muss sowohl bei eindeutig nachgewiesenen als auch hypothetischen Bereichen innerhalb einer digitalen Rekonstruktion die wissenschaftliche Untermauerung vorhanden sein. Das setzt eine umfangreiche Recherche und sorgfältige Grundlagenermittlung voraus. Um diese zu gewährleisten, ist in der Regel die Zusammenarbeit mit Fachleuten aus den Disziplinen Archäologie, Baugeschichte bzw. Kunstgeschichte notwendig.

Alle Ergebnisse konsequent selbst anzuzweifeln bedeutet im Falle der digitalen Rekonstruktionen, Alternativen und Varianten zuzulassen, diese kritisch zu hinterfragen und zu diskutieren und in die Argumentation mit einzubeziehen. Somit ist es unabdingbar, sowohl plausible Varianten als auch Varianten, deren Plausibilität vor dem Hintergrund weitergehender Analysen angezweifelt wird, in einer Dokumentation darzustellen. Dies schließt ebenfalls Varianten anderer, nicht direkt an dem jeweiligen Projekt beteiligter Akteure mit ein. Für diesen Ansatz, in Varianten zu denken, diese zuzulassen und nicht zwingend Eindeutigkeiten produzieren zu müssen, scheint auch inzwischen innerhalb der Museumslandschaft ein Bewusstsein vorhanden zu sein. Das Projekt MiQua mit der Visualisierung von **möglichen Synagogen** [08] kann hier als Beispiel genannt werden.

Für den speziellen Bereich der TV-Dokumentation und der dortigen Verwendung digitaler Rekonstruktionsmodellen ist dies skeptischer zu sehen. Hier hat sich mittlerweile die fotorealistische, eindeutige und damit unkritische Darstellung eines Abbildes der Vergangenheit etabliert, die kein Nachdenken über Varianten zulässt. Für eine wissenschaftlich basierte digitale Rekonstruktion in den Feldern Forschen, Vermitteln und Bewahren ist ein variantenorientierter Ansatz jedoch unabdingbar, daher ist dieses Prinzip in die **Rekonstruktion-Argument-Methode** und in das **Online-Tool** 37 eingeflossen.

Die Forderung der DFG nach **Dokumentation der Resultate** 38 ist Kern der **Rekonstruktion-Argument-Methode** und bereits ausführlich dargelegt worden. Mit der Entwicklung des beschriebenen Online-Tools ist darüber hinaus eine Basis für eine mögliche Form einer **wissenschaftlichen Veröffentlichung** gelegt worden, die immer direkt mit der Dokumentation der Ergebnisse verbunden ist. Hier könnte das **Online-Tool** 37 ein Beispiel darstellen, wie zukünftig neben klassischen Zeitschriften neue Formen wissenschaftlicher Veröffentlichungen aussehen könnten. Als nächster mittelfristiger Schritt wird nun die Weiterentwicklung der Onlineplattform (z. B. Möglichkeit der Abspeicherung von Zwischenständen) sowie eine institutionelle Verankerung und die Anbindung an bereits vorhandene Systeme, wie es die EU fordert 39, angestrebt.

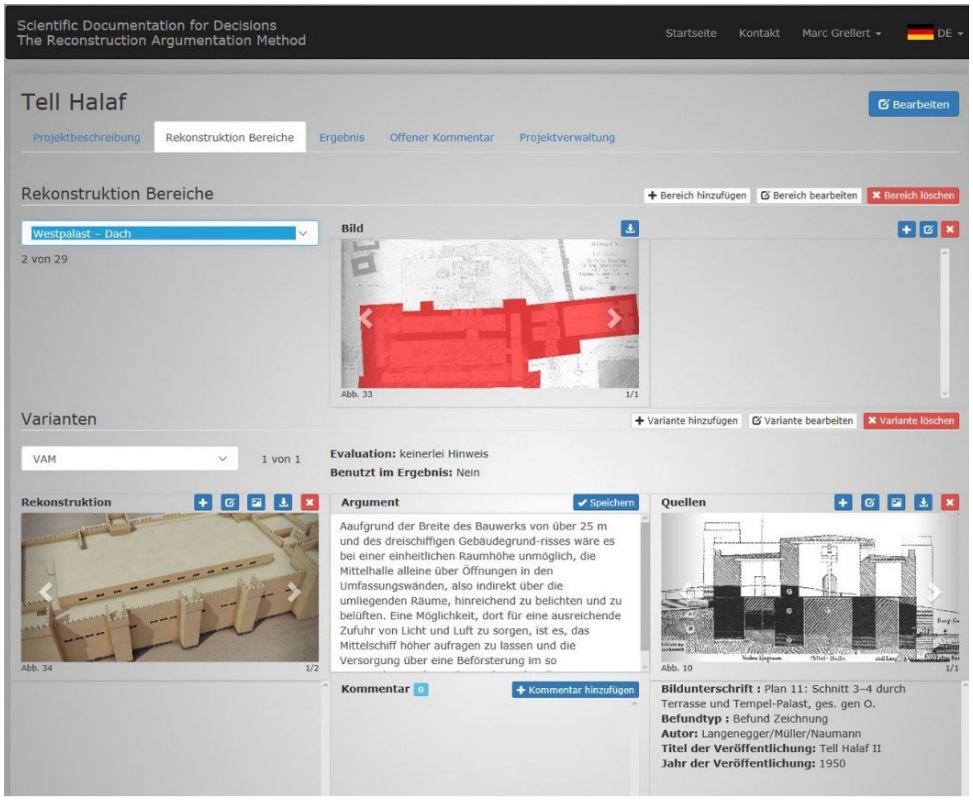
Für die letzte hier angesprochene Empfehlung, die **Sicherung und Aufbewahrung von Primärdaten**, ist noch keine befriedigende Lösung realisiert. Dazu müssten bei digitalen Rekonstruktionsmodellen nicht nur die Primärdaten gesichert werden, sondern auch die Originalkonfiguration von Hard- und Software. Auch für diesen Fall ist eine institutionelle Verankerung sinnvoll, um das Konzept weiterzudenken und in Zukunft Herausforderungen wie Emulationen, die langfristige Lesbarkeit der Daten oder den Datenaustausch angehen zu können.

Durch das **Online-Tool** 37 und die diesem zugrunde liegende Rekonstruktion-Argument-Methode kann aber bereits heute vier der fünf angesprochenen DFG-Empfehlungen entsprochen werden.

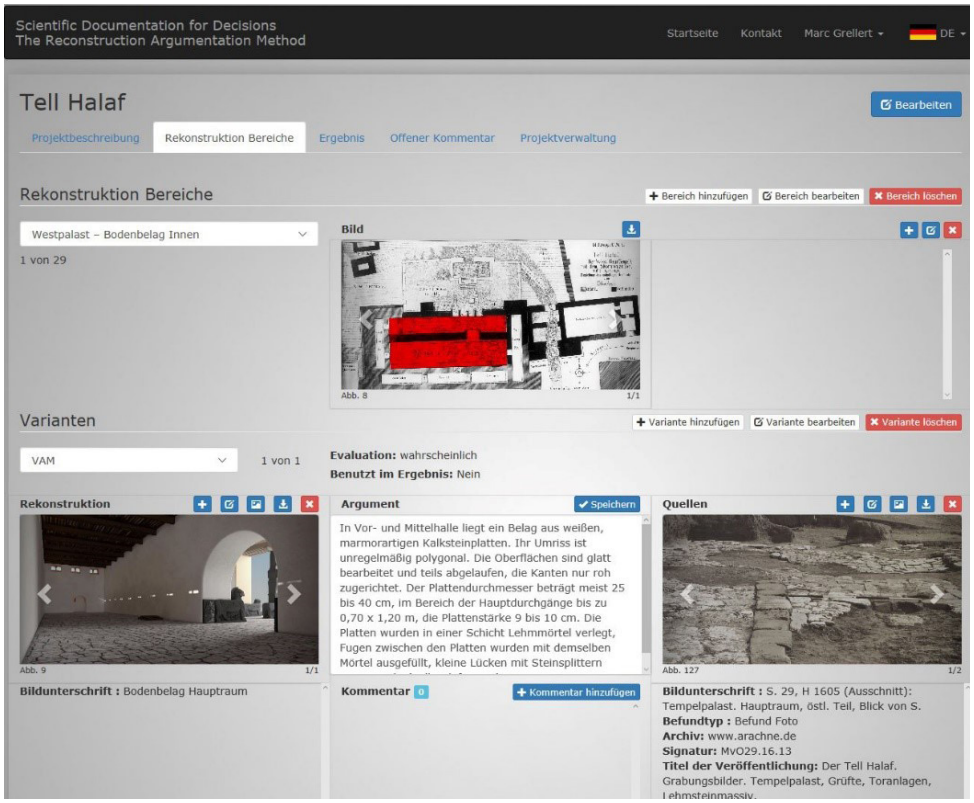
■ **37**
http://www.sciedoc.org

■ **38**
Deutsche Forschungsgemeinschaft, Grundlagen guter wissenschaftlicher Praxis.

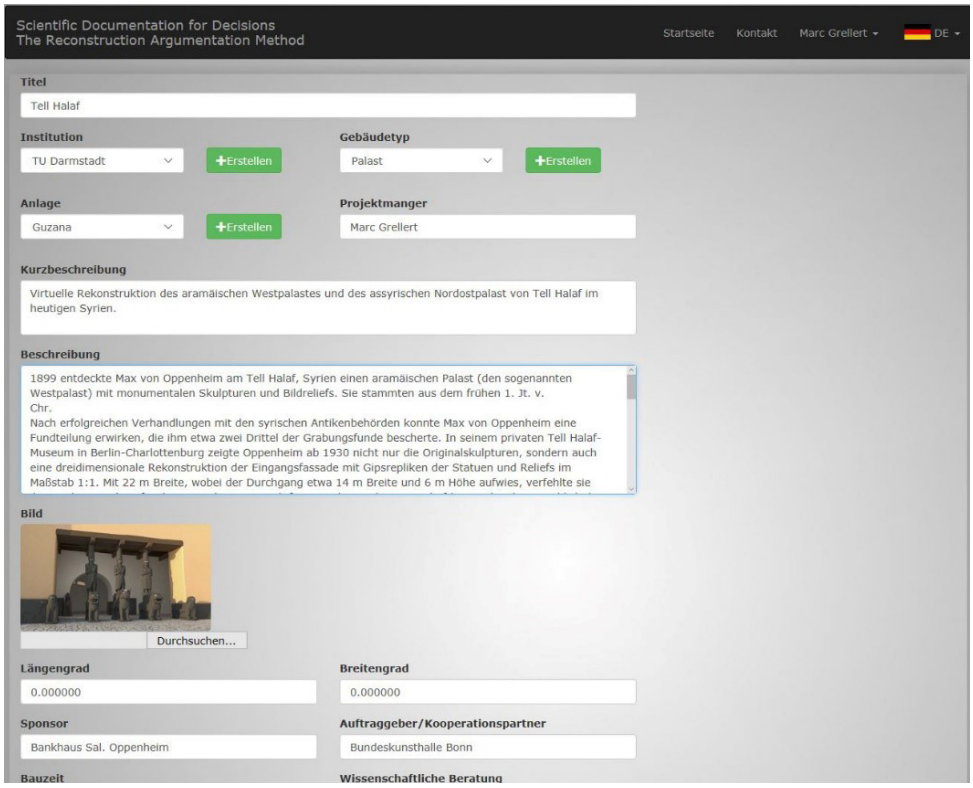
■ **39**
European Commission (Hg.), European Commission's Report on Digitisation, Online Accessibility and Digital Preservation of Cultural Material, 2014, https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/european-commissions-report-digitisation-online-accessibility-and-digital-preservation-cultural.



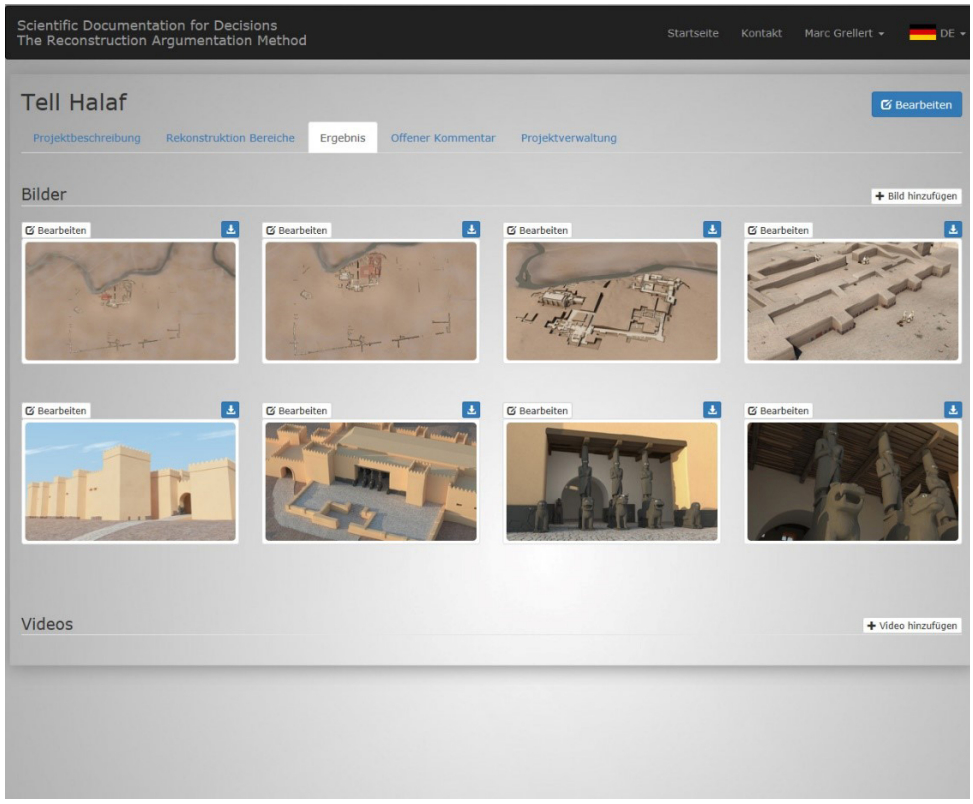
☐ 01
Dokumentation der Entscheidungen bei der Rekonstruktion des Bereichs »Dach«, Projekt Tell Halaf.



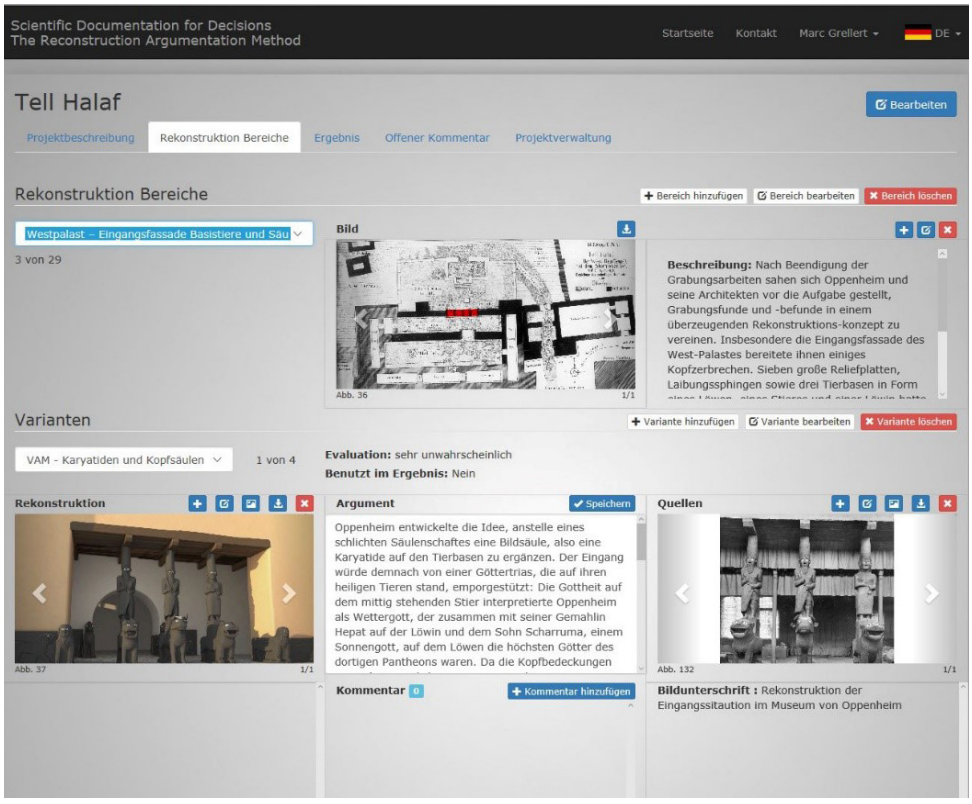
☐ 02
Dokumentation der Entscheidungen bei der Rekonstruktion des Bereichs »Bodenbelag Innen«, Projekt Tell Halaf.



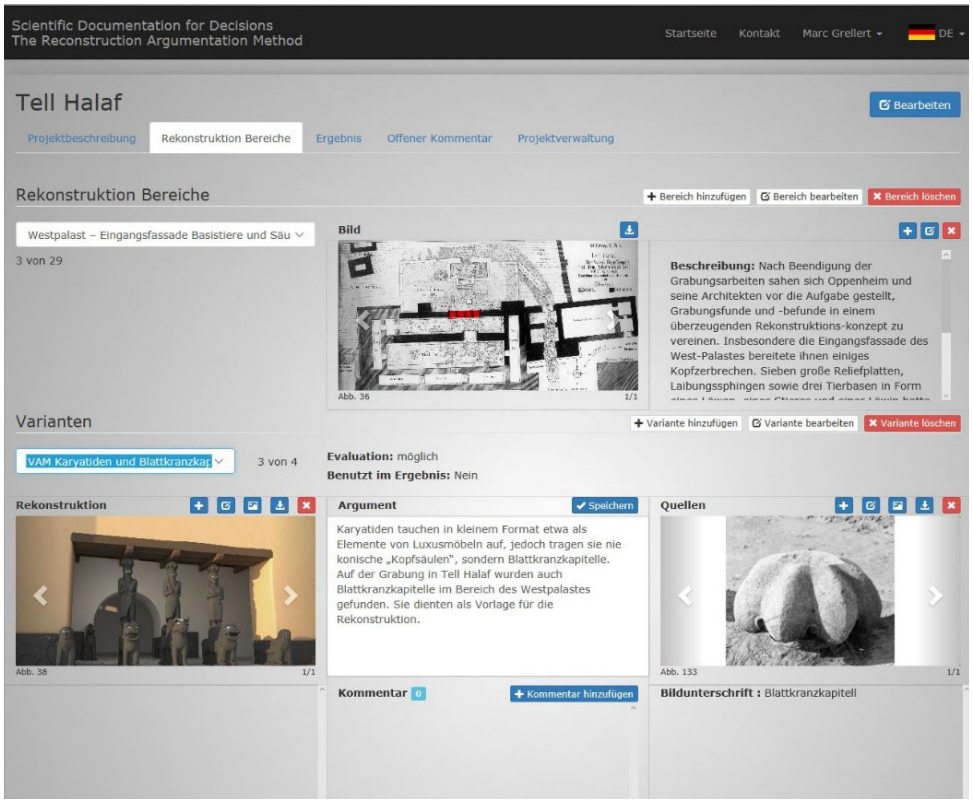
☐ 03
Eingabemaske für das Eintragen der Projektinfos, Projekt Tell Halaf.



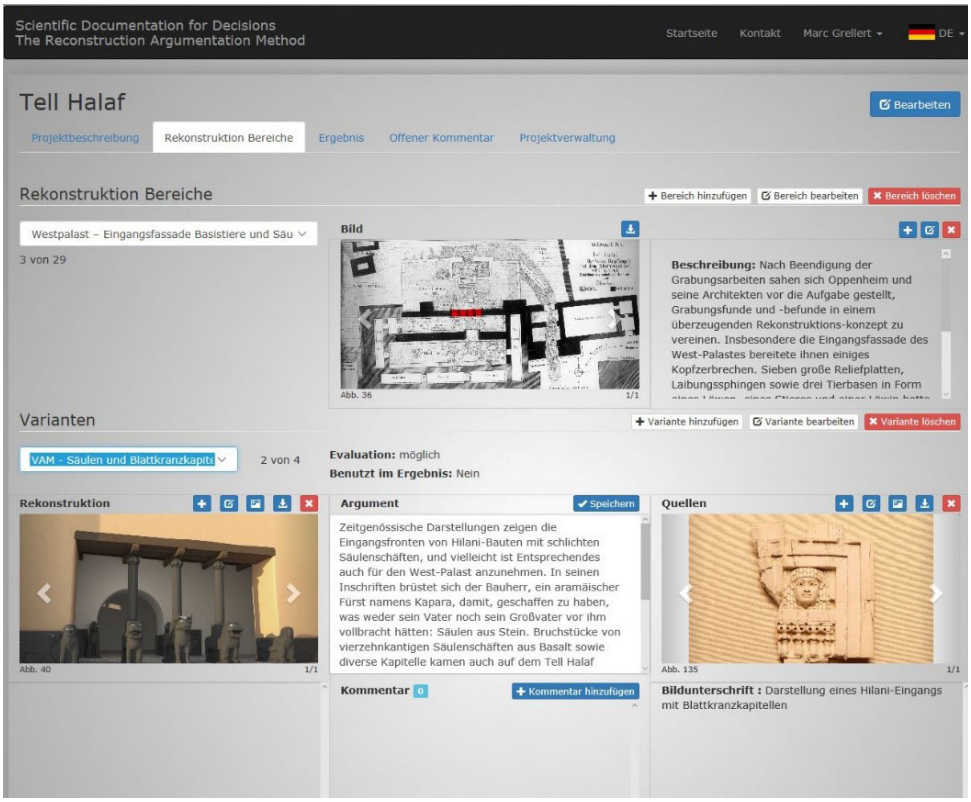
☐ 04
Dokumentation der Ergebnisse (Renderings) beim Projekt Tell Halaf.



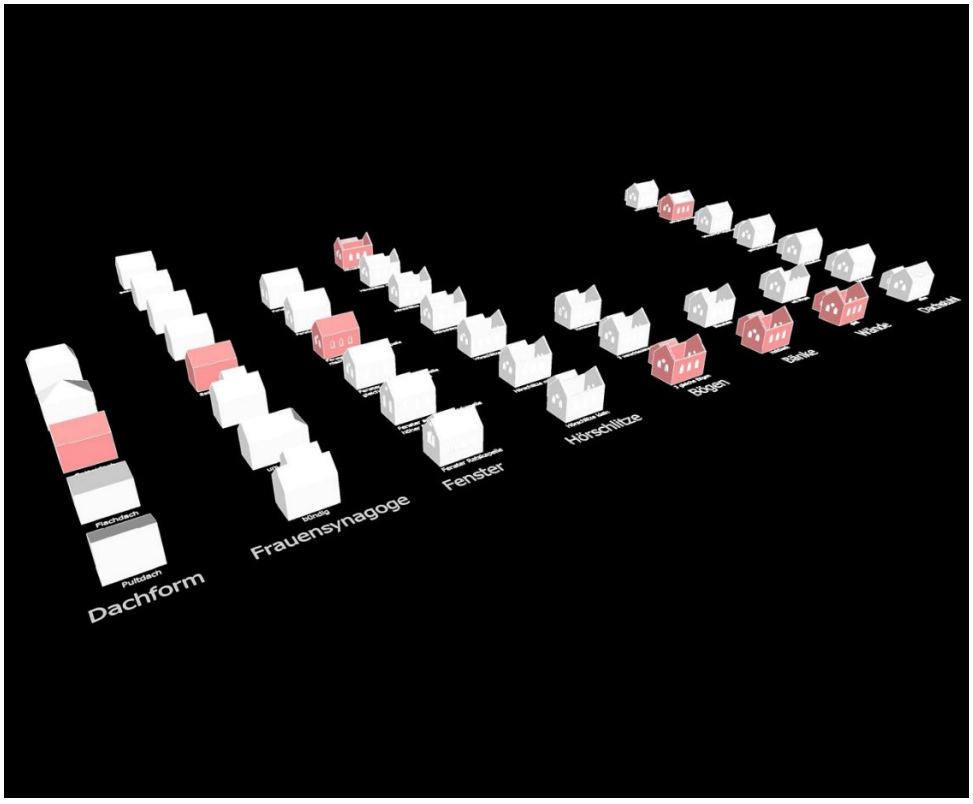
☐ 05
Eingangsfassade Tell Halaf, Variante mit Basistieren, Karyatiden (Götterstatuen) und Kopfsäulen.



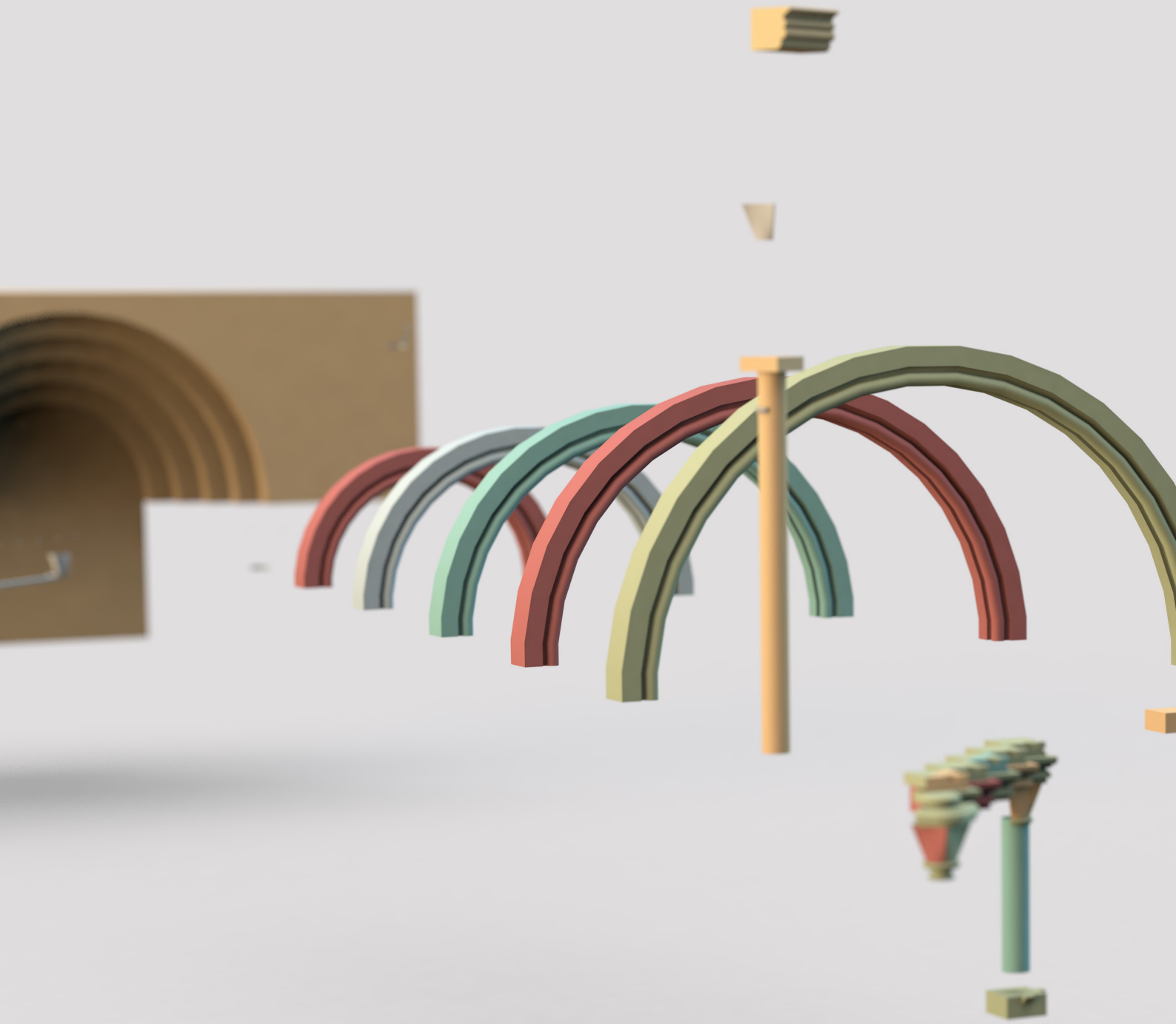
☐ 06
Eingangsfassade Tell Halaf, Variante mit Basistieren, Karyatiden (Götterstauen) und Blattkranzkapitellen.

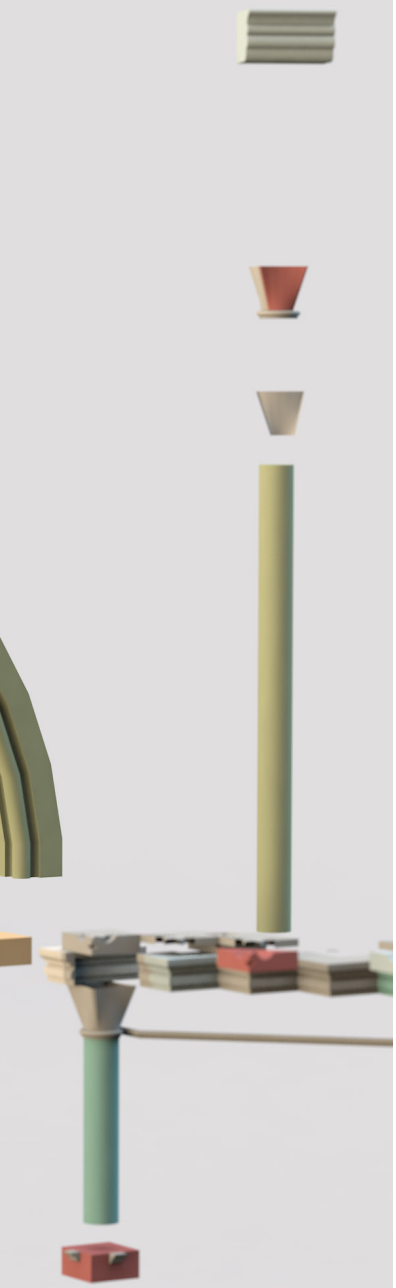


☐ 07
Eingangsfassade Tell Halaf, Variante mit Basistieren, Säulen und Blattkranzkapitellen.



☐ 08
Vorstudien zur Rekonstruktion der mittelalterlichen Synagoge Köln mit möglichen Varianten





Markus Wacker, Jonas Bruschke

M. Dokumentation von digitalen Rekonstruktionsprojekten

→ 3D-Rekonstruktion, CIDOC CRM, Dokumentation, Londoner Charta, Standards

Digitale Rekonstruktionen sind von zunehmender Bedeutung in den digitalen Geisteswissenschaften. Für Experten stellen sie unter anderem ein Forschungswerkzeug zur Gewinnung neuer Erkenntnisse dar. Gleichzeitig bieten die finalen Modelle eine gute Möglichkeit, die Forschungsergebnisse zu präsentieren. Experten als auch Laien sollen dabei unterscheiden können, welcher Teil der Rekonstruktion auf Fakten oder hergeleitetem Wissen beruht und welcher rein hypothetisch ist. Umso wichtiger ist es, die verwendeten Quellen und das von den an der Rekonstruktion Beteiligten eingebrachte Wissen umfassend zu dokumentieren und zugänglich zu machen. Regularien wie die Londoner Charta oder die Charta von Sevilla stellen diesbezüglich Grundsätze auf, die innerhalb von Visualisierungsprojekten zu beachten und anzuwenden sind. Konkrete Empfehlungen zur Umsetzung geben sie jedoch nicht. Zum einen fehlt es an Best-Practice-Lösungen, an denen sich Projekte orientieren können. Zum anderen sind personelle und finanzielle Ressourcen für eine allumfassende Dokumentation in den Projekten oft nicht eingeplant. Somit ist die Kenntnis über die Regularien in der Regel vorhanden, aber eine Umsetzung findet in den meisten Fällen nicht oder nur ungenügend statt. Dieser Beitrag gibt einen Einblick in die Problematik der Dokumentation von digitalen Rekonstruktionen und Rekonstruktionsprojekten und stellt bisherige Bestrebungen und Lösungsansätze vor.

M.1 Einleitung

Die digitale Rekonstruktion von Bauwerken gewinnt zunehmend an Bedeutung und wird immer häufiger in verschiedenen Wissenschaftsbereichen angewendet. In neu entstandenen Wissenschaftszweigen wie den digitalen Geisteswissenschaften (Digital Humanities) bilden sich sogar eigene Forschungsgruppen in diesem Bereich. Für Experten stellen dreidimensionale, digitale Rekonstruktionen ein neues Forschungswerkzeug dar, welches in Ergänzung zu bereits etablierten Methoden der jeweiligen Fachbereiche zur Gewinnung neuer Erkenntnisse beiträgt. Die finalen Modelle bieten außerdem eine gute Möglichkeit, Forschungsergebnisse und Zustände von Gebäuden außerhalb der eigenen Forschungsgruppe, so auch für Laien, anschaulich und verständlich zu präsentieren.

Eine große und wichtige Herausforderung ist es, die Entstehung eines Modells inklusive sämtlicher Bezüge zu genutzten Quellen (dauerhaft) zu sichern und nachvollziehbar zu gestalten. Ziel ist es, den Prozess der Rekonstruktion so transparent zu halten, dass auch Außenstehende in die Lage versetzt werden zu entscheiden bzw. beurteilen zu können, ob und inwiefern die Rekonstruktion auf verlässlichen Fakten beruht und an welcher Stelle im Erstellungsprozess welche Hypothesen Einfluss auf deren Entstehung hatten. Zudem können während der manuellen Modellkonstruktion neue wissenschaftliche Erkenntnisse bezüglich des zu rekonstruierenden Objekts gewonnen werden. 01 Es besteht Konsens unter den Wissenschaftlern, dass eine ausführliche und lückenlose Dokumentation des Rekonstruktionsprozesses ebenso wichtig wie das Modell selbst ist. Die aus 3D-Modellen resultierenden Visualisierungen haben aber meist keinen Bezug mehr zu den verwendeten Quellen. In aller Regel ist es für externe, nicht an der Entstehung des Modells beteiligte Personen (wenn überhaupt) nur schwer nachvollziehbar, an welchen Stellen eine Rekonstruktion auf verlässlichen Fakten beruht und wo sie auf Hypothesen basiert. Eine ausführliche, lückenlose Dokumentation der Rekonstruktion ist daher essenziell und sollte folgende Inhalte umfassen:

- → Hintergrundinformationen zum Projekt,
- → verwendete Quellen,
- → während der Modellerstellung zusätzlich gewonnene Erkenntnisse,
- → Entscheidungen und Schwierigkeiten während des Modellierungsprozesses,
- → Erläuterung dreidimensional umgesetzter Hypothesen.

Erst wenn man die Entstehung eines Modells nachvollziehen kann, lässt sich dessen Qualität beurteilen. Damit eine Zusammenarbeit in Projekten und der Austausch und eine Archivierung der Daten möglich ist, bedarf es jedoch normativer Regularien.

Dieser Beitrag zeigt Problemfelder und bisherige Lösungsansätze bezüglich der Dokumentation von digitalen Rekonstruktionen auf und soll dazu anregen, einen von allen Seiten akzeptierten Dokumentationsstandard zu entwickeln und zu etablieren.

■ **01**
Götz Echtenacher, Wissenschaftliche Erkenntnisse durch manuelles Konstruieren von 3D-Modellen, in: Katja Heine, Klaus Rheidt, Frank Henze, Alexandra Riedel (Hg.), Von Handaufmaß bis High Tech III, Darmstadt 2011, S. 49–57.

M.2 Bestehende Regularien

In den letzten 30 Jahren hat die Nutzung digitaler Medien rasant zugenommen. Diese Entwicklung machte auch vor Rekonstruktionen nicht halt, die mittlerweile häufig digital erstellt und gespeichert werden. Die dafür notwendige Hard- und Software veraltet jedoch sehr schnell, so dass ungewiss ist, ob die digitalen Informationen auch in Zukunft wiedergegeben werden können. Etliche Projekte können schon jetzt nicht mehr sinnvoll weitergenutzt bzw. verwendet werden. Das **digitale Erbe**, häufig von flüchtiger Natur, aber von dauerhaftem Wert und dauerhafter Bedeutung, droht der Nachwelt verloren zu gehen. Die UNESCO-Generalkonferenz hat daher im Oktober 2003 die **Charta zur Bewahrung des digitalen Kulturerbes** verabschiedet. 02 Darin warnt sie vor dem drohenden Verlust des digitalen kulturellen Erbes und ruft Produzenten und Vertreiber digitaler Medien und Institutionen dazu auf, die nötigen rechtlichen, ökonomischen und technischen Maßnahmen zu ergreifen und mit Bibliotheken, Archiven und Museen zusammenzuarbeiten, um diesem Verlust entgegenzuwirken. DURAARK 03 ist in Bezug auf 3D-Daten ein Beispielprojekt, das die Langzeitspeicherung von 3D-Modellen, speziell Building Information Models (BIM), und Punktwolken im Bereich der Architektur zum Ziel hat.

Die 2006 verabschiedete **Londoner Charta für die computergestützte Visualisierung von kulturellem Erbe** definiert Grundsätze und Richtlinien,

> »die sicherstellen sollen, dass die digitale Visualisierung von Kulturgut wenigstens so intellektuell und technisch rigoros ist wie die bereits etablierten Forschungs- und Kommunikationsmethoden«. 04

Die Visualisierungsmethoden sollen also streng wissenschaftlich angewandt werden und die Forschungsergebnisse dem Nutzer den Stand des Fachwissens exakt vermitteln. Dazu definiert die Charta Leitsätze in Bezug auf intellektuelle Integrität, Seriosität, Dokumentation, Nachhaltigkeit und Zugänglichkeit. Anhand dieser Leitsätze wird eine Bewertung der Methoden und Ergebnisse möglich. Neben grundsätzlichen Leitsätzen, die das Anwendungsgebiet der Charta definieren und die am Rekonstruktionsprozess Beteiligten dazu auffordern, jeweils zu prüfen, ob eine Visualisierungsmethode überhaupt für den Zweck geeignet ist, nimmt der Leitsatz zum Thema Dokumentation den wichtigsten Stellenwert ein. Allgemein

> »sollen genügend Informationen dokumentiert und weitergegeben werden, um das Verstehen und Bewerten der [angewandten Methoden und Ergebnisse] in Bezug auf die Zusammenhänge und Absichten [...] zu ermöglichen.« 04

■ **02**
UNESCO (Hg.), Charta zur Bewahrung des digitalen Kulturerbes, https://www.unesco.de/document/1707/unesco-charta-zur-bewahrung-des-digitalen-kulturerbes.

■ **03**
DURAARK — Durable Architectural Knowledge, http://duraark.eu/.

■ **04**
The London Charter, Draft 2.1, February 2009, http://www.londoncharta.org/.

Dazu empfiehlt es sich, Dokumentationsstrategien zu entwickeln, die diese Aktivitäten tatkräftig verbessern und strukturieren. Im Konkreten bedeutet das die Dokumentation der

- → Kenntnislage: Es ist darzustellen, was die Visualisierung anstrebt, und von welcher Art und welchem Ausmaß die faktischen Unsicherheiten sind.
- → Forschungsquellen: Die genutzten Quellen einschließlich ihrer Herkunft sollen aufgelistet werden.
- → Prozesse (Paradaten 05): Alle auswertenden, analytischen, deduktiven, interpretativen und kreativen Entscheidungen sollen so zur Verfügung stehen, dass die Beziehung zwischen Quelle, implizitem Wissen, expliziten Schlussfolgerungen und den Visualisierungsergebnissen verstanden werden kann.
- → Methoden: Anwendern, die mit den gewählten Visualisierungsmethoden nicht vertraut sind, sollte eine Beschreibung der Methoden zur Verfügung gestellt werden. Außerdem sollte erklärt werden, warum die gewählte Methode die geeignetste ist (in Bezug auf Leitsatz 2 der Londoner Charta **Ziele und Methoden**). Die Dokumentation sollte darüber hinaus bei der »Artikulation impliziten Wissens« 04 und der »Identifizierung der verschiedenen Terminologien« 04 (mit Blick auf interdisziplinäre Projekte) helfen.
- → Verknüpfung von Abhängigkeiten: »Die Art und Wichtigkeit der wesentlichen, hypothetischen Abhängigkeitsverhältnisse zwischen den Elementen [sollen] identifiziert und die zugrunde liegenden Folgerungen verstanden werden können.« 04
- → Formate und Standards: Die Dokumentation soll durch die »Nutzung der effektivsten verfügbaren Medien« 04 und Standards in einer Form verbreitet werden, dass deren Benutzung sowie die Aufnahme in Zitationsdatenbanken vereinfacht werden.

Eine weitere wichtige Rolle spielen die Themen Nachhaltigkeit und Zugänglichkeit. Für Ersteres sollen Strategien zur Sicherung der langfristigen Zukunftsfähigkeit der Ergebnisse und Dokumentationen entwickelt und umgesetzt werden. Dazu müssen verlässliche und auch künftig verfügbare analoge wie digitale Archivierungsarten identifiziert werden. Außerdem sollen notwendige Informationen für den Gebrauch in der Zukunft mitgegeben werden. Für letzteres Ziel soll eine Verbreitung der Visualisierung so erfolgen, dass ein »maximal möglicher Gewinn für Studium, Verständnis, Interpretation, Erhaltung und Verwaltung von Kulturgut erzielt wird.« 04

Die 2011 erschienene **Charta von Sevilla** (oder auch **Seville Principles**) nimmt klar Bezug auf die Londoner Charta, erweitert und spezifiziert diese aber auf den Anwendungsbereich von computergestützten Visualisierungen archäologischer Kulturgüter. 06 Unter anderem wird darauf eingegangen, dass ein Visualisierungsprojekt nicht von einem einzigen Experten bewerkstelligt werden kann, sondern nur von einer Kooperation aus verschiedenen Spezialisten (d. h. Archäologen, Informatikern, Historikern, Architekten etc.).

■ 05
Richard C. Beacham, Defining our Terms in Heritage Visualization, in: Anna Bentkowska-Kafel, Hugh Denard, Drew Baker (Hg.), Paradata and Transparency in Virtual Heritage, Farnham 2012, S. 7–12.

■ 06
International Forum of Virtual Archaeology, Seville Principles, http://smartheritage.com/seville-principles/seville-principles.

Außerdem sollten immer Archäologen und Historiker an dem Projekt beteiligt sein, die für die Rekonstruktionen wissenschaftlich verantwortlich zeichnen. Vor dem Hintergrund, dass bei vielen Rekonstruktionen Annahmen getroffen werden, wie historische Gegenstände ausgesehen haben mögen, wird explizit gefordert, dass es möglich sein soll, zu unterscheiden, was auf wahren Befunden beruht, was authentisch hergeleitet und was rein hypothetisch ist. Bei Bedarf sollen alternative Interpretationen angeboten werden. Außerdem sollen Visualisierungen auf solider Forschung basieren, um den bestmöglichen Grad an historischer Genauigkeit und Wahrhaftigkeit zu erzielen. Es wird festgestellt, dass alle dokumentierten historischen Phasen eines Objekts sehr wertvoll sind und demzufolge auch visualisiert werden sollten (einschließlich der Verfallszustände). Nach Möglichkeit sollte auch die Umgebung und die Landschaft modelliert werden, um das Objekt in einem räumlichen Kontext darstellen zu können. Andere Leitsätze, die die Dokumentation der Methodik, Techniken, Beweisführungen, Herkunft und Charakteristiken der Quellen, Ergebnisse und Schlussfolgerungen sowie die Zugänglichkeit thematisieren, entsprechen weitgehend der Londoner Charta.

M.3 Anwendung der Regularien

Die vorgestellten Regularien sind ein erster Schritt zu einer angemessenen Dokumentationspraxis. Sie geben allerdings keine Empfehlungen oder Hinweise für deren Umsetzung. Wie viel Handlungsbedarf noch besteht, zeigt eine Sichtung mehrerer Rekonstruktionsprojekte. Sie ergab, dass eine Dokumentation auf wissenschaftlicher Basis gar nicht oder nur ungenügend erfolgte. 07 Gelegentlich werden die Quellen und Vorgehensweisen exemplarisch dargelegt, doch eine direkte Verknüpfung von Objekt und Dokument fehlt. Auch projektintern wird der Entstehungsprozess und das Wissen kaum dokumentiert und die Archivierung und Pflege der Daten und Datensätze oft nicht fachgerecht betrieben. Nicht dokumentiertes Wissen verbleibt in der Regel bei den am Projekt beteiligten Personen. Sind diese nicht mehr erreichbar, geht auch das mühsam erlangte Wissen verloren. Weiter ist man in den Naturwissenschaften, in denen die Dokumentationsmethoden klar definiert sind und jeder Arbeitsschritt protokolliert wird. 08 Was in anderen Fachrichtungen bereits fester Bestandteil der wissenschaftlichen Arbeit ist, muss bei digitalen Rekonstruktionen erst noch etabliert werden.

Um diesem Mangel abzuhelfen, bedarf es neben allgemeinen Richtlinien wie der Londoner Charta konkreter Fallbeispiele, anhand derer eine angemessene Vorgehensweise entwickelt werden kann. 09 Die Chartas definieren universell, ohne konkrete Vorgaben bzw. Vorschläge zu formulieren, da — wie sie selbst festhalten — zu jedem Projekt eine eigene Strategie für eine Dokumentation entwickelt werden muss. Schließlich hat jedes Projekt seine eigenen, spezifischen Anforderungen. Wenn jedoch Umsetzungsbeispiele vorliegen, können Rekonstruktionsprojekte von diesen Erfahrungen anderer

07
Mieke Pfarr, Dokumentationssystem für Digitale Rekonstruktionen am Beispiel der Grabanlage Zhaoling, Provinz Shaanxi, China, Dissertation, TU Darmstadt 2010.

08
Ebd., S. 38 f.

09
Franco Niccolucci, Setting Standards for 3D Visualization of Cultural Heritage in Europe and Beyond, in: Anna Bentkowska-Kafel, Hugh Denard, Drew Baker (Hg.), Paradata and Transparency in Virtual Heritage, Farnham 2012, S. 22–36.

Projekte profitieren und den Verantwortlichen so kostbare Zeit sparen, die für die Ausarbeitung einer Strategie nötig wäre.

Konkretere Vorschläge und Konzepte zu einzelnen Aspekten der Chartas gibt es bereits. Besonders die Frage, wie man die Validität einer Rekonstruktion bzw. einzelner rekonstruierter Elemente erfassen und beschreiben kann, beschäftigte einige Akteure im Bereich der virtuellen Rekonstruktionen. So gibt es mehrere Vorschläge, eine Skala der Unsicherheit / Glaubwürdigkeit festzulegen. Unter anderem spielen dabei die Stärke von Hypothesen und die Qualität der Quellen eine Rolle. Der Einfluss der verschiedenen Faktoren auf die Rekonstruktion von Elementen soll auf einen numerischen Wert abgebildet werden. Die Faktoren können dabei unterschiedlich ausfallen und bewertet werden. Niccolucci et al. [10] und Hermon et al. [11] setzen auf Fuzzylogik. Hauck et al. [12] definieren zusätzlich zum Level of Detail (LoD), der sich auf die Geometrie eines Objektes bezieht, ein Level of Information (LoI), der die Informationsdichte der Quellen zu einem Element widerspiegeln soll. Die Kombination aus LoD und LoI ergibt ein Level of Hypothesis (LoH), der den Grad der Unsicherheit repräsentiert. Eine weitere Einteilung der Unsicherheit entwirft Apollonio [13], indem er unter anderem die Quellen in Gruppen unterteilt, abhängig von deren Informationsgehalt und Interpretationsbedarf. Ein Aufsatz über ein Bauwerk bedarf eines höheren Interpretationsaufwands als ein Grundrissplan. Der Grad der Unsicherheit verschiebt sich somit in diesem Fall in Richtung höherer Unsicherheit.

Die Indizierung dieses unscharfen Wissens ist oft auch ein Ausgangspunkt für deren Visualisierung. Die Methoden zur Visualisierung der Unsicherheiten erstrecken sich von Transparenz und Drahtgitterdarstellungen [14] über den Detailgrad der 3D-Geometrien bis hin zu farblichen Codierungen der Elemente. [15] Auch die Kombination mehrerer Methoden ist möglich. [16] Solche Visualisierungen können eine gute Gesamtübersicht über die entstandenen Rekonstruktionen geben und dem Betrachter Hinweise liefern, dass die einzelnen Elemente unterschiedlich zu bewerten sind. Auch Laien kann auf diese Weise verdeutlicht werden, dass nicht alles auf klaren Fakten beruht, sondern auch verschiedene Interpretationen und Unschärfe eine wesentliche Rolle spielen.

Die eigentlichen, konkreten Entscheidungen beim Rekonstruktionsprozess werden hiermit aber noch nicht widergespiegelt. Die Indizierung des unscharfen Wissens kann deshalb nur ein Teil der Gesamtdokumentation sein und dessen Visualisierung nur als Überblick und Einstieg zu der Dokumentation der jeweiligen Entscheidungsprozesse dienen. Um die Entscheidungen und die resultierende Rekonstruktion in einen Zusammenhang zu bringen, werden heute vielfach die 3D-Modelle semantisch angereichert. Dazu gibt es bereits mehrere Ansätze: Einer erwägt die Integration einer Datenbank direkt in das Modellierungswerkzeug [17], andere setzen dagegen auf formale Sprachen: Demetrescu [18] orientiert sich an bei archäologischen Ausgrabungen genutzten Methoden und Werkzeugen, insbesondere der Stratigrafie und Harris-Matrix. Die virtuelle Rekonstruktion wird als Erweiterung der archäologischen Befunde gesehen. So versucht Demetrescu entsprechend die archäologischen Methoden und Sprachen zu erweitern. Hauck et al. [19] versuchen die Sachverhalte in einer XML-basierten Sprache festzuhalten.

10
Franco Niccolocci, Sorin Hermon, A Fuzzy Logic Approach to Reliability in Archaeological Virtual Reconstruction, in: Franco Niccolocci, Sorin Hermon (Hg.), Beyond the Artifact. Proceedings of CAA2004, Prato 13–17 April 2004, Budapest 2010, S. 28–35.

11
Sorin Hermon, Joanna Nikodem, 3D Modelling as a Scientific Research Tool in Archaeology, in: Axel Posluschny, Karsten Lambers et al., Layers of Perception., Berlin, Germany, April 2–6, 2007, Bonn 2008.

12
Oliver Hauck, Piotr Kuroczyński, Cultural Heritage Markup Language, in: Proceedings of the 20th International Conference on Cultural Heritage and New Technologies (CHNT 20, 2015), Wien 2016.

13
Fabrizio I. Apollonio, Classification Schemes for Visualization of Uncertainty in Digital Hypothetical Reconstruction, in: Sander Münster, Mieke Pfarr-Harfst et al., 3D Research Challenges in Cultural Heritage II: How to Manage Data and Knowledge Related to Interpretative Digital 3D Reconstructions of Cultural Heritage, Cham 2016, S. 173–197.

14
Dominik Lengyel, Catherine Toulouse, Darstellung von unscharfem Wissen in der Rekonstruktion historischer Bauten, in: Katja Heine, Klaus Rheidt, et al., Von Handaufmaß bis High Tech III, Darmstadt 2011, S. 182–187.

15
Apollonio 2016.

16
Karen M. Kensek, Lynn Swartz Dodd et al., Fantastic reconstructions or reconstructions of the fantastic?, in: Automation in Construction, 13 2004, S. 175–186.

17
Hermon & Nikodem 2008.

Dazu entwickelten sie die Cultural Heritage Markup Language (CHML).

Ein Standard, der vermehrt angewendet wird, ist das CIDOC Conceptual Reference Model (CRM). [20] **CIDOC CRM** ist ein ISO-Standard für den Austausch und die Integration von Informationen im Bereich des kulturellen Erbes und wurde vor allem für die Anwendung von Museen und Archiven konzipiert. Als Ontologie, bestehend aus Entitäten und Eigenschaften, ist es auf eine semantische Datenmodellierung zugeschnitten. Bei der Anwendung auf den Bereich der digitalen Rekonstruktionen stößt es jedoch schnell an seine Grenzen, da komplexere digitale Inhalte und unscharfes Wissen zunächst nicht berücksichtigt werden können.

Bereits 2006 wurde von Niccolucci et al. [21] eine Erweiterung für komplexe 3D-Modelle vorgeschlagen. Dabei wird das **CIDOC CRM** mit dem X3D-Standard [22] verzahnt. Der Interpretations- und Entscheidungsprozess wird dabei jedoch nicht berücksichtigt. Stattdessen bezieht sich die Erweiterung lediglich auf **digitale Repliken**. Mit CRM_{dig} [23] kam später eine offizielle Erweiterung für das **CIDOC CRM**. Der Fokus liegt dabei auch auf Digitalisaten kulturhistorischer Objekte und relevanten Informationen zu deren Ursprung / Herstellung, wie Scanverfahren oder benutzter Software. Ein Interpretationsprozess ist bei einer Digitalisierung jedoch nicht vorhanden und findet in der genannten Erweiterung daher auch keine Beachtung.
CRM_{dig} kommt auch bei der in den letzten Jahren einsetzenden Digitalisierung von Museumsobjekten zum Einsatz. Die digitalen Repliken sollen dann zum Teil in digitalen Bibliotheken wie der Europeana der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden. Bruseker et al. [24] bedienen sich dagegen der noch relativ neuen Erweiterungen CRM_{inf} und CRM_{BA}. CRM_{inf} [25] ist auf die formale Beschreibung von Argumentationsketten und Schlussfolgerungen spezialisiert, während CRM_{BA} [26] die Komplexität historischer Gebäude zu beschreiben versucht, inklusive einzelner Gebäudeteile, funktionaler Räume und Bauphasen. Durch die Kombination dieser Erweiterungen können Argumentationen und Schlussfolgerungen bzw. auch einzelne Schritte der Argumentation mit bestimmten Gebäudeteilen und schließlich mit dem digitalen Modell verlinkt werden. Die Modellierung von Wahrscheinlichkeitsgraden oder alternativen Rekonstruktionsmöglichkeiten blieb laut den Autoren jedoch zunächst außen vor.

Im Allgemeinen eignen sich formale Sprachen und Ontologien wie das **CIDOC CRM** gut, um Informationen zwischen mehreren Systemen auszutauschen oder zu integrieren, z. B. mittels Technologien des Semantic Web. Für normale Nutzer ist jedoch eine semantische Anreicherung der Modelle bzw. deren formale Beschreibung mithilfe einer Ontologie nicht einfach. Zwar werden mit Ontologien aufgebaute Daten und Verknüpfungen oft in XML-basierten Formaten wie dem im Semantic Web gebräuchlichen Resource Description Framework (RDF) gespeichert und sind somit prinzipiell vom Menschen lesbar. Die Erfassung der Daten ist aufgrund der technischen Natur der Ontologien aber schwierig, insbesondere wenn es sich um größere Datenmengen handelt. Außerdem können die Informationen zum Teil recht granular beschrieben werden und durch den formalen, logischen Aufbau auf sehr abstrakte Weise verknüpft sein. Dies stellt ein Problem dar und widerspricht auch der in den oben genannten Chartas gestellten Forderung nach Zugänglich-

■ **18**
Emanuel Demetrescu, Archaeological stratigraphy as a formal language for virtual reconstruction., in: Journal of Archaeological Science, 57 2015, S. 42–55.

■ **19**
Hauck & Kuroczyński 2016.

■ **20**
SO, Information and documentation — A reference ontology for the interchange of cultural heritage information, ISO 21127:2014.

■ **21**
Franco Niccolucci, Andrea D'Andrea, An ontology for 3D cultural objects, in: Marinos Ioannides, David Arnold et al., Proceedings of the 7th International Conference on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage, Nicosia 2006, S. 203–210.

■ **22**
X3D ist ein XML-basiertes, deklaratives Format zur Beschreibung von 3D-Szenen. X3D ist zudem ein ISO-Standard.

■ **23**
Martin Doerr, Maria Theodoridou, CRMdig: A generic digital provenance model for scientific observation, in: 3rd USENIX Workshop on the Theory and Practice of Provenance, TaPP'11, Heraklion 2011.

■ **24**
George Bruseker, Anaïs Guillem, Nicola Carboni, Semantically Documenting Virtual Reconstruction: Building a Path to Knowledge Provenance, in: ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-5/W3 2015, S. 33–40.

■ **25**
Stephen Stead, Martin Doerr et al. CRMinf: the Argumentation model — An Extension of CIDOC-CRM to support argumentation, http://www.cidoc-crm.org/crminf/ModelVersion/version-0.9.

■ **26**
Paola Ronzino, Franco Niccolucci et al., CRMba a CRM extension for the documentation of standing buildings, in: International Journal on Digital Libraries, 17 (1) 2016, S. 71–78.

keit von Daten: Die Visualisierung und Dokumentation soll ja so aufbereitet und verfügbar sein, dass man daraus den größtmöglichen Nutzen für das Studium, das Verständnis und die Interpretation ziehen kann. 27 Eine rein formale Beschreibung mittels Ontologien oder anderer Formate für eine valide Dokumentation reicht also nicht aus. Hier bedarf es geeigneter Werkzeuge, die es ermöglichen, die Dokumentation einfach und verständlich zu vermitteln, und somit auch Laien einen Zugang bieten.

■ 27
The London Charter, 2009.

M.4 Dokumentationswerkzeuge

Die bereits genannten Ansätze beschäftigen sich größtenteils nur mit einzelnen Aspekten zur Dokumentation von Rekonstruktionen, wie der Visualisierung von Unsicherheiten oder der formalen Speicherung des Wissens. Es gibt aber auch schon Umsetzungsvorschläge, wie eine möglichst allumfassende Dokumentation aussehen und diese dem Nutzer auch ohne technische Vorkenntnisse verständlich und nachvollziehbar näher gebracht werden könnte.

Im Rahmen der **EPOCH Research Agenda** (2004–2008) wurden bereits konkrete Ideen entwickelt, wie man digitale Objekte dokumentieren könnte, welche Daten erfasst werden sollten und wie sich diese in digitalen Bibliotheken bereitstellen ließen. 28 Diese Überlegungen mündeten unter anderem in der Londoner Charta. Ein weiteres Ergebnis dieser Agenda ist ein Werkzeug, das den Interpretationsprozess verwalten und auch die Quellen, die zu der Visualisierung geführt haben, erfassen soll. 29 Es ist webbasiert und baut auf der Wiki-Technologie, also auf untereinander verlinkten Seiten, auf. Die Seiten sind strukturiert in Datenblätter, die die Quellen und deren Herkunft, Qualität und deren Interpretation erfassen; Seiten, die die Wechselbeziehungen zwischen mehreren Quellen dokumentieren (z. B. gemeinsame Merkmale); Hypothesenblätter, welche verschiedene Möglichkeiten diskutieren; und schließlich Ergebnisblätter, die die eigentliche Rekonstruktion präsentieren. Das Werkzeug blieb allerdings ein Prototyp und wird aktuell nicht entwickelt oder genutzt.

■ 28
David Arnold, Guntram Geser, EPOCH Research Agenda for the Applications of ICT to Cultural Heritage – Full Report, Brighton 2008.

■ 29
Daniel Plentickx, How to make sustainable visualizations of the past. An EPOCH common infrastructure tool for interpretation management, in: Anna Bentkowska-Kafel, Hugh Denard, Drew Baker (Hg.), Paradata and Transparency in Virtual Heritage, Farnham 2012, S. 203–244.

Einen theoretischen Ansatz liefert Pfarr. 30 Sie schlägt ein **4-Ebenen-Dokumentationssystem** vor, welches den den Nutzer von allgemeinen hin zu detaillierten Informationen führt. So beinhaltet die erste Ebene lediglich Hintergrundinformationen zum Projekt. Die zweite Ebene beschreibt dessen historischen Kontext. Die dritte Ebene beschreibt das System, die Methodik und Chronologie der Rekonstruktion und Dokumentation, und die vierte Ebene besteht aus Quellen- und Methodenkatalogen, die die Beziehungen zwischen den Quellen, Modellen und Prozessen listen. Entscheidungen werden in Textdokumenten mit Referenzen zu dem genutzten Material erklärt. Dieser theoretische Ansatz orientiert sich sehr an den Prinzipien und Normen von technischen Dokumentationen.

■ 30
Pfarr-Harfst 2010, S. 83 f.

Eine bereits nutzbare virtuelle Forschungsumgebung inklusive einer umfangreichen Verknüpfung der Daten auf Basis des **CIDOC CRM** und der CHML bietet **Patrimonium.net**. [31] Die Plattform bedient sich somit zum Teil existierender Standards. Die Daten sollen auch mittels Technologien des Semantic Webs als Linked Open Data öffentlich zugänglich gemacht werden. Die Informationen und Modelle werden in kuratierten Galerien dargeboten. Die Ergebnisse sollen auch in einem sogenannten Virtuellen Museum präsentiert werden. Der Nutzer kann sich im Browser durch die virtuelle 3D-Rekonstruktion bewegen und Informationen zu Objekten aufrufen.

Neben diesen Ansätzen zur Dokumentation lohnt ein Blick auf die Praxis, um den Stand von Dokumentationswerkzeugen zu beurteilen. Aus der Analyse von Projektverläufen erkennt man, dass die Dokumentation in der Praxis oft vernachlässigt wird, weil sie sehr aufwendig ist und in Projektanträgen selten als eigenständiger Posten Berücksichtigung findet. [32] Das ist auch ein Grund, weshalb die zuvor genannten Chartas in der Praxis kaum Anwendung finden, obwohl sie inzwischen relativ bekannt sind und des Öfteren auch in wissenschaftlichen Beiträgen zitiert werden. Plentickx und Pfarr-Harfst liefern zwar konkrete Umsetzungsvorschläge dieser Chartas und mit **Patrimonium.net** ist sogar eine umfangreiche Forschungsumgebung praktisch verfügbar. Der manuelle Aufwand, eine umfassende und ausführliche Dokumentation zu erstellen, wird dadurch aber nicht oder kaum verringert, sei es durch das Erstellen der Quellen- und Methodenkataloge oder das Füllen umfangreicher Eingabemasken. Insgesamt kann man feststellen, dass der Dokumentationsprozess nach Möglichkeit entlastet werden muss.

■ 31
Piotr Kuroczyński, Oilver Hauck, Daniel Dworak, 3D Models on Triple Paths – New Pathways for Documenting and Visualizing Virtual Reconstructions, in: Sander Münster, Mieke Pfarr-Harfst, Piotr Kuroczyński, Marinos Ioannides (Hg.), 3D Research Challenges in Cultural Heritage II: How to Manage Data and Knowledge Related to Interpretative Digital 3D Reconstructions of Cultural Heritage, Cham 2016, S. 149–172.

■ 32
Sander Münster, Interdisziplinäre Kooperation bei der Erstellung geschichtswissenschaftlicher 3D-Modelle, Wiesbaden 2016.

Eine gute Ausgangsbasis für die zukünftige Entwicklung von Dokumentationsstandards und -methoden bietet die Erfassung, Untersuchung und Analyse bereits durchgeführter Projekte wie sie in der Dissertation von Sander Münster zu finden sind. [33] Für eine gute und erfolgreiche Durchführung von Projekten, einschließlich ihrer Dokumentation, sind seiner Analyse nach folgende Punkte wichtig:

■ 33
Ebd.

- → Deadlines setzen. Deadlines fördern ein effizientes Arbeiten. Um wirksam zu sein, müssen sie verbindlich sein und Anreize bzw. Sanktionen beinhalten.
- → Bei der Strukturentwicklung berücksichtigen, dass das Modell sich einfach finden und editieren lassen muss.
- → Modellsystematik und -struktur entwickeln, dokumentieren und einhalten. Standards frühzeitig entwickeln und möglichst beibehalten.
- → Wenn möglich das Modell anhand räumlicher, zeitlicher, funktionaler und modellorganisatorischer Aspekte gliedern.
- → Vorhandene Quellinformationen räumlich und zeitlich sortieren und verorten, beispielsweise in Generalplänen.
- → Die Übersicht / Erreichbarkeit der Daten klären.
- → Bei unklarer Befundlage Auslassungen oder mehrere Alternativhypothesen im Modell präsentieren.
- → Eine Strategie zu Häufigkeit und zeitlicher Verortung von Korrekturen entwickeln.
- → Für eine Kontrolle wesentlich sind visuelle Vergleiche, beispielsweise von Modellansichten und Quellen.
- → Breit etablierte und für alle Beteiligten zugängliche Austauschformate nutzen.
- → Nicht erfolgte Korrekturen dokumentieren.
- → Entscheidungen in geeigneter Skalierung aktiv kommunizieren und auf eine breite Basis stellen.
- → Stakeholder regelmäßig informieren.
- → Strukturierte **Problemlisten** aufstellen und im Vorfeld einer Besprechung übermitteln.
- → Eine einfache Sprache sowie intuitive Formate wie beispielsweise Bilder nutzen.
- → Skizzen und Zeichnungen als Hilfsmittel nutzen.
- → Quellen und Vorgehen im Präsentationsmedium geeignet darstellen.

Auch in Gruppen, wie der **AG Digitale Rekonstruktion** der DHd (Digital Humanities im deutschsprachigen Raum), wird dem Thema Dokumentation große Beachtung geschenkt. Es hat sich ein Arbeitskreis gebildet, der in den verschiedenen Fachdisziplinen den Stand der Technik und mögliche Felder der Zusammenarbeit erarbeiten soll. [34] So wird unter anderem diskutiert, wie man die Dokumentationspraxis verbessern kann. Eine möglichst einfache, schnelle Dokumentation steht zunächst im Widerspruch zur komplexen Ausgestaltung aller möglichen Facetten von Informationen und damit einer den Chartas genügenden Dokumentation.

Da Letztere auch mithilfe der existierenden Werkzeuge aus oben genannten Gründen praktisch kaum angewendet wird, schlagen Pfarr-Harfst & Grellert [35] einen **Minimalstandard** vor. Dieser besteht im Wesentlichen darin, dass den Quellen Bilder der Rekonstruktion gegenübergestellt werden und mit einem geschriebenen Text, der Argumentation, verknüpft werden. Die Argumentation beschreibt, auf welche Quellen, Analogien und Interpretationen die Rekonstruktion basiert. Zusätzlich erfasst werden lediglich Informationen zum Projekt, zu den verantwortlichen Personen und die wichtigsten Metadaten zu den Quellen. Ein wichtiger Aspekt ist, dass dieser **Minimalstandard** auf komplizierte Standards im Hintergrund verzichtet. Auch die technische Realisierung ist somit erheblich vereinfacht. Die Dokumentation kann sogar in analoger Form erfolgen. Durch die Reduktion auf die Eingabe nur der wichtigsten Daten und auch den Verzicht auf die Einbettung der 3D-Modelle zur Echtzeitbetrachtung werden zudem einige Probleme und Herausforderungen bezüglich der Benutzerfreundlichkeit, die komplexe Anwendungen unweigerlich mit sich bringen, umgangen.

Einen anderen Ansatz, der Herausforderung gelingender Projektdokumentation zu begegnen, verfolgen Bruschke & Wacker. [36] Mit dem Dokumentationssystem **DokuVis** soll eine Plattform geschaffen werden, die sich in den Rekonstruktionsprozess von Beginn an integrieren und dem Nutzer so viele Routineaufgaben wie möglich (semi-)automatisiert abnehmen soll. Dementsprechend sollen auch das Projektmanagement und die Kommunikation (z. B. Rückfragen bei Unklarheiten) in das System integriert sein. Ein besonderes Augenmerk liegt auf der intuitiven Bedienbarkeit der Anwendung. So soll sich der Nutzer auf seine wesentlichen Aufgaben konzentrieren können und nicht mit technischen Details überfordert werden. Die Daten werden im Hintergrund konform zum **CIDOC CRM** verknüpft und hinterlegt, Details und die korrekte semantische Verwendung werden vom System sichergestellt.

34
Sander Münster, Piotr Kuroczyński, Mieke Pfarr-Harfst, Marc Grellert, Dominik Lengyel, Future Research Challenges for a Computer-Based Interpretative 3D Reconstruction of Cultural Heritage – A German Community's View, in: ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-5/W3 2015, S. 207–213.

35
Mieke Pfarr-Harfst, Marc Grellert, The Reconstruction – Argumentation Method, in: Marinos Ioannides, Eleanor Fink, Antonia Moropoulou, Monika Hagedorn-Saupe, Antonella Fresa, Gunnar Liestøl, Vlatka Rajcic, Pierre Grussenmeyer (Hg.), Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection: 6th International Conference, EuroMed 2016, Nicosia, Cyprus, October 31–November 5, 2016, Proceedings, Part I, Cham 2016, S. 39–49.

36
Jonas Bruschke, Markus Wacker, Simplifying Documentation of Digital Reconstruction Processes, in: Sander Münster, Mieke Pfarr-Harfst, Piotr Kuroczyński, Marinos Ioannides (Hg.), 3D Research Challenges in Cultural Heritage II: How to Manage Data and Knowledge Related to Interpretative Digital 3D Reconstructions of Cultural Heritage, Cham 2016, S. 256–271.

Eine Anwendung, welche nach Bruschke & Wacker bei 3D-Rekonstruktionsprojekten eine ideale Unterstützung bietet, vereint Elemente aus verschiedenen Bereichen:

- → Einen Explorer (für Quellen und 3D-Modelle), in dem alle anfallenden Daten verwaltet werden.
- → Einen Projektmanagementteil, in dem Aufgaben und Mitarbeiter verwaltet werden.
- → Einen Kommunikationsteil, der bei der Projektdokumentation unterstützt und mit dessen Hilfe Mitarbeiter untereinander kommunizieren können. Hier können Kommentare verschiedener Ausprägung (Quellenkritik, Modellkritik, Bemerkungen) erstellt werden.
- → Einen Konfigurationsteil, in dem die Rechte für die unterschiedlichen Benutzergruppen festgelegt und Mitarbeiter verwaltet werden. Das Programm muss verschiedene Nutzergruppen unterscheiden. Hierbei sollten mindestens Spezialisten wie Historiker, technische Bearbeiter und Projektleiter berücksichtigt und mit unterschiedlichen Rechten bei der Benutzung des Programms ausgestattet werden können. Weitere Rollen wären denkbar, etwa die eines externen Beobachters oder Auftraggebers, der sich mit Hilfe der Anwendung regelmäßig über den Stand des Projektes informieren kann.
- → Eine Datensynchronisation (online und/oder offline).
- → Eine Protokollfunktion.

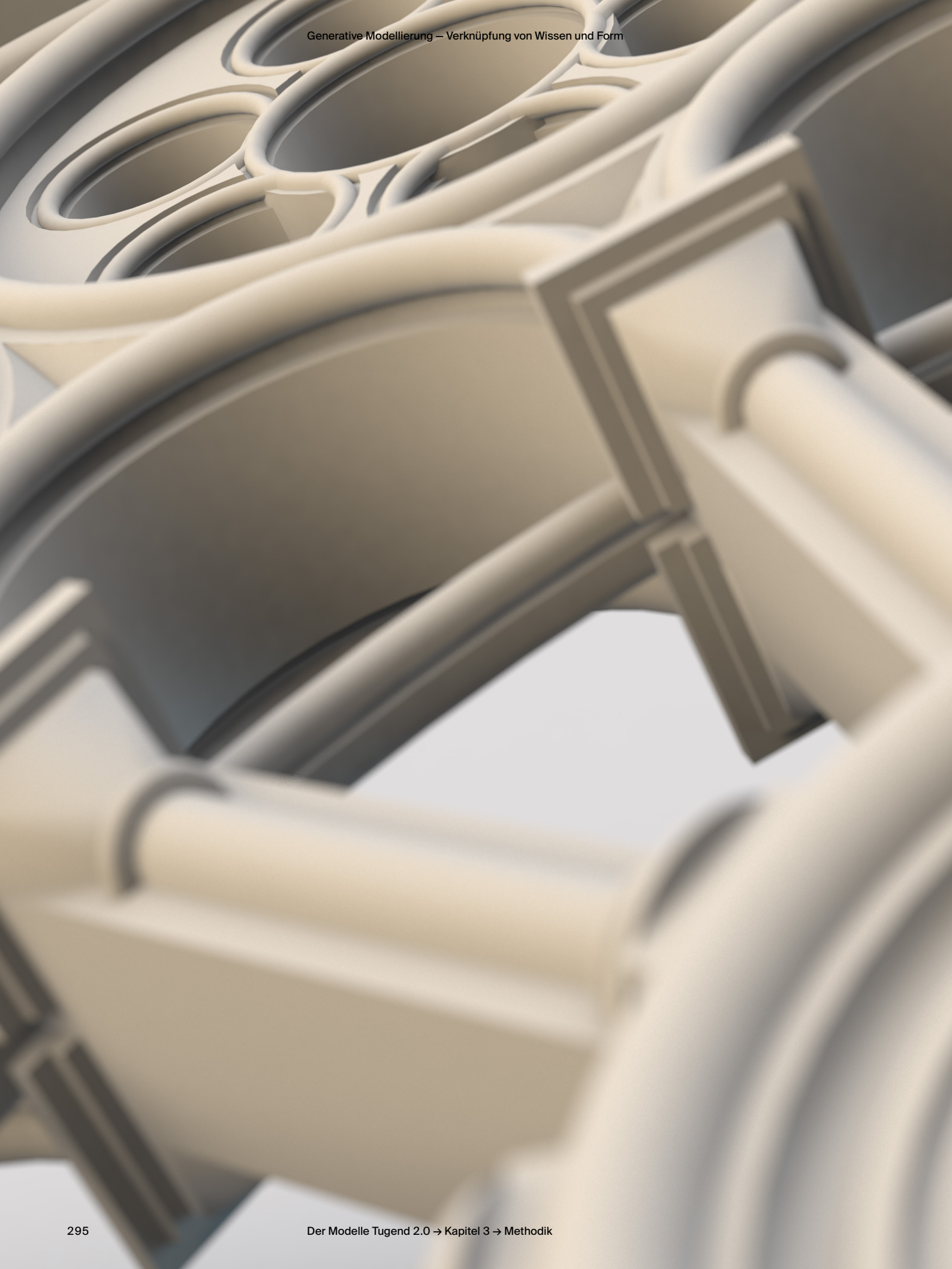
Solche Werkzeuge decken viele verschiedene Bereiche bei der Projektarbeit ab und sind in Teillösungen bereits verfügbar. Die Erfahrungen der verschiedenen Nutzergruppen mit derlei Werkzeugen sind jedoch sehr unterschiedlich ausgeprägt und sollten bei der Entwicklung einer Anwendung streng berücksichtigt werden.

M.5 Zusammenfassung

Es ist allgemeiner Konsens, dass eine gute Dokumentation digitaler Rekonstruktionsprojekte einen enormen Gewinn sowohl während der Projektdurchführung als auch bei der Projektverwertung darstellt. Bisher mangelt es aber vielen Projekten an Projektdisziplin und vor allem an allgemein anerkannten Standards. Es gibt bereits viele Ansätze, die Teilbereiche einer Dokumentation abdecken, aber auch Vorschläge ganzer Dokumentationswerkzeuge und -systeme. Die meisten wurden anhand konkreter Projekte entwickelt, werden aber überwiegend lediglich von den jeweiligen Autoren eingesetzt. Wie variabel die Ansätze auch auf verschiedenste Projekte angewandt werden können, ist ungewiss.

Der besseren Zugänglichkeit wegen setzen die meisten Anwendungen auf eine webbasierte Lösung. Eine noch ungelöste Frage ist jedoch, inwieweit die Systeme und damit auch die Daten auch in Zukunft noch verfügbar sein werden. Dokumentationswerkzeuge böten den Vorteil, dass hier Standards etabliert und von den Projektteilnehmern (über standardisierte Eingaben) eingefordert werden können, so dass ein Austausch der Daten und eine Langzeitarchivierung unterstützt wird. Da Rekonstruktionsprojekte jedoch sehr vielfältig ausfallen können, könnte solch eine Standardisierung aber zu sehr einschränken und nicht allen Anforderungen gerecht werden.

Es ist nun an der Community, die Herausforderung zu meistern, die bestehenden, zum Teil vielversprechenden Lösungsansätze zu einer von allen Seiten akzeptierten Gesamtlösung zusammenzuführen.



Christoph Schinko, Ulrich Krispel, Robert Gregor, Tobias Schreck, Torsten Ullrich

N. Generative Modellierung — Verknüpfung von Wissen und Form

→ Architektur, Generative Modellierung, Geometrische Datenverarbeitung, Produktdesign, Prozedurale Modellierung, Semantische Datenverarbeitung

Die Idee der generativen Modellierung besteht darin, die Generierung von hochkomplexen Objekten auf der Grundlage einer Reihe von formalen Konstruktionsregeln zu unterstützen. Anhand dieser Konstruktionsregeln wird eine Form nicht nur durch das geometrische Endergebnis aller angewandten Operationen, sondern durch eine Abfolge von Bearbeitungsschritten beschrieben: Formgebung wird zum Regeldesign. Dank seines generischen Charakters kann dieser Ansatz auf jede Domäne und jede beliebige Formdarstellung angewendet werden, die entsprechende erzeugende Funktionen bietet. Generative Modellierungstechniken bieten viele interessante Anwendungsvorteile, insbesondere etwa im Kontext der Architektur:
Als Folge von Konstruktionsschritten beschreibt ein generatives Modell nicht nur ein Gebäude, sondern umfasst in gewisser Art auch das Wissen, wie es zu bauen ist. Diese Metainformationen werden unter anderem in Bibliotheksdiensten benötigt, um 3D-Daten sinnvoll zu indizieren und zu archivieren.
Dieses Wissen kann genutzt werden, um z. B. Laserscans automatisch nach Architekturstilen und -perioden zu klassifizieren. Eine maschinenlesbare Darstellung, wie etwas gebaut wird, kann verwendet werden, um fehlende Teile mit plausiblen Schätzungen zu ergänzen. Weitere vielversprechende Anwendungsgebiete sind die Klassifizierung und Restaurierung von Kulturgütern oder die Unterstützung semantischer Techniken im Maschinenbau.
Dieses Kapitel beschreibt das Paradigma der generativen Modellierung. Dabei steht die Kombination aus semantischen Informationen mit der Kodierung von Konstruktionsschritten im Mittelpunkt. Die Anwendungsmöglichkeiten werden an den Beispielen der Modellklassifizierung, Identifikation und der Formrekonstruktion illustriert.

N.1 Motivation

Die Beschreibung von 3D-Formen ist heute eine wichtige Voraussetzung für viele Anwendungen, z. B. im Bereich industrielle Fertigung (Formbeschreibung von Bauteilen), Stadtplanung und Architektur (Gebäude und Pläne der technischen Gebäudeausrüstung) oder Simulation (Formbeschreibung von Oberflächen). In der Computergrafik und der computergestützten Geometrie wurden bis heute viele Formrepräsentationen vorgestellt, um Formeigenschaften zu kodieren und zu verarbeiten, beispielsweise für die Modellierung, die Visualisierung und die Suche. Viele Formrepräsentationen sind **explizit**, d. h. sie kodieren direkt die Oberfläche oder das Volumen einer Form. Eine sehr einfache und weit verbreitete Variante direkter Kodierung ist z. B. die explizite Kodierung von Koordinaten und der Konnektivität der Eckpunkte eines Polygonnetzes. Im Gegensatz dazu beruhen generative Repräsentationen und Modellierungswerkzeuge auf der **impliziten** Kodierung von Formen. Diese beinhalten in der Regel algorithmische Vorschriften, durch welche eine Form anhand einer Menge von Basisformen und Operationen erzeugt wird. Generative Modellierung ist ein mächtiges Werkzeug für viele Anwendungsfälle wie etwa für die effiziente Generierung von Formvariationen oder musterbasiertes Suchen von Formen. Wir führen in diesem Kapitel in die Grundlagen des generativen Modellierens ein und geben eine Reihe von Anwendungsbeispielen, welche den Nutzen der Techniken veranschaulichen. Darüber hinaus beschreiben wir einige interessante Probleme für zukünftige Arbeiten.

N.2 Geometrische Sprachen

Ein **generatives Modell** ist eine algorithmische Beschreibung, die während der Ausführung erzeugende und modifizierende Funktionen aufruft. Das Endergebnis ist eine Instanz einer Familie von Modellen, die durch den Algorithmus und der Menge aller möglichen Aufrufparameter repräsentiert wird. 01 Die Umsetzungen dieses theoretischen Konzepts können wie folgt gruppiert werden: **Regelbasiert**: Ersetzungsregeln und deren sukzessive Anwendung auf eine initiale, einfache Datenstruktur erzeugen komplexe, geometrische Strukturen. 02 **Skriptbasiert**: Der Einsatz eines Interpreters oder eines Übersetzers erlaubt die Verwendung beliebiger Programmiersprachen zur Erzeugung geometrischer Gebilde. 03 **Datenflussbasiert**: Generative Modelliersysteme mit grafischer Oberfläche arbeiten oft mit Datenflussgraphen, die Modellierprozesse auf formale Beschreibungen abbilden. 04

Alle Ansätze haben ihren Ursprung im Übersetzerbau — jener Disziplin der Informatik, die sich mit dem Entwurf und der Programmierung von Compilern beschäftigt. Compiler sind Computerprogramme, die den Quelltext einer höheren Programmiersprache in den Zielcode in Maschinensprache übersetzen. Dort werden algorithmische Beschreibungen auf der Basis der zugrunde liegenden Grammatik klassifiziert. Laut **Chomsky-Hierarchie** ist eine Beschreibung, d. h. eine Sprache, rekursiv aufzählbar, kontextsensitiv, kontextfrei, oder regulär. Um eine algorithmische Beschreibung ausführen zu können, sind — unabhängig von der Ausführung durch einen Interpreter oder durch einen Übersetzer — folgende Schritte notwendig: Erstens: die lexikalische Analyse. Sie zerteilt den eingelesenen Quelltext in lexikalische, elementare Einheiten, die Tokens genannt werden. Zweitens: die syntaktische Analyse, auch Parsing genannt. Durch sie wird der Syntaxbaum erstellt. Drittens: die semantische Analyse. Sie vervollständigt den Syntaxbaum mit Attributen, unter anderem durch die Auflösung von Variablennamen.

Im Kontext der generativen Modellierung ist eine weitere Klassifizierung relevant. Sie orientiert sich am Berechnungsmodell und der Berechenbarkeit. Die Verwendung einer Turing-mächtigen 05 Programmiersprache in einem Modelliersystem führt zu Problemen in der Nutzererfahrung. Aufgrund des Halteproblems kann die Terminierung eines algorithmischen Modells nicht vorab bestimmt werden, Endlosschleifen können also nicht immer erkannt werden und müssen explizit beendet werden. Diese Situationen werden vermieden, wenn die algorithmische Beschreibungssprache nicht Turing-mächtig ist, sondern lediglich primitiv-rekursive Funktionen erlaubt.

01
Ulrich Krispel, Christoph Schinko, Torsten Ullrich, The Rules Behind — Tutorial on Generative Modeling, in: Proceedings of Symposium on Geometry Processing / Graduate School 12, 2014, S. 2:1–2:49.

02
Lars Krecklau, Darko Pavic, Leif Kobbelt, Generalized Use of Non-Terminal Symbols for Procedural Modeling, in: Computer Graphics Forum 29, 2010, S. 2291–2303; Pascal Müller, Peter Wonka, Simon Haegler, Andreas Ulmer, Luc Van Gool, Procedural Modeling of Buildings, in: Proceedings of ACM Siggraph 25 (3) 2006, S. 614–623.

03
Christoph Schinko, Martin Strobl, Torsten Ullrich, Dieter W. Fellner, Scripting Technology for Generative Modeling, in: International Journal on Advances in Software 4, 2011, S. 308–326.

04
Markus Lipp, Peter Wonka, Michael Wimmer, Interactive Visual Editing of Grammars for Procedural Architecture, in: ACM Transactions on Graphics 27 (3) 2008, S. 1–10 und Wolfgang Thaller, Ulrich Krispel, Sven Havemann, Dieter W. Fellner, Implicit Nested Repetition in Dataflow for Procedural Modeling, in: Proceedings of the International Conference on Computational Logics, Algebras, Programming, Tools, and Benchmarking (Computation Tools) 3, 2012, S. 45–50.

05
Eine Turing-mächtige Programmiersprache ist nach der Berechenbarkeitstheorie von Alan Turing (britischer Mathematiker, 1912–1954) eine universelle Programmiersprache, in der jede Berechnung ausgedrückt werden kann, die sich in irgendeiner maschinenlesbaren Beschreibung ausdrücken lässt.

N.3 Geometrische Modelle

Als geometrische Modellierung bezeichnet man Methoden zur computergestützten Beschreibung der Formen geometrischer Objekte. Diese Methoden beinhalten unter anderem Computer-Aided Geometric Design (CAGD), algebraische Geometrie sowie algorithmische Geometrie. 06 CAGD beschäftigt sich mit der mathematischen Beschreibung von Kurven und Flächen hauptsächlich unter Verwendung parametrischer Gleichungen der Differentialgeometrie. Die Kombination von einfachen Formen zu komplexeren Modellen mittels boolescher Algebra wird Constructive Solid Geometry (CSG) genannt und ist ein prominenter Vertreter von Solid Modeling. Algebraische Geometrie ist die Erweiterung der klassischen analytischen Geometrie. Algorithmische Geometrie beschäftigt sich mit Design und Analyse von geometrischen Algorithmen mit Verbindungen zu numerischen Methoden, Berechenbarkeitstheorie und Komplexitätsanalyse. Die Wahl der Beschreibung ist oft eng mit der Aufgabe bzw. den technischen Gegebenheiten verbunden.

06
Michael E. Mortenson, Geometric Modeling, in: John Wiley & Sons, 1985.

N.4 Geometrische und semantische Informationen

Ein prominentes Beispiel für den Einsatz generativer Techniken zur Modellierung sind die sogenannten **Formgrammatiken**. Sie wurden von Stiny und Gips 07 zur generativen Beschreibung von Bildern entwickelt. Dazu wurden Ansätze aus der formalen Sprachtheorie nach Noam Chomsky 08 verwendet. Dieser Ansatz wurde zur generativen Beschreibung von Architektur weiterentwickelt. 09 10 Bei diesen Ansätzen beschreibt die Menge der Regeln die Konstruktionsvorschriften, welche die Erstellung eines Gebäudes beeinflussen. Moderne Ansätze beschreiben die Erstellung eines Gebäudemodells in mehreren Stufen: Wie in der Architektur üblich, zuerst in Form eines groben Massenmodells; schrittweise werden dann Details (durch Anwendung von Regeln) hinzugefügt.

07
George Stiny, James Gips, Shape Grammars and the Generative Specification of Painting and Sculpture, in: Best computer papers of 1971 1, 1971, S.125–135.

08
Noam Chomsky, Three models for the description of language, in: IRE Transactions on Information Theory 2, 1956, S. 113–124.

09
Peter Wonka, Michael Wimmer, François Sillion, William Ribarsky, Instant Architecture, in: International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, ACM SIGGRAPH 2003 22 (3) 2003, S. 669–677.

10
Pascal Müller, Peter Wonka, Simon Haegler, Andreas Ulmer, Luc Van Gool, Procedural Modeling of Buildings, in: Proceedings of ACM Siggraph 25 (3) 2006, S. 614–623.

Der Aufbau entspricht also einer Grob-nach-fein-Struktur. Thaller et al. 11 und Zmugg et al. 12 nutzen volumenbasierte Verfeinerungsregeln mit konvexen Polyedern als Grundmodellierprimitiv. Ihr Regelsystem erlaubt einen gewissen Freiheitsgrad in der Form, auf die es angewendet wird, und passt sich dann automatisch an. Dadurch werden parametrische Modelle möglich, wie sie in 01 gezeigt sind.

■ **11**
Wolfgang Thaller, Ulrich Krispel, René Zmugg, Sven Havemann, Dieter W. Fellner, Shape grammars on convex polyhedra, in: Computers & Graphics 37 (6) 2013, S. 707–717.

■ **12**
René Zmugg, Ulrich Krispel, Wolfgang Thaller, Sven Havemann, Martin Pszeida, Dieter W. Fellner, A New Approach for Interactive Procedural Modelling in Cultural Heritage, in: Proceedings of the 40th Conference of Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, 2012, S. 190–204.

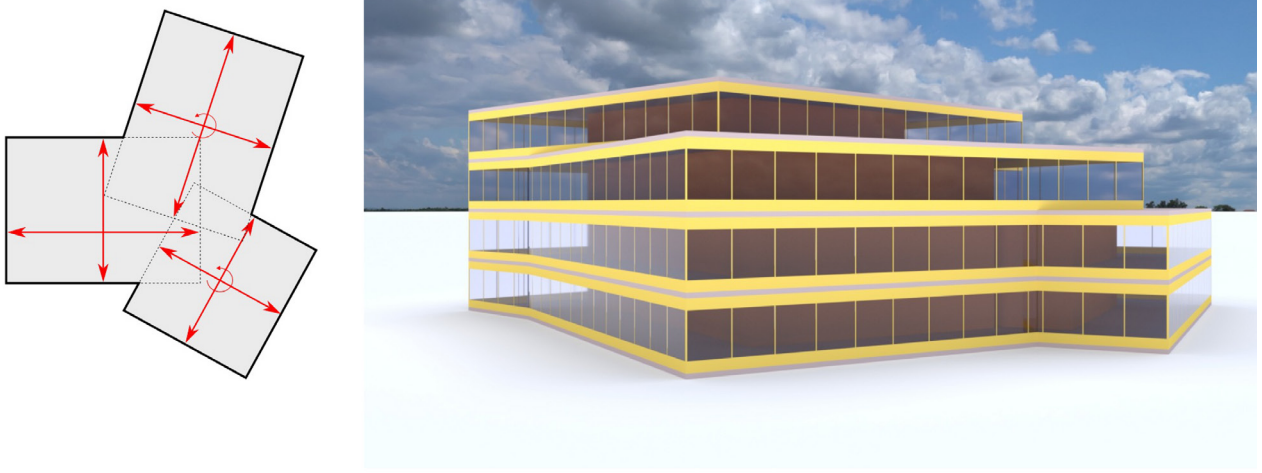
□ 01
Das Modell links ist von der Rialto-Brücke in Venedig inspiriert, sein Hauptparameter ist sein Neigungswinkel. Das Modell rechts zeigt eine virtuelle Rekonstruktion des äußeren Teils vom Ostflügel-Pavillon des Louvre. Durch den Einsatz parametrisierter Elemente können Teile des Modells (durch Austausch von Regeln) nachträglich verändert werden.

Basierend auf diesen hochentwickelten parametrischen Entwurfssystemen und Skripting-Techniken hat die Verwendung von Animations-, Simulations- und Formfindungstechniken eine neue Architekturrichtung mit radikal neuen Zielen und Werten inspiriert: den **Parametrismus.** 13

Im nächsten Beispiel werden semantische Informationen genutzt, welche durch die generative Beschreibung verfügbar sind: Thaller et al. 14 entwickelten eine Klasse von generativen Gebäudemodellen, welche neben einer Voransicht auch eine Abschätzung der Energieeffizienz ermöglichen.
Der Klient kann so schon frühzeitig ein Gefühl dafür entwickeln, wie sich Designentscheidungen ökonomisch auswirken. Die generative Beschreibung besteht in diesem Beispiel aus mehreren Grundformen 02. Die Auswertung der Beschreibung zeichnet entsprechende geometrische Einzelteile gemäß ihrer Materialien aus, gruppiert die konkreten Flächenanteile nach Himmelsrichtungen und liefert damit eine Schätzung der Energieeffizienz.

■ **13**
Patrik Schumacher, Parametricism: A New Global Style for Architecture and Urban Design, in: Architectural Design — Digital Cities 79 (4) 2009, S. 14–23.

■ **14**
Wolfgang Thaller, Ulrich Krispel, Sven Havemann, Ivan Redi, Andrea Redi, Dieter W. Fellner, Developing Parametric Building Models — the GANDIS Use Case, in: Proceedings of the 4th ISPRS International Workshop 3D-ARCH, 2011, S. 163–170.



□ 02
Ein generatives Gebäudemodell ermöglicht es, die Grundform eines Gebäudes mit einigen wenigen Parametern zu beschreiben (links). Die Auswertung der generativen Beschreibung liefert ein 3D-Modell (rechts) inklusive einer Abschätzung der Energieeffizienz.

Ein weiteres Einsatzgebiet generativer Beschreibungen ist das **Produktdesign**. Berndt et al. 15 zeigen am Beispiel von Eheringen, dass sich mit einer generativen Beschreibung eine Vielzahl an möglichen Variationen realisieren lässt. Die Form eines Ringes wird dabei aus einem Profilpolygon, der Anzahl an Profilen, dem Radius, einer Profiltransformationsfunktion und weiteren Merkmalen wie verwendetem Material und ggfs. Besatz mit Edelsteinen erstellt. Diese generative Beschreibung deckt den Designraum von Eheringen einer Ringmanufaktur ab. 03 zeigt einige Beispiele von Ringen, die erzeugt werden können. Zusätzlich zur visuellen Repräsentation lassen sich auch zusätzliche Information in die generative Beschreibung einbinden, die es erlauben, z. B. den Materialbedarf und den Preis des Ringes zu berechnen.

■ **15**
René Berndt, Christoph Schinko, Ulrich Krispel, Volker Settgast, Sven Havemann, Eva Eggeling, Dieter W. Fellner, Ring's Anatomy — Parametric Design of Wedding Rings, in: Proceedings International Conference on Creative Content Technologies 4, 2012, S. 72–78.

□ 03
Mit der generativen Beschreibung kann eine Vielzahl von Eheringen unterschiedlichster Ausführung erzeugt werden.

Die konzeptionelle Nähe einer generativen Beschreibung zu Algorithmen und deren Implementation in Programmiersprachen ermöglicht die Verknüpfung **semantischer Informationen** mit erzeugenden Funktionen. Strukturierte Kommentare kennzeichnen Klassen, Schnittstellen und Methoden sowie zugehörige Attribute. Diese Beschreibungen umfassen in der Regel die Autorenschaft sowie den Typennamen, den Methodennamen, die Art und die Anzahl der Parameter, die Wirkung der Methoden und das Laufzeitverhalten des kommentierten Quelltexts. Diese Metadaten, die den Algorithmus und den zugrunde liegenden Erzeugungsprozess beschreiben, können auf die erzeugte Geometrie übertragen werden und so die finale Form semantisch anreichern. Auf den ersten Blick scheinen diese Metadaten minimalistisch und **flach** — vergleichbar mit dem **Dublin-Core Modell**. Der große Unterschied entsteht jedoch in der Auswertung der strukturierten Kommentare und Annotationen zur Laufzeit, d. h. während der Interpretation des Algorithmus. Die hierarchischen Strukturen des Kontrollflussgraphen und des Programmablaufs können genutzt werden, um ontologische Ordnungen und Taxonomien auf die 3D-Struktur, ihre Teilstrukturen, Variablen und Funktionen abzubilden. Neben der semantischen Anreicherung ist insbesondere die Überwindung und Verknüpfung unterschiedlicher Inhaltsformen nennenswert: Da Ontologien und Taxonomien textuell definiert sind, macht ihre Abbildung auf 3D-Teilstrukturen es möglich, in diesen textuell zu suchen. In der Softwareentwicklung werden strukturierte Kommentare und Annotationen vorwiegend intern genutzt und nur selten dem Benutzer offengelegt; im Kontext der generativen 3D-Modellierung ist es jedoch sinnvoll, diese Informationen explizit bereitzustellen.

N.5 Identifikation, Klassifikation und Rückgewinnung von Informationen

Techniken zur generativen Modellierung finden auch im Bereich von **Information-Retrieval-Systemen** vielfältige Anwendung. Retrieval-Systeme im Allgemeinen werden dazu eingesetzt, um in größeren Sammlungen Objekte anhand ihrer Ähnlichkeiten zu suchen oder zu klassifizieren. [16] [17] [18]
Der klassische Ansatz für dieses Problem besteht in der Extraktion sogenannter **Feature-Vektoren** aus jedem Objekt einer zu durchsuchenden Sammlung. Feature-Vektoren stellen aus mathematischer und algorithmischer Sicht eine stark vereinfachte Repräsentation der Ausgangsobjekte dar, auch wenn sie im Allgemeinen hochdimensional sind. Meist werden sie aus einer expliziten Repräsentation eines 3D-Modells extrahiert. Im Gegensatz zur impliziten Repräsentation kodieren Feature-Vektoren in der Regel nicht genügend Informationen, um die Form des ursprünglichen Objekts vollständig aus ihnen rekonstruieren zu können. Feature-Vektoren können direkt zu Zwecken der Ähnlichkeitsberechnung genutzt werden, etwa durch die Berechnung ihrer euklidischen Distanz oder anderer Metriken. [19]

Retrieval-Techniken können aber auch für die Klassifizierung von 3D-Objekten benutzt werden. Bei gegebener Klassifizierung einer Sammlung von 3D-Modellen (dem Objektraum) kann die Klasse eines neu hinzugefügten Objekts z. B. durch eine Ähnlichkeitssuche nach den bereits klassifizierten Modellen gefunden werden. Die Klassifizierung und die Distanz der ähnlichsten Objekte dienen anschließend als Basis für die Klassifikation des neuen Objekts. Generative Modellierung kann in diesem Zusammenhang auf vielfältige Weise genutzt werden. Die folgenden Abschnitte beschreiben nur einige ausgewählte Anwendungsszenarien, es gibt darüber hinaus noch andere. 3D-Feature-Vektoren werden meist aus expliziten Repräsentationen von 3D-Objekten extrahiert, sie lassen sich jedoch auch sehr einfach aus generativen Beschreibungen von 3D-Objekten extrahieren. Soll etwa die Ähnlichkeit zwischen verschiedenen Instanzen ermittelt werden, die aus derselben generativen Beschreibung mit unterschiedlichen Parametern erzeugt konkateniert werden.

16
Johan W. H. Tangelder, Remco C. Veltkamp, A survey of content based 3D shape retrieval methods, in: Multimedia Tools and Applications 39 (3) 2008, S. 441–471.

17
Michalis Savelonas, Ioannis Pratikakis, Konstantinos Sfikas, Partial 3D Object Retrieval combining Local Shape Descriptors with Global Fisher Vectors, in: Eurographics Workshop on 3D Object Retrieval 8, 2015, S. 23–30.

18
Christoph Schinko, Thomas Vosgien, Thorsten Prante, Tobias Schreck, Torsten Ullrich, Search and Retrieval in CAD Databases — a user-centric State-of-the-Art Overview, in: Proceedings of the International Joint Conference on Computer Vision and Computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAPP), 12, 2017, S. 306–313.

19
Robert Gregor, Andreas Lamprecht, Ivan Sipiran, Tobias Schreck, Benjamin Bustos, Empirical Evaluation of Dissimilarity Measures for 3D Object Retrieval with Application to Multi-feature Retrieval, in: Proceedings 13th International Workshop on Content-Based Multimedia Indexing (CBMI 15), 2015.

Generative Techniken können im Kontext des Information Retrieval verwendet werden, um den Objektraum, also die Menge aller Objekte einer Objektklasse oder Domäne, aufzuspannen. Der Objektraum als solcher wird durch einzelne **Vertreterobjekte** repräsentiert. Diese Vertreterobjekte, die aus einem konkreten Satz von Parametern erstellt wurden, dienen in der Arbeit von Grabner et al. [20] als Trainingsobjekte für inhaltsbasierte Retrievalmethoden: Als generative Objektklassen dienen u. a. Autos (Limousinen). Diese Objektklasse wird verwendet, um Trainingsdaten für inhaltsbasierte Retrievalmethoden zu erstellen. Obwohl keines der generierten Modelle im Princeton Shape Benchmark [21] enthalten ist, kann dieser mit der generativen Beschreibung klassifiziert werden; d. h. die generative Beschreibung einer Limousine ist ausreichend, um mittels Ähnlichkeitssuche alle Limousinen zu identifizieren.

Als **inverse generative Modellierung** wird eine Technik bezeichnet, die ein generatives Modell so parametriert, dass es einem konkreten Objekt (vielmehr der digitalen Repräsentation davon) möglichst entspricht. In der Arbeit von Ullrich und Fellner [22] wird ein Algorithmus beschrieben, der folgende Fragen beantwortet:

- → Kann ein konkretes Objekt (die Punktwolke eines 3D-Scans) durch ein generatives Modell beschrieben werden?
- → Ist dies der Fall, was sind die Parameter des generativen Modells, um eine gute Beschreibung des konkreten Objekts zu erhalten?

Die Implementierung verwendet hierarchische Optimierungsroutinen, die auf unscharfer Geometrie basieren. Dafür wird die generative Beschreibung als Funktion mit Parametern betrachtet. Die Registrierung bzw. die Parameterschätzung basiert auf der Minimierung einer Fehlerfunktion. Der Optimierungsalgorithmus bestimmt die Parameter so, dass der geometrische Abstand möglichst vieler Punkte der Punktwolke zum generativen Modell minimal ist. Im Zuge der Optimierung ist es erforderlich, die Ableitung der generativen Beschreibung zu bilden. Schinko et al. [23] haben für diesen Zweck die Programmierumgebung Euclides entwickelt, welche Algorithmen mathematisch differenzieren kann.

■ **20**
Harald Grabner, Torsten Ullrich, Dieter W. Fellner, Content-based Retrieval of 3D Models using Generative Modeling Techniques, in: Proceedings of EUROGRAPHICS Workshop on Graphics and Cultural Heritage (Short Papers / Posters) 12, 2014, S. 9–12.

■ **21**
Philip Shilane, Patrick Min, Michael Kazhdan, Thomas Funkhouser, The Princeton Shape Benchmark, in: Shape Modeling International 8, 2004, S. 1–12.

■ **22**
Torsten Ullrich, Dieter W. Fellner, Generative Object Definition and Semantic Recognition, in: Proceedings of the Eurographics Workshop on 3D Object Retrieval 4, 2011, S. 1–8.

■ **23**
Christoph Schinko, Martin Strobl, Torsten Ullrich, Dieter W. Fellner, Scripting Technology for Generative Modeling, in: International Journal on Advances in Software 4, 2011, S. 308–326.

N.6 Neue Anwendungen der Generativen Modellierung aus aktuellen Forschungsprojekten

Methoden der generativen Modellierung können die semantische Lücke zwischen Domänenwissen und Geometrie verringern. Wir besprechen im Folgenden exemplarische Forschungsergebnisse aus unserer Arbeit. Dort wird generative Modellierung zur semantischen Anreicherung und Klassifikation von Gebäudedaten und Kulturgut sowie zur Restauration von unvollständig erhaltenen archäologischen Artefakten eingesetzt.

N.7 Projekt DURAARK: Anreicherung von Gebäudedaten mit generativer Modellierung

Im Kontext des sogenannten **Building Information Modeling** (BIM) wird der gesamte Lebenszyklus eines Gebäudes digital abgebildet [24] — von der Planung und Konstruktion über dessen Nutzung und Instandhaltung bis zum Abriss und der Dokumentation für die Nachwelt. Diese Daten sind für viele Gruppen von großem Interesse: für Architekten und Städteplaner, das Facility Management, aber auch für die breite Bevölkerung. Für Gebäude, die in jüngster Zeit gebaut wurden, sind viele dieser Daten bereits digital vorhanden. Für viele ältere Gebäude sind Gebäudedaten jedoch entweder gar nicht vorhanden oder nicht in einem kohärenten Modell zusammengeführt. Im Rahmen des EU-Forschungsprojektes **DURAARK** (Durable Architectural Knowledge) wurden Methoden und Werkzeuge für die automatische inhaltsbasierte Anreicherung von digitalen Gebäudedaten und deren Langzeitarchivierung geschaffen. BIM-Daten bestehen im Wesentlichen aus zwei Ausprägungen von Information: einerseits geometrischer Information, wie z. B. Grundrisspläne, 3D-Modelle, Form und Verlauf von Leitungsrohren und dergleichen, und andererseits semantischer Information, wie Materialeigenschaften, Ereigniszeitpunkte oder Verknüpfung mit für die Planung und den Bau verantwortlichen Personen und vieles mehr.

Die Datenanreicherung im DURAARK-Projekt fokussiert auf semantische Anreicherung durch Nutzbarmachung von Werkzeugen der Semantic-Web-Technologie: In der Arbeit von Yu et al. [25] wurde ein sog. **focused crawler** entwickelt, welcher nach einer vorgegebenen Stichwortmenge öffentlich verfügbare Daten sucht und indiziert. Damit kann beispielsweise ein Gebäude aus dem öffentlichen Raum automatisch mit relevanten, öffentlich verfügbaren Daten verknüpft werden — wie zum Beispiel dem Verlauf des Wetters an der Gebäudeposition oder der Biografie des Erbauers.
Der zweite Teil, die geometrische Anreicherung, besteht in der Erfassung von geometrischen Baubestandsdaten durch Vermessung sowie der Ableitung zusätzlicher, schwer zu vermessender Daten: Das Verfahren von Ochmann et al. [26] erlaubt es, Grundrisspläne und Raumverbindungsgraphen aus Abstandsmessdaten (Punktwolken) abzuleiten sowie Elemente wie Türen und Fenster einzelnen Wänden dieses digitalen Modells zuzuordnen. Aus dieser Repräsentation wird in Kombination mit Bildinformationen (Fotos) in dem Verfahren von Krispel et al. [27] die Position von Stromleitungen ermittelt: Aus Bilddaten werden sichtbare Endpunkte von Stromleitungen, wie z. B. Schalter oder Steckdosen, über einen Klassifikationsalgorithmus identifiziert, welcher mit einem repräsentativen Set von Schaltern und Steckdosen trainiert wurde. Anhand der Positionen der Wände, der bekannten Raumverbindung und den Endpunkten wird unter Einbeziehung der geltenden technischen Normen die Lage der Leitungen ermittelt — die Normen werden über einen Regelsatz beschrieben, also ein generatives System. Mit diesen Regeln wird für die endgültige Hypothese der Suchraum für die Leitungsverläufe auf die den technischen Normen entsprechenden Fälle beschränkt.

■ **24**
Chuck Eastman, Paul Teicholz, Rafael Sacks, Kathleen Liston, BIM Handbook — A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors, in: John Wiley & Sons, Inc., 2008.

■ **25**
Ran Yu, Ujwal Gadiraju, Besnik Fetahu, Stefan Dietze, Adaptive Focused Crawling of Linked Data, in: 16th International Conference on Web Information Systems, Springer International Publishing, 2015, S. 554–569.

■ **26**
Sebastian Ochmann, Richard Vock, Raoul Wessel, Reinhard Klein, Automatic Reconstruction of Parametric Building Models from Indoor Point Clouds, in: Computers & Graphics 54, 2016, S. 94–103.

■ **27**
Ulrich Krispel, Henrik Evers, Martin Tamke, Torsten Ullrich, An Automatic Hypothesis of Electrical Lines from Range Scans and Photographs, in: Proceedings 16th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering 7, 2016, S. 815–822.

N.8 Projekt CityFit: Klassifikation von Gebäudefassadenelementen mit generativer Modellierung

Eine wichtige Aufgabe der Digitalisierung ist die Erfassung von digitalen Gebäudemodellen aus realen Gebäuden. Methoden der geometrischen Rekonstruktion von Gebäuden aus Messdaten unterliegen dabei typischerweise Ungenauigkeiten bei der Bemessung und / oder Rekonstruktion. Daher kann es von großem Nutzen sein, entsprechendes Vorwissen in die Rekonstruktion miteinfließen zu lassen beziehungsweise zu versuchen, die Designidee des Architekten mit zu rekonstruieren. Zum Beispiel kann die Konfidenz 28 eines schlecht erkannten Fensters erhöht werden, wenn im Stockwerk darunter und darüber Fenster mit hoher Konfidenz erkannt wurden und in der Fassade Fenster üblicherweise immer spaltenweise angeordnet sind.

Die bereits vorgestellten Formgrammatiken (engl. **shape grammars**) wurden im österreichischen Forschungsprojekt CityFit verwendet, um typische Strukturen der klassischen Architektur, wie z. B. Symmetrie und Wiederholung, in eine Rekonstruktion am Beispiel von neoklassischen Fassaden einfließen zu lassen. Im Verfahren von Riemenschneider et al. 29 wird eine orthogonale Projektion der Fotoaufnahme einer Fassade mithilfe einer zweidimensionalen Formgrammatik analysiert. Diese Grammatik erlaubt Operationen der Unterteilung (Split) sowie in der Architektur übliche Unterteilungs- und Symmetrieregeln. Für jeden Pixel einer orthografischen Ansicht der Fassade wird zuerst eine Klassifizierung in Strukturelemente durchgeführt mit den Klassen Wand, Fenster, Tür etc. Anhand dieser Klassifizierung wird dann ein **Parse-Baum** der Shape-Grammatik abgeleitet, ähnlich dem Parsen von formalen Grammatiken im Compilerbau. Dieser Parse-Baum enthält die konkrete Abfolge der Grammatikoperationen, deren Auswertung Bereiche der Fassade in die entsprechenden Elemente klassifiziert. Einerseits wird durch Einbeziehen der Strukturregeln das Klassifizierungsergebnis verbessert, andererseits kann der Parse-Baum direkt in eine andere generative Beschreibung transformiert werden, welche z. B. ein 3D-Modell der Fassade generiert.

28
Unter Konfidenz versteht man die statistisch-stochastische Zusicherung, dass ein berechnetes (fehlerbehaftetes) Ergebnis mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zutreffend ist.

29
Hayko Riemenschneider, Ulrich Krispel, Wolfgang Thaller, Michael Donoser, Sven Havemann, Dieter W. Fellner, Horst Bischof, Irregular lattices for complex shape grammar facade parsing, in: Proceedings of the 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2012, S. 1640–1647.

N.9 Projekt ProFits: Klassifikation von Kulturgut mit generativer Modellierung

Ein generatives Modell beschreibt ein **prozedurales Wissen** 30 — die Grundlage einer fundierten Schätzung der fehlenden Daten. Das folgende Beispiel illustriert eine mögliche Anwendung: 31 04 zeigt ein Artefakt der Sammlung des Museums Eggenberg in Graz sowie ein generatives Modell (in der Mitte), welches den Aufbau der Vasen beschreibt. Die generative Beschreibung hat 13 Freiheitsgrade, die in ihrer Gesamtheit das geometrische Spektrum der Familie dieser Artefakte abdecken.

In einem ersten Schritt wird die generative Beschreibung mit dem 3D-Scan registriert. Dieses sogenannte **Fitting** bestimmt die Parameter der generativen Beschreibung so, dass das algorithmische Ergebnis der Beschreibung mit genau jenen Parametern zu einem 3D-Modell führt, welches den 3D-Scan am besten beschreibt. 32 In einer anschließenden Varianzanalyse werden die Unterschiede zwischen dem 3D-Scan und der generativen Instanz berechnet. 33 Die Abweichung beider Modelle zueinander beschreibt die Güte des Fitting-Ergebnisses. Ist das Ergebnis gut genug, kann der 3D-Scan vervollständigt werden. Dazu werden im dritten Schritt, der sogenannten Varianzdokumentation, beide Modelle zusammengefügt. Der 3D-Scan, die **verrauschte Realität**, wird dann — ohne Fehler oder Datenverlust — als Offset der idealen Beschreibung gespeichert.

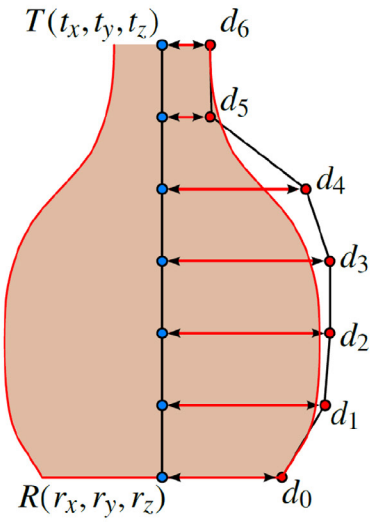
■ 30
Christoph Schinko, Martin Strobl, Torsten Ullrich, Dieter W. Fellner, Modeling Procedural Knowledge — a generative modeler for cultural heritage, in: Proceedings of EUROMED 2010 — Lecture Notes on Computer Science 6436, 2010, S. 153–165.

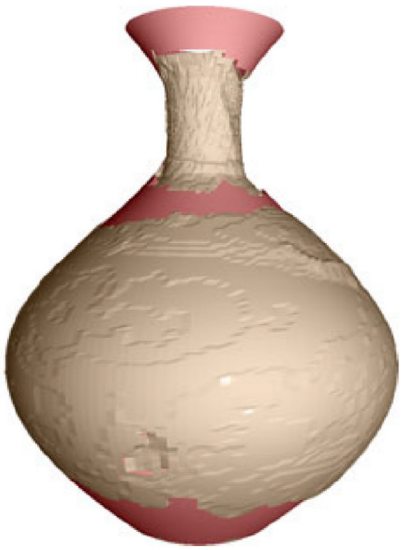
■ 31
Torsten Ullrich, Christoph Schinko, Thomas Schiffer, Dieter W. Fellner, Procedural Descriptions for Analyzing Digitized Artifacts, in: Applied Geomatics 5 (3) 2013, S. 185–192.

■ 32
Torsten Ullrich, Dieter W. Fellner, Generative Object Definition and Semantic Recognition, in: Proceedings of the Eurographics Workshop on 3D Object Retrieval 4, 2011, S. 1–8.

■ 33
Torsten Ullrich, Volker Settgast, Dieter W. Fellner, Abstand: Distance Visualization for Geometric Analysis, in: Proceedings of the Conference on Virtual Systems and MultiMedia Dedicated to Digital Heritage (VSMM) 14, 2008, S. 334–340.

□ 04
Generative Methoden ermöglichen automatische Verfahren zur semantischen Datenanreicherung. Eingangsdaten links, das generative Modell Mitte und die Vervollständigung rechts.





Dieser Ansatz bietet mehrere Vorteile. Die Registrierung und die Varianzanalyse erkennen automatisch die Zugehörigkeit eines 3D-Scans zu einer Artefaktfamilie. Ist der Fehler klein genug, kann — wie im Beispiel — ein 3D-Scan eindeutig als Vase identifiziert werden. Zusätzlich werden bei der Bestimmung der Parameter **direkte** Kenngrößen (Höhe, Radius etc.) bestimmt, von denen **weitere** Kenngrößen (Oberfläche, Volumen etc.) abgeleitet werden können. Diese automatische semantische Anreicherung macht aus einer anonymen 3D-Punktwolke einen Datensatz, der einer Objektfamilie zugeordnet werden kann und dessen Kenngrößen bekannt sind; damit kann der Datensatz verschlagwortet und somit in einer Bibliothek auffindbar gemacht werden 34 35. Ferner ermöglicht die Varianzdokumentation die Darstellung einer plausiblen Vervollständigung. 04

■ 34
Volker Settgast, Torsten Ullrich, Dieter W. Fellner, Information Technology for Cultural Heritage, in: IEEE Potentials 26 (4) 2007, S. 38–43.

■ 35
Torsten Ullrich, Volker Settgast, René Berndt, Semantic Enrichment for 3D Documents: Techniques and Open Problems, in: Proceedings of the International Conference on Electronic Publishing 14, 2010, S. 374–384.

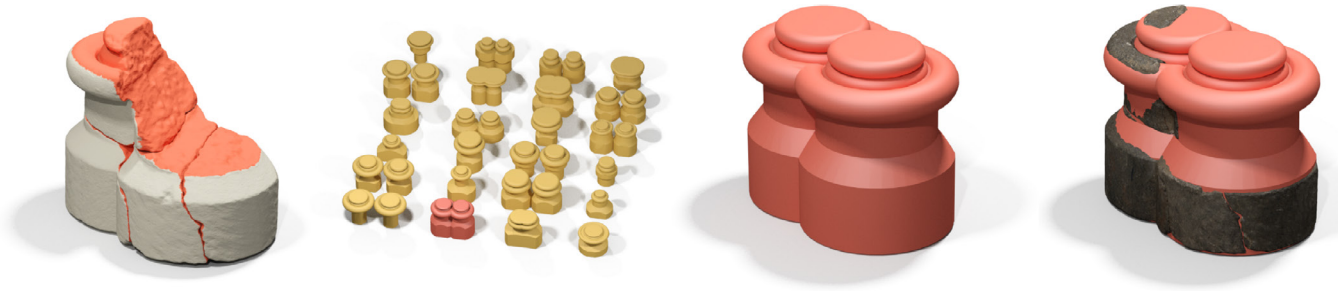
N.10 Projekt PRESIOUS: Restaurierung von archäologischen Ausgrabungsstücken mit generativer Modellierung

Im Rahmen des EU-Forschungsprojekts PRESIOUS (Predictive digitization, restoration and degradation assessment of cultural heritage objects) wurde generative Modellierung genutzt, um fragmentierte bzw. beschädigte digitalisierte 3D-Objekte aus der Archäologie zu restaurieren. 36 Oft liegen z. B. archäologische Ausgrabungsstücke in stark beschädigtem Zustand vor. Oft sind einzelne Artefakte in mehrere Teile zerbrochen und wurden während der virtuellen Restaurierung zunächst automatisiert zusammengesetzt. Einzelne Fragmente können zu stark beschädigt, unauffindbar, erodiert oder z. B. aus pragmatisch-technischen Gründen nicht digitalisierbar sein. Um auch hier zu einem plausiblen Restaurierungsvorschlag zu kommen, wurden Retrieval-Techniken untersucht, die es ermöglichen, unvollständigen virtuell zusammengesetzten Fragmenten global ähnliche, jedoch geometrisch einfache Vorlagen (**Templates**) zuzuordnen 37. Diese Zuordnung erlaubt das automatisierte Auffinden von Stellen, an denen fehlende Teile vermutet werden und ermöglicht so die Visualisierung oder den 3D-Ausdruck von plausiblen Restaurationslösungen. Zum Einsatz kamen dabei also zwei Techniken: Für das Retrieval wurden Feature-Vektoren auf Basis einer expliziten Repräsentation des digitalisierten Artefakts und eines Template verwendet, zur Erzeugung der Templates diente eine generative Modellierung. Technisch realisiert wurde die generative Modellierung mit Skripten, die randomisierte Parameterwerte in eine parametrisierte CSG-Beschreibung auf Basis von

■ 36
Georgios Papaioannou, Tobias Schreck, Anthousis Andreadis, Pavlos Mavridis, Ivan Sipiran, Konstantinos Vardis, From Reassembly to Object Completion — A Complete Systems Pipeline, in: Journal on Computing and Cultural Heritage 10 (2) 2016, S. 8ff.

■ 37
Robert Gregor, Ivan Sipiran, Georgios Papaioannou, Tobias Schreck, Anthousis Andreadis, Pavlos Mavridis, Towards Automated 3D Reconstruction of Defective Cultural Heritage Objects, in: Proceedings of the EUROGRAPHICS Workshop on Graphics and Cultural Heritage 12, 2014, S. 135–144.

OpenSCAD einfügen. Die generative Modellierung dient hier der Erzeugung einer großen Anzahl von Modellen für die Formvervollständigung.
Die Verwendung von in Textform repräsentierten CSG-Bäumen reduziert den benötigten manuellen Aufwand zum Erstellen der parametrisierten, impliziten Modellbeschreibung. Sobald die zugeordneten Templates im Verlauf der weiteren Restauration am Artefakt ausgerichtet worden sind, kann auf Basis von lokalen Feature-Vektoren das Kopieren von kleineren geometrischen Oberflächenstrukturen auf die Basisgeometrie des Templates (teil-) automatisiert werden. 05 illustriert diesen Prozess.



☐ 05
Ein unvollständiges Kapitell (links) dient als Anfrage zur Ähnlichkeitssuche in einer Sammlung von generativ erzeugten Templates (Mitte links). Ein dem Kapitell ähnliches und anschließend passend transformiertes Template (Mitte rechts) kann dazu verwendet werden, die Form des Kapitells zu ergänzen (rechts). Alle hier gezeigten Templates sind randomisiert erzeugte Instanzen derselben generativen Beschreibung.

N.11 Zusammenfassung

Wie wir in diesem Kapitel zu erläutern versucht haben, sind generative Formrepräsentationen mächtige Werkzeuge zur Unterstützung vieler fortgeschrittener Anwendungen. Generative Verfahren können u. a. zur Suche, zur Klassifikation oder zur Formsynthese verwendet werden. Dies sind wichtige Aufgaben, auch in Bezug auf die Verarbeitung von immer größeren Formdatenmengen, welche in naher Zukunft durch verbesserte Digitalisierungsprozesse erwartet werden können.

Wir sehen in diesem Bereich offene Fragen, deren Bearbeitung sich als akademisch interessant und praktisch nützlich erweisen könnte. Wir stellen fest, dass Anwendungen, z. B. im Bereich der Modellierung oder Formrestaurierung, typischerweise auf bestehende generative Beschreibungen

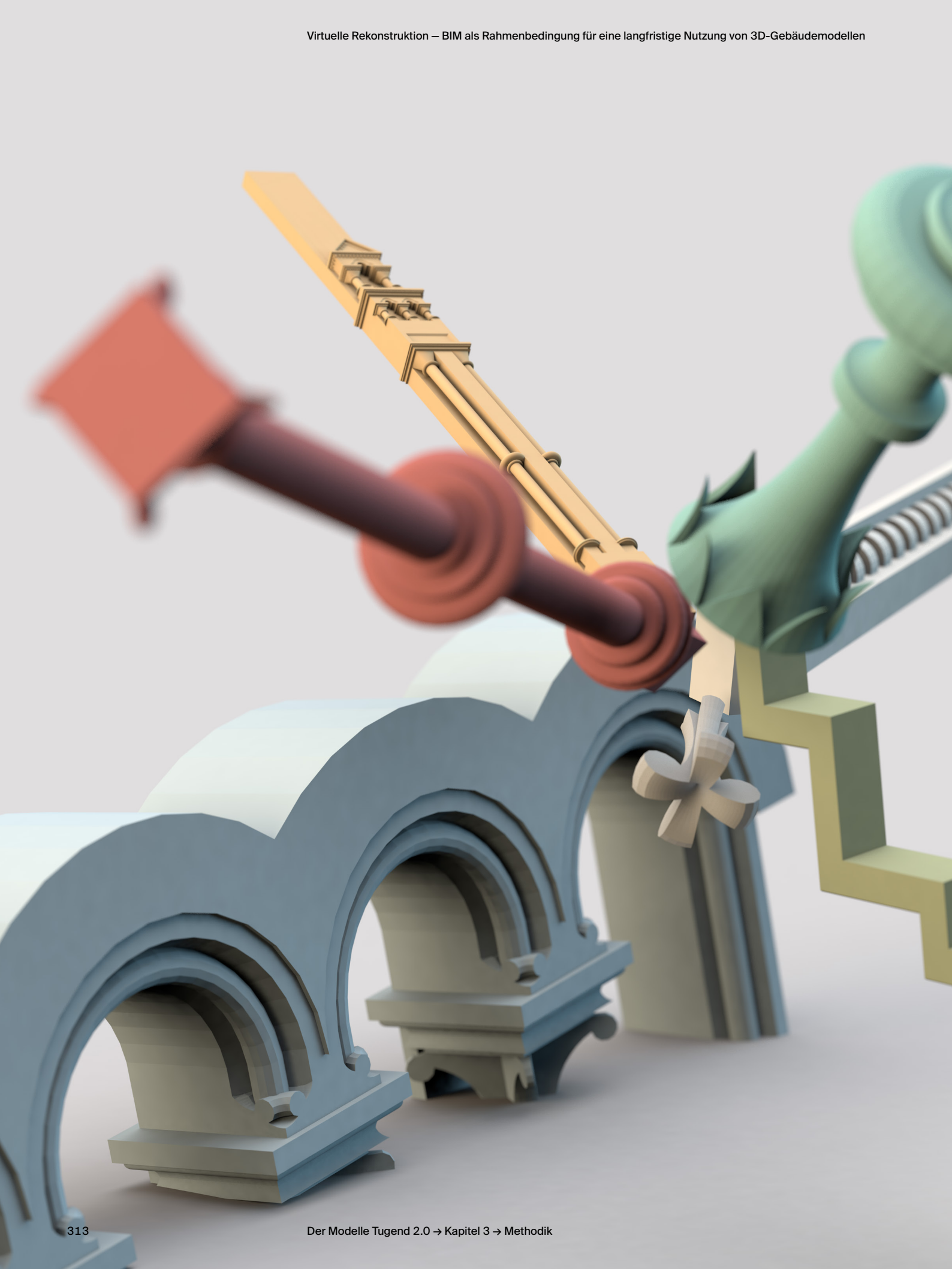
zurückgreifen. Hier ist das Vorhandensein von Sammlungen von Modellen wünschenswert, welche viele relevante Objektklassen abbilden können. Solche generativen Modellrepositorien könnten die Arbeit in Kunst- und Baugeschichte in vielfältiger Weise unterstützen, beispielsweise durch Ableiten eines 3D-Modells aus einem annotierten Grundrissplan zur Erzeugung einer Hypothese einer historischen Gebäudeform. Weiteres Potenzial ergibt sich aus der automatisierten Vervollständigung von zerstörten Gebäuden unter Berücksichtigung der Stilepoche oder der Möglichkeit einer Stilklassifikation durch Ähnlichkeitssuche in generativen Stilrepositorien.

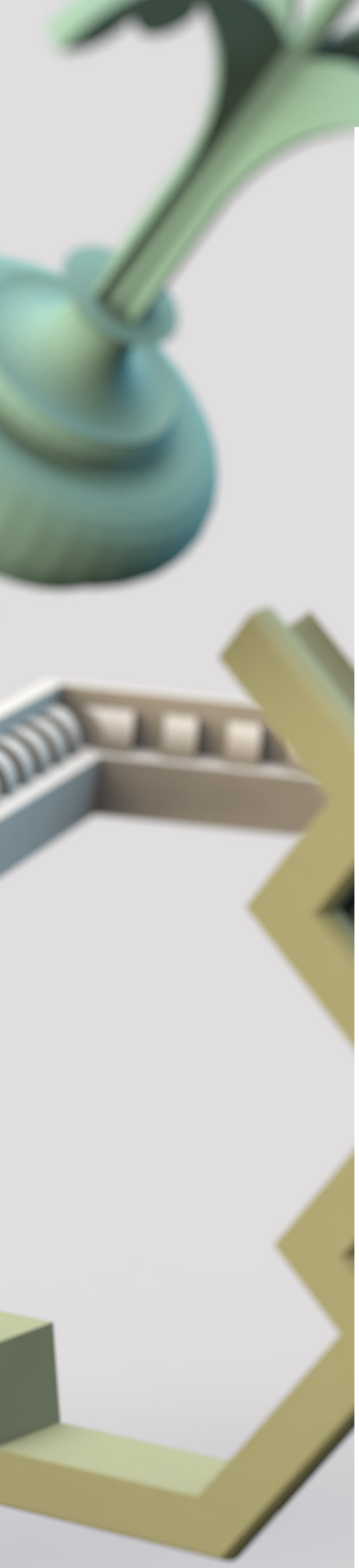
Uns sind derzeit keine sehr großen generativen Modellierungsrepositorien bekannt. Dies mag mit dem Erstellungsaufwand zusammenhängen, der mit der Erzeugung von generativen Formrepräsentationen einhergeht. Aktuelle Arbeiten versuchen, aus bestehenden expliziten Beschreibungen generative Prozesse zu lernen, mit denen neue, plausible Formen synthetisiert werden können. [38] Dies könnte ein Schritt in Richtung Erzeugung von Formrepositorien sein. Ein damit zusammenhängendes Problem ist die Frage, wie generative Beschreibungen aus verschiedenen Ansätzen (z. B. Verwendung unterschiedlicher Algorithmen, Formoperationen etc.) ineinander übersetzt werden können, um heterogene generative Formrepositorien gemeinsam nutzen und durchsuchen zu können. Erste Ansätze dazu existieren [39], die Vielzahl generativer Ansätze übersteigt die Konvertierungsmöglichkeiten jedoch deutlich.

In der Erzeugung von expliziten Repräsentationen aus parametrischen Repräsentationen sind die Parameter der generativen Verfahren so geeignet zu wählen, dass daraus das gewünschte Ausgabeobjekt resultiert. Dies ist zumeist ein iterativer Prozess, der oft durch Versuch und Fehler geleitet ist, sofern beim Benutzer kein Hintergrundwissen über die generative Beschreibung vorhanden ist. Ein einfaches Sampling des Parameterraums produziert in der Praxis oft auch nicht plausible Ergebnisse. Die Entwicklung von geeigneten Such- oder Validierungsprozessen wäre nützlich, um die Formsynthese automatisch zu unterstützen. Ein großer Vorteil generativer Verfahren ist, dass diese eine Art von Semantik über die Formerzeugung kodieren können. Dies kann potenziell zu neuen Verfahren des Formverstehens von z. B. digitalisierten Formdaten führen, etwa durch Anwendung von Klassifikation- und Suchverfahren. Während generative Verfahren bereits in vielen Spezialanwendungen eingesetzt werden, wird in anderen Bereichen mit expliziten Repräsentationen gearbeitet. Die Einbeziehung generativer Techniken in das Informatikstudiuem bzw. die Schulcurricula könnte deren Anwendung fördern. Ein verbreitetes Beispiel im Bereich 2D-Formrepräsentation ist z. B. die Verwendung der sogenannten Turtle-Metapher in der Ausbildung der Programmiersprache LOGO bzw. der computergestützten Geometrieerzeugung. Es könnte pädagogisch interessant ein, an vergleichbaren generativen Ansätzen für die 3D-Geometrie zu arbeiten.

■ **38**
Haibin Huang, Evangelos Kalogerakis, Benjamin Marlin, Analysis and Synthesis of 3D Shape Families via Deep-learned Generative Models of Surfaces, in: Computer Graphics Forum 34, 2015, S. 25–38.

■ **39**
Martin Strobl, Christoph Schinko, Torsten Ullrich, Dieter W. Fellner, Euclides — A JavaScript to PostScript Translator, in: Proceedings of the International Conference on Computational Logics, Algebras, Programming, Tools, and Benchmarking (Computation Tools) 1, 2010, S. 14–21.





Bob Martens, Peter Herbert

O. Virtuelle Rekonstruktion — BIM als Rahmenbedingung für eine langfristige Nutzung von 3D-Gebäudemodellen

→ Datenstruktur, Gebäudemodellierung, Lebenszyklus, Modelldokumentation, Modellierungswerkzeug, Rekonstruktionsmodell

Auch wenn das Ergebnis einer virtuellen Rekonstruktion vordergründig in der Vermittlung eines nicht mehr existenten baulichen Zustandes liegt, so ist die Art und Weise, wie ein dreidimensionales Gebäudemodell aufgebaut und dokumentiert wird, von ausschlaggebender Bedeutung. Im Zuge der Modellierung werden verschiedene Artefakte (Planunterlagen, Fotografien, Archivalien, etc.) zu interpretieren sein. Dabei ist zu beachten, dass sich der Wissensstand im Laufe der Zeit verändert. Hinzu kommt der Umstand, dass digitale Werkzeuge, mit denen die Modellsammlung aufgebaut wird, selbst einer fortwährenden Weiterentwicklung unterliegen. Das bedeutet, dass eine Anpassung, Ergänzung oder gar Portierung des vorhandenen 3D-Modells — unter Umständen auch nach einer längeren Zeitspanne — mit hoher Wahrscheinlichkeit notwendig wird. Prinzipiell ist von einem andersgearteten Lebenszyklus-Begriff die Rede, wenn man einen Vergleich mit existierenden Gebäuden und deren Errichtung bzw. der anschließenden Inbetriebnahme bis hin zum Abbruch zieht. In diesem Beitrag werden zunächst die open-BIM vs. closed-BIM–Datenstrukturen einer näheren Betrachtung unterzogen. Die Art und Weise, wie ein 3D-Modell nachvollziehbar aufgebaut wird, nimmt im Zuge einer virtuellen Rekonstruktion eine zentrale Rolle ein. Es sind beispielsweise zu einem frühen Zeitpunkt Überlegungen hinsichtlich einer sinnstiftenden Geschoss- und Ebenstruktur anzustellen. Überdies gilt es zu bedenken, dass für gewöhnlich mit wiederkehrenden Gebäudeelementen gearbeitet wird. Die langfristige Nutzung von digitalen Gebäudemodellen erfordert einschlägige Maßnahmen, um etwaige Informationsverluste zu minimieren. Abschließend werden verschiedene Möglichkeiten erörtert, um die im Zuge der Modellrekonstruktion erarbeiteten Ergebnisse unterschiedlichen Zielgruppen wirkungsvoll vermitteln zu können. Aus diesem Grund ist auch die Einbeziehung der Umgebung in das virtuell rekonstruierte Gebäudemodell unabdingbar.

0.1 Einführung

Moderne Softwarelösungen ermöglichen es heute, zerstörte Bauten mit hohem Detaillierungs- und Darstellungsgrad **wiederaufleben** zu lassen. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, wie es um den Lebenszyklus dieser Gebäudemodelle bestellt ist und wie diese im Laufe der Zeit **am Leben** — sprich nutzbar — gehalten werden können. Man stelle sich etwa vor, dass im Laufe der Zeit an einer umfangreichen 3D-Modellsammlung gearbeitet wird und fortlaufend Erweiterungen dazu stattfinden. 01 Neue Informationen kommen hinzu, etwa durch die Erschließung bislang unbekannter Archivmaterialien (Planunterlagen, Bildmaterialien etc.); auch durch die weiterführende Auseinandersetzung mit nachfolgenden Rekonstruktionen entwickelt sich der Erkenntnisstand weiter. Eine offene Arbeitsumgebung soll ihre Integration ermöglichen. Um diese Anforderungen abdecken zu können, ist eine nachvollziehbare Daten- und Dokumentstrukturierung von nöten. Wie dauerhaft mit erarbeiteten 3D-Modellierungen umgegangen werden sollte, wird in diesem Beitrag ebenso erörtert wie die Frage, wie die Ergebnisse einem möglichst breiten Spektrum an Rezipienten vermittelt werden können. **Building Information Modeling** (BIM) ist in diesem Zusammenhang als eine methodische Vorgangsweise zu betrachten, digitale Gebäudemodelle über ihren gesamten Lebenszyklus mit all ihren relevanten Informationen abzubilden und eine gemeinsame Datenbasis für verschiedene Nutzerkreise zu kreieren. 02

■ **01**
Bob Martens, Herbert Peter, The Destroyed Synagogues of Vienna: Virtual City Walks, Vienna 2011.

■ **02**
Karen Kensek, Doug Noble, Building Information Modeling: BIM in Current and Future Practice, Hoboken, New Jersey 2014.

0.2 Kontext: Umgang mit 3D-Modellierung

Seit weit über drei Jahrzehnten werden verschiedene (**CAD/CAAD**-) Modellierungspakete zur Marktreife entwickelt und anschließend kommerziell vertrieben. Inzwischen haben sich die meisten Nutzer für ein bestimmtes Softwareprodukt entschieden und wechseln nur noch den Anbieter und die Software, wenn dies zu einer nachweislichen Effizienzsteigerung und Verbesserung der Wertschöpfung in den Arbeitsprozessen führt. Einige Programmangebote haben die Weiterentwicklung eingestellt, und so verbleiben letztlich nur einige wenige Programme zur Auswahl. Neue Programmversionen werden ungefähr einmal pro Jahr angeboten. Auch wenn wirtschaftliche Zwänge und vor allem die Befriedigung von Stakeholdern bei der Software-Evolution im Vordergrund zu stehen scheinen, so findet insgesamt doch bei den Modellierungswerkzeugen eine bedeutende Entwicklung statt.

Im Umfeld der virtuellen Rekonstruktion kommt dem Aspekt der **langfristigen Verfügbarkeit** des in das Modell eingeflossenen Wissens eine besondere Bedeutung zu — es sei denn, es steht eine neuerliche bauliche Realisierung im Vordergrund. Denn während bei der Umsetzung geplanter Bauvorhaben keine Entwicklungsvorgänge mit iterativen Abfolgen involviert sind und die unterschiedlichen am Bauprozess beteiligten Professionen ihr Fachwissen parallel in die Planung einbringen, wird bei der virtuellen Rekonstruktion

der jeweilige (dokumentierte) Wissensstand im Laufe der Zeit mit **neuen** Informationen angereichert. Das Nicht-mehr-Existieren dieser Bauten stellt dabei naturgemäß eine wichtige Rahmenbedingung. 03 04 Die langfristige Nutz- und Editierbarkeit von dreidimensionalen Rekonstruktionsmodellen bedeutet für gewöhnlich auch, dass die involvierten Bearbeiter im Laufe der Zeit eventuell wechseln. Dies kann zu erheblichen Informationsverlusten führen. Ebenso ist die Lebensdauer der eingesetzten Modellierungs-Software letztlich unbekannt. Sinnvoll ist deshalb — auf lange Zeit gesehen — der Einsatz einer auf offenen Standards und Arbeitsabläufen beruhenden BIM-Datenstruktur, der sog. **Open BIM®**. Bei einer Open BIM-Datenstruktur kann das erstellte Gebäudemodell (Geometrie und vielschichtige zugeordnete Eigenschaften) in einem vom Ursprungswerkzeug (BIM-Authoring-Tool) unterschiedlichen Datenformat gespeichert werden. Die BIM-Software eines anderen Herstellers kann dieses bereits erstellte Modell ohne nennenswerten Datenverlust weiter verwenden bzw. mit zusätzlichen Informationen aus dieser Arbeitsumgebung (Fachgebiet) anreichern oder editieren. Bei der sog. **Closed BIM-Datenstruktur** wird hingegen der Datentausch zwischen den verschiedenen Fachdisziplinen unter Verwendung desselben Softwareprodukts abgewickelt. Die Software-Umgebung und das proprietäre Datenformat des Herstellers wird also nicht verlassen. Damit entsteht, je nach Betrachtungsweise, eine **Daten-Insellösung** oder auch die Abhängigkeit von einer bestimmten Produktfamilie.

Nehmen wir den Fall an, dass ein bestimmtes CAD / CAAD-Paket nicht mehr weiterentwickelt wird oder die Update-Politik für die Nutzerschaft nicht mehr tragbar erscheint. Welche Vorgangsweise erschiene dann sinnvoll und wie könnte allenfalls ein **Notfall-Szenario** aussehen? In erster Linie würden nun wohl die verschiedenen Schnittstellen hinsichtlich Minimierung der Informationsverluste zu überprüfen sein.

Detaillierte (digitale!) 3D-Modelle, welche vor zwei oder gar mehreren Jahrzehnten erstmalig erstellt wurden, scheinen in dieser digitalen Welt fast prähistorisch. Inzwischen sind nachfolgende Softwareversionen erschienen und die Update-Intervalle haben sich womöglich verdichtet. Ohne Portierung ist das ursprüngliche Datendokument höchstwahrscheinlich nicht mehr nutzbar. Im Prozess der fortwährenden Migration stellt sich die Frage, was **bleibt** und was ohne Einschränkungen weiter genutzt werden kann, d. h. inwiefern bestimmte Eigenschaften durch die Umwandlung verloren gehen. Ist nach der Konvertierung die Nutzbarkeit in vollem Umfang gegeben oder müssen bestimmte Bauelemente/-teile **nachmodelliert** werden?

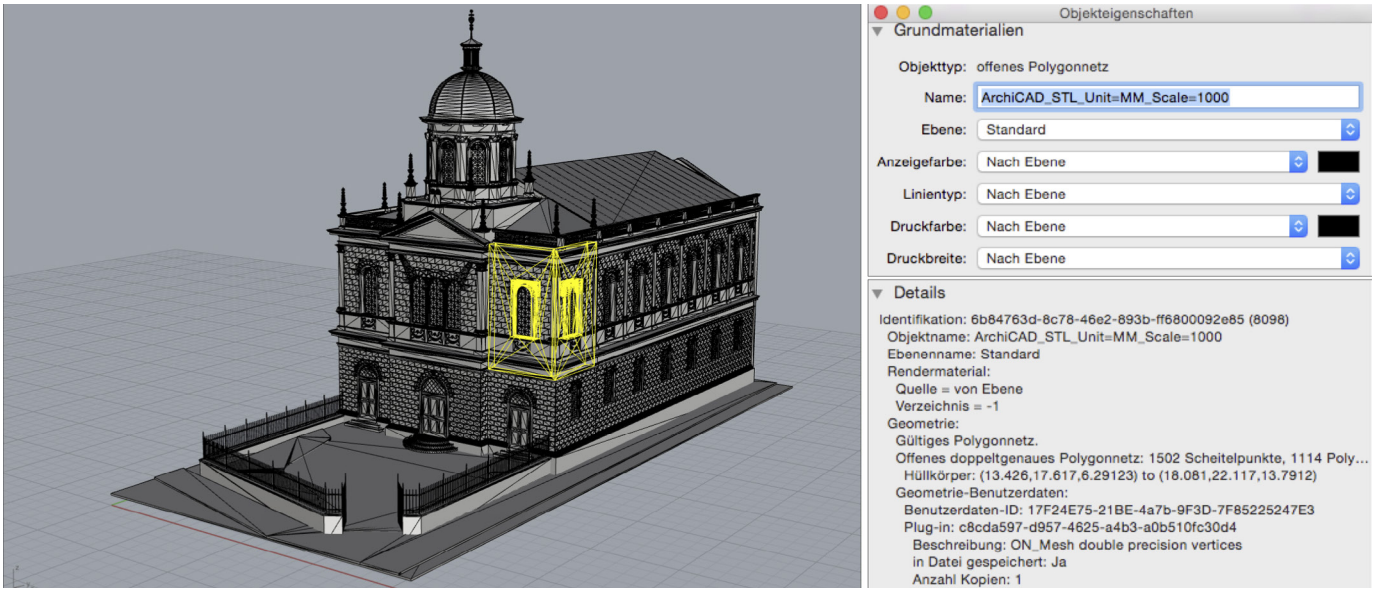
■ 03
Janice Affleck, Thomas Kvan. Reinterpreting Virtual Heritage, in: CAADRIA 2005 Conference Proceedings, New Delhi (India), vol. 1, 2005, S. 169–178.

■ 04
Beng-Kiang Tan, Hafizur Rahaman, Virtual Heritage: Reality and Criticism, in: CAADFutures Conference Proceedings, Montreal (Canada), 2009, S. 143–156.

0.3 Datenstrukturen und -schnittstellen

Wenn man das Softwareangebot hinsichtlich der Erstellung von dreidimensionalen Modellen genauer betrachtet, kristallisieren sich zwei Denkrichtungen heraus. Entweder wird bloß ein digitales Geometriemodell erzeugt 01 oder es wird– äquivalent zum realen Bauprozess — für wiederkehrende Teilbereiche (mit exakt gleicher oder ähnlicher Gestalt) für eine element-orientierte Vorgangsweise optiert. Letzteres bedeutet, dass mehrfach vorkommende Objekte nur ein Mal erstellt werden und an den jeweiligen Stellen — allenfalls mit unterschiedlichen Parametern — eingesetzt werden. Diese Vorgangsweise führt zu einer entsprechenden Schlankheit der Datenstruktur insgesamt.

☐ 01
In dieser Modelldarstellung wird beispielhaft das .STL-Datenformat mit reinen »Geometrie-Informationen« gezeigt. (Martens / Peter)



Inwiefern erscheint eine Kombination von Modellierungsprogrammen unter- bzw. miteinander überhaupt sinnvoll? Die Verwendung von verschiedenen Software-Werkzeugen zur Modellierung virtueller Gebäudemodelle hängt unmittelbar von den vorhandenen **hard skills** der Bearbeiter ab. Geprägt vom Arbeitsumfeld oder von gezielten Anforderungen an spezifische Softwarepakete (z. B. Architektur-, Tragwerks- oder Haustechnikplanung) werden im Laufe eines Arbeitslebens ein oder mehrere CAD / CAAD-Programme erlernt. Da jedes einzelne Softwarepaket seine spezifischen Vor- und Nachteile in puncto Funktionen und Handhabung hat, bieten sich für Nutzer mit breit aufgestelltem Software-Know-how zweifelsohne mehrere Optionen im Zuge der 3D-Modellierung. Effizientere Arbeitsabläufe mittels ergänzend verwendeten Softwarelösungen verbessern zwar das Modellierungsergebnis im qualitativen Sinne, jedoch müssen potenzielle Ineffizienzen durch Datenverluste im digitalen Element-Tausch (Schnittstellenqualität) fortwährend im Auge behalten werden. Ebenso sind (ungewollte) Explosionen der gesamten Datenmenge zu vermeiden, auch wenn die vorhandene Rechnerleistung dies gerade noch »packen« würde.

Hier gilt als Faustregel, zuallererst die im CAD / CAAD-Programm vorhandenen Standardwerkzeuge zu nutzen. Sehr häufig besteht überdies die Möglichkeit, eine Software mittels sog. Plug-ins individuell zu erweitern. Wenn diese Optionen nicht — oder nicht mit vertretbarem Aufwand — zum anvisierten Ergebnis führen, kann auf alternative Softwarepakete ausgewichen werden. Im Idealfall werden Bauteile »extern« modelliert und mit dem Ausgangsprogramm im Wege einer Synchronisation abgeglichen. Allerdings ist in der Realität kaum eine native (**art-eigene**) Verbindung gegeben; oft sind daher Export-/Importvorgänge durchzuführen. Allerdings empfiehlt sich, die eigentliche Modellierungsumgebung nicht verfrüht zu verlassen und sich frühzeitig mögliche fehlende Software-Kenntnisse anzueignen. Der Anschluss an eine Arbeitsgruppe / Modellierungsgemeinschaft, in der einschlägige Erfahrungen ausgetauscht werden und das eigene Know-how Zug um Zug wächst, ist daher dringend zu empfehlen.

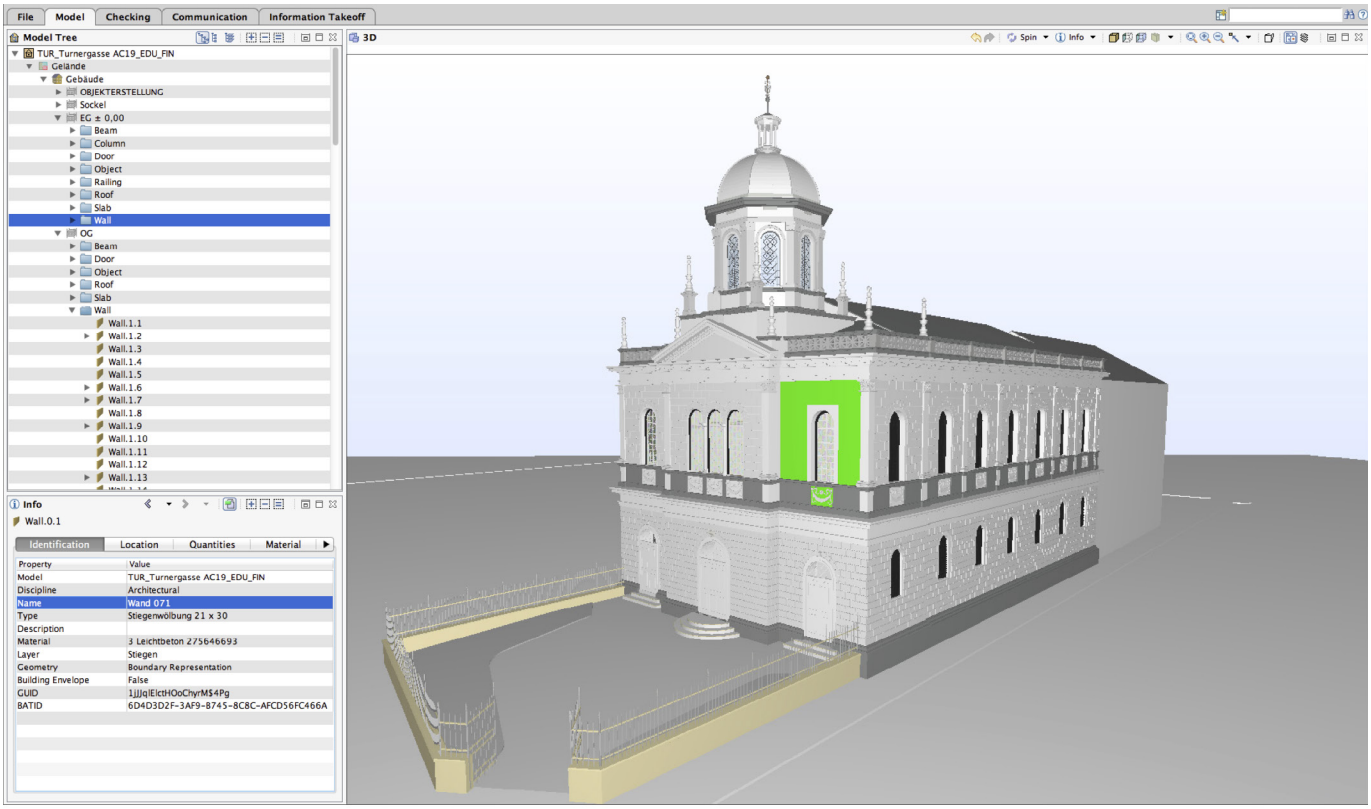
BIM ist in der Bauwirtschaft als ein Querschnittsthema zwischen Planung, Bau und Gebäudebetrieb zu betrachten. Alle drei genannten Bereiche können aus ihrem eigenen Blickwinkel das Gebäudemodell betrachten, entwickeln und verwalten. 05 Auf dem Gebiet der virtuellen Rekonstruktion sind jedoch auch anderweitige Standpunkte und Akteure involviert (Bauforschung; Kunst- und Baugeschichte; Denkmalpflege; Architekturgeschichte etc.). Grundsätzlich kann — unbeschadet der angeführten Einschränkungen — auch in der virtuellen Rekonstruktion eine Open BIM-Datenstruktur nutzbringend angewendet werden.
Im Gegensatz zu Closed BIM setzt Open BIM auf Vielfalt und das reibungslose Zusammenspiel von verschiedenen Softwareprogrammen. Dabei wird versucht, durch das gewählte Datenformat den potenziellen Datenverlust zu minimieren. Dies wird neben einem herstellerunabhängigen Datentauschformat vor allem durch die einheitliche Definition des Datentausch-Workflows sowie die vereinheitlichte Struktur der auszutauschenden Daten in puncto Geometrie und der zugehörigen Eigenschaften (**properties**) ermöglicht.

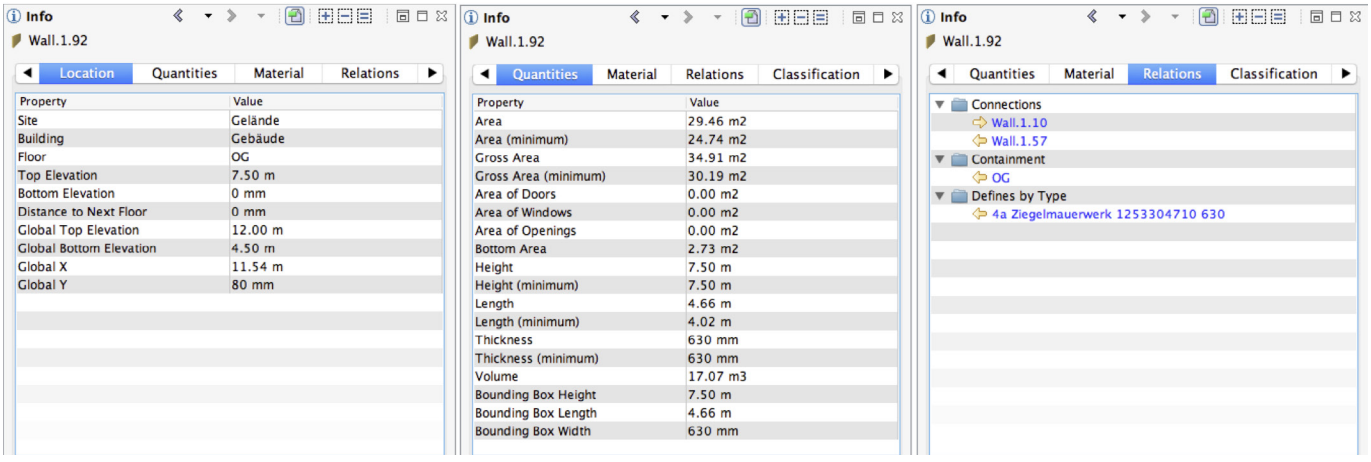
Die wichtigsten Produzenten von CAD / CAAD-Softwarepaketen haben sich auf die Nutzung des Interoperabilitätsformats **IFC** (Industry Foundation Classes) verständigt. Dies soll die gemeinsame Nutzung von Gebäudedaten erleichtern. Hinter diesen Entwicklungen steht **buildingSMART**, eine nichtstaatliche Non-Profit-Organisation, welche im Jahre 1994 errichtet wurde (gegründet unter der Bezeichnung **International Alliance for Interoperability**, kurz: IAI). Die Versionsschritte des IFC sind nicht in 12 bis 15-monatigen Schritten **getaktet**, sondern es gibt alle 3 bis 5 Jahre **major releases** — derzeit liegt IFC4 vor — es müssen also weniger oft Daten portiert werden. Die herstellerunabhängige Basis unterstützt eine möglichst reibungslose Weiterführung der virtuellen Rekonstruktionen in einer anderen Soft- und Hardwareumgebung und vermeidet somit Sackgassen in der Projektfortführung. 02 Das bedeutet, dass nicht nur die Geometrie, sondern auch die Datenstruktur wie auch die zugehörigen Eigenschaften (z. B. Farb- und Materialinformation; Oberflächen etc.) weitgehend beibehalten bleiben und nach Überführung in eine andere Software-Umgebung weiterhin genutzt werden können. Dies steht im Gegensatz zu den in früheren Zeiten genutzten (proprietären) Austauschformaten wie 2D-DXF/3D-DWG, bei denen ausschließlich die Geometrie übertragen wurde.

■ 05
Siehe hierzu: Austrian Standards, Digitale Bauwerksdokumentation — Teil 1: CAD-Datenstrukturen und Building Information Modeling (BIM) — Level 2 [ÖNORM A 6241-1], Wien 2015; Austrian Standards, Digitale Bauwerksdokumentation — Teil 2: Building Information Modeling (BIM) — Level 3-iBIM [ÖNORM A 6241-2], Wien 2015; Austrian Standards, Industry Foundation Classes (IFC) für den Datenaustausch in der Bauwirtschaft und im Anlagenmanagement [ISO Norm 16739:2013], Wien 2017 und VDI, Building Information Modeling — VDI-Richtlinien zur Zielerreichung, Düsseldorf 2017.

In manchem erinnert der Prozess an die Entwicklung des PDF-Formats (seit dem Jahre 1993). Hier stand von Anfang an der Endnutzer im Zentrum der Betrachtung. Auch ohne installierte Autorensoftware sollte ein bestimmtes Ergebnis gleichermaßen austauschbar sein und in der Folge geräteunabhängig betrachtet und gegebenenfalls ausgedruckt werden können. Bei einem PDF-Dokument, welches aus einem CAD / CAAD-Softwarepaket vektorbasierend erzeugt wurde, kann z. B. die Ebenenstruktur mittransportiert und ggf. können einzelne Ebenen im PDF-Dokument ein- und ausgeblendet werden.

☐ 02
Das idente Modell transportiert mittels IFC wesentliche Eigenschaften über die Geometrie hinaus (Struktur, Mengen, Geschossinformation, Baustoff etc.). (Martens / Peter)





0.4 Modelldokumentation

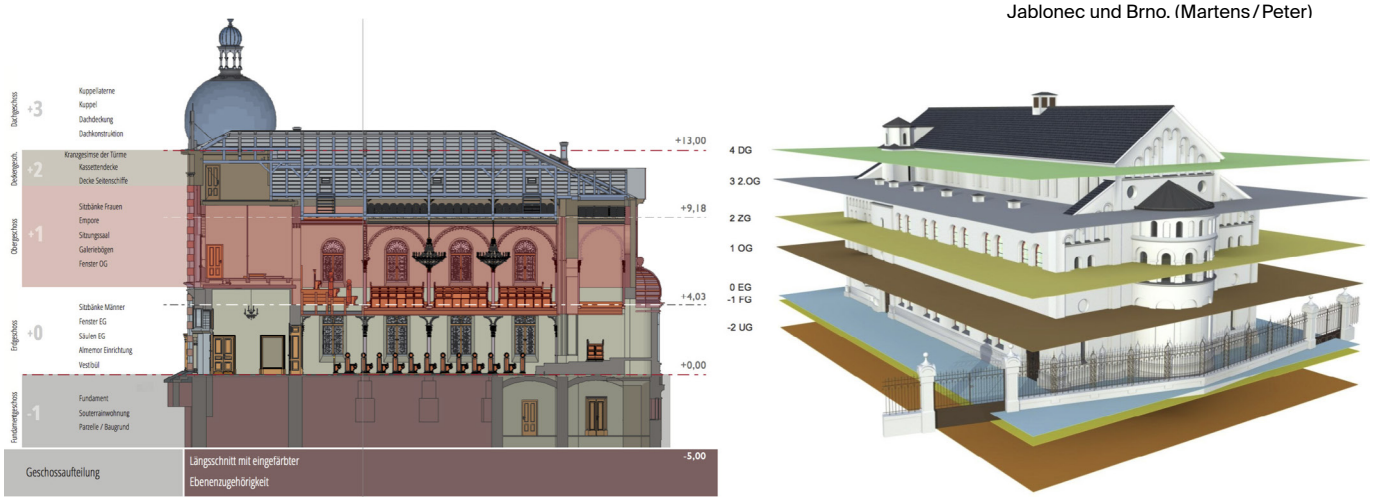
An erster Stelle steht die grundsätzliche Frage nach dem Nutzen für den Anwender: Welcher konkrete Mehrwert wird durch den zusätzlichen Aufwand, den die Erstellung einer Dokumentation bedeutet, gewonnen? Im Hinblick auf die langfristige Auseinandersetzung mit einer virtuellen Rekonstruktion ist das Führen einer Modelldokumentation unabdingbar. 06 07 Die modelltechnische Intervention — bezogen auf die Archivfähigkeit — hat insofern einen hohen Stellenwert, als dass durch einschlägige Maßnahmen (z. B. Portierung in eine nachfolgende Programmversion) die jederzeitige Weiterbearbeitbarkeit und allenfalls auch Informationsverdichtung der gegenständlichen Modellierung realisiert werden kann.

Welche Optionen bestehen nun für eine allgemein verständliche Dokumentation der digitalen Datenmodelle? In diesem Zusammenhang könnte zunächst der grundlegende Aufbau der Modellstruktur angeführt werden und zwar mit einer nachvollziehbaren Geschoss- und Ebenenstruktur. 03 04 05 Dies beinhaltet beispielweise auch eine selbsterklärende Bezeichnung der eingerichteten Geschosse und Ebenen. Gegebenenfalls kann diese auch vom IFC-Gebäudebaum abgeleitet und mit der digitalen Gebäudestruktur verknüpft werden.

Ebenso muss auch an die modellübergreifende Mehrfach- und Nachnutzung von Gebäude-Teilbereichen und Objekten / Bauelementen aus den erstellten Gebäudemodellen gedacht werden. 06 Dies spielt insbesondere bei der Vielzahl der um 1900 errichteten Sakralbauten eine große Rolle, zumal intensiv von präfabrizierten Bauelementen Gebrauch gemacht wurde. Dieser Umstand kann auch im digitalen Gebäudemodell in effizienter Weise mittels eigens erstellter BIM-Bibliotheken nachgeahmt werden (vgl. dazu **www.nationalbimlibrary.com**).

■ **06**
Bob Martens, Herbert Peter, Virtual Reconstruction of Synagogues: Systematic Maintenance of Modeling Data, in: eCAADe 2002 Conference Proceedings, Warsaw (Poland) 2002, S. 512–517.

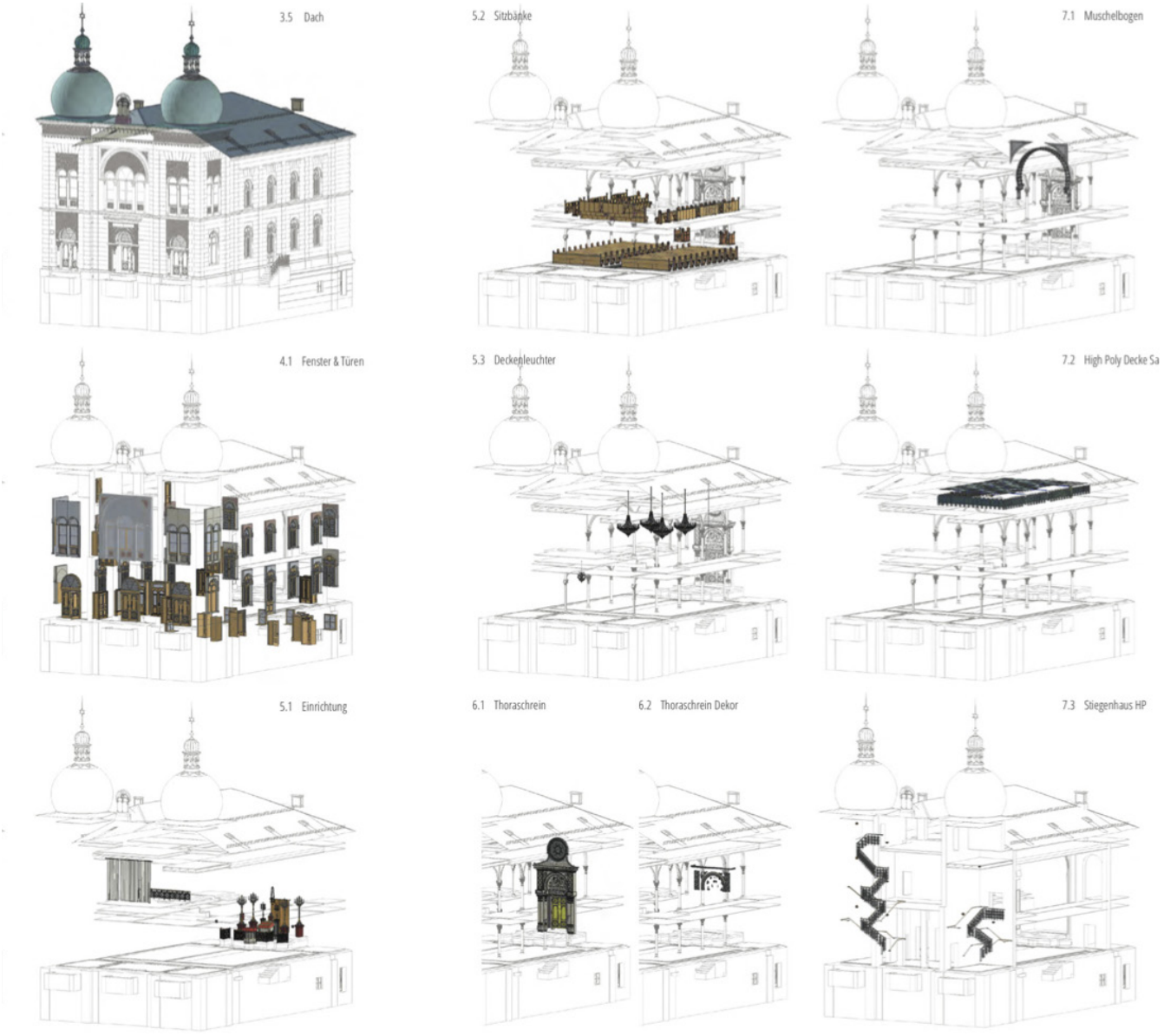
■ **07**
Bob Martens, Herbert Peter, Developing Systematics Regarding Virtual Reconstruction of Synagogues, in: ACADIA 2002 Conference Proceedings, Pomona 2002, S. 349–356.

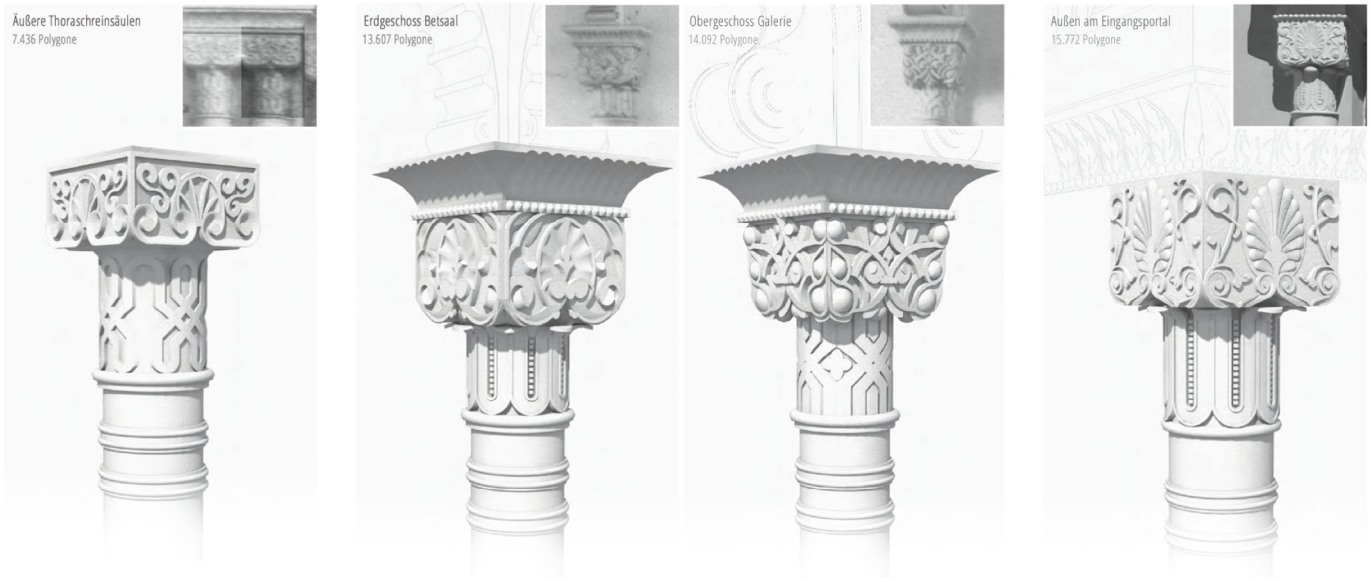


□ 03
Darstellung der Geschossstruktur am Beispiel der zerstörten Synagogen in Jablonec und Brno. (Martens / Peter)

☐ 04
Dokumentation der Ebenenstruktur am Beispiel der Synagogenrekonstruktion in Jablonec. (Martens / Peter).

☐ 05
Fortsetzung zu 04.



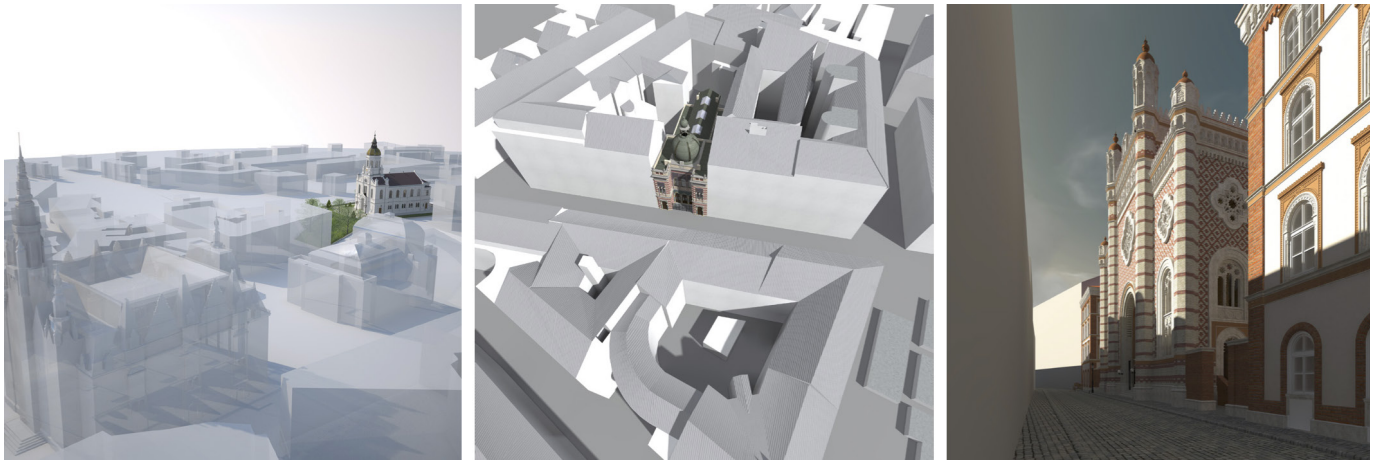


☐ 06
Nachnutzung: Bauteile aus dem »Katalog«. (Martens / Peter).

0.5 3D-Gebäudemodell: Entwicklungsvarianten und Optionen zur Vermittlung

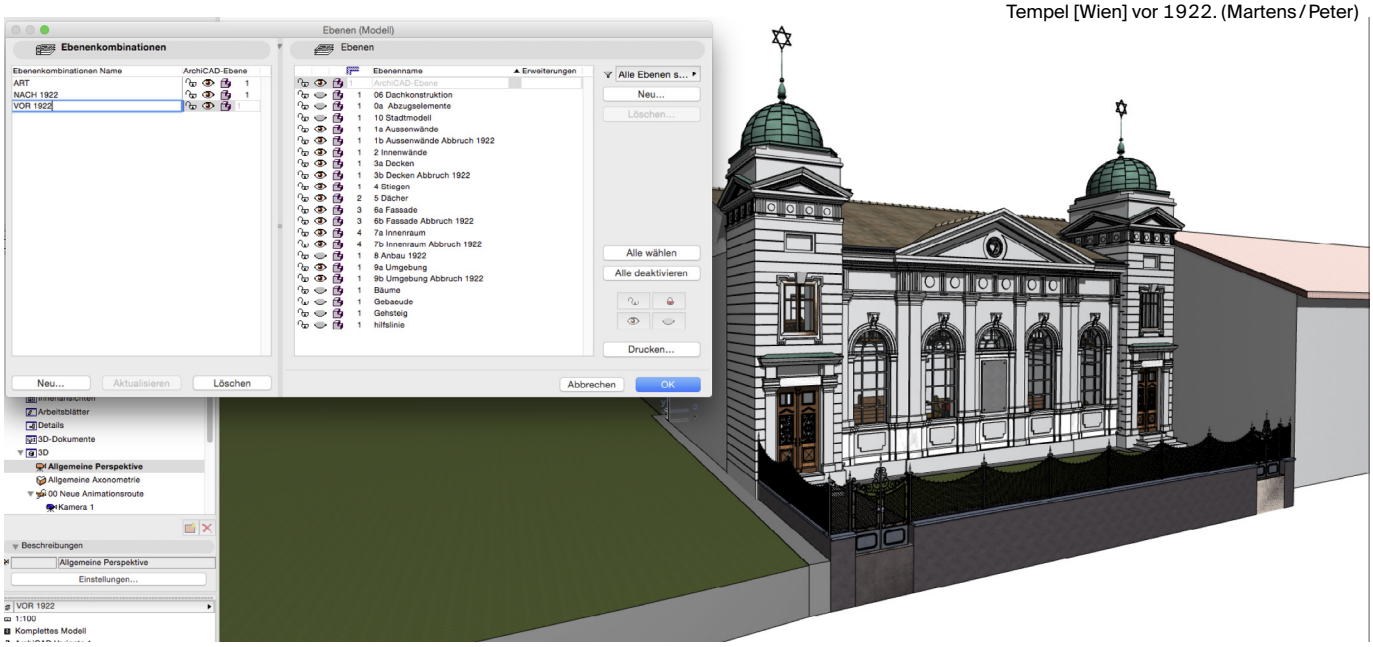
Im Zuge der virtuellen Rekonstruktion von zerstörten Sakralbauten (wie bspw. Synagogen) gilt es zu bedenken, dass auch die Darstellung des unmittelbaren Umgebungskontextes eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielt. 07 Wie würde das Gebäude im heutigen Umfeld aussehen? Wurde der Bauplatz des zerstörten Sakralgebäudes von einem anderen Bau mit in etwa den gleichen Ausmaßen ersetzt? Oder wurde inzwischen gar das gesamte Umfeld gänzlich neu entwickelt? Im letztgenannten Fall ist die Vorher-nachher-Situation eher schwer darstellbar.

☐ 07
Synagogenstandorte im städtebaulichen Kontext: Liberec, Polnische Schule [Wien], Leopoldstädter Tempel [Wien] (Martens / Peter).

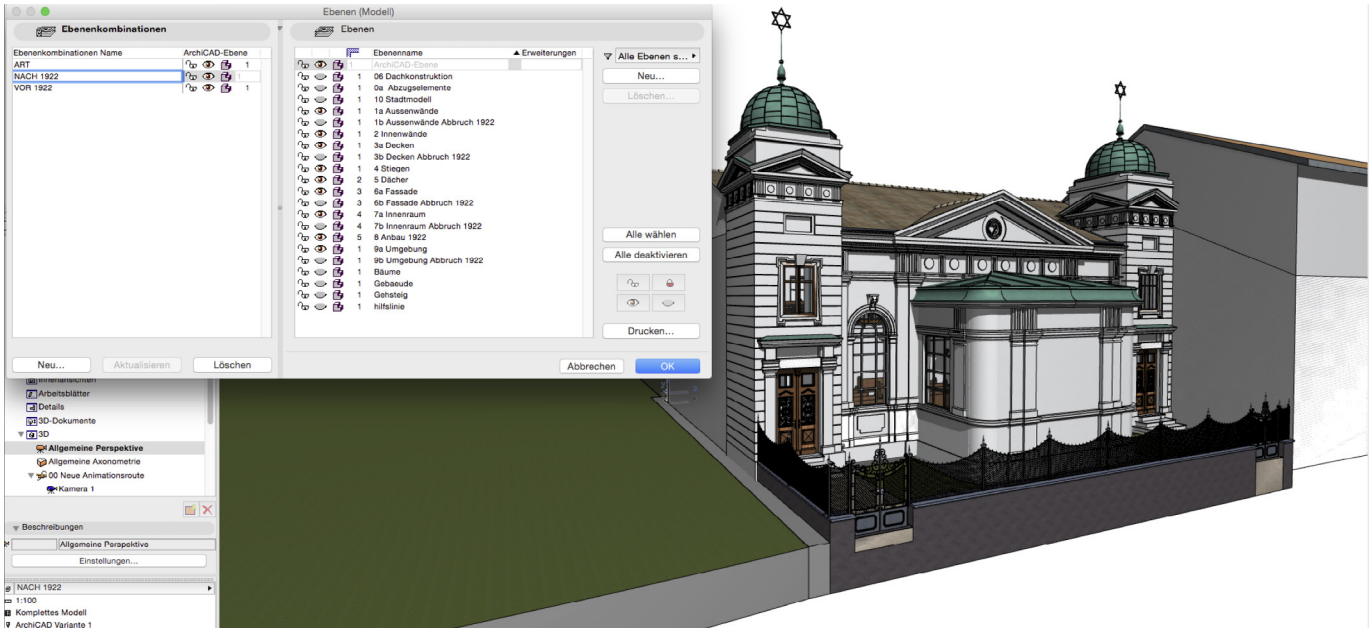


Ebenso gilt es zu bedenken, dass synagogale Bauten während ihres Daseins im Laufe der Zeit umgebaut und erweitert wurden. Diese Entwicklungszustände lassen sich in einem digitalen Modell abbilden. Eine entsprechende Erweiterung der bereits eingerichteten Ebenenstruktur mittels sog. **Ebenengruppen**, erlaubt das Umschalten von einem Bauzustand zum anderen. 08 09 Es muss somit kein weiteres Modell erzeugt werden und die Konsistenz bleibt gewahrt.

☐ 08
Ebenengruppensteuerung: Atzgersdorfer Tempel [Wien] vor 1922. (Martens / Peter)



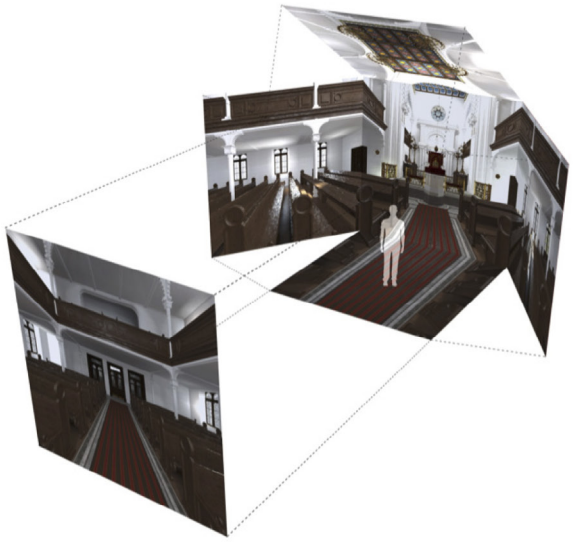
☐ 09
Ebenengruppensteuerung: Atzgersdorfer Tempel [Wien] nach 1922 (Martens / Peter)

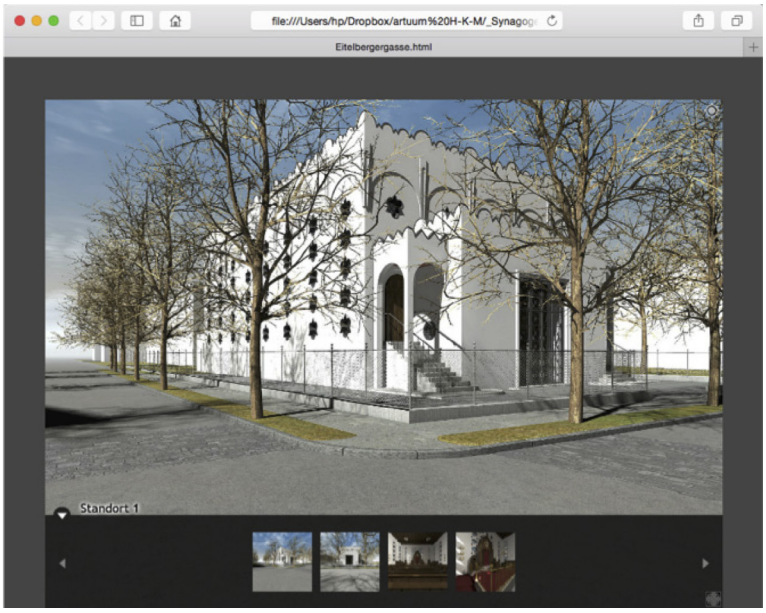


In der Regel werden die erarbeiteten digitalen Modelldaten dem Endnutzer kaum zugänglich gemacht. Je nach Bedarf werden für ihn stattdessen verschiedenartige Visualisierungen erzeugt. Am einfachsten ist das Generieren von Einzelbildern (auch **Renderings** genannt). Zu diesem Zweck werden einzelne Standpunkte mit einer bestimmten Blickrichtung im In- oder Exterieur erzeugt. Hier gilt es, nach Möglichkeit einen inszenierten Eindruck — vorzugsweise in menschlicher Augenhöhe — nachzustellen. Mittels einer Serie von verschiedenen Einzelbildern wird dann versucht, so gut wie möglich einen Gesamteindruck zu vermitteln. Eine andere Möglichkeit der Visualisierung nutzt die Technik der Animation. Mithilfe einer hohen Zahl an Einzelbildern (bis zu 24 pro Sekunde!) wird eine filmische Sequenz zusammengestellt. Dies erfordert einen entsprechenden zeitlichen Rechenaufwand und für die Betrachtung wird zudem ein Abspielmedium (z. B. ein Tablet) benötigt. Einen interessanten Mittelweg bildet die panoramische Darstellung — sie erlaubt einerseits eigenständig zu navigieren und andererseits den räumlichen Sachverhalt zu erkunden. Benötigt werden dazu jeweils pro Standpunkt insgesamt sechs Einzelbilder, und zwar sind dies die korrespondierenden Mantelflächen eines Würfels. Die bildtechnische **Verschmelzung** dieser sechs Einzelbilder zu einem kubischen Panorama (CUBIC-VR) erlaubt eine menschennahe Betrachtung, als bewege man den Kopf etwas nach links und rechts bzw. nach oben und unten. 10 Der Betrachter bewegt sich allenfalls vom jetzigen Standpunkt zum nächsten Hotspot, wo ein weiteres Panorama mit den genannten Bedingungen einen weiteren Gesichtspunkt erschließt. Demnach könnte mit einem Konglomerat von bereits 4 bis 5 Einzelpanoramen eine kompakte Betrachtung realisiert werden. Auch in diesem Fall wird jedoch ein Abspielmedium benötigt. 08

■ **08**
Bob Martens, Wolf-Michael Tschuppik, Displaying Spatially Complex Constellations. An Endoscopic Exploration Implementing the CUBIC-VR Technique, in: Proceedings of the 6th European Architectural Endoscopy Association Conference, Bratislava (Slovakia) 2004, S. 101–107.

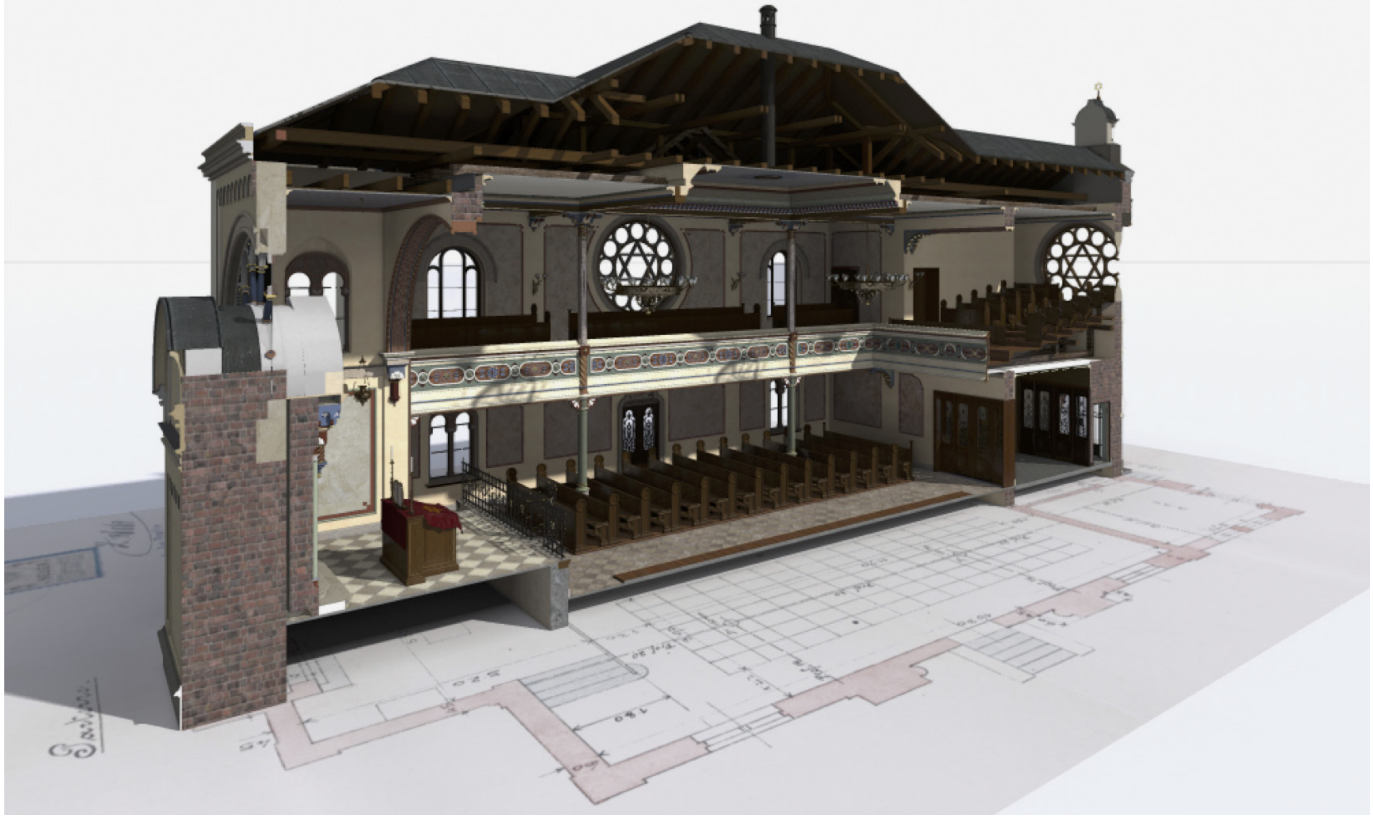
□ 10
CUBIC-VR für virtuelle Panoramen: Prinzip und Ergebnis. (Martens / Peter)





Die besondere Stärke von digitalen Modellen liegt zweifelsohne in der Möglichkeit der zerstörungsfreien Zerlegung. Schnittmodelle können im digitalen Umfeld beliebig erzeugt werden; bei physischen Modellen hingegen nicht. Das bedeutet, dass beispielsweise auch Zusammenhänge zwischen dem In- und Exterieur mittels Schnittdarstellungen geschaffen werden können. [11]

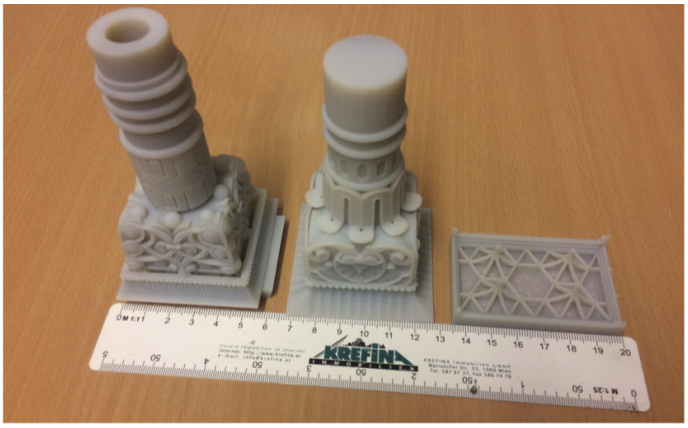
☐ 11
Zerstörungsfreie »Zerlegung« einer Synagogenrekonstruktion [Orlova]. (Martens / Peter)

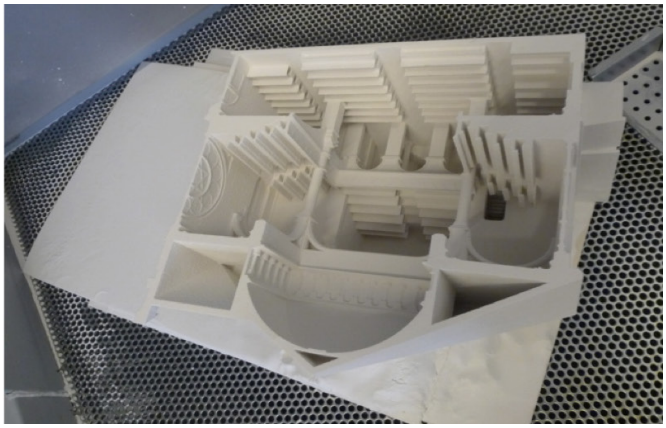


■ 09
Bob Martens, Martijn Stellingwerff, Creating Physical Models Using Virtual Reconstructions: Mixed CAM-techniques for a Viennese Synagogue Scale-model, in: SiGraDi 2005 Conference Proceedings, Lima (Peru) 2005, S. 108–113.

Nicht unerwähnt bleiben sollten in diesem Zusammenhang sog. **3D-Druckverfahren.** 09 Am Ende eines Druckvorganges stehen ein physikalisches Gesamtmodell oder allenfalls auch ausgewählte Teilbereiche eines solchen Modells zur Verfügung. 12 Allerdings ist es wahrhaftig nicht so, dass der 3D-Drucker in ähnlicher Weise wie ein Laserdrucker vom Rechner angesteuert wird und »einfach« ein Modell gedruckt wird. Je nach maschineller Vorgaben (Mindeststärke des Baumaterials; Größe des Druckvolumens, Beschaffenheit des Modellbaumaterials etc.) sind ergänzende Modellierungsvorgänge erforderlich.

□ 12
Beispielhafte 3D-Drucke mittels verschiedenartigen Druckverfahren direkt aus dem digitalen Modell (re-)produziert (Martens / Peter).





0.6 Ausblick

Was kann BIM also zur virtuellen Rekonstruktion beitragen, was ist bei der Planung einer Rekonstruktion zu beachten und welche Entwicklungen sind zu erwarten? Bevor mit einer anstehenden Rekonstruktionsarbeit begonnen wird, sind Überlegungen zur Entwicklung einer **nachhaltigen Datenstrukturierung** anzustellen. Dabei hängt das Bemühen zur Wahrung der Konsistenz innerhalb der BIM-Datenstruktur mit den vergleichsweise ausgedehnten Archivzeiträumen zusammen. Ein weiterer Themenkreis ist die **Unabhängigkeit** von der ursprünglichen Modellierungssoftware. Ein Umstieg sollte mit einem überschaubaren Maß an qualitativem Datenverlust jederzeit möglich sein; es ist daher empfehlenswert, hochgradig verlustfreie Datenschnittstellen frühzeitig zu testen. Eine weitere Herausforderung der Modellierung betrifft die virtuelle Rekonstruktion von historischen Formen von Bauelementen wie z. B. Kapitellen, Ornamentierungen, Mobiliar etc., welche nicht in den heutigen BIM- Bibliotheken enthalten sind.

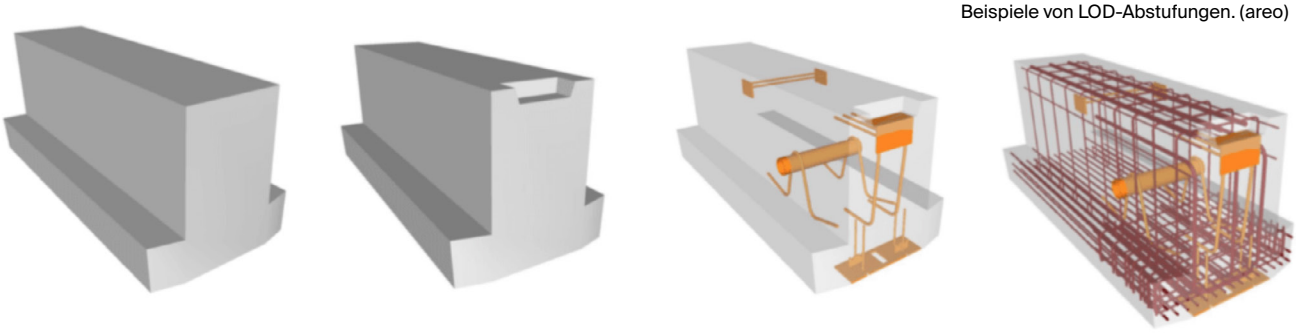
Das 3D-Datenmodell ist wie eine Datenbankumgebung zu betrachten, in der in konsistenter Weise Daten gesammelt und eingepflegt werden.

Im Bedarfsfall wird für eine anstehende Visualisierung der notwendige Datenexport zweckspezifisch aggregiert. Allerdings ist die BIM-basierte Modellierung für eine Visualisierung nicht per se erforderlich, zumal z. B. unterschiedliche Oberflächen innerhalb eines Elementes verloren gehen können.

Betrachtet man die virtuelle Rekonstruktion von nicht mehr existierenden Gebäuden nach dem im BIM definierten **Level of Detail**-Schema (**LOD**), so kann man feststellen, dass eine elementbasierte Modellierung von Bauteilen gegenüber einer allgemeinen Geometrie-Modellierung vorzuziehen ist. Nachfolgende Abstufungen wurden dabei folgendermaßen definiert:

- → LOD 100 — entspricht einem schematischen Entwurf
- → LOD 200 — entspricht Entwurfsqualität
- → LOD 300 — beinhaltet Konstruktionsdetails
- → LOD 400 — inkludiert Ausführungsdetails
- → LOD 500 — entspricht dem errichteten Gebäude (»as built«)

☐ 13
Beispiele von LOD-Abstufungen. (areo)



Modelle einer virtuellen Rekonstruktion können jede einzelne LOD-Abstufung repräsentieren. 13 Während bei der Planung und Errichtung von Gebäuden normalerweise eine kontinuierliche Verdichtung von Geometrie und zugehöriger Information in einem definierten Projektzeitraum stattfindet, gibt es bei einer virtuellen Rekonstruktion keinen solchermaßen definierten Projektzeitraum. Der realisierbare Detailgrad eines Modells hängt hier vielmehr — je nach Stand der Recherche — vom verfügbaren Archivmaterial ab, wenngleich grundsätzliche Aussagen über die Konstruktion und das Zusammenwirken von Bauteilen erfahrungsgemäß ein Stück weit aus historischen Bauweisen und Konstruktionsmethoden abgeleitet werden können. Die elementbasierende Modellierung sämtlicher Bauteile und der nachhaltige Zugriff darauf fördern eine Erhöhung der LOD-Abstufung und steigern damit das Forschungsergebnis vom Rekonstruktionsmodell in seiner Gesamtheit. Obwohl es keine technische Abfolge von Vorentwurfs-, Entwurfs-, Einreichplanung, Ausführungs-/Detailplanung und Errichtungs- und Betriebsphase (analog zum Phasenmodell eines Gebäudes) gibt, besteht das Ziel einer virtuellen Rekonstruktion vor allem darin, möglichst nah an den ursprünglich realisierten Zustand zu gelangen. Im Bedarfsfall würde dies auch die im Laufe der Zeit stattgefundenen Um- und Zubauten des Gebäudebestandes einschließen.

Kapitel 4 →
Wissensorganisation und -repräsentation

Piotr Kuroczyński

Von Big Data zu neuer Datenkultur

Die Digitalisierung unserer Gesellschaft beschleunigt in bisher nicht gekanntem Ausmaß die Bildung und den Austausch von Informationen. Gleichzeitig beobachten wir eine Auslagerung unseres kulturellen Gedächtnisses in das World Wide Web, welches seit 1990 eine rasante Entwicklung von Web 1.0 über Web 2.0 in Web 3.0 vollzieht.

Die exponentiell wachsende Informationsflut birgt Chancen, bereitet aber auch Probleme. Nach einer Schätzung aus dem Jahre 2013 waren nur ein geringer Anteil, nämlich 5% der damals geschätzt 4,4 Exabyte weltweit vorhandenen Daten sogenannte **target rich data** 01, also Daten, deren Bedeutung von Maschinen gelesen und verstanden werden können, weil sie in strukturierter Form abgelegt und mit Informationen über sich selbst (**Metadaten**) ausgestattet waren. Im Kontext der Unmengen an unstrukturierten, heterogenen und schwer lesbaren Daten sprechen wir von **Big Data** oder **Dark Data**. Diese stellen die Wirtschaft und die Gesellschaft vor neue Herausforderungen, wenn es um Auswertung und Nachnutzung vorhandener digitaler Ressourcen geht.

Im Bereich des kulturellen Erbes gibt es sowohl von kommerzieller Seite als auch von staatlichen Einrichtungen Bestrebungen, unser analog gespeichertes Wissen der **Gutenberg-Galaxis** zu digitalisieren und jederzeit sowie überall online zugänglich zu machen. 02 Darüber hinaus werden immer mehr Objekte von kulturellem Wert mittels 3D-Retrodigitalisierung erfasst und als 3D-Punktwolken digitalisiert. Parallel entstehen digitale 3D-Rekonstruktionen von zerstörten bzw. nicht realisierten Kunst- und Baudenkmälern, die ein hypothetisches Abbild unserer Vergangenheit in Form von born-digital 3D-Modellen und Visualisierungen vermitteln.

Auch wenn im Kontext des Kulturerbes noch lange nicht von Big Data gesprochen werden kann, so stehen die kulturellen Institutionen und die sie begleitenden Wissenschaften vor ähnlich großen Herausforderungen, wenn es um die Lesbarkeit, Verwertbarkeit und Nachhaltigkeit der digitalen Daten geht. Aufgrund der schlechteren finanziellen Lage und des geringeren wirtschaftlichen Drucks sind die Herausforderungen hier eher größer als kleiner.

■ **01**
Das Wachstum des Digitalen Universums wird geschätzt von 4,4 Exabyte (2013) auf 44 Exabyte (2020). Ein Wachstum von 40% je Jahr bis 2020. https://www.emc.com/leadership/digital-universe/2014iview/executive-summary.htm.

■ **02**
Marshall McLuhan, The Gutenberg Galaxy, London 1962.

Der digitale Wandel hat bereits frühzeitig die Forschungsdaten und Forschungsmethoden erfasst und verändert die Wissenschaft grundlegend. Der **Rat für Informationsinfrastruktur** (RfII) stellt zu Recht fest, dass

»mit der Digitalität von Forschungsdaten sich vielfältige, in ihrer Art neue Herausforderungen an deren Qualitätssicherung stellen. Neben der Qualität und Integrität von Datensätzen ›an sich‹ spielen die Qualität des Datenmanagements und der Metadaten, die Einhaltung international gängiger Standards sowie die Qualität der Infrastruktur selbst eine wichtige Rolle.« 03

Der RfII stellt hierbei den Begriff einer **neuen Datenkultur**, einer Kultur der Offenheit und des Teilens der Daten, vor und fordert gleichzeitig eine ausreichende Datenqualität über den gesamten Lebenszyklus hinweg. Denn so lange die digitalen Forschungsdaten eine kürzere Lebensdauer haben als die materiellen Träger unseres kulturellen Gedächtnisses, wie gedruckte Bücher, Kunst- und Baudenkmäler, müssen wir uns ernsthaft die Frage nach dem Mehrwert der Digitalität in Kultur und Wissenschaft und damit der Sinnhaftigkeit des Einsatzes von Computern in den Institutionen des kulturellen Gedächtnisses und der Wissenschaft insgesamt stellen.

■ **03**
RfII – Rat für Informationsinfrastrukturen, Leistung aus Vielfalt. Empfehlungen zu Strukturen, Prozessen und Finanzierung des Forschungsdatenmanagements in Deutschland, Göttingen 2016, S. 52, http://www.rfii.de/download/rfii-empfehlungen-2016/.

Arthistory's Next Topmodel?

Hinsichtlich der digitalen 3D-Rekonstruktion blicken wir auf 30 Jahre vielfältiger Anwendungen im Kontext (kunst-)historischer Rekonstruktionen zurück (**Heike Messemer → 059**). Die nativ digitalen Daten, aus denen die 3D-Modelle bestehen, stellen das Ergebnis der im Entstehungsprozess vorangegangenen wissenschaftlichen Diskurses und der hypothetischen Abbildung eines Objekts mittels computerbasierter Technologien dar. Dennoch ist es schwierig, gezielt auf die Ergebnisse der Forschungsprojekte zuzugreifen. Schuld daran ist die fehlende **digitale Erschließung**, die fehlende

»Integration und Konvergenz zwischen digitalisierten und nativ digitalen Daten in einheitlichen, integrierten Arbeitsumgebungen mit dem Ziel dynamischer Wissensintegration«. 04

Die Bauindustrie begegnete der Herausforderung fehlender digitaler Erschließung bereits in den 1990er Jahren mit der Entwicklung von **Building Information Modeling** (BIM) und des Datenaustauschmodells **Industry Foundation Classes** (IFC). 05 Dank BIM und IFC können zeitgenössische Bauvorhaben effizienter geplant und abgewickelt werden, sodass es möglich ist, Planungs-, Bau- und Betriebskosten zu senken. Aus einfachem Grund:

■ **04**
RfII – Rat für Informationsinfrastrukturen, Göttingen 2016, S. 13.

■ **05**
André Borrmann, Markus König, Christian Koch, Jakob Beetz (Hg.), Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis, Springer Vieweg, 2015.

Der gesamte digitale Bauprozess kann über die Schnittstelle des IFC-Datenmodells gewerkeübergreifend und ohne Informationsverluste an einem 5D-Modell simuliert, koordiniert und dokumentiert werden. Dahinter verbirgt sich die Idee eines **digitalen Zwillings** des Objekts in all seinen Lebensphasen: Von der Planung über den Bauprozess bis zum Betrieb und Abriss.

Im Zusammenhang mit geisteswissenschaftlichen objektbasierten Fragestellungen, die anhand einer digitalen 3D-Rekonstruktion bearbeitet und beantwortet werden sollen, gestaltet sich die Lösung schwieriger. Hier geht es vorrangig um die Dokumentation und Abbildung der subjektiven Quelleninterpretation und der kreativen 3D-Modellierung, der Texturierung und der Visualisierung eines Bauwerks. Anders als bei Planung zeitgenössischer Bauwerke mithilfe von BIM / IFC gilt es bei der digitalen 3D-Rekonstruktion vergangener Kulturgüter, für die mit hermeneutischen Methoden gewonnenen Rekonstruktionserkenntnisse einen Ausdruck in digitalen, hypothetischen 3D-Datensätzen (Modellen) zu finden. Die digitale (kunst-)historische Rekonstruktion wartet noch auf einen gemeinsamen Dokumentationsstandard (Datenmodell) und eine dynamische Wissensintegration innerhalb und mittels adäquater Virtueller Forschungsumgebungen (VFU). Eine Grundvoraussetzung für die digitale Erschließung leisten strukturierte Daten, welche sich an einschlägige Metadaten-Schemata, kontrollierte Vokabulare und Normdateien sowie Referenzontologien richten, wie sie in den **DFG-Praxisregeln »Digitalisierung«** festgehalten sind. 06

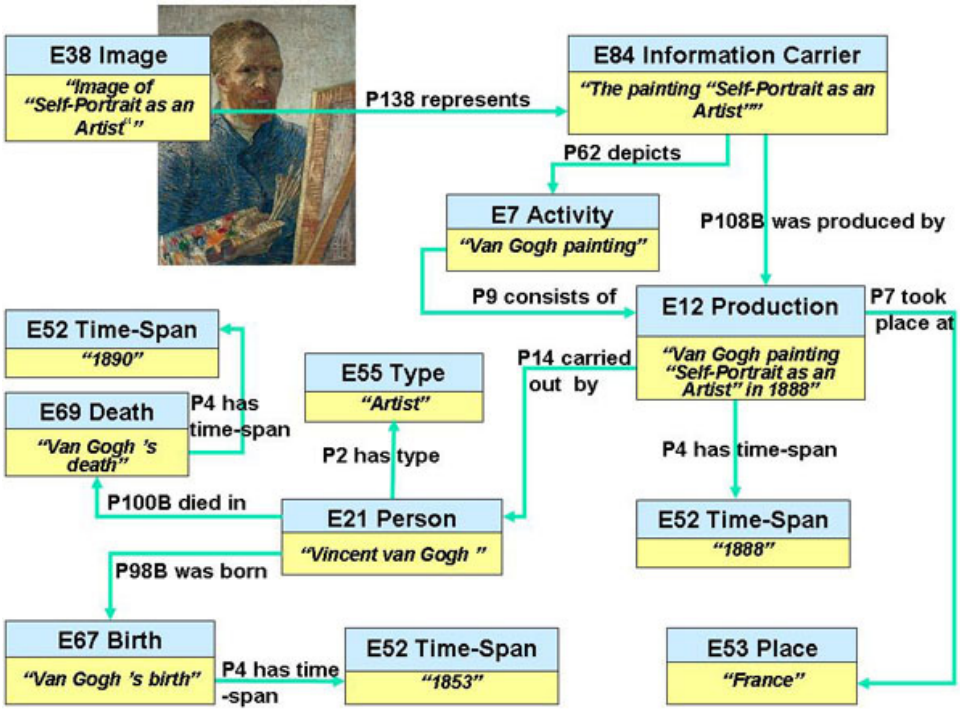
Die Fachcommunity ist zurzeit bemüht, ein Datenmodell zu entwickeln, das die subjektiv-kreativen Interpretations- und Arbeitsprozesse bei der digitalen 3D-Rekonstruktion abbildet und das 3D-Modell zu den beteiligten Personen, zu den Orten, Quellen, Aktivitäten und Ereignissen in Beziehung setzt. Tagungssektionen und Round Tables wie **Arthistory's Next Topmodel? Der Trend zur Ontologie** und **Data Model beyond the digital 3D Model** eruieren das Thema der Wissensrepräsentation und die Bedeutung der Datenstrukturierung aus dem Blickwinkel der Geisteswissenschaften. 07 Es geht dabei um nicht weniger als den Nachweis der Wissenschaftlichkeit digitaler Forschungsdaten — festzumachen an Nachvollziehbarkeit, Interoperabilität und Nachhaltigkeit — durch eine adäquate Wissensrepräsentation.

■ 06
Deutsche Forschungsgemeinschaft, DFG-Praxisregeln Digitalisierung, Bonn 2016, S. 26, https://www.dfg.de/formulare/12_151/12_151_de.pdf.

■ 07
Digital Humanities im deutschsprachigen Raum e. V., Arthistory's Next Topmodel? Der Trend zur Ontologie, Leipzig 2016, http://www.dhd2016.de/abstracts/sektionen-003.html und 22th Conference on Cultural Heritage and New Technologies, Round Table, Data Model beyond the digital 3D Model, Wien 2017, http://www.chnt.at/data-model-beyond-the-digital-3d-model/.

■ 08
http://www.cidoc-crm.org/.

Als Referenzontologie im Kulturerbe-Bereich ist CIDOC CRM (ISO 21127:2006) weltweit anerkannt 01. 08 Mit rund 90 Entitäten und 150 Relationen ermöglicht der internationale Standard CIDOC CRM eine Formalisierung des Wissens innerhalb der kulturellen Einrichtungen (vor allem in Museen und Archiven) in mensch- und maschinenlesbar Form.



☐ 01
Formalisierung des Wissens am Beispiel des Selbstporträts von Van Gogh mithilfe der CIDOC CRM-Referenzontologie. **http://old.cidoc-crm.org/crm_core/core_examples/van_gogh.htm** (Martin Doerr).

Die Referenzontologie stellte eine übergeordnete Formalisierung des Wissens dar, auf welche sich wiederum die fachspezifischen Anwendungsontologien berufen. Die Referenzontologie CIDOC CRM bildet, analog zur IFC aus dem Bausektor, den **semantischen Kitt** zwischen den Anwendungsontologien unterschiedlicher Fachdisziplinen.

Im Bereich der Archäologie verbessern Erweiterungen wie das CIDOC CRMba die archäologische Erfassung von Gebäudebefunden und machen es damit leichter, die Dokumentation und Rekonstruktion der Gebäude zu verstehen. Wie **Paola Ronzino** (**→ 354**) in ihrem Beitrag schildert, können dank der Formalisierung des Wissens in CIDOC CRMba die Datensätze einer Ausgrabung beispielsweise hinsichtlich ihrer Bedeutung abgefragt werden und die entsprechenden Schlussfolgerungen daraus gezogen werden. So können automatische rechnergestützte Suchabfragen zu Raumkonfigurationen und Relationen durch die Ausgrabungsfunde (Quellen) belegt und ihre Interpretation nachvollzogen werden.

Die epistemologische Schwierigkeit, in einem Datenmodell eine subjektive Entscheidung in eine operative Objektivität zu übersetzen, kommt im scheinbaren Gegensatz von Hermeneutik einerseits und Normdaten andererseits zum Ausdruck. Für die Bearbeiter des Modells stellt sie eine große Hürde dar. Diese Übersetzungsleistung ist im Umkehrschluss jedoch Voraussetzung für die Operationalisierung des Wissens, da sie auf formalisierten Informationen gründet. Die Herausforderungen der konzeptionellen Modellie-

rung, der semantischen Segmentierung und der kognitiven Prozesse im Kontext digitaler 3D-Rekonstruktion beleuchtet **Fabrizio Ivan Apollonio** (→ **412**) im letzten Beitrag von Kapitel 4. Seine analytische Ausführung und Vorstellung der Methodik erläutert der Autor im anschließenden ersten Beitrag im **Projekt-Portfolio** (→ **432**) an einem Beispiel zu Architekturzeichnungen von Ledoux.

3D Digital Heritage — Exploring Virtual Research Space

Grundlegende Voraussetzung für die digitale Erschließung und Nachnutzung digitaler Forschungsdaten stellen **Virtuellen Forschungsumgebungen** (VFU) dar. Sie ermöglichen eine kollaborative, webbasierte Forschungsarbeit und fungieren im Sinne dynamischer Wissensintegration.

Die webtechnologische Entwicklung im Bereich der interaktiven Darstellung von 3D-Datensätzen, allen voran die WebGL-Technologie, eröffnet heute neue Anwendungshorizonte für den wissenschaftlichen Einsatz von 3D-Modellen in Forschung und Lehre.

Die Rolle der konzeptionellen Segmentierung eines Bauwerks bei dessen grafischer und informationstechnischer Erfassung in einer Datenbank wird von **Alexander Stenzer** (→ **372**) untersucht. Dabei werden Fragen nach einer geeigneten grafischen Schnittstelle, dem Datenmodell und der Verknüpfung von Quellen und Bauwerksdaten erörtert.

Ebenfalls mit Interesse zu beobachten ist die Aktualität, die das in der zeitgenössischen Bauindustrie etablierte 3D-Datenaustauschmodell BIM / IFC in Bezug auf digitale 3D-Rekonstruktionen bekommen hat. **Paola Ronzino** und **Alexander Stenzer** stellen in ihrem Beitrag Überlegungen zur Anknüpfung des CIDOC CRM-Datenmodells an das Datenmodell von IFC an. Die Öffnung gegenüber BIM / IFC erklärt sich zum einen aus dem Wunsch, Fragestellungen aus dem Kulturerbe-Bereich in einem **digitalen Zwilling** (As-Built-Model, gängig in der Bauwerkserfassung und im Facility Management) abzubilden. Zum anderen erweitert man das Spektrum von BIM / IFC um die kulturhistorische Dimension. Diese Entwicklung sollte zusammen mit der Forschung im Bereich des **historic** bzw. **heritage Building Information Modelling** (hBIM), bei dem das digitale Gebäudemodell die Rolle des zentralen Informationsträgers übernimmt, weiter verfolgt werden. 09

Für die objektorientierte Forschung bringt die VFU viele Anforderungen im Sinne der eingangs postulierten digitalen Erschließung und neuen Datenkultur mit sich. Es sind größere Forschungsprojekte, wie unter anderem **Virtuelle Rekonstruktionen in transnationalen Forschungsumgebungen — Schlösser und Parkanlagen im ehemaligen Ostpreußen** (**Kuroczyński et al** → **546**), die das Mögliche auf diesem Gebiet ausloten und die Voraussetzungen für die webbasierte Zusammenarbeit verschiedener Fachkulturen bei digitalen 3D-Rekonstruktionen herausarbeiten. Aus den gewonnenen Erfahrungen kann eine ganze Reihe von Anforderungen abgeleitet werden, die gleichzeitig die Komplexität des Themas widerspiegeln. Von besonderer Bedeutung ist:

09
Maurice Murphy, Historic Building Information Modelling (HBIM) for Recording and Documenting Classical Architecture in Dublin 1700 to 1830, Dublin, 2012; Yusuf Arayici, John Counsell, Lamine Mahdjoubi, Gehan Nagy, Soheir Hawas (Hg.), Heritage Building Information Modelling, Routledge, 2017.

- → die Nutzung von Open-Source-Technologien für das operative System (z. B. Drupal als Content Management System)
- → die Gestaltung intuitiver grafischer Schnittstellen (User Interface)
- → eine Konzeptentwicklung für eine bessere Nutzererfahrung mit niedrigerer Hemmschwelle (User Experience)
- → eine Strukturierung und Referenzierung der Daten in einem internationalen Standard (mensch- und maschinenlesbares Format, z. B. Ressource Description Framework, Referenzontologie, z. B. CIDOC CRM)
- → die Anbindung der Daten an kontrollierte Vokabulare und Normdaten (z. B. The Getty Controlled Vocabularies, Gemeinsame Normdatei)
- → die semantische Segmentierung und Verknüpfung von Text, Bild und 3D-Modell mit den Datenbank-Instanzen: a) Annotation von Freitexten (HTML), b) Annotation von Bildern mit Scalable Vector Graphics (SVG), c) Annotation der 3D-Modelle im 3D-Viewer (WebGL)
- → die Versionierung der 3D-Modelle (Zitierfähigkeit)
- → die Open-Access-Publikation der 3D-Modelle (unter Creative Commons Lizenzen)
- → die Publikation der mensch- und maschinenlesbaren Projektdaten (Export auf webbasierte Online-Dienste wie GitHub)

Den Stand der Technologie zur webbasierten 2D-/3D-Darstellung und weitere Komponenten einer VFU für die kunstgeschichtliche Forschung werden von **Peter Fornaro** (**→ 392**) am Beispiel einer am Baseler **Digital Humanities Lab** entwickelten Arbeitsumgebung vorgestellt. Neben der Klärung der Definition und der Ziele einer VFU beleuchtet der Beitrag das Potenzial und die Relevanz der echten Farb- und Materialwiedergabe mithilfe des **Reflexion Transformation Imaging** (RTI)-Verfahrens, welches von der WebGL-Technologie unterstützt wird.

Die größte Herausforderung hinsichtlich der Wissensrepräsentation und der digitalen Erschließung unserer rechnergestützten Forschungsdaten besteht darin, die Erkenntnisse aus den drittmittelgeförderten Forschungsprojekten zu verstetigen. Hierzu müssen zum einen die Forschungsinstitutionen die Relevanz und Bedeutung des Themas erkennen, um über die Projektlaufzeiten hinaus die personellen Ressourcen in diesem Bereich zu halten. Zum anderen muss die Fachcommunity sich endlich auf Standards hinsichtlich der Projektdokumentation und Wissensrepräsentation verständigen, die wiederum die Nachvollziehbarkeit, Lesbarkeit, Austauschbarkeit und Nachhaltigeit der Forschungsergebnisse im Sinne einer **guten wissenschaftlichen Praxis** gewährleisten. 10

Sollte die Wissenschaft allgemein den digitalen Wandel ernst nehmen, wird sie nicht um die Anforderungen von **Linked Open Data** (Web 3.0) herumkommen, die Tim Berners-Lee als die höchste Stufe seiner fünfstufigen Skala definiert. 11 Auf dem Weg zu **neuem Forschungsraum** und **virtuellen Forschungsumgebungen** für **digitale 3D-Rekonstruktionen** sowie nachhaltigen digitalen Forschungsdaten im Sinne von **Open Science** müssen wir uns ernsthaft mit einer Reihe an Fragen auseinandersetzen, die im gleichnamigen Artikel des Autors näher betrachtet wurden: 12

■ 10
Deutsche Forschungsgemeinschaft, Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis, Denkschrift Memorandum, Bonn 2013, S. 15, https://www.dfg.de/download/pdf/dfg_im_profil/reden_stellungnahmen/download/empfehlung_wiss_praxis_1310.pdf.

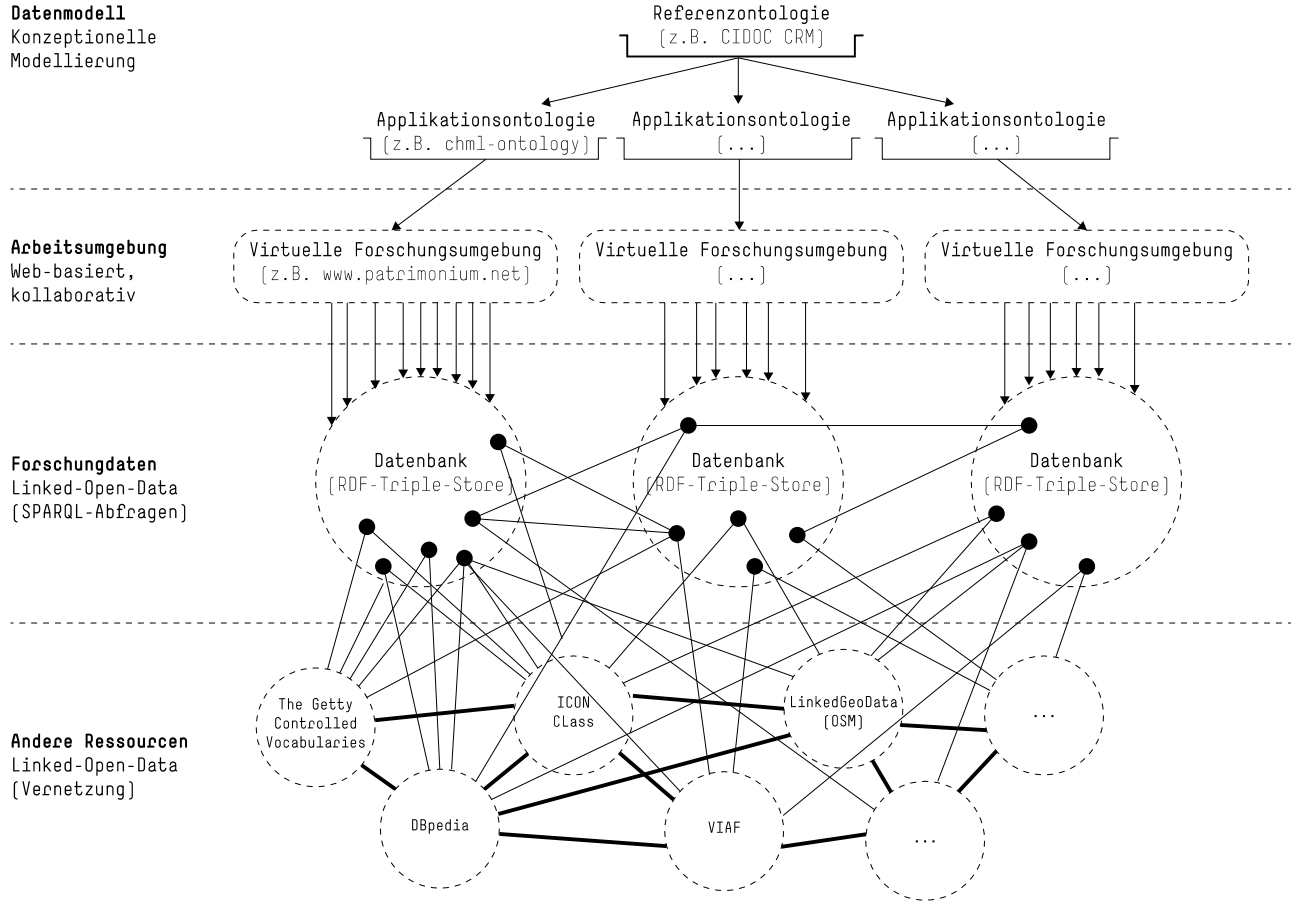
■ 11
Tim Berners-Lee, 5-Sterne-Modell, http://5stardata.info/de/, 2016.

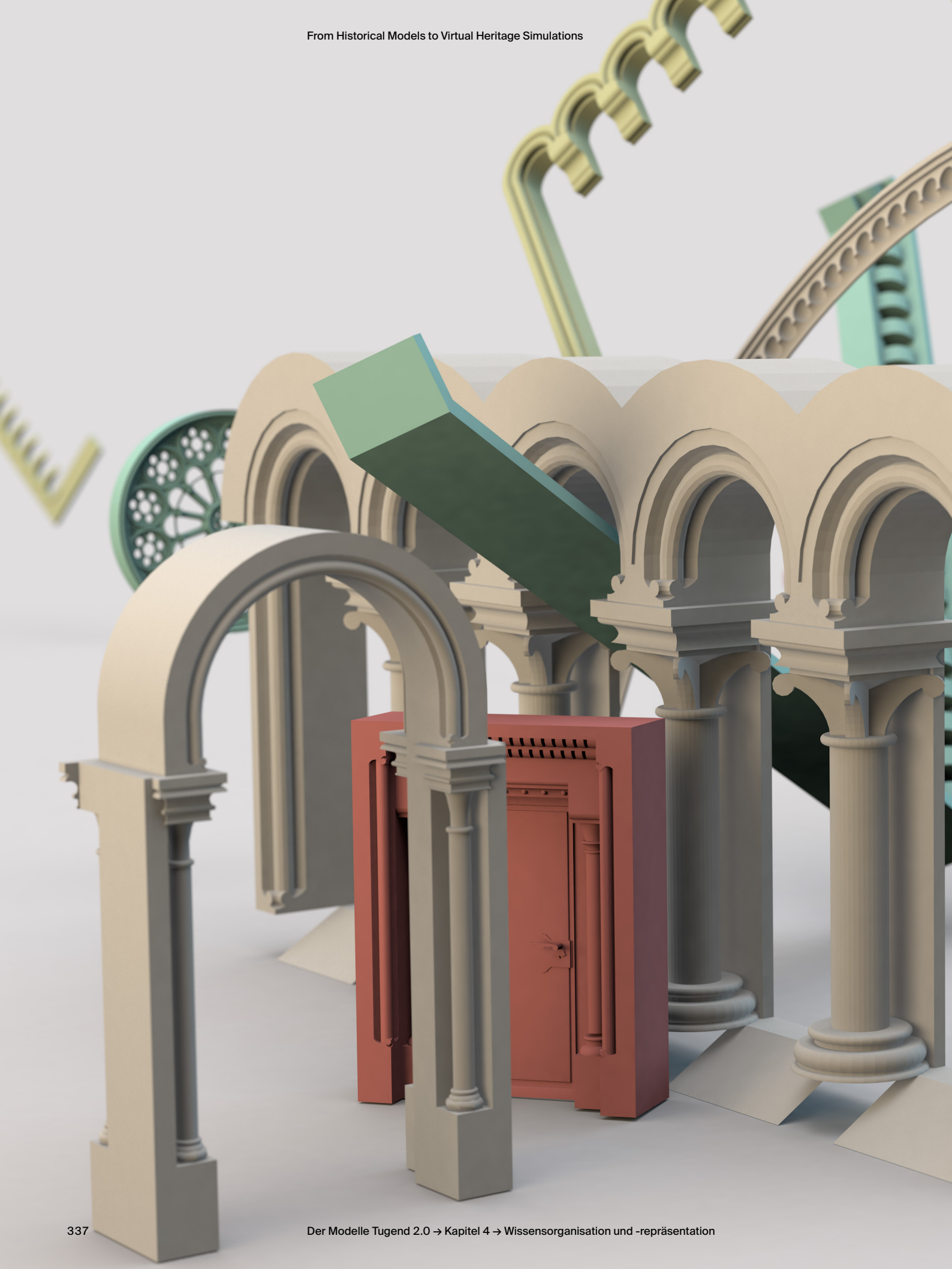
■ 12
Piotr Kuroczyński, Neuer Forschungsraum für die Kunstgeschichte: Virtuelle Forschungsumgebungen für digitale 3D-Rekonstruktionen, in: Piotr Kuroczyński, Peter Bell, Lisa Dieckmann (Hg.), Computing Art Reader. Einführung in die digitale Kunstgeschichte, arthistoricum.net-ART-Books, Heidelberg 2018, S. 161–181, https://books.ub.uni-heidelberg.de/arthistoricum/reader/download/413/413-17-83324-3-10-20190111.pdf.

→ Wie können Semantic-Web-Technologien in den Digital Humanities sinnvoll eingesetzt werden?
→ Wie wird das Wissen im Web 3.0 strukturiert und organisiert?
→ Welche Ontologien und Begriffssysteme können angewendet werden?
→ Wie können Inhalte mithilfe maschineller Intelligenz semantisch angereichert werden?
→ Welche Forschungsumgebungen/-infrastrukturen werden der Wissenschaft in diesem Kontext einen angemessenen Dienst leisten?

Ein sich abzeichnender digitaler Forschungsraum basiert auf der neuen Datenkultur und einer semantischen Vernetzung mensch- und maschinenlesbaren Wissens 02.

□ 02
Ebenenbasierte Darstellung der Komponenten einer Forschungsinfrastruktur im Sinne dynamischer Wissensintegration, Linked Open Data und Open Science. (Piotr Kuroczyński, 2017)





Erik Malcolm Champion

P. From Historical Models to Virtual Heritage Simulations

→ 3D models, digital history, theory, virtual heritage

This chapter analyses the gap between digital historical models, and proposes that instead of developing stand-alone models that we design in terms of components, components of scholarly ecosystems and audience-oriented learning systems. The focus here is not on individual projects or technological limitations but on the lack of clear and replicable explicit terminology, methodology, assessable, replicable evaluation, and scholarly infrastructure. The success of virtual heritage projects as both a communication and preservation medium depend on community involvement, including scholars, students, the wider public, but also the original shareholders.

There is also great potential for more focussed usability studies to verify the effectiveness of interaction and contextual learning. How interaction is intended, what actually takes place and how to archive it separately from the model are difficult issues, but they need to be solved. I will also briefly discuss four major themes potentially of great import to a virtual heritage repository: consumer VR; research groups attempting to avoid the problems of silo projects; publication of 3D models in journals; and real-time streaming of distributed components in a game engine. This chapter also suggests ten criteria to determine whether and to what extent virtual heritage models can solves these issues.

P.1 Introduction

This chapter is primarily an analysis of the gap between digital historical models and their effective and efficient use of components of scholarly ecosystems and audience-oriented learning systems. The focus will not be on individual projects or technological limitations but on the lack of clear and replicable explicit terminology, methodology, assessable, replicable evaluation, and scholarly infrastructure. 01

■ 01
Alonzo Addison, Emerging Trends in Virtual Heritage, in: MultiMedia, 7 (2), 2000, pp. 22–25.

P.2 Issues

Despite the proliferation and uptake of digital technology and social media, experts have warned us of the disappearance of digital models, especially those used for virtual heritage projects. While there are various examples of digital heritage projects and tools virtual projects that promise reliable infrastructure, 02 there are still too few examples of effective use and deployment of 3D models and related media for cultural heritage. 03

To demonstrate this issue, try this simple exercise: which 3D digital model project can satisfactorily answer the following questions?

→ Capacity to distribute different levels of quality of content but communicate accuracy of the data and the intentions that drove the creation of the simulation?
→ Ability to connect to archives and to other external sources and track the usefulness and effectiveness of the data?
→ Results in guaranteed meaningful and significant feedback from communities and shareholders?

All three questions may appear to be predicated on technical solutions but they also depend on agreed terminology.

■ 02
Ignacio San Jose, Jose Martinez, Noelia Alvarez, Juan Fernandez, Francisco Delgado, Ruben Martinez, Julio Puche, Javier Finat, An Open Source Software Platform for Visualizing and Teaching Conservation Tasks in Architectural Heritage Environments, Proceedings of the ISPRS-International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 1(2) 2013, pp. 367–372.

■ 03
Maria Economou, Laia Pujol, Educational Tool or Expensive Toy? Evaluating VR Evaluation and Its Relevance for Virtual Heritage, in: Yehuda Kalay, Thomas Kvan, Janice Affleck (Eds.), New Heritage: New Media and Cultural Heritage, Routledge, London 2008, pp. 242–60.

P.3 Terminology

Although terminology may be considered in many academic disciplines to be an exercise in pedantry, in the field of heritage it could and should be of crucial import. 04

Digital models of historical buildings and historical landscapes are typically hypothetical and partial models. They are also rhetorical or pedagogical, but according to Clark, 05 they are not **actually** reconstructions, instead, they are constructions, and, if digital, simulations, more of a **simulation slice**. In a spirit of academic debate, although it differs from the title of this book, I counter-argue that current digital heritage projects are models rather than simulations, they are not predictive tools, as they don't create, question or demonstrate hypothetical situations or imaginative possibilities.

For example, a sophisticated weather simulation does not just copy a physical object, it does not simply create a simplified physical or digital distinction all differ: a digital copy, a conceptual simplification, a model that replicates a process rather than just the object itself, or a simulation that can only predict a potential outcome once it runs. Despite this, the words used to describe them in the field are interchangeable. The relevant scholarly communities need to agree on the definitions of model and simulation, as different fields define them differently, and some fields use either term without distinction.

We also require more theoretical and practical research into how digital models can explain intangible heritage values or communicate layers and levels of archaeological uncertainty, 06 but such an aim is problematic if we do not agree on key meanings and usages.

Digital simulations are often introduced to academic audiences at virtual heritage conferences and virtual heritage exhibitions, but the purpose and aims of virtual heritage are typically vague. While virtual heritage was initially described as a fusion of virtual reality technology with cultural heritage content, 07 Stone and Takeo emphasized the pedagogical aspect:

»... the use of computer-based interactive technologies to record, preserve, or recreate artifacts, sites and actors of historic, artistic, religious, and cultural significance and to deliver the results openly to a global audience in such a way as to provide formative educational experiences through electronic manipulations of time and space.« 08

The most famous charter on virtual heritage, the **London Charter** defined computer-based visualization as »the process of representing information visually with the aid of computer technologies« 09 but it does not explain the cultural significance of the object or process simulated, and reasons for why it should be preserved and communicated.

■ 04
Anna Bentkowska-Kafel, Hugh Denard, Drew Baker, Paradata and Transparency in Virtual Heritage, Ashgate, London 2012.

■ 05
Jeffrey Clark, The Fallacy of Reconstruction, in: Maurizio Forte (Ed.), Cyber-Archaeology, Archaeopress, Oxford 2010, pp. 63–73.

■ 06
Konstantinos Papadopoulos, Efi Kefalaki, At the Computer's Edge the Value of Virtual Constructions to the Interpretation of Cultural Heritage, in: Archeomatica 4, 2010, pp. 46–51.

■ 07
Alonzo C. Addison, Virtual Heritage: Technology in the Service of Culture in: Arnold, David Arnold, Alan Chalmers, Dieter Fellner (Eds.), The Proceedings of the 2001 Conference on Virtual Reality, Archeology, and Cultural Heritage, Athens, Greece, 28–30 November 2001, pp. 343–354.

■ 08
Robert Stone, Takeo Ojika Virtual Heritage: What Next? In: Multimedia, 7 (2) 2000, pp. 73–74.

■ 09
Hugh Denard, The London Charter for the Computer-Based Visualisation of Cultural Heritage, in: London Charter, 2009, http://www.londoncharter.org/.

I have argued that the purpose and significance of virtual heritage is clearer if we define it as

»the attempt to convey not just the appearance but also the meaning and significance of cultural artefacts and the associated social agency that designed and used them, through the use of interactive and immersive digital media.« [10]

Now this is not the only use for architectural models, [11] but it is particularly important for cultural heritage as a communication process.

When virtual heritage showcases the latest technology, in order to integrate both new media and digital heritage; it is unlikely to satisfy the requirements of both, at least not in fixed project form. Virtual heritage has been a (sometimes) successful communication medium but seldom has it succeed as a preservation medium. [12]

Why? Due to the lack of scholarly debate, and agreed terminology. [13] The definition of virtual heritage is highly contentious, yet there is little literature either in book or journal form that consistently and progressively argues for standardized terms.

■ 10
Erik Champion, Explorative Shadow Realms of Uncertain Histories, in: Yehuda Kalay, Thomas Kvan, Janice Affleck (Eds.), New Heritage: New Media and Cultural Heritage, Routledge, London 2008, pp. 185–206.

■ 11
Sander Münster, W. Hegel, Cindy Kröber, A Model Classification for Digital 3D Reconstruction in the Context of Humanities Research, in: Sander Münster, Mieke Pfarr-Harfst, Piotr Kuroczyński, Marinos Ioannides (Eds.), 3D Research Challenges in Cultural Heritage II: How to Manage Data and Knowledge Related to Interpretative Digital 3D Reconstructions of Cultural Heritage, Springer, Cham 2016, pp. 3–31.

■ 12
Erik Champion, Entertaining the Similarities and Distinctions between Serious Games and Virtual Heritage Projects, in: Entertainment Computing 14, 2016, pp. 67–74.

■ 13
Hazel Tucker, Elizabeth Carnegie, World Heritage and the Contradictions of Universal Value, in: Annals of Tourism Research 2014, pp. 63–76.

P.4 Method versus Methodology

An even more fundamental issue is the lack of clear methodology (as distinct from method). In the English-speaking world, methodology has often been conflated with method but there is a crucial distinction. While methodology can be seen as a framework of methods, I suggest the more useful definition is as a study and critique **of** methods.

I invite the reader to review papers in the field and see for herself or himself the number of papers in virtual heritage that clearly and comprehensively describe and discuss the range and effectiveness of methods in virtual heritage before describing the method they chose in their virtual heritage project. Without clearly examining the field of relevant research, and explaining **why** they chose the methods they use, the field of virtual heritage will uncritically repeat itself. [14] A community portal providing key papers and projects and shared tools and terminology would go some way to addressing this issue.

■ 14
Sander Münster Thomas Koehler, 3d Reconstruction of Cultural Heritage Artefacts, in: Stephan Hoppe and Stefan Breitling (Eds.), Virtual Palaces, Part II: Lost Palaces and Their Afterlife, Palatium, Munich 2016, pp. 87–102.

P.5 Scholarly Effectiveness

This is also an issue of inadequate infrastructure, which is not helped by the tendency of research funding bodies to support new advances rather than to maintain and update infrastructure. Because of the emphasis on standalone models, interaction design patterns (and mechanics) are not standardized, and not preserved, let alone separated from the 2D and 3D media assets. [15] There have been recent European and North American moves [16] to create archives and digital humanities infrastructures [17] but 3D models have not yet been fully incorporated into these new infrastructures while allowing full public access. [18]

There are also challenges of access: models are hard to find, impossible to download and edit, in unusual, unwieldy or obsolete formats. Many are standalone 3D meshes with no accompanying metadata or information on how the data was acquired, how the models can be shared (and if they can be edited), and how accurate the scanning or modelling process was, or the scholarly documents, field reports, photographs and site plans that allowed the designers to extract enough information (including copyright and legal information) for their models.

15
Erik Champion, The Missing Scholarship Behind Virtual Heritage Infrastructures, in: Chiara Eva Catalano, Livio De Luca (Eds.), GCH '16 Proceedings of the 14th Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage, Genoa 5–7 October 2016, pp. 57–65.

16
3D ICONS, 3d -ICONS, in: 3D-ICONS 3D Digitisation of Icons of European Architectural and Archaeological Heritage, Undated, http://3dicons-project.eu/

17
Jennifer von Schwerin Heather Richards-Rissetto, Fabio Remondino, Giogio Agugario, Gabrio Girardi, The Mayaarch3d Project: A 3d WebGIS for Analyzing Ancient Architecture and Landscapes, in: Literary and Linguistic Computing 28 (4), 2013, pp. 736–753.

18
Jeremy Huggett, Promise and Paradox: Accessing Open Data in Archaeology, in: Clare Mills, Michael Pidd, Esther Ward (Eds.), Digital Humanities Congress 2012, Sheffield, 6–8 September 2012.

P.6 Evaluation

Experts have argued [19] that a major issue in the development of high quality and effective virtual heritage projects has been a corresponding lack of evaluation methods. Due at least in part to the lack of interactivity, the pedagogical benefits of teaching heritage and archaeology and architectural history via 3D digital heritage models, is also problematic.

More work is required to provide access to the models, sites and paradata (which the London Charter [20] defines as **Information about human processes of understanding and interpretation of data objects**). Although there are charters such as the London Charter and the Seville Charter, as there are few publicly accessible models [21] there is also no shared standardized evaluation data, and many scholars have complained about user experience issues and a scarcity of suitable pedagogical material [22] or data that conveys the accuracy, authenticity and authorship of the simulated material. [23]

19
Athanasis Karoulis, Stella Sylaiou, Martin White, Usability Evaluation of a Virtual Museum Interface, in: Informatica 17 (3), 2006, pp. 363–380.

20
Denard.

21
Sara Barsantia, et al., Critical Factors and Guidelines for 3d Surveying and Modelling in Cultural Heritage, in: International Journal of Heritage in the Digital Era 3 (1), 2014, pp. 141–158.

22
Economou and Pujol.

23
De Reu et al., 2012. Towards a three-dimensional cost-effective registration of the archaeological heritage, Journal of Archaeological Science 40 (2): 1108–1121.

Usability studies, evaluations of user experience, and standardized ways to demonstrate what interaction is expected to happen or not happen in virtual heritage projects need to be better investigated, communicated and verified in order to verify the effectiveness of interaction. How interaction is intended, what actually takes place and how to archive it separately from the model (so it can be easily extracted) are difficult issues but some projects attempt to address this (**https://idre.ucla.edu/research/active-research/vsim**).

P.7 Gaps in Preservation Infrastructure

Hal Thwaites summarized key critical issues for virtual heritage infrastructure:

»In the very near future some critical issues will need to be addressed; increased accessibility to (and sharing of) heritage data, consistent interface design for widespread public use and re-presentations of work, the formalization of a digital heritage database, establishment of a global infrastructure, institutionalized, archival standards for digital heritage and most importantly the on-going curation, of work forward in time as the technology evolves so that our current digital, heritage projects will not be lost to future generations. We cannot afford to have our digital heritage disappearing faster than the real heritage or the sites it seeks to ›preserve‹ otherwise all of our technological advances, creative interpretations, visualizations and efforts will have been in vain.« 24

■ **24**
Harold Thwaites, Digital Heritage: What Happens When We Digitize Everything? In: Eugene Ch'ng, Vincent Gaffney, Henry Chapman (Eds.), Visual Heritage in the Digital Age, Springer, London, 2013, pp. 327–348.

Virtual heritage projects display new uses and potential of technology for cultural heritage, but the funding models and composition of project teams have had minimal usability evaluations and preservation strategies. Publications are found in journals such as **Internet Archaeology, Journal of Computing and Cultural Heritage,** and **Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage,** but actual virtual heritage models are not so common. There are very few online and library-accessible depositories for virtual heritage models, and many of the academic research projects lack long-term infrastructure and preservation strategies. Yet infrastructure is critical if we are to sustain scholarly communication, enrich public involvement and consolidate the currently promised — rather than proven — **heritage** component of **virtual heritage.**

If we are serious in our aim to help the public understand and be involved in virtual heritage then the public need to understand the potential and limita-

tions of the technologies as well. Workshops on 3D tools and software are required, which will allow communities, heritage groups and classrooms to learn from developing their own models and artefacts using free and open source game engines and 3D modeling tools. Further, the research and support of these infrastructures should be supported and rewarded by the academic community.

Key features of 3D models should be that they engage the audience, are formative (allowing the audience to create test and share hypotheses), can be recycled and reconfigured, and are amenable to preservation. However, researchers [25] have cast doubt on the ongoing reliability of 3D data for long-term preservation and they have warned:

»The possibility exists for precious and costly data sets to be lost on failed hard-drives, destroyed in floods or fires, or simply thrown out.« [26]

Despite recent European and North American moves to create archives and digital humanities infrastructures, 3D models have not yet been fully incorporated into these new infrastructures while allowing full public access.

Although there are interesting prototypes and selective web-based prototypes (such as **http://vcg.isti.cnr.it/3dhop/** and **http://www.3dicons.ie/3d-content**) and online commercial suppliers of 3D models of varying quality and accuracy, in many other regions there are very few accessible 3D models of heritage sites that use a common, stable format. Recent European trends are to create archives and digital humanities infrastructures but 3D models have not kept up with the progress achieved for other formats of cultural heritage, they are still silos.

There are exciting new developments: such as topoi, which provides citable research data (**http://repository.edition-topoi.org/**); the inclusion of 3D data in the Archaeology Data Service ADS), United Kingdom (**http://archaeologydataservice.ac.uk/**); Sketchfab, which publishes a large range of 3D interactive models that can be viewed in different contexts including Google CardboardVR (**https://sketchfab.com/**); **www.patrimonium.net**; [27] and 3Dhop, an

»open-source software package for the creation of interactive Web presentations of high-resolution 3D models, oriented to the Cultural Heritage field«

(**http://3dhop.net/**). However, we still need these portals and repositories to provide clearer examples and workflows or demonstrate how to demarcate levels of accuracy and authenticity.

■ 25
Sven Havemann, Intricacies and Potentials of Gathering Paradata in the 3d Modelling Workflow, in: Anna Bentkowska-Kafel, Hugh Denard, Drew Baker (Eds.), Paradata and Transparency in Virtual Heritage, Ashgate, London 2012, pp. 145–162.

■ 26
Kelly Greenop, Justin Barton, Scan, Save, and Archive: How to Protect Our Digital Cultural Heritage, in: The Conversation, 2014, https://theconversation.com/scan-save-and-archive-how-to-protect-our-digital-cultural-heritage-22160

■ 27
Piotr Kuroczyński, Oliver Hauck, Daniel Dworak, 3D Models on Triple Paths – New Pathways for Documenting and Visualizing Virtual Reconstructions, in: Sander Münster, Mieke Pfarr-Harfst, Piotr Kuroczyński, Marinos Ioannides (Eds.), 3D Research Challenges in Cultural Heritage II: How to Manage Data and Knowledge Related to Interpretative Digital 3D Reconstructions of Cultural Heritage, Springer, Cham 2016, pp. 149–172.

P.8 Solutions

The above issues are directly related to a more fundamental problem, the design, maintenance 01 and circulation of the digital models themselves and how they could and should link to both the interactive experience and the documentation required to communicate, debate and preserve archival and scholarly resources. To address at least some of these problems, the virtual heritage community needs to debate and adopt a scholarly ecology (an overall system and community that provide feedback, management and impact for virtual heritage research).

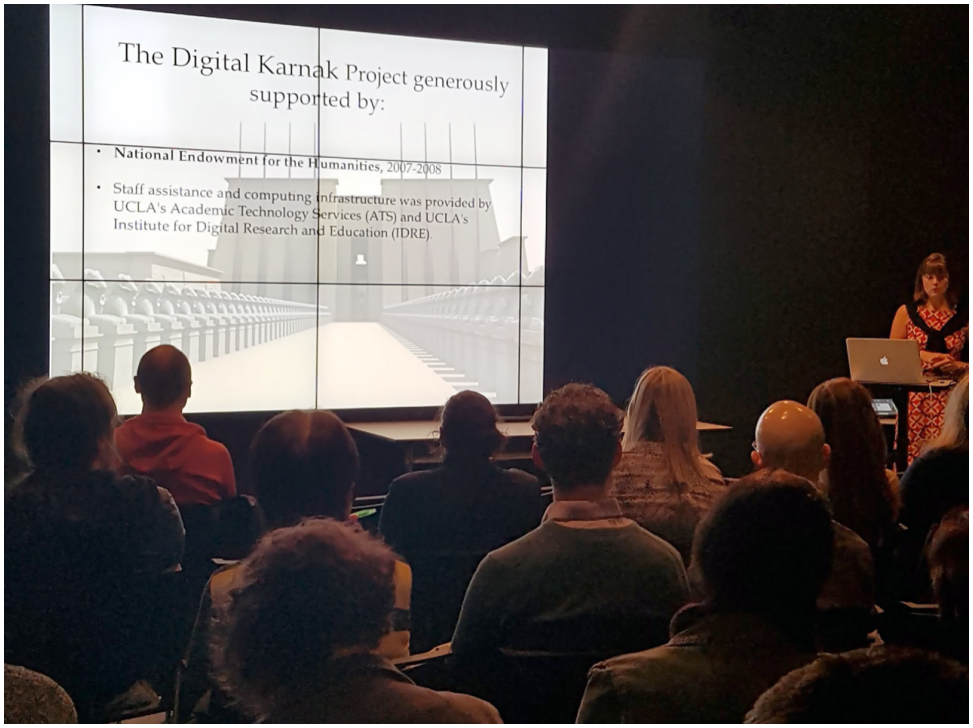
Tost and Champion 28 argued that virtual heritage projects should demonstrate: care, accuracy, sensitivity, effective and inspirational pedagogical features, collaborative, and evaluation-orientated. Extrapolating from these aims, the following features are desirable for designing 3D virtual heritage models or developing an infrastructure that can support virtual heritage models for the purpose of classroom teaching and public dissemination: 02

- → Data accuracy: the level of accuracy and type of data capture method should be associated with the model, as well as the geographical location.
- → Format limitations: any known limitations or required conditions due to the digital format or way in which the data was created, should also be associated with the model.
- → Provenance: the record of ownership and scholarship and community input should be recorded and accessible (the source and the ownership rights).
- → Community protocols: social, cultural and institutional protocols that guide who accesses the sourced cultural heritage and how that should affect the transmission, distribution and dissemination of the digitally simulated model.
- → Authenticity: the known, extrapolated, omitted, simplified and imagined areas and components of the model should be identified in some form of thematic (and preferably standardized) schema.

■ **28**
Laia Pujol Tost, Erik Champion, Evaluating Presence in Cultural Heritage Projects, in: International Journal of Heritage Studies, 18 (1), 2011, pp. 83–102.

☐ 01
The Advanced Challenges in Theory and Practice in 3D Modeling of Cultural Heritage Sites Workshop, at UCLA, 20–23 June 2016, noted the failure to preserve many Augmented Reality projects.

P.9 Features of 3D Formats



☐ 02
Dr Elaine Sullivan, Digital Karnak project on the challenges in publishing 3D models (GLAMVR 2016 event, Curtin University).

Any file format is supported should be robust, durable and open (with minimum data loss) to various import and export formats. However, these features are not enough if the file format is too limited to support the aims of virtual heritage models. As an initial tentative suggestion, a 3D file format for virtual heritage should provide the following features:

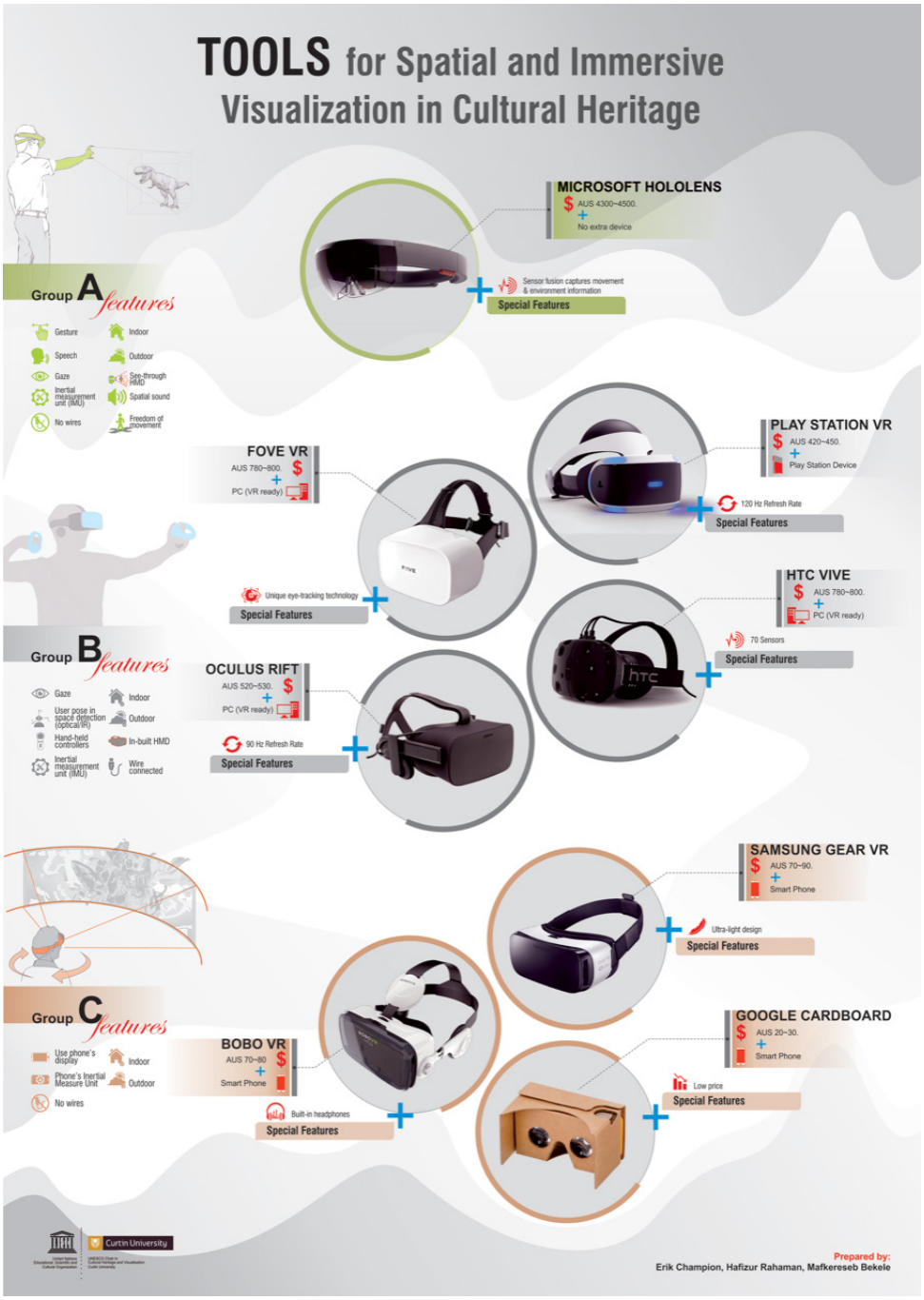
- → Zoom in, zoom out, rotate, and walk around.
- → Certain points in the text can link to camera views.
- → Can remove or add parts of the model (as components, areas, layers, or in terms of authenticity).
- → Can change from wireframe to textured view.
- → Can take screenshots.
- → Can incorporate annotations.
- → Can pose and change the field of view.
- → Can measure between parts of the online model.
- → Can handle large file sizes.
- → Has many import and export options.
- → Can work with timelines, so that the model can show changes over time.

When hosted with other data online, the historical and hypothetical simulations could require the following features:

- → As a core part of a scholarly ecosystem, the historical simulation as a 3D model should be traceable; it should link to previous works and to related scholarly information.
- → The model should be component-based so that parts can be directly linked and updated. Web models would be dynamically created at run-time.
- → The model should be engaging, thus extensive play-testing and evaluation will be required to ensure that it actually does engage its intended audience.
- → As part of a scholarly infrastructure, the 3D model format (and all related data formats) should be easy to find and reliable.
- → The model should not require huge files to download, or it should at least provide users with enough information to decide whether and what to download.
- → Metadata should record the completeness, measurement methodology and accuracy of the models.

P.10 From Stand-alone Models to Flexible Component-based Systems

There are four major themes here of great import to a virtual heritage repository. Firstly, as was noted above, VR equipment 03 is moving towards the consumer level and as a component-based system where your smartphone is both the stereoscopic viewer, and the computer (such as the Samsung Gear). These consumer technology frameworks will help VR technology and related content become far more accessible.



☐ 03
A range of consumer MR / VR headsets available in 2018 (Hafizur Rahaman, Erik Champion).

Secondly, there are research groups now so concerned at the silo mentality of earlier virtual heritage projects that they are developing technology that either allows people to create their own content using free and open source technology such as the EU Chess project. 29 or they are developing technical exemplars using free software that others can download and modify and thus learn from, for example, CINECA's APA reusable game assets-serious game project using the free Blender 3D software. 30

Thirdly, a few journals provide technology that allows authors to add 3D models inside or next to text-based articles. Two journals that come to mind are Internet Archaeology, (**http://intarch.ac.uk/**) and Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage (**http://www.journals.elsevier.com/digital-applications-in-archaeology-and-cultural-heritage/**).

Fourthly, if a game engine (a real-time rendering engine) is required, then a solution would be to have the game engine or application add the components (assets) dynamically, requiring the model to be broken up into sub-components and then the computer would stream and connect to these subcomponents (packages) at runtime. There may also be a compromise solution that allows both a robust but limited 3D format for archived models and a more interactive format available either via a browser or as a downloadable application.

Could virtual heritage researchers further the development of a digital heritage journal with support from a community of specialists? Can tools, methods, projects, scholarly communities and an open-access online journal-publishing system exist to communicate between and beyond digital research infrastructures, versed in text or in 3D models? How to encourage communities to adopt and extend this **›ecosystem‹**?

■ **29**
Laia Pujol, Maria Roussou, Stavrina Poulo, Oliver Balet, M. Vayanou, Y. Ioannidis, in: Graeme Earl, Tim Sly, Angeliki Chrysanthi, Patricia Murrieta-Flores, Constantinos Papadopoulos, Iza Romanowska, David Wheatley (Eds.), Personalizing Interactive Digital Storytelling in Archaeological Museums: The Chess Project, Archaeology in the Digital Era, Proceedings of the 40th annual conference of Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, Southampton, 26–29 March 2012, pp. 77–90.

■ **30**
Antonella Guidazzoli, Maria Chiara Liguori, Mauro Felicori, Sofia Pescarin, Creating New Links among Places through Virtual Cultural Heritage Applications and Their Multiple Re-Use, in: Mediterranean Archaeology and Archaeometry 14 (4), 2014, pp. 17–24.

P.11 Scholarly Appraisal of VH Infrastructure

Bilder and Neylon wrote:

»What should a shared infrastructure look like? Infrastructure at its best is invisible. We tend to only notice it when it fails. If successful, it is stable and sustainable. Above all, it is trusted and relied on by the broad community it serves. Trust must run strongly across each of the following areas: running the infrastructure (governance), funding it (sustainability), and preserving community ownership of it (insurance).« 31

A successful scholarly virtual heritage infrastructure could be assessed in terms of how it supports the development of new research and grants and how it is used to provide evidence for academic esteem and promotion. How could a virtual heritage infrastructure help scholarly review of the projects

■ **31**
Geoffrey Bilder, Jennifer Lin, Cameron Neylon, Principles for Open Scholarly Infrastructures, Science in the Open, 2015, http://dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.1314859.

themselves? It could provide a systematic way to show changes over time, allow for viewing on different formats for varying input mechanisms and learning mediums, allow counterfactual exploration, log user responses, track user preferences and share insights and personal feedback from distributed audiences. And it could help content creators assess impact, usability and usefulness automatically, and help make comparisons to other projects.

Ideally, it would also augment **scholarly research of the content**, as well as educational source material, providing associated tools, interpretative mediums and careful references as well as usage data that could provide evidence for solid scholarly arguments.

Above all, it would be an **ecosystem**. All its parts would be interdependent, and it would hopefully be greater than the sum of its parts. A review community would be summoned to discuss and add to the models via publications and related links, and future publications could, in turn, integrate the community feedback into new research findings, improved critiques, and an enhanced research base.

These solutions include:

- → Adoption of a 3D file format that allows the separation of both archive and online display.
- → Agreed-upon ontology disseminated widely.
- → Wizards to create metadata easily and conveniently following agreed charters; lucid scenarios and examples of 3D workflows with community feedback forums.
- → Design of digital models as combinations of components that can incorporate Linked Open Data, connections with academic publication frameworks, digital archives and other media assets.
- → Variable levels of detail of resolution to provide copyright holders with some level of control and authorship.
- → The fostering of prizes and awards via national and international communities for best practice projects and to promote scholarly 3D models as academic outputs.
- → Cultural presence: models should aim towards explaining the cultural significance of the original site, and give an impression of the situated cultural value of the place as experienced by the original inhabitants.
- → Evaluation Data: these aims should be clearly explained and any evaluation data of participants should be linked to (or otherwise associated with) the models.
- → Purpose: the generic ways in which original creators and shareholders intended the models could be edited or otherwise modified, should be described.
- → The model must provide some degree of access and feedback from the wider public or specialized interest groups and shareholders.

P.12 Conclusion

Virtual heritage is not a dependable and demonstratively effective communication medium; the field contains too few examples of accessible useful and engaging models that one can test, verify, experience and learn from. Virtual heritage urgently requires more usability research, but the biggest issue is the preservation of the research data and 3D models. To solve this, virtual heritage requires a systematic pipeline featuring open source software, a well-organized online archive of 3D models in a robust open format, and globally accepted metadata. But it also requires a community who reviews, critiques, augments and maintains suitable content. In short, a digital scholarly ecosystem for cultural heritage.

It may appear that the overall number and difficulty of technical issues is the major problem to resolve, but if there is no public involvement, understanding and appreciation, the virtual heritage project has failed despite any technical brilliance or infrastructure support. Indeed, infrastructure that is not used is not really infrastructure; it is merely equipment. Previous writers have written convincingly about the importance of archives [32] but there is another important step, ensuring the archive is effectively used. As Garnett and Edmond have declared, [33] there are many issues with APIs, but one critical issue is how to get enough people to use them. The success of virtual heritage projects as both a communication and preservation medium depends on community involvement, which includes scholars, students, the wider public, but also the original shareholders and owners of the cultural content simulated. Shared understanding requires clear aims, methods and terms, but above all, it requires a comprehensive methodology. Otherwise, the field will not scale, and it will not progress.

■ 32
W. F. Limp, A. Payne, S. Winters, Adam Barnes, Jackson Cothren, Approaching 3d Digital Heritage Data from a Multi-Technology, Lifecycle Perspective, in: Francisco Contreras, Mercedes Farjas, Francisco Melero (Eds.), Proceedings of the 38th Annual International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA), Granada 6–9 April 2010, pp. 15–22.

■ 33
Vicky Garnett and Jennifer Edmond to Impact of Social Science blog, of the London School of Economics, 13 Vicky Garnett and Jennifer Edmond, Building an API is no t enough! Investigating Reuse of Cultural Heritage Data, in: LSE Impact Blog, 2014, http://blogs.lse.ac.uk/impactofsocialsciences/2014/09/08/investigating-reuse-of-cultural-heritage-data-europeana.

Paola Ronzino

Q. CRMba: An ontological model for encoding buildings archaeology documentation

→ BIM, buildings archaeology, CIDOC CRM, CRMba, ontological extensions

The present work addresses the issues related to data interoperability in the field of buildings archaeology. It introduces the extension of the ontological model CIDOC CRM for buildings archaeology, namely CIDOC CRMba, which expresses the semantic relations between the building and its components with the introduction of specialized classes and properties, that allow to describe and document any information related to the built work throughout its life cycle. A first attempt to harmonize the ontological model for building archaeology documentation with the archaeological extension of the CIDOC CRM — CRMarchaeo — has been carried out with good results, and is presented in this work. Furthermore, the paper introduces the work carried out by the author (still in progress) to demonstrate how the integrated use of Building Information Modelling (BIM) and semantic technologies permits to connect different data sources and to combine them into a semantic network — allowing to have a unique representation of the building and its context — by exploring the integration of the CIDOC CRM ontology and its archaeological extensions with 3D models and the collected information.

Q.1 Introduction

An important aspect of the archaeological investigation is the study and documentation of standing archaeological structures. Buildings Archaeology is by far the oldest form of archaeology, having its origins in the Italian Renaissance. The actual name was decided during a conference of the Building Special Interest Group of the Institute of Field Archaeologist (1993). 01 Before then, the name used to identify the buildings archaeologists was building recorders, architectural archaeologists, or archaeological surveyors. 02

Within this science, buildings are almost used as physical documents in their own right, providing examples of the development of decorative carvings, mouldings or plan forms, being the result of a series of modifications due to construction and destruction activities that modified their appearance over the historical periods.

The identification of these processes, the analysis of the different techniques and the materials used over its existence, provide archaeologists with an understanding of the continuity and discontinuity of the events that interested the built structure.

This information can be used to produce a detailed understanding of the development of any building, whether standing or in ruins, or when dealing with unconnected built structures found in stratified contexts.

The documentation produced during an archaeological investigation, consisting of the archaeologist's excavation diaries, notes, photos, maps, is then recorded into forms developed by archaeological institutions and research centres to preserve the evidences destroyed in the excavation process or collected during the observation of a standing structure. This information is usually archived into digital repositories and other information systems, which are frequently not readily available online or easy to find.

The implementation of an ontological model that helps to understand the life cycle of ancient buildings comes from the archaeologists' urgent need to avail themselves of a tool to support the archaeological investigation and its related activities, and to formalize the information gathered during observation and excavation.

So far, national standards have partly managed to give a more consistent systematization to archaeological excavation and investigation documentation by developing national-based guidelines and schemas. 03 Nevertheless, it is still possible to see extensive fragmentation and discrepancies between the various standards used by archaeological schools and the high-level systems developed by governments and other official institutions, which require a tool capable of managing the documentation and activities of the whole excavation process by using an adequate semantic framework.

The idea of developing archaeological extensions of the CIDOC CRM 04 ontology to cover the specific needs of an archaeological investigation and to help archaeologists examine and understand the complex relationships between all entities and activities related to it, derived from this need.

■ **01**
Jason Wood, Buildings Archaeology: Applications in practice (ME-PRAC), Oxford 2004.

■ **02**
Richard Morriss, The Archaeology of Buildings, Stroud 2004.

■ **03**
Paola Ronzino, Nicola Amico, Franco Niccolucci, Assessment and comparison of metadata schemas for architectural heritage, in: CIPA Symposium, Prague 2011, http://www.conferencepartners.cz/cipa/proceedings/index.htm, version: 12–16 September 2011.

■ **04**
CIDOC CRM. Current Official Version of the CIDOC Conceptual Reference Model, http://old.cidoc-crm.org/docs/cidoc_crm_version_6.2.2%20(WorkingDoc).pdf.

The two archaeological extensions of the CIDOC CRM, CRMba 05 designed to model the complexity of a built structure from the perspective of buildings archaeology, and the CRMarchaeo 06 developed to model the processes involved in the investigation of subsurface archaeological deposits, were implemented in the framework of the ARIADNE project. 07 The project addressed the issue of data fragmentation with the ultimate goal to enable the integration of archaeological datasets, providing an infrastructure for the exploration of the available archaeological dataset archives and the semantic integration of the digital resources made available within the network. ARIADNE adopted the CIDOC CRM ontology for the whole infrastructure.

■ **05**
Paola Ronzino, CIDOC CRMba A CRM Extension for buildings archaeology information modelling, (Unpublished doctoral thesis). The Cyprus Institute, Nicosia, Cyprus 2015 and Paola Ronzino, Franco Niccolucci, Achille Felicetti, Martin Doerr, CRMba a CRM extension for the documentation of standing buildings, in: International Journal on Digital Libraries, 17 (1) 2016, pp. 71–78.

■ **06**
CRMarchaeo, http://www.ics.forth.gr/isl/CRMext/CRMarchaeo/docs/CRMarchaeo_v1.4.pdf.

■ **07**
Franco Niccolucci, Julian Richards, ARIADNE Advanced Research Infrastructure for Archaeological Dataset Networking in Europe, in: International Journal of Human-Computer Studies Art 7(1–2), 7088, 2013.

Q.2 The CRMba ontological model

The CRMba is an extension of the CIDOC CRM formal ontology, conceived to encode metadata about the documentation of archaeological buildings and to formalize the observation and analysis of the traces left on standing buildings by the activities performed on the monuments through time. The model was implemented to support the archaeological and architectural investigation methods used to phase and date the fabric and to support the analysis, interpretation, restoration and virtual reconstruction of archaeological standing buildings through the semantic encoding of the information, thus identifying the evolution of the structure over time and recording the relationships between each of the building components and with the building as a whole.

Furthermore, the CRMba model was developed with the aim of expressing the semantic relations of the stratigraphic units of standing buildings, taking into account the stratigraphic analysis theory of standing buildings 08, which is basically driven by the same principles of archaeological stratigraphy. 09

After an accurate analysis of specific metadata standards and schemas developed to document the built heritage, the results of a cross-walk mapping between the main schemas and standards in use by national bodies at European level 10 demonstrated that such standards, although very rich in their structure, fail to describe the completeness of information about the building T1.

In particular, the possibility to make explicit the parthood relations between components and the whole building, and the relationships between Stratigraphic Units amongst each other has not been explored yet. The result of the mapping enabled the identification of the hidden semantics and the inter-relationships of the metadata sets and highlighted the need to add more specialized concepts to the CIDOC CRM core ontology to describe the very complex structure of the buildings, especially as concerns the analytical description of the asset (static and functional components) and the relationship among its parts.

CRMba takes into consideration not only the physical layout of the archaeological stratification visible on the built structures, but also enables to register the events that led to the genesis of a particular stratification, allowing to record and subsequently to interpret the stratifications of the architectural remains found during an excavation.

The peculiarity of CRMba is that it focuses on the theory of parthood (Mereology) 11, and part-whole relation combined with topology (Mereotopology) 12 between the constituent parts and the whole structure, and introduces the concepts of **empty spaces** and **space functions** defined by form. 13

■ **08**
Richard Morriss, The Archaeology of Buildings, Stroud 2004 and Manfred Schuller, Building Archaeology, Icomos, Munich 2002 and Gian Pietro Brogiolo, Archeologia dell'edilizia storica, Como 1988 and Roberto Parenti, Archeologia dell'architettura, in: Dizionario di Archeologia. Temi, concetti e metodi, 2009, p. 39–43.

■ **09**
Edward Harris, Principles of Archaeological Stratigraphy, London 1989 and Andrea Carandini, Storie della Terra. Manuale di scavo archeologico, Einaudi, Torino 1991.

■ **10**
Paola Ronzino, Nicola Amico, Franco Niccolucci, Assessment and comparison of metadata schemas for architectural heritage, in: CIPA Symposium, Prague 2011, http://www.conferencepartners.cz/cipa/proceedings/index.htm.

■ **11**
C. Maria Keet, Alessandro Artale, Representing and reasoning over a taxonomy of part-whole relations, in: Applied Ontology – Ontological Foundations of Conceptual Modelling, 3(1–2) 2008, pp. 91–110 and Achille Varzi, Mereology, Stanford 2014, http://plato.stanford.edu/entries/mereology/.

■ **12**
Anthony G. Cohn, Achille C. Varzi, Connection Relations in Mereotopology, in: H. Prade (Hg.), European Conference on Artificial Intelligence (ECAI), John Wiley & Sons, Ltd, 1998, p. 150–154, http://www.columbia.edu/~av72/papers/Ecai_1998.pdf.

■ **13**
Paola Ronzino, CIDOC CRMba A CRM Extension for buildings archaeology information modelling, (Unpublished doctoral thesis).

Category	**EU-Chic**	**MA / CA**	**MIDAS**	**Carare/ 3D Icons**
Asset ID	Unique reference number of asset	Codice Univoco	Primary Reference number	ID
Heritage Asset	→ Type of Heritage asset → name of Heritage Asset	→ Definizione tipologica → Denominazione	→ Monument Type → Material → Heritage Asset Name → Artifact Name Type	→ HA / Chracters / heritage Asset type → HA / Appelation / name → HA / Characters / heritage asset type
Structure	Structural material: → Foundation → Wall / pillars → Interstore structure → Roof Finishing material: → Foundation → Wall / pillars → Interstore structure → Roof	→ Spazi / subdivizioni interna → Impianto strutturale → PiantaFondazioni → Strutture verticali → Strutture orizontamento → Copertura → Scale → Pavimenti i pavimentazioni → Elementi decorativi	→ Evidence → Representation Source → Construction Method → Material → Material Component → Note → Material Name → Associated Goods	→ HA / description → HA / construction method → HA / Characters / materials
Conservation/ Restoration	→ Current physical condition → General condition → Condition of critical elements → Major Risks → long-term enviromental impact → sudden enviromental impact → Anthropogenic impact	→ Stato di conservazione → Riferimento alla parte → indicazioni specifiche	→ Modification State → Condition → Condition Statement → Completeness → Condition Date → Agent of Damage → Vulnerability Level → Buffer Zone Width Enviromental	→ HA / Condtion / condition → HA / Condtions / Condition assessment → HA / Condtions / Condition date → HA / Condtions / relations

☐ T1
This table shows part of the cross-walk mapping of built heritage standards.

The model was developed in line with the theories and guidelines for the study of archaeological standing buildings developed by scholars like Brogiolo [14], Parenti [15], Schuller [16], Morriss [17], Davies [18] and by taking into account the real needs of the archaeological documentation of the standing structures expressed by national and international standards, as explained above [19]. The model reuses parts of the CIDOC CRM classes and properties, and refers to other CRM extensions such as CRMgeo [20], a detailed model of generic spatio-temporal topology and geometric description; parts of CRMsci [21], a model for scientific observation, measurements and processed data in descriptive and empirical sciences (such as biology, geology, geography, cultural heritage conservation, etc.) and of CRMarcheo [22], a model currently under development for the documentation of archaeological excavations. The CRMba follows the same principles of the CIDOC CRM model, rendering the semantics of the buildings' subclass components as properties between two classes.

■ **14**
Gian Pietro Brogiolo, Archeologia dell'edilizia storica, Como 1988.

■ **15**
Roberto Parenti, Archeologia dell'architettura, in: Dizionario di Archeologia. Temi, concetti e metodi, 2009, p. 39–43.

■ **16**
Manfred Schuller, Building Archaeology. Icomos, Munich 2002.

■ **17**
Richard Morriss, The Archaeology of Buildings, Stroud 2004.

■ **18**
Martin Davies, The archaeology of standing structures, in: Australian Journal of Historical Archaeology 5, 1987, p. 54–64.

■ **19**
Paola Ronzino, Nicola Amico, Franco Niccolucci, Assessment and comparison of metadata schemas for architectural heritage, in: CIPA Symposium, Prague 2011, http://www.conferencepartners.cz/cipa/proceedings/index.htm.

■ **20**
Martin Doerr, Gerald Hiebel, CRMgeo: Linking the CIDOC CRM to GeoSPARQL through a spatiotemporal refinement, Technical Report: ICS-FORTH / TR-435, 2013, http://www.ics.forth.gr/isl/CRMext/CRMgeo/docs/TR435-CRMgeo.pdf.

■ **21**
CRMsci: the Scientific Observation Model, http://www.ics.forth.gr/isl/CRMext/CRMsci/docs/CRMsci1.2.3.pdf.

■ **22**
CRMarchaeo, http://www.ics.forth.gr/isl/CRMext/CRMarchaeo/docs/CRMarchaeo_v1.4.pdf.

Q.3 Definition of classes and properties in CRMba

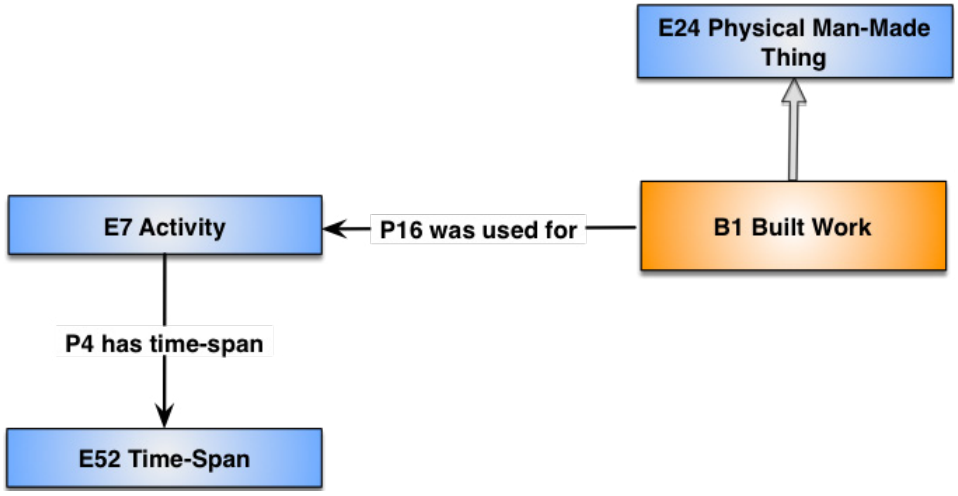
The new concepts introduced by CRMba are aimed at representing archaeological standing buildings and at defining the relations between each of their components and their relation to the whole building. The naming convention used for CRMba classes and properties follows the same principle adopted by CIDOC CRM and its extensions. In particular, classes of CRMba are identified by numbers preceded by the letter **B** and are named using noun phrases with initial capitals, while properties are identified by numbers preceded by the letter **BP** and are named in both directions using verbal phrases in lower case.

The main class introduced in CRMba is B1 Built Work, a subclass of **E24 Physical Man-Made** Thing. A B1, as described in the notes of the Art & Architecture Thesaurus (AAT) of the Getty Institute for the term Built Works, includes

»...freestanding buildings, components of buildings, complexes of buildings, other structures, or a man-made environment, typically large enough for humans to enter, serving a practical purpose, being relatively permanent and stable...«. 23

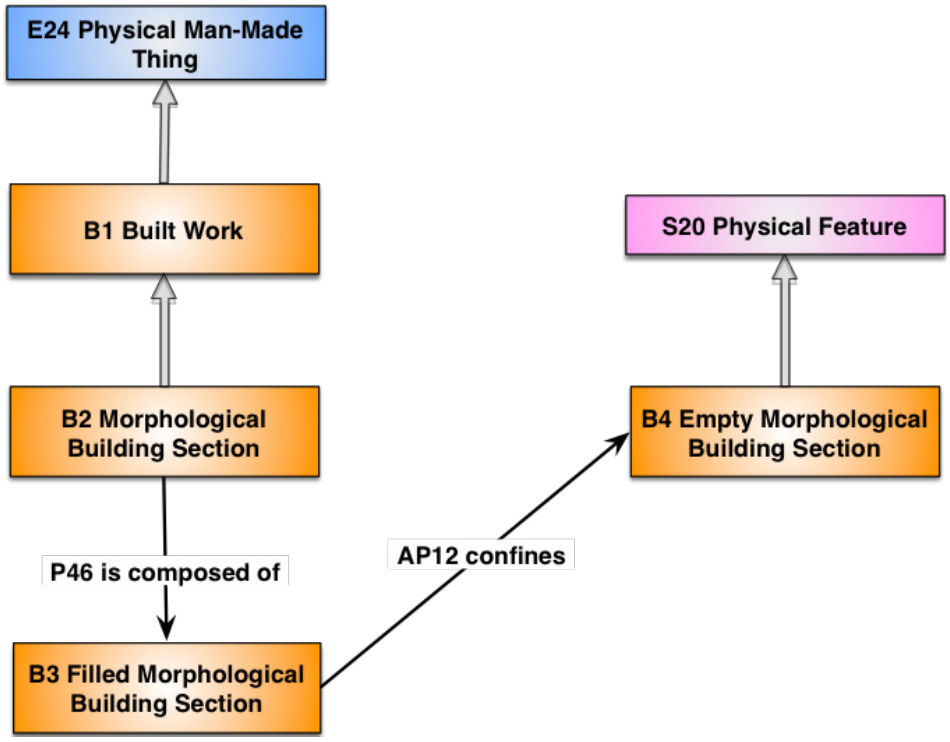
The B1 is produced by a **E12 Production** and its temporal confinement is described by a **E52 Time-Span**. Whatever purpose the building may have been used for during the various phases of its life, this can be modelled with the property P16 was used for, which links the building with an activity (E7) 01.

■ 23
Art & Architecture Thesaurus, AAT, http://www.getty.edu/vow/AATFullDisplay?find=built+work&logic=AND&note=&english=N&prev_page=1&subjectid=300265418.



☐ 01
Use of the building modelled with CIDOC CRM (blu) and CRMba (orange) (Paola Ronzino)

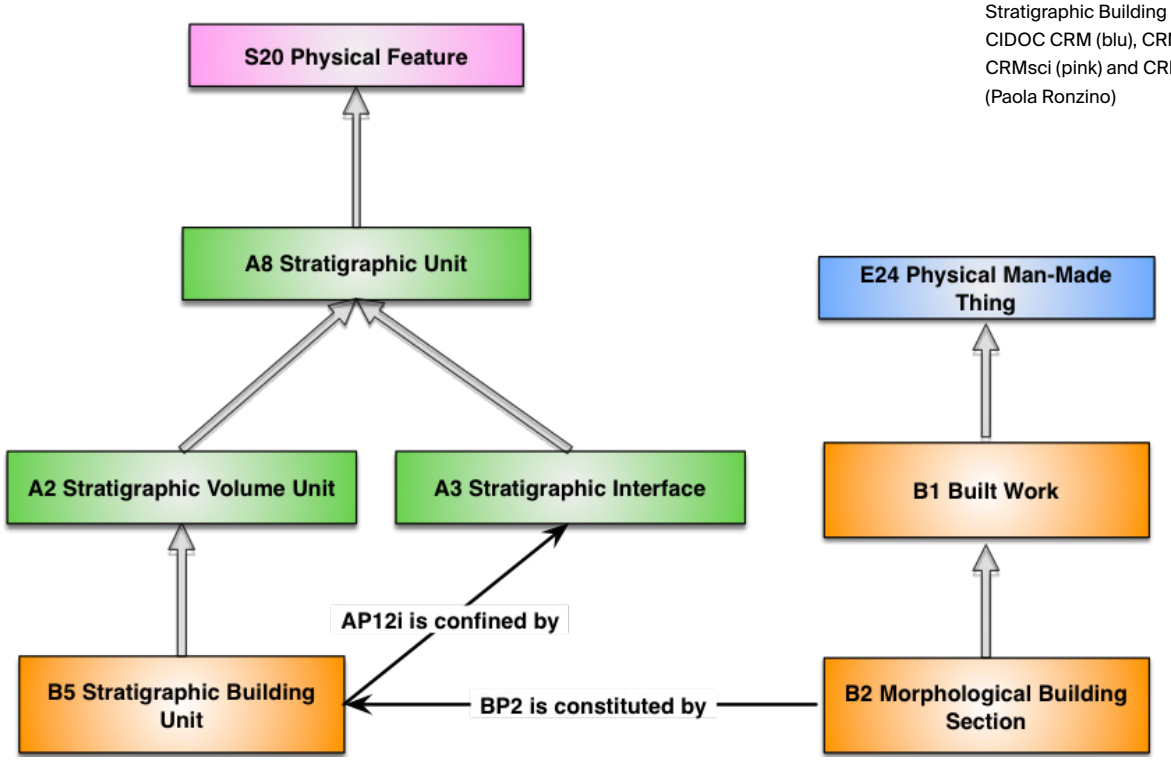
B1 Built Work can be broken down into components, represented by the class **B2 Morphological Building Section**. B2 is a subclass of B1, being a specification of the class **built work**. At the same time any instances of B2 are instances of the B1 class. B2 is characterized by the fact that any instance must be a functional element for the whole building, e. g. wall, story, roof, foundations, room, etc., having a specific role within the building. A **B2 Morphological Building Section** has a duration in time and is composed of (P46) parts that are completely filled with matter, which are modelled with the class **B3 Filled Morphological Building Section**. The intentional disposition in the space of filled parts (like bricks, walls, columns, wooden panels, etc.) defines portions of space that are completely void, e. g. the opening in the wall for a doorway, or an intercolumniation and so forth. In CRMba the void parts are identified with the class **B4 Empty Morphological Building Section**, a subclass of **E26 Physical Feature**. In the particular case of a window or a doorway, respectively, the pane or the door are considered as **E18 Physical Thing** attached to them. A **B4 Empty Morphological Building Section** is linked with a **B3 Filled Morphological Building Section** through the property of CRMarchaeo **AP12 confines** 02.



☐ 02
Graph showing the building's parts modelled with CIDOC CRM (blu), CRMba (orange) and CRMsci (pink) (Paola Ronzino)

One fundamental class introduced in CRMba, explicitly devised to describe the minimal construction unit of a built structure, is the **B5 Stratigraphic Building Unit**. B5 is subclass of the CRMarchaeo **A2 Stratigraphic Volume Unit** as it refers to material entities only. The Stratigraphic Building Unit (B5) represents a single evidence of human activity intentionally performed on the building: e. g. the presence of mortar, vestments or any of the discontinuities of matter visible on a wall surface. The **B5 Stratigraphic Building Unit** is a constituent part of a **B3 Filled Morphological Building Section**. The constituency of a Stratigraphic Building Unit (B5) may be seen as a subclass of **E2 Temporal Entity** with a duration in time (P4 has time span). 02 The term constituency is used within the model with the meaning of being a costituent part. The possibility of defining the class **Constituency** is still under consideration. 03

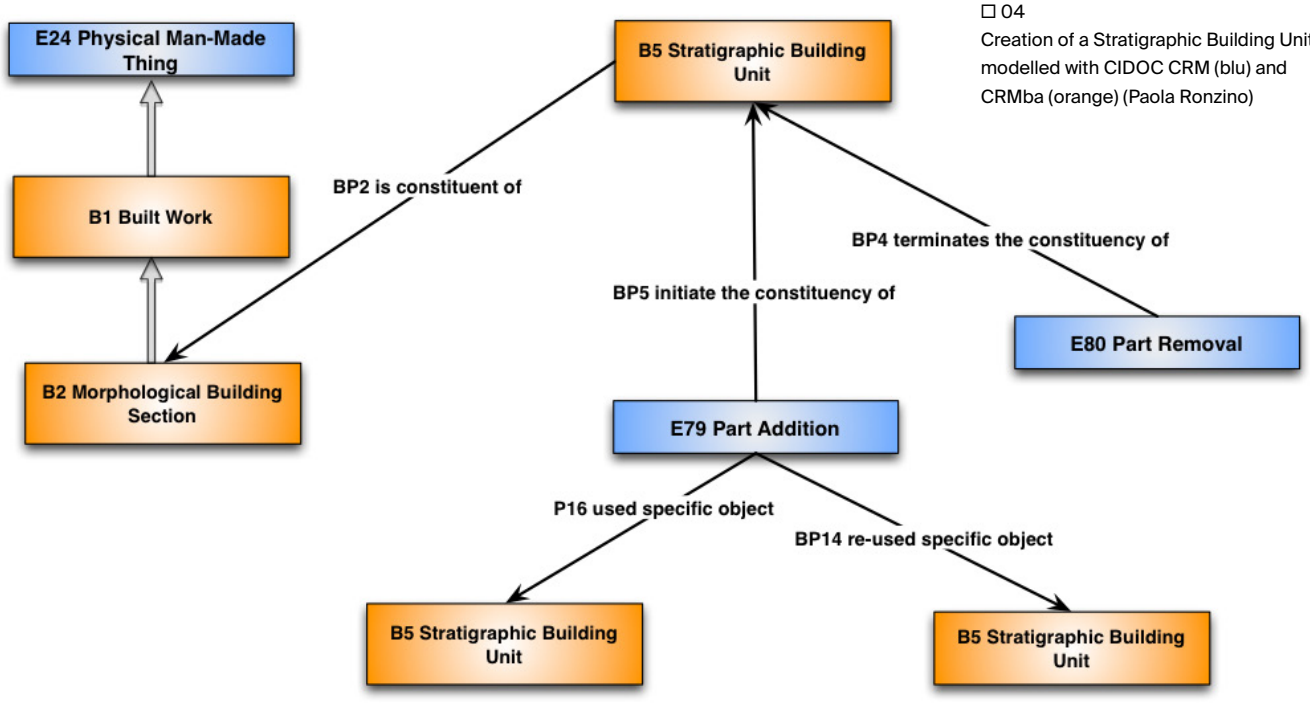
☐ 03
Graph showing the constituency of Stratigraphic Building Unit modelled with CIDOC CRM (blu), CRMba (orange), CRMsci (pink) and CRMarchaeo (green) (Paola Ronzino)



Creation of a stratigraphic building unit

The stratification genesis of subsurface deposits can be caused by natural or human actions, while the physical genesis of a stratigraphic unit in a built structure is the result of an intentional action of the creator and is described with the CRM class **E11 Modification**. Similarly to the unconsolidated soil, which can be disturbed by later intrusions or by human activities, standing structure stratigraphy may undergo modification through the ages. The modification of an archaeological deposit in built structures, which may include addition or removal of matter, are regarded as modification of the status **being part of** (i. e. the constituency) a portion of a structure within the whole **B2 Morphological Building Section**. The modification is modelled using the CRM classes **E11 Modification**, superclass of **E79 Part Addition** and **E80 Part Removal.** 04 The opening of a breach for the construction of a new window in an existing wall, for example, implies the removal of substance (E80) and consequently the addition of other substance (E79). Being part of a building is therefore expressed with the properties BP4 terminates the constituency of and BP5 initiates the constituency of, which respectively express that a **E11 Modification** event caused the status of being part of a whole.

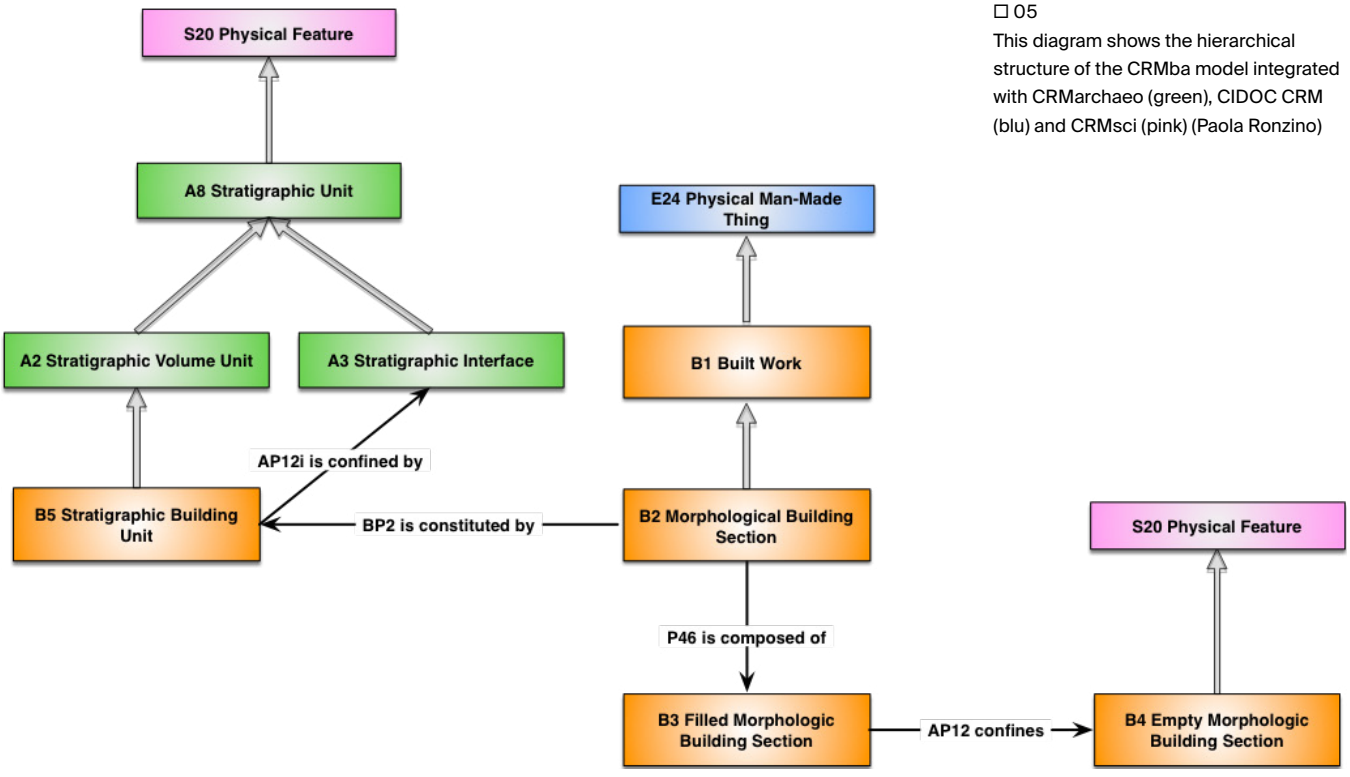
According to the objects used for the creation of new constituencies, CRMba introduces the following properties: **BP13 used specific object** and **BP14 re-used a specific object**. In the first case the object used in the construction of a new wall, for example, can be a feature made in situ, like a breach made in a wall for the opening of a new window, or a pre-constructed feature like a column. In the second case B14 is used when, for example, a decorated stone from another building is reused into the masonry of a new one. 04



☐ 04
Creation of a Stratigraphic Building Unit modelled with CIDOC CRM (blu) and CRMba (orange) (Paola Ronzino)

The stratigraphic interface

In the study of standing structures, the analysis of standing stratification turns around the concept of the stratigraphic interface, which represents a stratigraphic unit in its own right and comprises coherent parts of the boundary surface of a stratigraphic unit, as resulting from a common genesis event or process. A stratigraphic interface is a means to associate chronology and continuity to a Stratigraphic Building Unit (B5) or to a Morphological Building Section (B2) and is part of the identity and evidence of the process. The removal of existing stratification and the creation of new substances, for example, defines a stratigraphic interface, which is identified with the CRMarchaeo class **A3 Stratigraphic Interface**, subclass of **A8 Stratigraphic Unit**. A3 may be related with the **B5 Stratigraphic Building Unit** through the property **AP12 confines**. Figure 6 shows the complete CMRba model, hierarchically integrated with CRMarchaeo, CRMsci and classes CRM core. 05



☐ 05
This diagram shows the hierarchical structure of the CRMba model integrated with CRMarchaeo (green), CIDOC CRM (blu) and CRMsci (pink) (Paola Ronzino)

Q.4 Topological relations

In the analysis of archaeological buildings, the topological relations [24] can be used to study the hierarchical distribution of spaces and connections, and to perform comparative analysis of theoretical models or observed patterns (ritual, symbolic or cultural type of building). [25] In the case of buildings reduced to ruins, through the evaluation of connections between the walls and the living spaces, the process of reconstructing the original passages can be performed, thus allowing detection of anomalies like, for instance, traces pertaining to structures that are no longer there. [26] One of the most interesting features provided by the model is the possibility to build complex reasoning by means of specific classes and properties that can be interpreted, for instance, to create a system capable of formulating interpretative hypotheses. A typical example is represented by the possibility to define connectivity relationships between different environments, analysing the ways they can be interconnected. It is possible, for example, to say that two rooms are connected and to define also the entity through which this connection is made possible.

The property **BP11 is connected to** allows, for example, to establish a connection between two rooms (i. e. the empty spaces surrounded by walls) and to specify that this connection is established through a specific doorway (expressed by CIDOC CRM as **E26 Physical Feature**). BP11 identifies the instance of **B4 Empty Morphological Building Section** which is connected to another instance of B4. The instance of **E24 Physical Man Made Thing** through which the connection between the two instances of **B4 Empty Morphological Building Section** is made, can be recorded using the property **BP11.2 is connected through**. The way in which empty spaces are connected also makes explicit the transitivity connection type, expressed with the property **BP11.1 in the mode of**, using the **E55 Type** entity to describe how the passage from one environment to another happened. Transitivity through different places, can thus be automatically deduced by an inferential engine, which will be able to calculate routes between spaces that are also distant from each other, by defining a coherent path through doorways and other openings.

■ 24
Giancarlo Guizzardi, The problem of transitivity of part-whole relations in conceptual modeling revisited, in: International Conference on Advanced Information Systems Engineering (CAiSE), Amsterdam 2009.

■ 25
Gian Pietro Brogiolo, Dall'archeologia dell'architettura all'archeologia della complessità, in: Pyranae 1(38) 1997, p. 7–38 and Maurizio Cattani, Andrea Fiorini, Topologia: identificazione, significato e valenza nella ricerca archeologica, in Archeologia e Calcolatori 15, 2004, p. 317–340.

■ 26
Maura Medri, Manuale di rilievo archeologico, Laterza, Bari 2003.

Q.5 CRMba integrating with CRMarchaeo

Declaring group of activities

The identification of each homogeneous stratum on a built structure or in a sequence of subsurface deposits is the first activity of an archaeologist involved in an excavation campaign. This process aims to observe and record the nature of the various deposit units, trying to understand the phenomena involved in the formation of the deposit and its transformation in time; each stratigraphic layer and each object found is documented with the attribution of a Stratigraphic Unit (SU) identifier regardless of its nature. Most of the time, built structures found in stratigraphic excavations, are fragmentary

and dispersed. This situation makes the reconstruction of the original relationships among walls, layers and artefacts quite incomprehensible and, if not properly recorded, it also makes the reconstruction of the real appearance of the built structure impossible. Further interpretative analyses of the observed entities may lead to the identification of stratigraphic units of the same nature, which may result in the assignment of common attributes.

CRMarchaeo encodes this interpretation process with the **A6 Group Declaration Event** class, subclass of **E13 Attribute Assignment**, which can be used to state that a set of items is intended to be part of one physical thing. A grouping activity of this kind can occur in the presence of artefacts embedded in certain deposits, for instance, a capital or other architectural elements that are found buried in a fragmentary way (e. g. two pieces of wall are recognized to be part of the same built structure). As first step, an archaeologist assigns an ID to each identified SU. This attribution can be encoded by using the **A2 Stratigraphic Volume Unit** class of CRMarchaeo. During the interpretation phase, the archaeologist, supported by the identification of common attributes may infer on the intention behind the production of a group of items. This interpretation can be encoded with the **A6 Group Declaration Event**. The items identified as **intentionally-built** structure can be assigned a new identifier and encoded with the **B5 Stratigraphic Building Unit.** [27] When possible, this approach may be extended to create hierarchical relationships among the components of the building and the whole structure, from the description of single architectural elements (B5) to functional units (B2), to a more articulated buried built work or built complex (B1).

This approach allows to keep track of the reasoning process of an archaeologist by archiving both the raw data (e. g. the attribution of IDs to the stratigraphic units) and the information derived by the inferences made during the interpretation process of the various stratigraphic units in order to make further interpretations possible.

■ 27
Paola Ronzino, Harmonizing the CRMba and CRMarchaeo models, in: International Journal on Digital Libraries, 18 (4) 2017, pp. 253–261.

Embedded built structures into a stratigraphic

Artefacts that are found embedded in a stratigraphic unit of an archaeological deposit are modelled with the CRM class **E18 Physical Thing**, superclass of Stratigraphic Units (A8) and are related to the **A7 Embedding** through the CRMarchaeo property **AP18 is embedded**. The **embedding** is a state of an instance of E18 being partially or completely embedded in a particular position, with relative stability in one or more A2 Stratigraphic Volume Unit. [28] Artefacts that are incorporated in a wall of a standing building are more specifically regarded in CRMba as B5 Stratigraphic Building Unit, subclass of **A2 Stratigraphic Volume Unit.** In this case, the physical relationships of an artefact with its **container** (e. g. the wall) is expressed with the concept of **being part of** connecting **B5 Stratigraphic Building Unit** and **B2 Morphological Building Section** with the property **BP2 is or was constituent of.** This reveals the intentional use of the object as a functional part of the wall, unlike in the case of an archaeological deposit where the embedding concept may underline the fortuity of an artefact being buried in a certain deposit due to natural or human activities. The discovery of an architectural element, e. g. a capital, within a clay stratus will be encoded linking the **E18 Physical Thing** and the **A2 Stratigraphic**

■ 28
CRMarchaeo, http://www.ics.forth.gr/isl/CRMext/CRMarchaeo/docs/CRMarchaeo_v1.4.pdf.

Volume Unit with the property **AP15 is or has remains contained in**. After the interpretation process the same object could be recognized as an architectural element and encoded as **B5 Stratigraphic Building Unit** that is or was constituent (BP2) of **B2 Morphological Building Section**.

Physical and stratigraphic relations

The stratigraphic sequence observed in an archaeological site or in a standing structure, represents its modification through time, while the stratigraphic unit represents one event in time. Each Stratigraphic Building Unit (B5) may have physical and stratigraphic relationships with one or more stratigraphic units. The physical relationships between two stratigraphic units are expressed through the CRMarchaeo class AP11 has physical relation, qualifying the possible relationships using property **AP11.1 has type (E55 Type).** The vocabulary used to describe the type of physical relationships includes: **fills**, **is filled by**, **cuts**, **is cut by**, **bound**, **is bonded by**, and so forth.

The stratigraphic relationships between two Stratigraphic Building Units (B5) are instead modelled with the CRMarchaeo property **AP13 has stratigraphic relation**. The relations expressed by AP13, namely **before**, **after** and **same as**, can be inferred from the kind of physical relations between two B5. 06

☐ 06
Physical and stratigraphic relation between B5s modelled with CRMba (orange) using CRMarchaeo properties (Paola Ronzino)

Q.6 Conclusions and further work

The outcome of this work consists in the development of the CRMba model, an extension of the CIDOC CRM ontology, for the documentation of standing buildings 01. The extension introduces new concepts that enable to reason with the available data and to support archaeological interpretation of archaeological buildings. In particular, the physical relations of the stratigraphic units, information that is important to understand the various phases of a building, and the topological relations of functional spaces are made explicit through new properties. Furthermore, CRM_{ba} introduces the concept of use and re-use of artefacts as part of activities already included in the CIDOC CRM, such as **E11 Modification, E12 Production, E79 Part Addition, E80 Part Removal**. These concepts can support the archaeological interpretation of various activities that affected the building, by determining the beginning (BP5) and the end (BP4) of the constituency of a Stratigraphic Building Units (B5) with a Morphological Building Section (B2) and with a Built Work (B1). A first attempt to harmonize the ontological model for building archaeology documentation with the archaeological extension of the CIDOC CRM — CRMarchaeo — has been carried out 29 with good results. The CRMba model is still under improvement and cannot be considered complete. More work needs to be done, especially towards the integration of a possible class **Function**.

Further work is also currently carried out to demonstrate how the integrated use of BIM and semantic technologies permits to connect different data sources and combine them into a semantic network that allows to have a unique representation of the building and its context.

A summary of the undergoing activities follows below.

Function

As described above, B2 comprises instances of man-made things that are considered functional units for the whole building (e. g. rooms, foundations, roof, and so forth).

From the analyses of the metadata schemas and standards for the documentation of built heritage, four main functional aspects have been identified.

The functional roles of the **parts of the building** may be expressed as types of a class **B6 Function** (still under discussion for approval), using the CRM class **E55 Type**, and related to **B2 Morphological Building Section** through the possible property **BP12 has function**.

The identified functional aspects concern a) statics, i. e. the ability of architectural elements to safely resist all actions a building is likely to face across time; b) affordance, borrowed from perceptual psychology 30 and used as a conceptual framework to understand the relationship between form and function of an element; c) protection, i. e. every element that provides passive protection from environmental and human activities (e. g. plaster, parapet, revetment, ceiling eaves, coating); d) decoration, i. e. something added to a building to improve its appearance (e. g. mouldings, inscriptions, mosaics, frieze etc.).

■ 29
Paola Ronzino, Harmonizing the CRMba and CRMarchaeo models, in: International Journal on Digital Libraries, Special Issue on Extending, Mapping and Focusing the CIDOC CRM 2016 https://link.springer.com/article/10.1007/s00799-016-0193-3.

■ 30
James J. Gibson, The theory of affordances, in: Robert Shaw, John Bransford (Hg.), Perceiving, Acting and Knowing, New York 1977, pp. 67–82.

Interoperability and integration of archaeological standing buildings information with BIM

Further work includes research carried out by the author of this paper aiming at investigating the use of the CIDOC CRM ontology and its archaeological extensions — CRMba and CRMarchaeo — to allow the integration of 3D models and the related information within Building Information Modelling (BIM) environments and in non-BIM native systems.

Initially used in urban areas for the description of new buildings, BIM has been extended to the field of historical architecture for purposes related to the 3D rendering and the collection of data about the heritage building (HBIM). 31 BIM applications can be used to model existing ancient buildings as well as trying to virtually reconstruct built structures that no longer exist, simulating the appearance that these structures would have had in the past, the materials which they were made of and the various phases of construction, integrating the information available on the built structure. 32

BIM allows users to model a building not only in terms of lines and volumes, but also in terms of the semantics of its constituents. The 3D models can be viewed, navigated, queried, via semi-automatic selection processes and costumed queries, modelled on defined ontological patterns.

Ontologies, therefore, play a key role in the expression of qualified semantic relationships that underpin the link between the data, making it possible to describe the information related to cultural heritage through a series of relations, types and connections.

When one approaches the virtual reconstruction of an ancient building, the first phase of the activity includes an accurate analysis to understand how it was done, what the available sources were, what information ensures effective organization of the data.

In some cases, when possible, it is necessary to document the building with surveys, photos, sketches and measurements, and to integrate it with a study of the existing sources (drawings or plants). Therefore, the ontology that is used to describe the information is very important in the digital reconstruction of an ancient building.

In most of the BIM environments, reference is made to the ontology used by the software. The most used data model in this area is the Industry Foundation Classes (IFC), a neutral and open file format used to describe construction data and the construction industry.

■ 31
Maurice Murphy, Eugene McGovern, Sara Pavia, Historic building information modelling (HBIM), in: Structural Survey, Vol. 27/4, 2009, pp. 311–327 and Conor Dore, Maurice Murphy, Integration of Historic Building Information Modeling and 3D GIS for Recording and Managing Cultural Heritage Sites, in: VSMM Conference Virtual Systems in the Information Society, 2012, pp. 369–376.

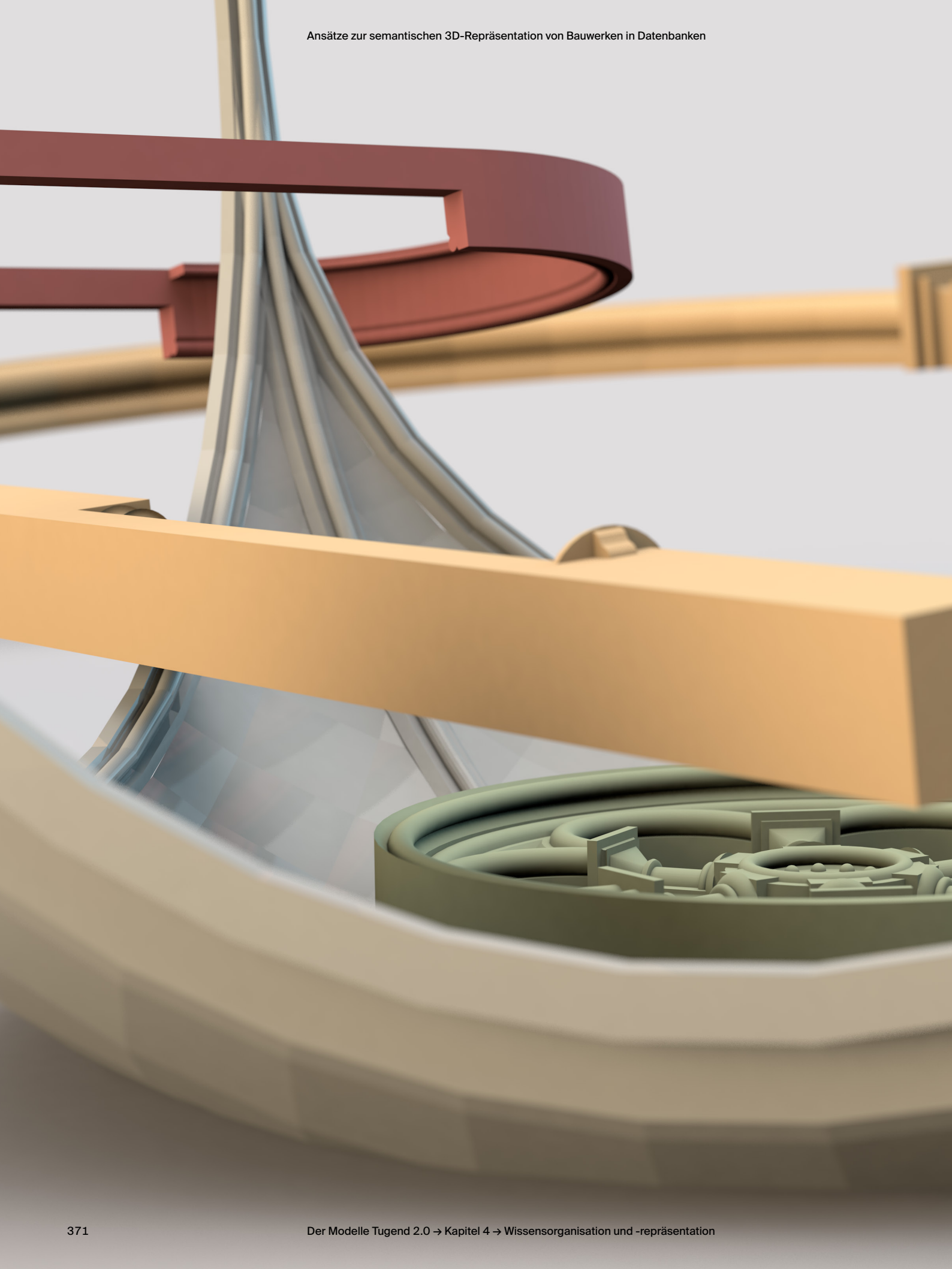
■ 32
Simone Garagnani, Anna Maria Manferdini, Parametric accuracy: Building Information Modeling process applied to the cultural heritage preservation, in: 3DArch2013, 2013, pp. 87–92.

It is an object-based file format with a data model developed by buildingSMART [33] to facilitate interoperability between the disciplines of architecture, engineering and the construction industry. It provides a collaborative format commonly employed in projects that use BIM-based methodologies.

Many governments are imposing the use of IFC files for construction projects of public administration properties due to the model's ability to facilitate interoperability between all the software platforms that allow it. Nevertheless, when one uses a BIM process for a different scope besides new buildings, i. e. adopting it for the reconstruction of non-existing buildings or for the reconstruction of a standing historical building, the basic ontology of some software is not enough to document the information, hence the need to integrate the information using a domain ontology.

Therefore, the research carried out as further investigation of this work aims at exploring the integration of the CIDOC CRM ontology and its archaeological extensions with 3D models and the collected information. The efficacy of applying the parametric and semantics methods of three-dimensional modelling in archaeology stems from the need to create modern 3D standardized and all-encompassing databases, containing all the material relating to the same building within the scope of a large cloud-database. This will enable not only to ensure a simultaneous use of vast resources shared on the network in real time, but it also allows the comparison of data from disparate sources and, therefore, the qualitative increase of statistics and crossed analysis.

■ **33**
buildingSMART, http://buildingsmart.org/standards/standards-library-tools-services/#standards.



Alexander Stenzer, Christina Ehrlinger, Matthias Schmid

R. Ansätze zur semantischen 3D-Repräsentation von Bauwerken in Datenbanken

→ BIM, IFC, Modellierung, MonArch, Segmentierung, Strukturgraph, Strukturhierarchie

3D-Modelle von historischen Gebäuden oder archäologischen Stätten ermöglichen es, intuitiv räumliche Eigenschaften abzubilden und stellen darüber hinaus einen Ankerpunkt für eine raumbezogene Informationsverortung zur Verfügung. Es existieren verschiedene Ansätze wie etwa Building Information Modelling (BIM) oder Geographische Informationssysteme (GIS), welche Gebäude zwar in einer dreidimensionalen Darstellung repräsentieren können, jedoch unterschiedliche Herangehensweisen verwenden und damit auch verschiedene Zielsetzungen verfolgen. Monumentalbauten, Ensembles oder einfache Gebäude lassen sich meist **auf natürliche Weise** segmentieren und somit in einzelne Bereiche und Bauwerksteile zerlegen. Die Bauwerkserhaltung und -pflege ist auf eine genügend genaue bauliche Repräsentation des Bauwerks und seiner Teile angewiesen, um basierend auf einem feingranularen baulichen Modell mögliche Schadensphänomene und korrespondiere Erhaltungsmaßnahmen dokumentieren zu können. Diese Segmentierung bildet die Grundlage für eine semantische Repräsentation eines Bauwerks und seine informationstechnische Speicherung in einem Datenbanksystem. Die Kombination der Repräsentation des Gebäudes in einer Datenbank und die Repräsentation als grafisches 3D-Model erlaubt die Erstellung eines 3D-Informationsmodelles. Je nach Herangehensweise ergeben sich drei verschiedene Wege, um an dieses 3D-Informationsmodell zu kommen: 1) eine separate Modellierung sowohl des graphischen Modells als auch des Strukturgraphen mit einer anschließenden Verknüpfung 2) kombinierte Modellierung von struktureller und graphischer Repräsentation 3) eine rein graphische Repräsentation. In unserem Beitrag werden zwei dieser Ansätze genauer verglichen und am Beispiel des MonArch-Systems illustriert.

R.1 Einleitung

Semantisch reiche Bauwerksmodelle erlauben nicht nur eine ansprechende und aussagekräftige grafische Darstellung des betrachteten Objekts, sondern auch eine multiperspektivische Beschreibung, die in ihrer Vielfalt und Tiefenschärfe über die rein architektonische Dimension hinausgeht. Für kunsthistorische Fragestellungen etwa ist es nötig, dass die Möglichkeit besteht, eine übergeordnete Perspektive einzunehmen, gleichzeitig muss aber auch gewährleistet sein, dass die Betrachtung einzelner Bauwerksteile und deren Verknüpfung nach verschiedenen Gesichtspunkten unterstützt wird. Darüber hinaus ist die Zuordnung weiterer, über die bauliche Dimension hinausgehender Beschreibungen und Informationsquellen zu dem Bauwerk oder seinen Teilen von entscheidender Bedeutung.
Eine eher auf Bauwerkserhalt und -pflege ausgerichtete Zielstellung ist dagegen auf eine genügend genaue bauliche Repräsentation des Bauwerks und seiner Teile angewiesen, um basierend auf einem feingranularen baulichen Modell mögliche Schadensphänomene und korrespondierende Erhaltungsmaßnahmen dokumentieren zu können. Aus konzeptioneller Sicht bildet eine für den jeweiligen Zweck geeignete Segmentierung des Bauwerks die Grundlage einer adäquaten Modellierung. Aus technischer Sicht schließlich erlaubt erst die Segmentierung eine Identifikation einzelner Bauwerksteile und damit deren Verknüpfung untereinander oder mit weiteren Informationen.

Objekte wie Monumentalbauten, Ensembles oder einfache Gebäude lassen sich meist **auf natürliche Weise** segmentieren und somit in einzelne Bereiche und Bauwerksteile zerlegen. In vielen Fällen ist dabei eine abgestufte Segmentierung von Vorteil. Diese bietet die Möglichkeit, den jeweils passenden Detaillierungsgrad zu wählen: von einer übersichtsartigen groben Darstellung bis hin zur Darstellung feiner Details. Die Möglichkeit der Segmentierung bildet die Grundlage für eine semantische Repräsentation eines Bauwerks und seine informationstechnische Speicherung in einem Datenbanksystem.

Im Folgenden wird der Zusammenhang zwischen der grafischen Repräsentation und der Segmentierung eines Bauwerks beschrieben und am Beispiel des MonArch-Systems illustriert. 01 02

■ **01**
Lehrstuhl für Informatik mit Schwerpunkt Informationsmanagement, Universität Passau, MonArch Projekt, http://www.monarch.uni-passau.de/.

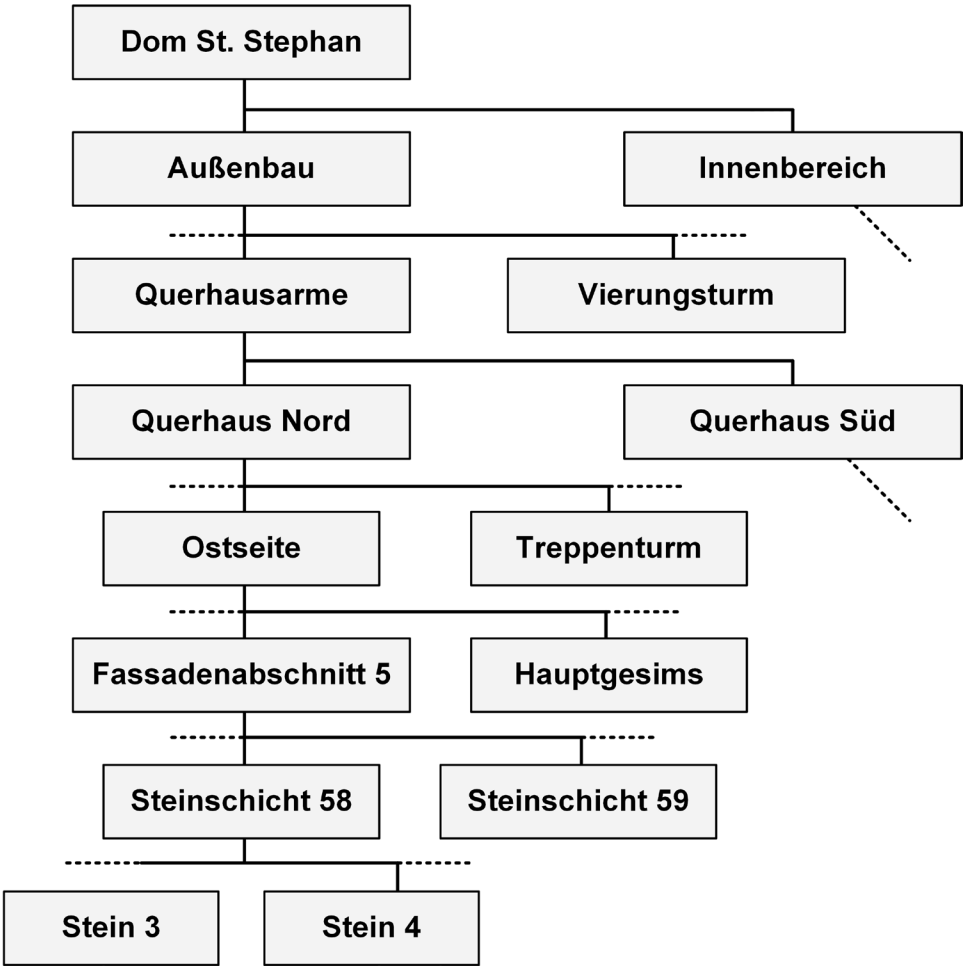
■ **02**
Alexander Stenzer, Claudia Woller, Burkhard Freitag, MonArch: Digital archives for cultural heritage, in: 13th International Conference on Information Integration and Web-based Applications and Services, Ho Chi Minh City, Vietnam 2011.

R.2 Segmentierung

Unter Segmentierung wird im Folgenden die Aufteilung eines Bauwerks in Teile bzw. Bereiche verstanden. Diese können wieder in Teile bzw. Bereiche aufgeteilt werden. Dabei wird die Entscheidung, wo ein Teil eines Gebäudes beginnt, welche räumliche Ausdehnung es hat und aus welchen Teilen es aufgebaut ist, von verschiedenen Faktoren beeinflusst.

Einen Faktor für die Segmentierung kann die funktionale Unterteilung des Objekts sein. Ein Sakralbau kann beispielsweise in seine Schiffe, den Chor und die Türme segmentiert werden. Diese Aufteilung ist nicht zwingend, spiegelt aber teilweise die Funktion der einzelnen Bereiche des Sakralbaus wider. Betrachtet man beispielsweise ein Haus, so lässt sich auch dieses nach funktionalen Eigenschaften segmentieren. Wird ein Haus in Räume, Stockwerke und Gänge aufgeteilt, so kann auch hier die (geplante) Nutzung des Gebäudes die Wahl der Segmentierung beeinflussen. Ein weiterer Faktor, der die Segmentierung beeinflusst, ist die räumliche Ausdehnung eines Gebäudes. Ein Büroraum wird im Allgemeinen durch Wände begrenzt. Räume befinden sich auf einem Stockwerk, und Decken beziehungsweise Fußböden unterteilen ein Bauwerk in Stockwerke. Eine alternative Segmentierung teilt das Gebäude in Quader mit einer Seitenlänge von beispielsweise einem Meter ein. Letzten Endes hängt die Wahl der Segmentierung und die davon abgeleitete digitale Repräsentation des Bauwerks davon ab, welche Segmentierung den Nutzerinnen und Nutzern, die mit der digitalen Repräsentation arbeiten, es am besten ermöglicht, sich intuitiv im Bauwerk zu orientieren. Durch die Segmentierung eines Bauwerks in einzelne identifizierbare Bestandteile und deren Benennung oder gar Typisierung wird ihm eine Semantik aufgeprägt, welche später für eine Suche nach Informationen über und zu dem Bauwerk oder Teilen davon genutzt werden kann.

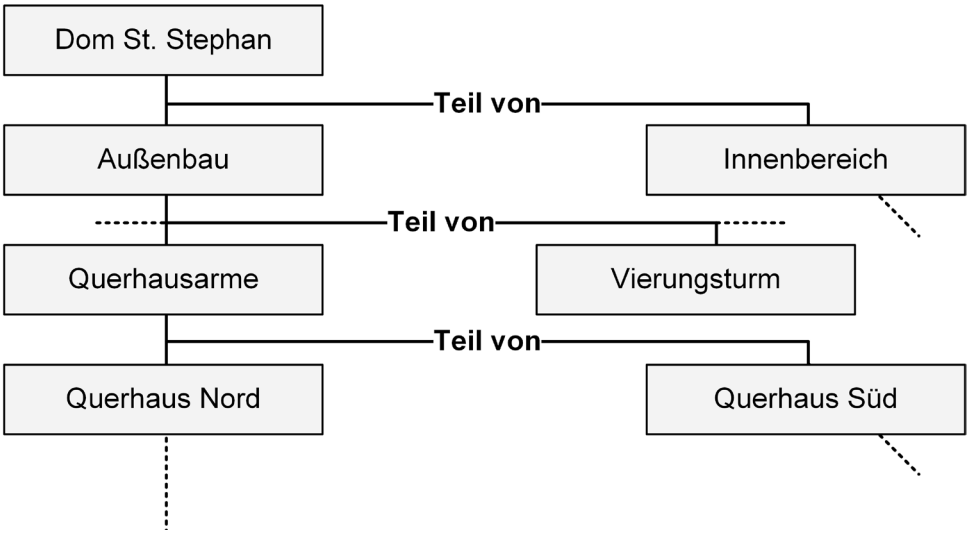
In 01 ist ein Ausschnitt einer möglichen Segmentierung für einen Sakralbau, hier für den Dom St. Stephan in Passau, dargestellt. Die Segmentierung sieht hier vor, das Gebäude in einen Außenbau und einen Innenbereich aufzuteilen. Der Außenbau kann wiederum in Querhausarme und Vierungsturm sowie weitere Segmente unterteilt werden. An diesem Beispiel ist gut erkennbar, dass mit jeder Benennung eines Segmentes und der Aufteilung in Untersegmente eine Entscheidung getroffen wurde, die sich später auf die Repräsentation des Gebäudes auswirkt. Die Trennung in einen Außen- und Innenbereich ermöglicht unterschiedliche Repräsentationen für das Äußere und das Innere eines Gebäudes. Die hier angedeutete Modellierung bis hinunter zum einzelnen Stein erlaubt beispielsweise eine sehr detaillierte Zuordnung von Informationen.



☐ 01
Mögliche Segmentierung des Doms St. Stephan in Passau. (Stenzer 2017)

R.3 Strukturhierarchie und Strukturgraph

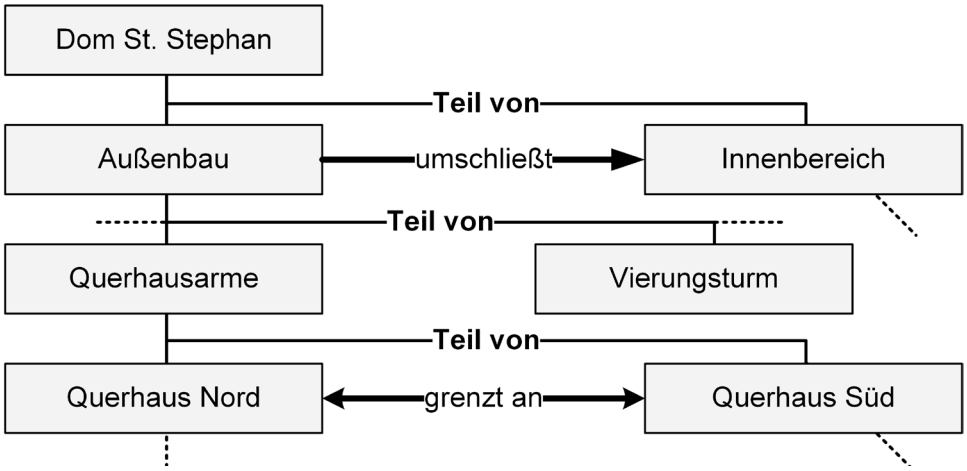
Ausgehend von einer Segmentierung eines Bauwerks lässt sich eine symbolische Repräsentation in Form einer Strukturhierarchie oder eines Strukturgraphen ableiten. Eine Strukturhierarchie ist eine baumartige Zerlegung eines Bauwerks auf der Grundlage einer vorher definierten Segmentierung. Dabei werden die Bauwerksteile benannt und zueinander in eine **Teil von**-Beziehung gesetzt. In 02 ist die vorher beschriebene Segmentierung als Strukturhierarchie dargestellt. Sie stellt zwischen den einzelnen Bauwerksteilen eine Beziehung her. Querhaus Nord und Querhaus Süd bilden hier beispielsweise Teile der Querhausarme. Diese Bauwerksteile können wiederum in weitere Bauwerksteile zerlegt werden.



☐ 02
Strukturhierarchie. (Stenzer 2017)

Ein Strukturgraph hingegen erlaubt über die **Teil von**-Beziehung hinaus zusätzliche Querbeziehungen. Im Allgemeinen liegt dann nicht mehr eine baumartige Repräsentation der Beziehungen zwischen Bauwerksteilen vor.

In 03 wurde die Strukturhierarchie zu einem Strukturgraphen erweitert, indem zwischen Außenbau und Innenbereich eine Querbeziehung **umschließt** eingefügt wurde. Diese zusätzliche Information beschreibt, dass der Außenbau den Innenbereich räumlich umschließt. Eine weitere Eigenschaft, die in einem Strukturgraphen beschrieben werden kann, stellt die Nachbarschaftsbeziehung von Bauwerksteilen dar. Das Beispiel modelliert hier eine **grenzt an**-Beziehung zwischen den beiden Querhäusern, welche in diesem Fall die räumliche Nachbarschaft zwischen den beiden Bauwerksteilen beschreibt.



☐ 03
Strukturgraph. (Stenzer 2017)

R.4 Grafische Repräsentation

Eine grafische Repräsentation eines Gebäudes kann in verschiedenen Ausprägungen vorliegen. Als Repräsentation kann man sich eine einfache 2D-Grafik bis hin zu einem volltexturierten 3D-Volumenmodell mit Segmentierung der Bauwerksteile vorstellen. Allerdings ist nicht jede dieser Varianten für eine semantische Repräsentation in der Datenbank geeignet. Mindestens folgende Anforderungen sollten an die grafische Repräsentation gestellt werden:

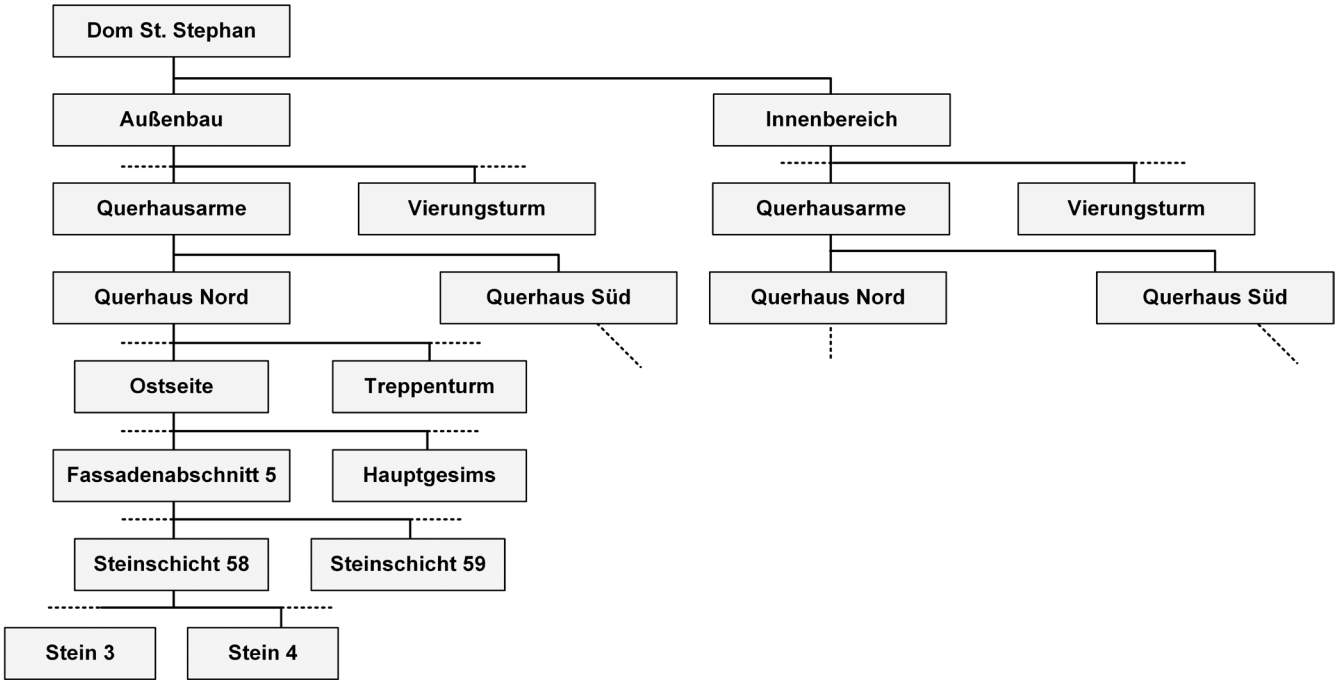
- → Segmente des Bauwerks müssen (grafisch) selektierbar sein. In der Regel bedeutet das für den zweidimensionalen Fall, dass Segmente eine Fläche haben und somit als geschlossenes Polygon gezeichnet sind. Im dreidimensionalen Fall heißt das im Idealfall, dass Segmente des Bauwerks als eigenständige Objekte in einem Volumenmodell modelliert werden. Ein Oberflächenmodell wäre denkbar, dieses schränkt jedoch die Möglichkeiten, Segmente als eigene Objekte zu repräsentieren, ein, da dann nur Flächen zur Verfügung stehen.
- → Die Granularität der Segmentierung muss frei wählbar sein. Dazu muss es möglich sein, innerhalb der Modellierung einzelne Segmente zu definieren und diese weiter in ihre jeweiligen Teilsegmente zu zerlegen.
- → Die Elemente der grafischen Repräsentation müssen identifizierbar sein. Die Identifizierbarkeit ist notwendig, um die grafische Repräsentation eines Segmentes mit der dazugehörigen strukturellen Repräsentation zu verknüpfen. Darüber hinaus kann sie als Anker für weitere Informationen dienen.

R.5 Vom Bauwerk zur Repräsentation

Als erster Schritt zur Repräsentation eines Bauwerks muss die Segmentierung definiert werden. Hierzu werden Bauwerksteile und Segmente definiert, wobei die Granularität der Segmentierung eine wichtige Rolle spielt. Je feiner die Segmentierung, d. h. je mehr Segmente definiert werden, desto aufwendiger kann die Erstellung der Repräsentation sein. Im Gegenzug erlaubt eine sehr feine Segmentierung auch eine detaillierte Zuordnung der Informationen zum Gebäude.

In 04 ist die Segmentierung für den Dom St. Stephan aus den vorherigen Beispielen zu sehen. Sie weist nun einen größeren Detailgrad auf. Diese Segmentierungsvariante unterscheidet explizit zwischen Außen- und Innenbereich und modelliert jeden einzelnen Stein. Diese Art der Segmentierung ist sehr aufwendig, da für ein so großes Bauwerk wie den Dom St. Stephan die Modellierung jedes einzelnen Steins einen enormen Aufwand generiert. Der Vorteil dieser Art von Modellierung besteht in der Möglichkeit, zu jedem Stein Informationen zu speichern und auch den Stein oder die Steinfugen selbst mit Informationen zu versehen. Entfernt man die schraffierten Elemente aus der Segmentierung, werden Außen- und Innenbereich nicht mehr unterschieden und es werden keine Fassadenabschnitte, Steinschichten oder Steine mehr modelliert. Der Aufwand für diese zweite Art der Segmentierung ist sehr viel geringer. Bei Bedarf kann sie dennoch bis hinunter zum Stein erweitert werden, bietet aber nicht die Möglichkeit, zwischen Außen- und Innenbereich zu unterscheiden.

Nach Abschluss der Segmentierung eröffnen sich mehrere Möglichkeiten, die Repräsentation in einer Datenbank zu realisieren.
Zwei Ansätze und die dazugehörigen Workflows werden im Folgenden dargestellt.



☐ 04
Detailierungsgrad der Segmentierung.
(Stenzer 2017)

R.6 Separate Modellierung

Diese Möglichkeit überführt die Segmentierung in eine Strukturrepräsentation, z. B. in eine Strukturhierarchie, und speichert diese in einer geeigneten Form in einer Datenbank. Dazu müssen die Bauwerksteile in Beziehung zueinander gesetzt werden. Anschließend werden eine oder mehrere grafische Repräsentationen erstellt, welche die zuvor geforderten Mindestanforderungen erfüllen. Die Granularität der Segmentierung kann sich hierbei durchaus von der Strukturhierarchie unterscheiden. Abschließend wird die Strukturhierarchie mit den entsprechenden Segmenten in der grafischen Repräsentation verknüpft und wieder in geeigneter Form in einer Datenbank repräsentiert.

Bei der Verknüpfung kann die unterschiedliche Granularität zwischen der strukturellen und der grafischen Repräsentation dazu führen, dass nicht jedes Segment in beiden Repräsentationen vorhanden ist und somit nicht alle Segmente auch verknüpft werden können. Dies kann durchaus gewollt sein und muss daher vom Informationsmodell unterstützt werden. Diese Art und Weise der Repräsentation der Räumlichkeit wurde z. B. bei der Entwicklung des Standards CityGML 03 analysiert und als informationsreiche Darstellungsform für Gebäude herausgearbeitet. CityGML stellt ein Standard-(austausch)format für digitale 3D-Modelle von Städten und Landschaften dar.

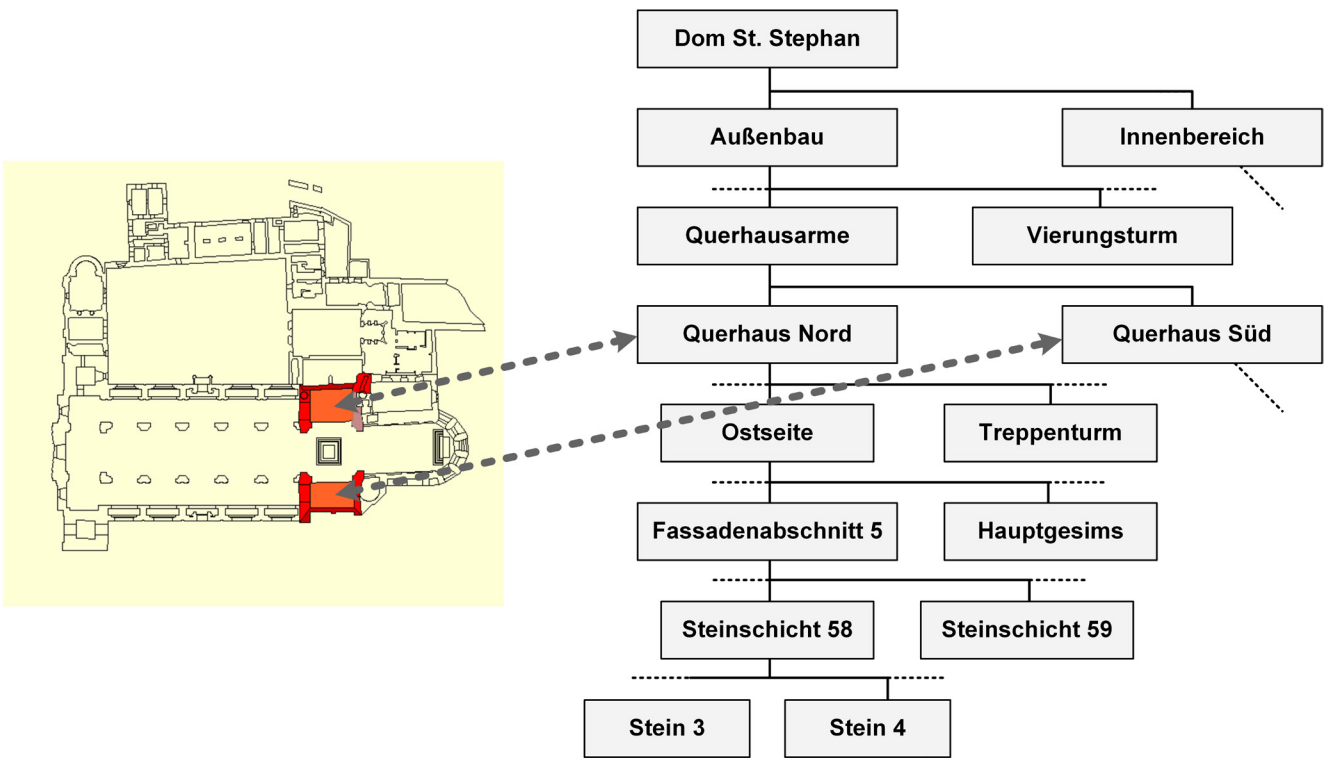
■ 03
Thomas H. Kolbe, Representing and exchanging 3d city models with cityGML, in: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, 2009.

In 05 sieht man eine Verknüpfung zwischen der grafischen Repräsentation und einer strukturellen Repräsentation des Doms St. Stephan. Hier sind beispielsweise die Querhäuser sowohl grafisch in der 2D-Übersichtskarte als auch in der Strukturhierarchie als Bauwerksteile repräsentiert. Die Bauwerksteile der Steine haben in der 2D-Übersichtskarte keine grafische Repräsentation und sind somit nur im Strukturgraphen zu finden.

Dem MonArch System 04, einem Informationssystem für die Repräsentation und Dokumentation von Bauwerken und Informationen über Bauwerke und ihre Teile, liegt die Herangehensweise der separaten Modellierung zugrunde. Eine genauere Beschreibung wird in Abschnitt **MonArch-Ansatz 2D/3D** gegeben.

■ **04**
Alexander Stenzer, Claudia Woller, Burkhard Freitag, MonArch: Digital archives for cultural heritage, in 13th International Conference on Information Integration and Web-based Applications and Services, Ho Chi Minh City, Vietnam 2011.

□ 05
Verknüpfung zwischen Repräsentationen. (Stenzer 2017)

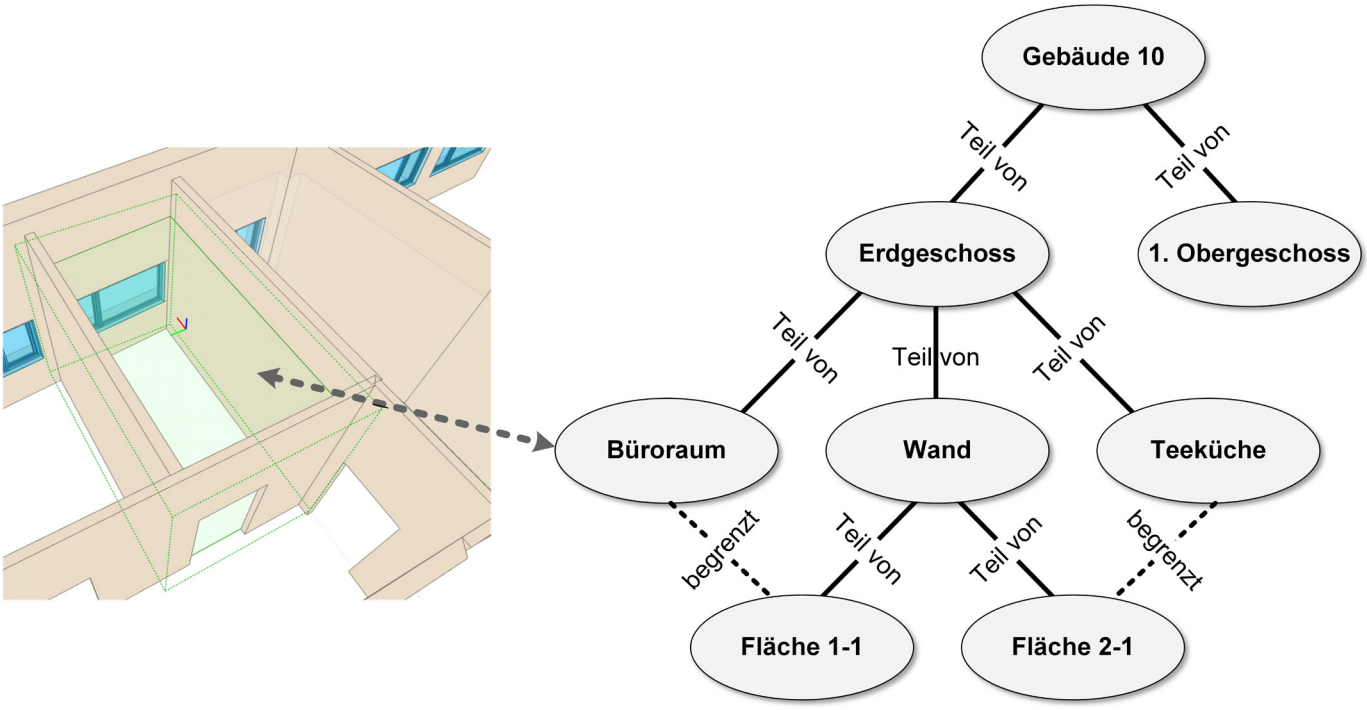


R.7 Kombinierte Modellierung

In dieser Vorgehensweise werden die strukturelle und die grafische Repräsentation nicht getrennt voneinander in zwei Schritten entwickelt. Für jedes Segment wird bei der Umsetzung eine Repräsentation erstellt und diese in Beziehung zu anderen Segmenten gesetzt. Hier entfällt der Schritt der Verknüpfung der Repräsentation. 06 zeigt auf der linken Seite das 3D-Modell eines Bürogebäudes. Zur Modellierung des Gebäudes wird bei der Erstellung jedes grafischen Elements zusätzlich die Information gespeichert, um welches Bauwerksteil es sich handelt, d. h., es werden Bezeichnungen und gegebenenfalls auch weitere Informationen angefügt.

Möchte man den hier dargestellten Raum im 3D-Modell erstellen, müssen zuerst die Wände des Raumes erstellt werden. Die Wände werden in 3D hier als Quader repräsentiert, wobei zu jedem Quader die Eigenschaft gespeichert wird, dass es sich um eine Wand handelt und in welchem Stockwerk des Gebäudes sich diese Wand befindet. Der eigentliche Raum, hier Büroraum, wird nicht als eigener Quader modelliert, sondern definiert sich aus den vier Wänden, die den Raum begrenzen. Damit ergibt sich für diesen Raum auch wieder, in welchem Stockwerk er sich befindet, welche Wandflächen den Raum auszeichnen und welche Räume an diesen Raum angrenzen. Angrenzende Räume teilen sich in diesem Beispiel eine Wand.

☐ 06
Überführung Segmentierung in Strukturgraph mit 3D-Repräsentation (Schmid 2017)



R.8 Grafische Modellierung

Eine weitere Möglichkeit, die aber in diesem Beitrag nicht weiterverfolgt wird, ignoriert die strukturelle Repräsentation und geht von einer rein grafischen Repräsentation aus. Dazu werden die Segmente als grafische Elemente wie etwa Punkte, Linien und Polygone dargestellt und in einer Datenbank gespeichert. Die reine grafische Repräsentation als Anker für weiterführende Informationen wird unter anderem in geografischen Informationssystemen (GIS) und deren Anwendungen verwendet.

R.9 Modellierungsansätze

Abhängig von der Realisierung der Segmentierung in der Datenbank ergeben sich verschiedene Ansätze zum schrittweisen Aufbau der Bauwerksrepräsentation.

R.10 MonArch-Ansatz 2D/3D

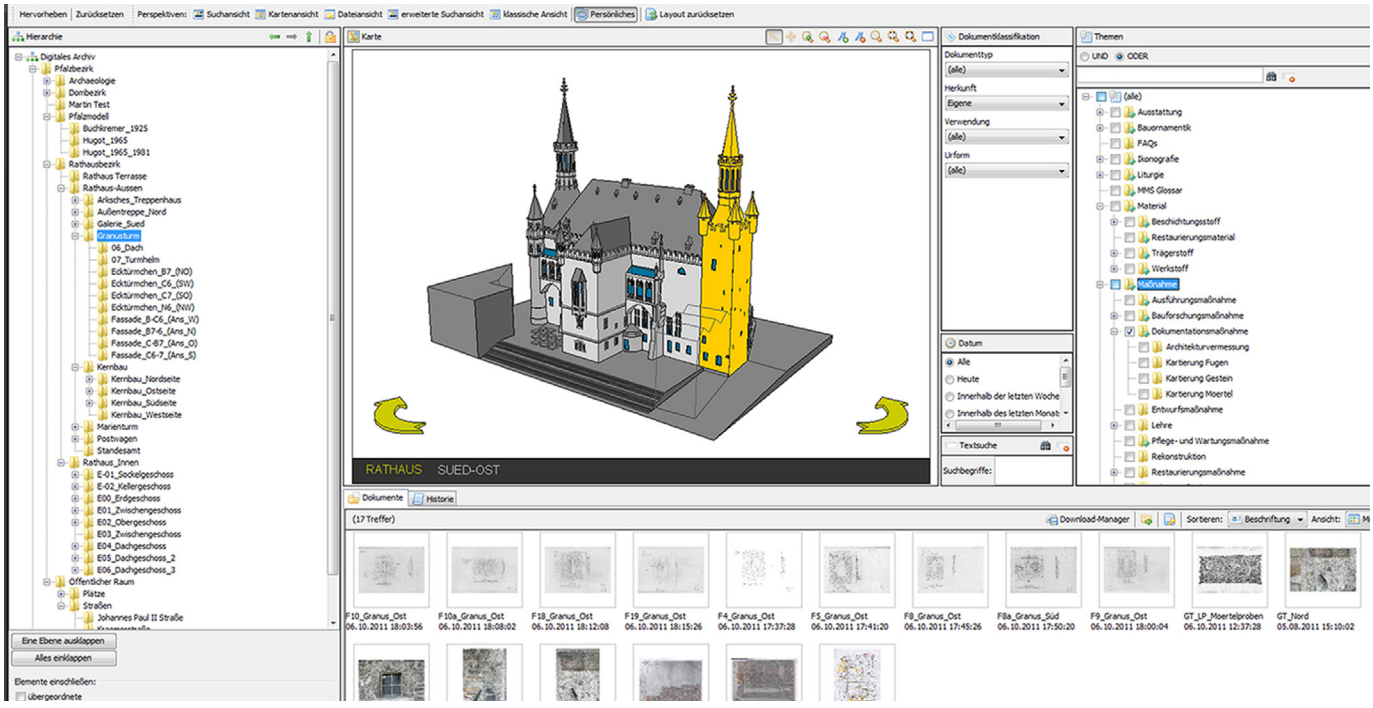
Der MonArch-Ansatz kombiniert die grafische Visualisierung eines Gebäudes mit der strukturellen Aufschlüsselung des Gebäudes nach Art eines Raumbuches. Sowohl die grafische Repräsentation des Gebäudes als auch die Aufschlüsselung werden mithilfe moderner Datenbanktechnologien gespeichert. Für die grafische Repräsentation können OpenGIS 05-kompatible relationale Datenbanksysteme eingesetzt werden. Für die Aufschlüsselung der Gebäudestrukturen bieten sich ebenfalls ein relationales Datenbanksystem an. Diese Kombination von grafischer und struktureller Repräsentation auf Basis einer vorher definierten Segmentierung bildet die primäre Ordnungsstruktur für die Zuordnung von Informationen und Dokumenten. Diese Ordnungsstruktur ist im Datenmodell wie auch in der Oberfläche wiederzufinden.

Durch die Segmentierung des Gebäudes und die Abbildung der Segmente in der Datenbank erlaubt der MonArch-Ansatz die Zuordnung von Informationen zu Gebäudeteilen oder auch zum Gesamtgebäude. Die grafische Visualisierung in MonArch kann in 2D als auch in 3D mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden, abhängig vom Gebäudeteil oder Bauwerksteil, frei gewählt und konfiguriert werden. 07 zeigt den Einsatz eines 3D-Modells, hier des Aachener Rathauses 06, für die grafische Repräsentation in MonArch. Der Detaillierungsgrad wurde hierbei so gewählt, dass die wichtigsten Bauwerksteile im 3D-Modell als 3D-Objekte hinterlegt sind. Die Strukturhierarchie hingegen ist detaillierter modelliert (siehe linke Seite der Abbildung). Die grafische Repräsentation dient hier nicht nur zur Visualisierung des Gebäudes, sondern ist auch ein Anker für Informationen über das Gebäude.

■ 05
Open Geospatial Consortium Inc., OpenGIS Implementation Specification for Geographic information, http://www.opengeospatial.org/standards/sfs.

■ 06
Judith Ley, Marc Wietheger, Pfalzenforschung in Aachen, http://arch.rwth-aachen.de/cms/Architektur/Forschung/Verbundforschung/Cultural-Heritage/~cbjv/Pfalzenforschung-in-Aachen/.

☐ 07
Einsatz von MonArch bei der Pfalzenforschung in Aachen. (Wietheger 2016)



Über die grafische und strukturelle Repräsentation hinaus erlaubt das Informationsmodell des MonArch Systems, die hinterlegten Informationen und Dokumente semantisch auszuzeichnen. Dazu können hierarchisch strukturierte Schlagwortkataloge definiert oder vorhandene kontrollierte Vokabulare importiert werden. Die darin enthaltenen Schlagworte können beispielsweise Dokumenten zugeordnet werden. Dabei sind Mehrfachzuordnungen möglich. Zudem werden diese Zuordnungen und die Vokabulare als SKOS-Ontologie 07 in der Datenbank gespeichert. Dies stellt die Verknüpfbarkeit mit externen Vokabularen als auch die Exportierbarkeit sicher. Operative Metadaten wie Erstellungszeit, Autor(en) etc. können zusätzlich gespeichert werden.

Durch die Speicherung in der Datenbank ist es jederzeit möglich, die strukturelle Aufschlüsselung oder auch die hinterlegten Vokabulare später zu erweitern oder zu verfeinern. Verschiedene visuelle Repräsentationen können gespeichert und nachträglich erweitert oder ersetzt werden, ohne dabei die verknüpften Informationen zu verlieren.

Diese Art der Repräsentation hat das Ziel, beliebige Eigenschaften, Dokumente und Informationen Gebäudeteilen zuzuordnen. Dies können beispielsweise Materialeigenschaften, die Spezifikation der Steinsorte eines Sockels oder Schadenskartierungen sein. Auch digitale Dokumente, beispielsweise aus alten Bauarchiven oder eine fotografische Dokumentation der letzten Grabungsmaßnahme, können an die passenden Gebäudeteile beziehungsweise Flächensegmente angehängt werden.

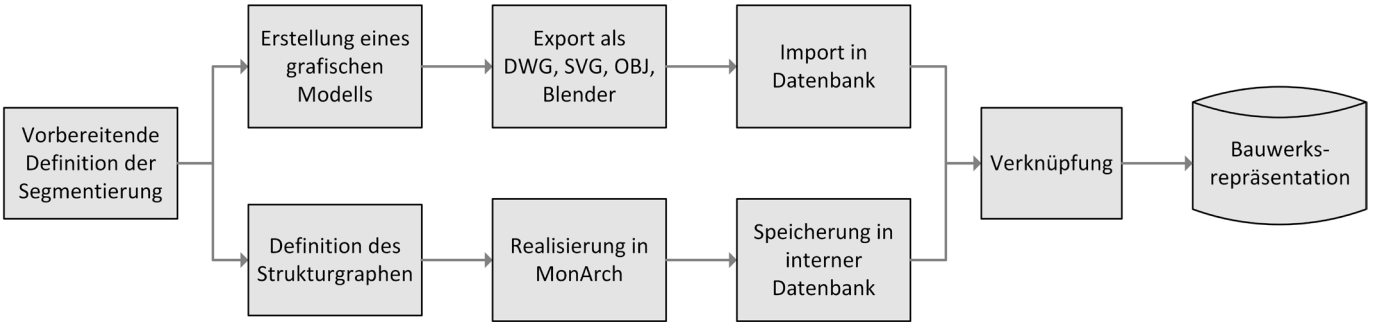
■ 07
W3C Working Group, SKOS Simple Knowledge Organization System Primer, https://www.w3.org/TR/skos-primer/.

R.11 Workflow für die semantische 2D/3D-Repräsentation

Der erste Schritt (siehe 08) zur semantischen 2D- oder auch 3D-Repräsentation eines Gebäudes ist die Festlegung einer Segmentierungsstrategie. Es sollte geklärt werden, welche Bauwerksteile man später sowohl strukturell als auch grafisch repräsentieren möchte. In diesem Schritt sollten Überlegungen angestellt werden, in welcher Beziehung die Bauwerksteile zueinander stehen. Dies umfasst beispielsweise die Frage, welche Räume repräsentiert und ob diese in Stockwerke eingeordnet werden sollen.

Der Detaillierungsgrad der Segmentierung sollte dabei dem späteren Nutzungsszenario entsprechen und möglichst auch für später hinzukommende Anforderungen geeignet sein. Wie schon beschrieben, ist eine spätere Verfeinerung der Segmentierung meist nur mit zusätzlichem Aufwand möglich.

Ist dieser konzeptionelle Schritt abgeschlossen, wird die grafische Visualisierung und die strukturelle Repräsentation des Bauwerks vorbereitet. Die grafische Visualisierung in Form eines 2D-Plandokuments oder eines 3D-Gebäudemodells kann auf Grundlage einer Aufnahme des Bauwerks (z. B. klassische Vermessung, Laserscan) erstellt werden.



☐ 08
Workflow 2D/3D-Repräsentation.
(Stenzer 2017)

Bei der Erstellung der Visualisierung müssen die Bauwerksteile, die später selektierbar sein sollen und als räumliche Anker für weiterführende Informationen gedacht sind, als eigenständige Objekte modelliert werden. Das Resultat dieses Schrittes ist die Visualisierung in einem Standardformat für 2D, wie beispielsweise SVG oder DWG, und für 3D entsprechend OBJ oder Blender. Parallel dazu kann ein konkreter Strukturbaum oder -graph des Gebäudes realisiert werden, der die konzeptuelle Segmentierung des Bauwerks widerspiegelt.

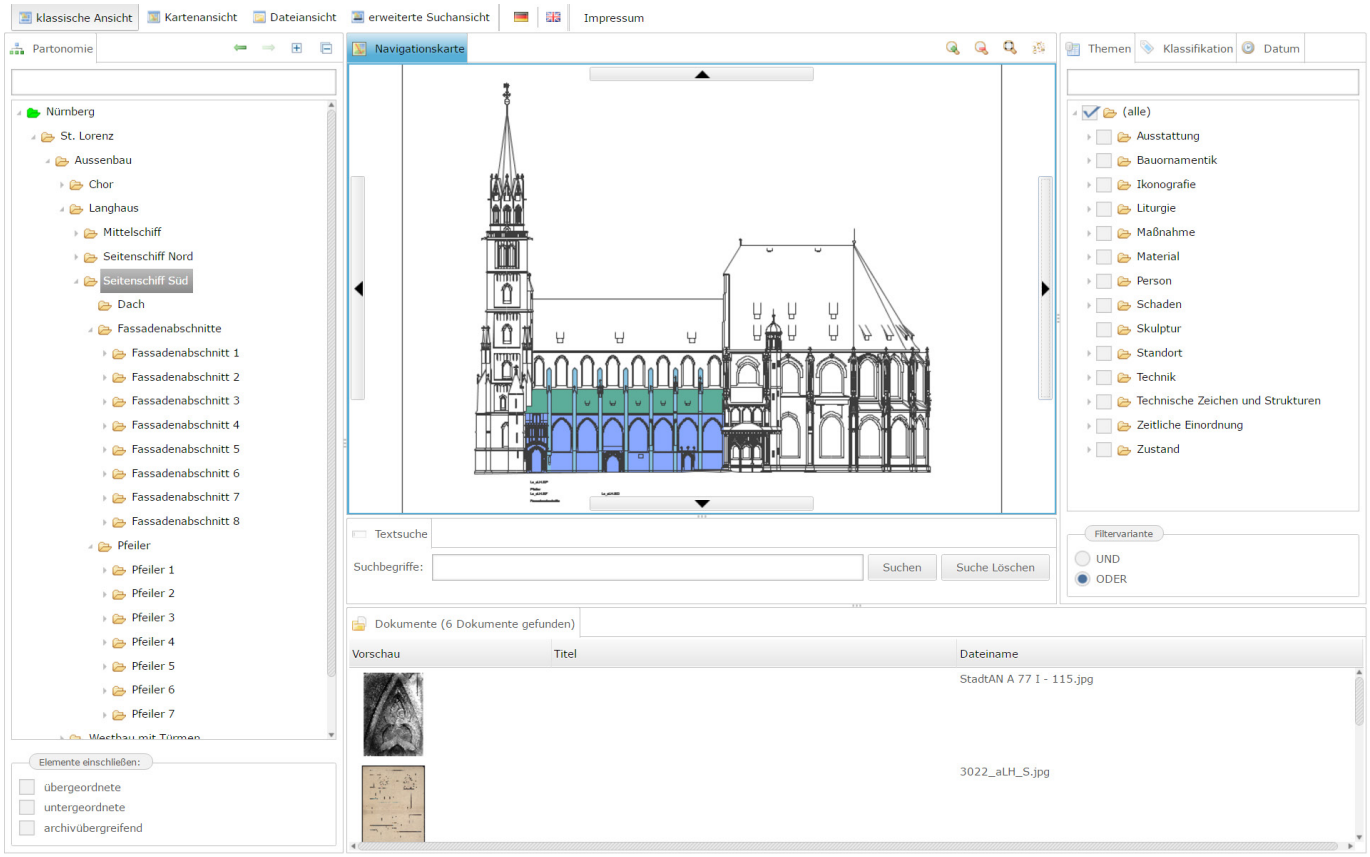
Der Strukturgraph bzw. -baum (siehe 09) wird anschließend mithilfe der MonArch-Software in der Datenbank gespeichert. Ist der Strukturgraph gespeichert, kann die vorher erstellte grafische Visualisierung ebenfalls in der Datenbank gespeichert werden. Der Workflow sieht hier durchaus vor, dass mehrere Repräsentationen des Gebäudes, seien es 2D-Zeichnungen oder 3D-Modelle mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden, in der Datenbank gespeichert werden können.

Bevor die initiale semantische Repräsentation des Gebäudes abgeschlossen ist, muss für die spätere Nutzung ein letzter essentieller Schritt vorge-

nommen werden: Jede grafische Repräsentation muss nun mit dem Strukturgraphen verknüpft werden. Die Komplexität der Verknüpfung hängt dabei wesentlich von dem vorhandenen Detaillierungsgrad ab.

Als Resultat dieses Workflows kann nun sowohl die grafische als auch die strukturelle Repräsentation als Bezugspunkt gewählt werden. Semantische Informationen und Dokumente sind sowohl über die visuelle grafische Repräsentation des Gebäudes als auch über die damit verknüpften Bauwerksteile auf intuitive Weise zugänglich.

In 09 sieht man die Südfassade von St. Lorenz in Nürnberg. Diese zweidimensionale Gebäuderepräsentation wurde wie in diesem Workflow durch manuelle Verknüpfung der strukturellen Repräsentation (linke Seite der Abbildung) und der grafischen Repräsentation (Mitte der Abbildung) erstellt. Im Schritt der Verknüpfung wurde jeder Pfeiler und jeder Fassadenabschnitt mit dem korrespondierenden Element in der 2D-Grafik verbunden.



☐ 09
Verknüpfung von Bauwerksteilen mit MonArch. (Stenzer 2017)

R.12 MonArch-Ansatz BIM

Der bisherige beschriebene MonArch-Ansatz nutzt die 2D- oder 3D-Gebäuderepräsentation zusammen mit dem Strukturgraphen als räumliche Referenzstruktur zur Verortung von Informationen zu einem Bauwerk. Soll das Bauwerk selbst modelliert werden, ergeben sich neue Anforderungen für die Gebäuderepräsentation. Hierbei kann ein 3D-Gebäudemodell selbst schon Informationsträger sein, da es beispielsweise den Zustand eines Gebäudes zu einem bestimmten Zeitpunkt repräsentiert. Der bisherige Ansatz muss folglich dahingehend modifiziert werden, dass nun das 3D-Gebäudemodell die Rolle des zentralen Informationsträgers übernimmt. Eine Segmentierung des Bauwerks, die auf das 3D-Gebäudemodell übertragen wird, ist weiterhin entscheidend, um als Referenzstruktur für die gespeicherten Dokumente und Informationen dienen zu können.

Anforderungen wie beispielsweise die Ablesbarkeit von direkten Hinweisen über Aufmaße, Materialeigenschaften oder Erhaltungszustand stellen neue Anforderungen an die 3D-Gebäudemodellierung. Diese Anforderungen können letztlich nur von sehr genauen 3D-Gebäudemodellen erfüllt werden. 3D-Modelle, die als Punktwolke oder als Netz von einer großen Zahl an Oberflächenelementen aufgebaut sind, eignen sich weniger gut, können aber als Ausgangspunkt für ein 3D-Gebäudemodell verwendet werden.

Damit stellt sich die Frage, wie geeignete segmentierte 3D-Gebäudemodelle erstellt und repräsentiert werden sollten, damit sie für die Zwecke der Bauwerksrepräsentation genutzt werden können. Hierzu müssen keine neuen Methoden für die Gebäudemodellierung erarbeitet werden, sondern es kann auf die sich immer stärker durchsetzende Methodik des Building Information Modeling (BIM) 08 zurückgegriffen werden. Die objektbezogene BIM-Methodik bietet eine Grundlage für eine einheitliche Gebäudemodellierung, und zusätzlich existiert mit den Industry Foundation Classes (IFC) 09 auch ein standardisiertes Austauschformat. IFC ist ein ISO-Standard 10, der es ermöglicht, die 3D-Repräsentation von Gebäuden und Gebäudeteilen ebenso wie die Beschreibung ihrer Eigenschaften mit unterschiedlichen Softwareanwendungen und Anwendungsgebieten auszutauschen. Die Anwendungsgebiete sehen dabei Prozesse zur Erstellung, Nutzung und Wartung eines Gebäudes vor. Alle nötigen Information werden als BIM-Daten gespeichert, die anschließend weiter genutzt werden können.

Viele Dienstleister stellen jetzt schon ihre CAD-Konstruktionen gemäß BIM-Standard zur Verfügung 11. Die so entstehenden 3D-Gebäudemodelle können von anderen BIM-kompatiblen Softwaresystemen übernommen und genutzt werden.

08
Salman Azhar, Michael Hein, Blake Sketo, Building information modeling (BIM): Benefits, risks and challenges, in: 44th ASC Annual Conference, 2008.

09
buildingSmart, Industry Foundation Classes (IFC), http://www.buildingsmart-tech.org/specifications/ifc-overview.

10
International Organization for Standardization, Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries, https://www.iso.org/standard/51622.html.

11
ALLPLAN, Allplan Architecture, https://www.allplan.com/de und Autodesk, Revit, https://www.autodesk.de/products/revit-family/overview.

Eine wesentliche Grundannahme von BIM besteht darin, dass Gebäude aus Bauwerksteilen zusammengesetzt sind. Die BIM-Methodik und die daraus resultierenden 3D-Gebäudemodelle bringen folgende Eigenschaften mit, die für eine semantische 3D-Repräsentation eines Gebäudes aus unserer Sicht notwendig sind:

- → BIM stellt durch die Art, wie Gebäude modelliert werden, sicher, dass einzelne Bauwerksteile identifizierbar sind und somit später als Anker für Informationen dienen können.
- → Die grafische als auch die strukturelle Repräsentation wird bei BIM in einem Schritt erstellt; dies erleichtert dem Modellierer des 3D-Modells das Gebäude auf geeignete Weise zu repräsentieren.
- → Die grafische und auch die strukturelle Repräsentation bilden nur einen Aspekt von BIM. Die BIM-Methodik sieht viele Möglichkeiten vor, Gebäude- oder Bauwerksteile weiter auszuzeichnen und somit das 3D-Modell in ein semantisches 3D-Modell zu überführen.

Gerade für die Dokumentation von baulichem Kulturgut eröffnet die Verwendung eines BIM- Modells eine Vielzahl neuer Möglichkeiten, um Informationen über das Bauwerk zu repräsentieren.

Mit der Möglichkeit, historische Bauwerke unter Verwendung von BIM zu repräsentieren, befasst sich das Historic Building Information Modeling (HBIM). 12

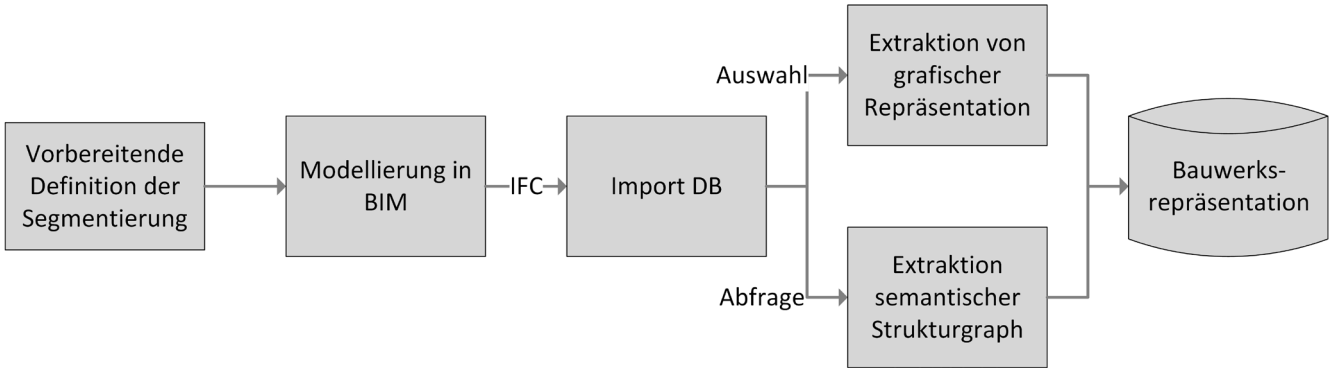
Soll ein bereits bestehendes oder historisches Bauwerk in BIM gezeichnet werden, so ist es oftmals nötig, eigens dafür Bauwerksteile (grafisch) zu konstruieren, da im Gegensatz zu modernen Gebäuden hierfür noch kaum vordefinierte Objekte verfügbar sind. Dies kann jedoch mit einem enormen Aufwand verbunden sein, möchte man das Gebäude realitätsnah darstellen. Derzeit lässt sich die Erstellung der oftmals komplexen geometrischen Bauteile nicht ohne Weiteres mit auf dem Markt befindlichen Softwarelösungen durchführen. Grundsätzlich existieren zwar bekannte Verfahren, um derartige Bauwerksteile in mehreren Arbeitsschritten zu konstruieren, jedoch ist dazu die Zusammenarbeit von Experten verschiedener Gebiete (beispielsweise Laservermessung und Photogrammetrie) zu empfehlen. 13

■ **12**
Murphy Maurice, Eugene McGovern, Sara Pavia, Historic building information modelling (HBIM), in: Structural Survey, 2009.

■ **13**
Banfi, Barazzetti, Previtali, F. Roncoroni, Historic BIM: A New Repository for Structural Health Monitoring, Copernicus Publications, 2017.

R.13 Workflow für eine semantische IFC-Repräsentation

Im Folgenden wird ein möglicher Workflow beschrieben (siehe 10), der sich die in BIM / IFC hinterlegten Informationen zunutze macht, um daraus eine semantische 3D-Repräsentation in der Datenbank zu realisieren.



☐ 10
Workflow IFC-Repräsentation. (Stenzer 2017).

Auch hier beginnt der Workflow mit der Definition der Segmentierung. In diesem Schritt ist es wichtig, nicht nur die Aufteilung eines Gebäudes zu definieren, sondern Bauwerksteiltypen wie Räume, Stockwerke oder Pfeiler zu identifizieren, um diese später bei der Modellierung umsetzen zu können. Sind diese grundlegenden Überlegungen abgeschlossen, kann das Gebäudemodell in BIM modelliert werden. Im eigentlichen Modellierungsschritt bietet BIM den Vorteil, dass die strukturelle und die grafische Repräsentation zusammen erstellt werden. Im Gegensatz zum zuvor beschriebenen Workflow muss kein zusätzlicher Aufwand zur Verknüpfung der beiden Repräsentationen betrieben werden. Dies kann allerdings auch als Nachteil oder zusätzliche Schwierigkeit gesehen werden, denn nun ist die fachliche Sicht der späteren Nutzerinnen und Nutzer bereits bei der baulichen grafischen Modellerstellung zu berücksichtigen. Sobald das Gebäude in BIM modelliert ist und somit strukturell als auch grafisch repräsentiert ist, kann es im IFC-Format exportiert werden. In diesem Workflow werden die im IFC-Format vorliegenden Daten in eine spezielle Datenbankanwendung importiert. Dadurch kann selektiv auf die IFC-Daten zugegriffen werden. Als technische Grundlage kommen für die Speicherung dieser Daten prinzipiell sowohl relationale als auch nicht-relationale Datenbanksysteme in Betracht, wobei die Autoren wegen ihrer Universalität für geeignete erweiterte relationale Systeme plädieren. Im nächsten Schritt kann aus dieser Datenbankanwendung die grafische Repräsentation des Gebäudes extrahiert und in ein für die 3D-Repräsentation geeignetes Format konvertiert werden. Das hat den Vorteil, dass für die eigentliche visuelle Darstellung des Gebäudes auf Standardtechnologie zurückgegriffen werden kann. Darüber hinaus bietet dieser Ansatz die Möglichkeit, je nach Anwendungszweck verschiedene 3D-Engines (z. B. jMonkeyEngine 14) zu verwenden und dazu das passende optimierte 3D-Format (z. B. Blen-

■ **14**
jMonkeyEngine, http://jmonkeyengine.org/.

der 15) aus IFC zu extrahieren. Parallel zu dem beschriebenen Schritt kann aus den IFC-Daten der Strukturgraph des Gebäudes (z. B. für die MonArch-Anwendung) extrahiert werden. Auch hier zeigt sich erneut die Flexibilität des Ansatzes, da je nach Anforderung der Strukturgraph sehr detailliert — z. B. alle Räume mit Wänden und Türen eines Gebäudes — oder grob — beispielsweise nur alle Stockwerke eines Gebäudes — extrahiert werden kann.

Der hier beschriebene Workflow sieht vor, sowohl die extrahierte grafische Repräsentation als auch den extrahierten Strukturgraphen in eine Datenbank zu importieren. Auf diese Weise kann sowohl der Strukturgraph als auch die grafische Repräsentation semantisch angereichert und mit Informationen und Dokumenten verknüpft werden.

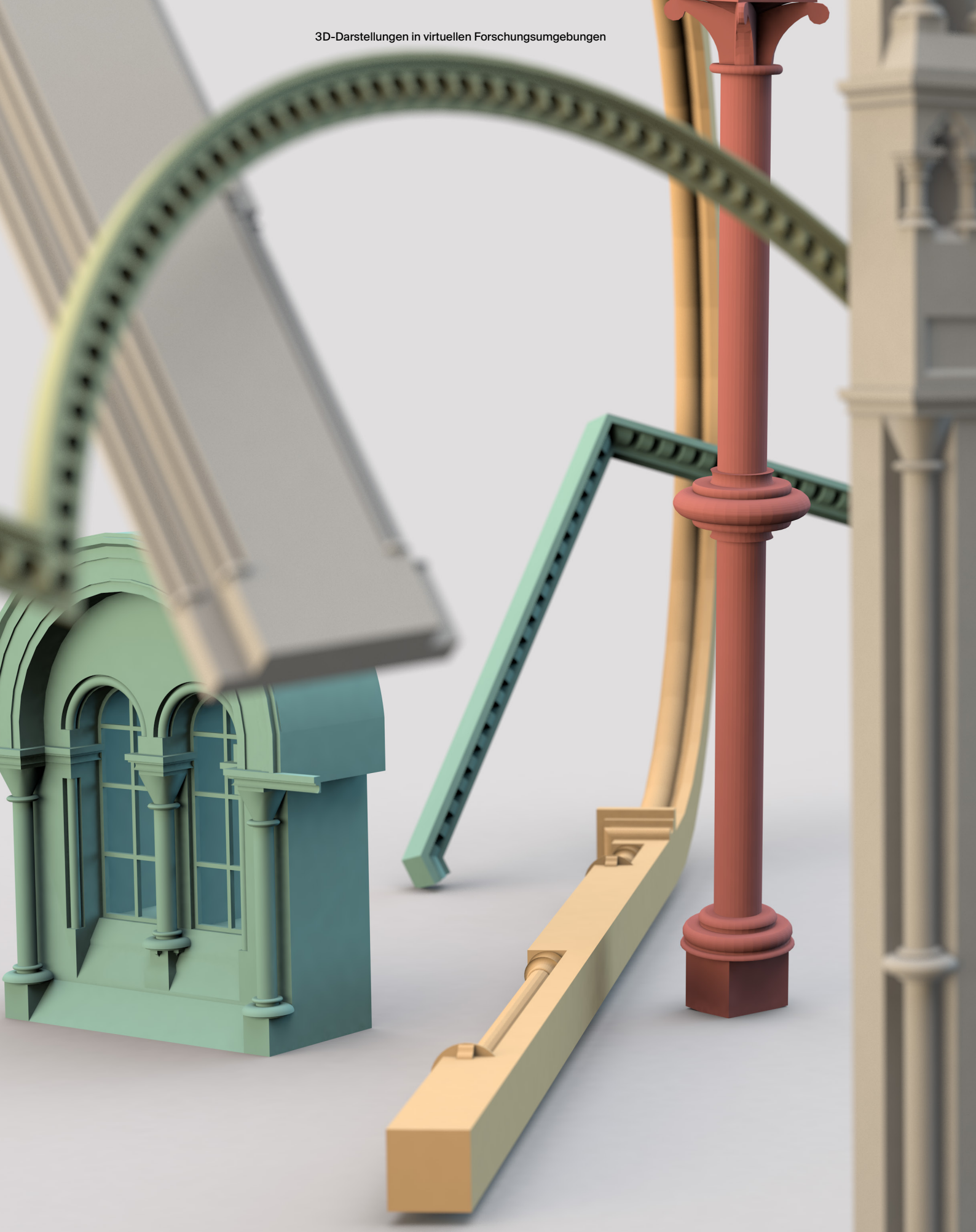
■ **15**
IfcOpenShell, ifcBlender: An ifc importer for Blender, http://ifcopenshell.org/ifcblender.html.

R.14 Ausblick

In diesem Beitrag wurden drei Ansätze zur semantischen 3D-Repräsentation von Gebäuden dargestellt, von denen zwei genauer betrachtet wurden. Ein Ansatz sieht vor, dass die strukturelle und die grafische Repräsentation unabhängig voneinander erstellt werden und die Verknüpfung der beiden Repräsentationen erst in der Datenbank stattfindet. Im zweiten Ansatz erfolgt die Verknüpfung bereits während der Modellierung des Gebäudes, und zwar mithilfe von BIM / IFC. Unabhängig davon, welcher der beiden Ansätze gewählt wird: Immer bilden die strukturelle und die grafische Repräsentation in der Datenbank die Grundlage zur semantischen Repräsentation eines Gebäudes.

IFC bietet ein Datenformat und ein Datenmodell, die es erlauben, semantisch angereicherte Informationen über Gebäude zwischen verschiedenen Informationssystemen auszutauschen und somit für unterschiedlichste Anwendungen nutzbar zu machen. Mit dem CIDOC Conceptual Reference Model 16 (CIDOC CRM) existiert ein Standard, um Informationen zum kulturellen Erbe zu beschreiben. Zukünftige Arbeiten werden die Kombination der Möglichkeiten von IFC mit den Möglichkeiten des CIDOC CRM untersuchen. Ist dieser Schritt vollzogen, steht für die semantische 3D-Gebäudereprä-sentation von Kulturerbe ein umfassendes Werkzeug zur Verfügung, mit dem das Gebäude selbst mit all seinen Facetten als auch Informationen zum Gebäude digital abgebildet und ausgetauscht werden können.

■ **16**
Nick Crofts, Martin Doerr, Tony Gill, Stephen Stead und Matthew Stiff, Definition of the CIDOC Conceptual Reference Model, ICOM/CIDOC CRM Special Interest Group, http://www.cidoc-crm.org/sites/default/files/cidoc_crm_version_5.0.4.pdf.



Peter Fornaro

S. 3D-Darstellungen in virtuellen Forschungsumgebungen

→ 3D-Visualisierung, Annotationen, Bildvergleich, Digitale Nachhaltigkeit, Kommentare, Reflection Transformation Imaging (RTI), Regionen in Bilddarstellungen, Reproduzierbarkeit digitaler Darstellungen, Virtuelle Forschungsumgebung, WebGL, Zitierfähigkeit im Digitalen

Das Visualisieren von 3D-Objekten gehört heute zu den Standardanwendungen in der Welt der Computer. Meist werden solche 3D-Objekte in dedizierten Applikationen oder auch in einem Browser dargestellt. Heutige Webbrowser wurden durch die WebGL Technologie deutlich erweitert und sie erfuhren eine signifikante Leistungssteigerung. Dies führt dazu, dass die visuelle Qualität von Renderings digitaler Objekte ebenfalls besser und realitätsgetreuer wurde. Webapplikationen können aber weit mehr, als nur unterschiedliche Medien-Objekte darstellen. Vor allem in der Forschung stellen heute virtuelle Forschungsumgebungen (Virtual Research Environment, VRE) eine wichtige Neuerung dar, um mit digitalen Quellen optimal arbeiten zu können. In den Geisteswissenschaften ist das Vernetzen und in Kontext setzen unterschiedlicher Quellen von grosser Wichtigkeit, um dadurch z. B. die qualitative Datenanalyse zu verbessern. Hilfsmittel wie grafisch markierte Regionen (region of interest, RoI) und Annotationstools erlauben es zudem, Erkenntnisse mit anderen Forschenden zu teilen, sie ebenfalls zu vernetzen und zu kommentieren. Werden solche 3D-Quellen in VREs eingesetzt, spielt die Nachhaltigkeit eine wichtige Rolle, um sicherzustellen, dass solche Forschungsdaten auch in der Zukunft genutzt werden können. In diesem Text wird gezeigt, welche Bedeutung VREs für die Darstellung und die Bewertung von 3D-Rekonstruktionen besitzen, welche Aspekte für die Nachhaltigkeit essentiell sind.

S.1 Einleitung

Die digitale Revolution ist bereits Teil unserer Geschichte und Computer sind aus unserem Alltag und Berufsleben nicht mehr wegzudenken. Diese Omnipräsenz von Technologie aus der digitalen Domäne ist auch in allen Bereichen der Wissenschaft intensiv zu spüren. In der Frühzeit der Computertechnik wurden erst die Naturwissenschaften von ihr durchdrungen, heute stellt die Computertechnik auch in den Geistes- und Sozialwissenschaften einen wichtigen Pfeiler dar, der unter dem Begriff **Digital Humanities** zusammengefasst werden kann. Die Digital Humanities sind sicherlich eine besondere Herausforderung, da es gilt die Computertechnik in der geisteswissenschaftlichen Forschung so einzusetzen, dass die eigentliche Forschungsarbeit mit einem Mehrwert versehen und unterstützt wird. Dass dieser Mehrwert nicht immer selbstverständlich gegeben ist, wird z. B. dadurch aufgezeigt, dass in der zeitlichen Entwicklung zunächst Originale in grossen Mengen digitalisiert wurden, in einem zweiten Schritt das Problem der schnell eintretenden Obsoleszenz von digitaler Technologie angegangen wurde und erst in einem dritten Schritt die Arbeitswerkzeuge für den Einsatz mit den so generierten und gespeicherten Quellen Beachtung fand. Der vorliegende Text soll vor allem diesen letzten Aspekt ansprechen, da hier die Möglichkeiten der 3D-Visualisierung und auch die Bedeutung der Forschungsarbeit mit digital reproduzierten Objekten besonders stark zum Tragen kommen.

Das Visualisieren von 3D-Objekten gehört heute zu den Standardanwendungen in der Welt der Computertechnik. Vor allem der Bereich des Computer Aided Design (CAD) und der Computerspiele ist heute ohne 3D-Darstellungen undenkbar. In der geisteswissenschaftlichen Forschung ist die Bedeutung von 3D-Objekten noch nicht so gross, das Potential und der Mehrwert aber beträchtlich.

Meist werden 3D-Objekte in dedizierten Applikationen wie z. B. Blender, Maya, 3Ds Max dargestellt, was vor allem das kollaborative Arbeiten erschwert. Die moderne Computertechnologie, wozu auch stark verbesserte Hardware gehört, ist so leistungsfähig, dass selbst komplexere Grafikdarstellungen möglich sind. Auf der Seite der Software ist eine der wichtigsten Technologien OpenGL und dessen browserfähige Weiterentwicklung WebGL 01, hardwareseitig sind leistungsfähige Grafikkarten mit eigener Rechnerleistung zu nennen, die sogenannten graphics processing units (GPUs). Heutige Webbrowser wurden durch die WebGL-Technologie in ihrem Funktionsumfang massiv erweitert und in Kombination mit GPUs sind selbst mobile Geräte in der Lage, 3D-Grafikinhalte erhöhter Komplexität darzustellen. Auch wenn im Vergleich zu anderen Grafiklösungen WebGL nicht zu den leistungsfähigsten gehört, so ist die Möglichkeit der einfachen Einbindung in einen Webbrowser von entscheidender Wichtigkeit im Kontext der kollaborativen Arbeit mit Forschungsdaten, denn das Web ist das wichtigste Tor zur ortsunabhängigen Zusammenarbeit. Zudem ist heute durch geschicktes caching und mit Auflösungspyramiden eine merkliche Verbesserung der Performance zu erreichen, was durch zahlreiche Beispiele wie google chrome experiments 02 oder Projekten wie dem digitalen Basler

■ **01**
KHRONOS Webseite, https://www.khronos.org/webgl/.

■ **02**
Chrome Experiments, https://experiments.withgoogle.com/chrome.

Merianplan 03 deutlich wird. Webapplikationen können aber weit mehr, als nur Objekte darstellen. Vor allem im wissenschaftlichen Kontext stellen webbasierte virtuelle Forschungsumgebungen eine wichtige Neuerung dar, um mit digitalen Quellen optimal arbeiten zu können. Hilfsmittel wie Bereichsmarkierungen (Region of Interest, RoI) und Annotationswerkzeuge erlauben es, Objektdetails, Forschungserkenntnisse und deren Entstehungsgeschichte mit anderen Forschenden zu teilen, sie zu vernetzen und zu kommentieren. Werden die Möglichkeiten von virtuellen Forschungsumgebungen mit dem Mehrwert, den 3D darstellt, kombiniert, bringt dies ganz neue Möglichkeiten für die wissenschaftliche Arbeit durch die Vorteile von räumlich-grafischen Darstellungen. Ein wichtiger Punkt ist hierbei zu nennen: Je umfangreicher und komplexer die Möglichkeiten zur Individualisierung der Betrachtungssituation in einem Webbrowser sind, um so wichtiger ist es auch, dass diese gespeichert werden können. Nur so ist es möglich, dass eine andere Person die identische Darstellung betrachten und nutzen kann.

In der ganzen digitalen Domäne, vor allem aber im Bereich der Wissenschaft spielt Nachhaltigkeit eine bedeutende Rolle. Werden virtuelle Forschungsumgebungen eingesetzt, wird langfristige Sicherung der Daten und deren Zugänglichkeit noch wichtiger, denn es muss sichergestellt werden, dass die vorhandenen Primärdaten und die neu erzeugten Sekundärdaten auch in zukünftige wissenschaftliche Arbeitsprozesse einbezogen werden können; die Zitierfähigkeit muss auch bei solch komplexen Objekten sichergestellt sein.

■ **03**
Digitalen Basler Merianplan, https://web.cadwork.ch/view.php?model=Cities/Basel%20Merian.

S.2 Virtuelle Forschungsumgebungen

Prinzipiell kann ein funktionales grafisches **front-end** mit einer Anbindung an eine Datenbanklösung als Virtuelle Forschungsumgebung (engl. Virtual Research Environment, VRE) bezeichnet werden. Ziel einer solchen digitalen Umgebung für die Geisteswissenschaften ist es, übliche Arbeitsabläufe mit digitalen Mitteln möglichst vollständig und zweckdienlich abzubilden 04. Dies soll in solch einer Form geschehen, dass die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler vertraute Konzepte und Arbeitsmethoden in einer Umgebung intuitiv wiedererkennen und nutzen können. Hierfür sind einige Grundfunktionen notwendig:

- → Eine browser-basierte client-server Lösung ist in jedem Fall einer stand-alone Lösung, einer konventionellen Applikation, vorzuziehen. Auf diese Weise kann nicht nur auf ein spezielles Programm verzichtet werden, sondern die Plattformunabhängigkeit ermöglicht mehr oder weniger automatisch ein kollaboratives Arbeiten 05.
- → Da in vielen geisteswissenschaftlichen Disziplinen intensiv mit Bildmaterial und Objekten gearbeitet wird, bei denen oft spezifische Bereiche (Region of Interest, RoI) hervorgehoben werden sollen, sind entsprechende grafische Elemente notwendig, mit denen sich solche

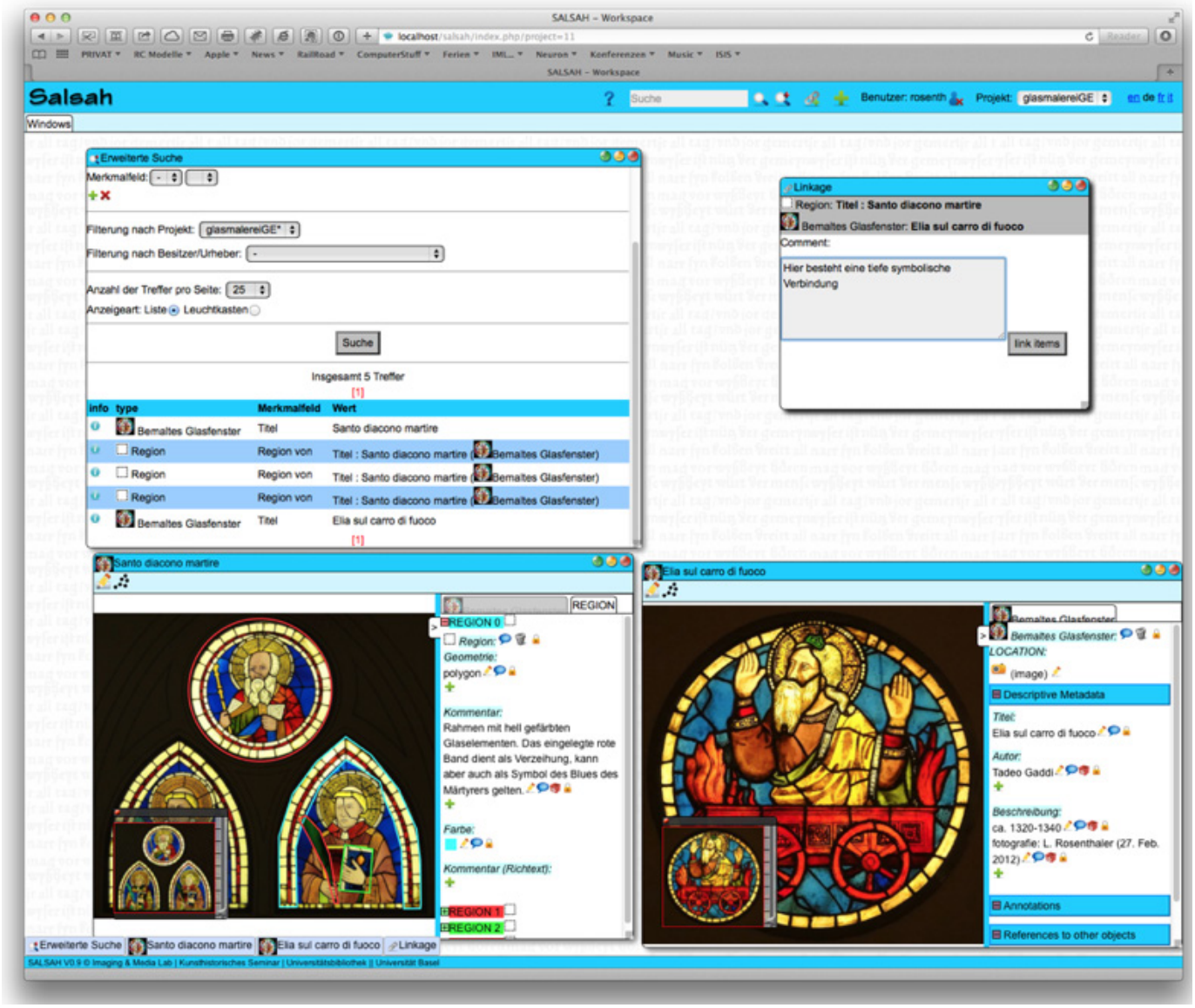
■ **04**
Tobias Schweizer, Lukas Rosenthaler, SALSAH – eine virtuelle Forschungsumgebung für die Geisteswissenschaften, in: Dr. Andreas Bienert, Dr. Frank Weckend, Dr. James Hemsley, Prof. Vito Cappellini (Hg.), EVA 2011 Konferenzband, Berlin 2011, S. 147–153.

■ **05**
Lukas Rosenthaler, Entwicklung einer Web 2.0-Applikation zur Präsentation und Erforschung der Basler Frühdrucke, in: Karin Krause und Barbara Schellewald (Hg.), Bild und Text im Mittelalter, Köln 2011.

Bereiche markieren lassen. Diese grafischen Elemente können z. B. Polygon-Linienzüge oder Rechtecke sein, welche die Markierung von Objektpartien erlauben.

- → Die in den Geisteswissenschaften gängige und bewährte Methode der Auswertung von Bildmaterial ist eher qualitativer Natur. Diese Arbeitsform erfordert umfangreiche und leistungsfähige Werkzeuge, um beschreibende und kontextuelle Metadaten (Annotationen, Transkriptionen, Kommentare) zu erfassen. Solche Metaobjekte müssen mit dem eigentlichen Primärobjekt verknüpft und auch so gesichert werden können.
- → Die Visualisierung in einer VRE muss multimedial sein. Neben Text, Bild, Ton und Video ist es zudem notwendig, Objekte in einem virtuellen 3D-Raum darstellen zu können.

Die Kombination aller oben genannten Punkte stellt eine besondere Herausforderung dar, da ein vollständiger Satz von Metadaten (technische und beschreibend-kontextuelle Informationen), aufgezeichnet und gespeichert werden muss. Nur so kann sichergestellt werden, dass zu jedem beliebigen späteren Zeitpunkt die identischen Untersuchungsbedingungen wieder geladen oder die Einstellungen einem anderen Benutzer im Rahmen der Forschungsarbeit zur Verfügung gestellt werden können. Im 3D-Raum sind diese Anforderungen besonders hoch, da die betrachtende Person eine Vielzahl von Parametern wählen kann, um dadurch eine spezifische Form der Visualisierung festzulegen. So kann zum Beispiel der Point of View (PoV), die Wirkung der Aufnahmeoptik sowie die Anzahl und die Position der Lichtquellen in einem 3D-Raum nahezu beliebig gewählt werden.
Das macht es unabdingbar, diese Parameter der Visualisierung ebenfalls zu speichern, um damit die Reproduzierbarkeit einer Betrachtungssituation und Vergleichbarkeit mehrerer solcher Situationen zu gewährleisten. Ebenso wichtig ist eine lückenlose und detaillierte Bearbeitungs-, bzw. Annotations- und Diskussions-History, die zu einem späteren Zeitpunkt aufzeigt, wer welche 3D-Objekte bearbeitete und kommentierte. Neben einer komplexen Datenstruktur für die Speicherung der Metadaten, der Verlinkung und der Einstellungen einer spezifischen Betrachtungssituation ist es wichtig, dass neben einer umfangreichen Benutzer- und Rechteverwaltung auch eine Versionierung unterstützt wird, um so sämtliche Modifikationen benutzerspezifisch transparent und nachvollziehbar aufzeichnen zu können.



☐ 01
Salsah ist ein Beispiel für eine virtuelle, browserbasierte Forschungsumgebung. In der Abbildung sind mehrere Benutzerfenster gezeigt, welche jeweils einzelne Bildobjekte plus die dazugehörenden Metadaten zeigen. (Digital Humanities Lab, Universität Basel)

S.3 Datenmodell

Forschungsdaten können sehr unterschiedlich strukturiert sein. Um diese Strukturunterschiede in einer Forschungsumgebung nutzbar zu machen, ist eine flexible Datenbank Voraussetzung, welche auch die Abbildung komplexer Datenmodelle erlaubt. Diese Flexibilität ist besonders wichtig, da eine solche digitale Infrastruktur generisch genutzt werden soll, d. h. unterschiedliche Projekte und auch Projekttypen sollen in einer solchen Umgebung abgebildet werden. Diese Vereinheitlichung der verwendeten Technologie ist nicht zuletzt für die digitale Langzeitsicherung und -verfügbarkeit von grosser Wichtigkeit.

Beispielhaft kann das Schweizerische Daten- und Servicezentrum für Forschungsdaten DaSCH 06 genannt werden, welches am Digital Humanities Lab der Uni Basel betrieben wird. Das DaSCH dient als generische Infrastruktur für datenbankorientierte Forschungsprojekte in den Geisteswissenschaften wo diese Flexibilität sowohl bezüglich der Datenmodelle, als auch der visuellen Repräsentation — also dem GUI — besonders stark gefordert ist. DaSCH muss also in der Lage sein, Projektdaten aus unterschiedlichen Disziplinen der Geisteswissenschaften aufzunehmen, was zum Teil mit einem grösseren Aufwand für die Migration und den Import einhergeht. Dennoch zeigt es sich, dass ein Grossteil der Funktionalitäten fach- und projektübergreifend sind und somit keine prinzipielle Neuentwicklung notwendig ist.

■ 06
Data and Service Center for the Humanities (DaSCH), http://dh-center.ch/.

Dies setzt natürlich einen flexiblen und funktional starken Datenbank-Unterbau voraus. Eine sehr gut funktionierende und bewährte Technologie für diese Aufgabe ist auf der Ebene der Datenbank das Ressource Description Framework 07 (RDF), dessen Ursprung in der Webtechnologie liegt. RDF ist der grundlegende Baustein für das Semantic Web, welches vom World Wide Web Consortium (W3C) standardisiert wurde. Grundsätzlich baut RDF auf sogenannten Tripeln auf, einer logischen Aussage. Mehrere Tripel bilden einen mathematischen Graphen, welcher als RDF-Modell bezeichnet wird. Ein Tripel ist eine Elementaraussage, die aus Subjekt, Prädikat und Objekt besteht. Ein Tripel stellt eine Behauptung dar, in welcher das Subjekt und das Objekt miteinander in Beziehung gebracht werden. Diese Beziehungen sind vom Subjekt zum Objekt gerichtet und mit einem Prädikat versehen. Werden diese RDF-Triples miteinander verknüpft, führt dies zu gerichteten Graphen, welche Datenmodelle unterschiedlicher Komplexität beschreiben können. 02

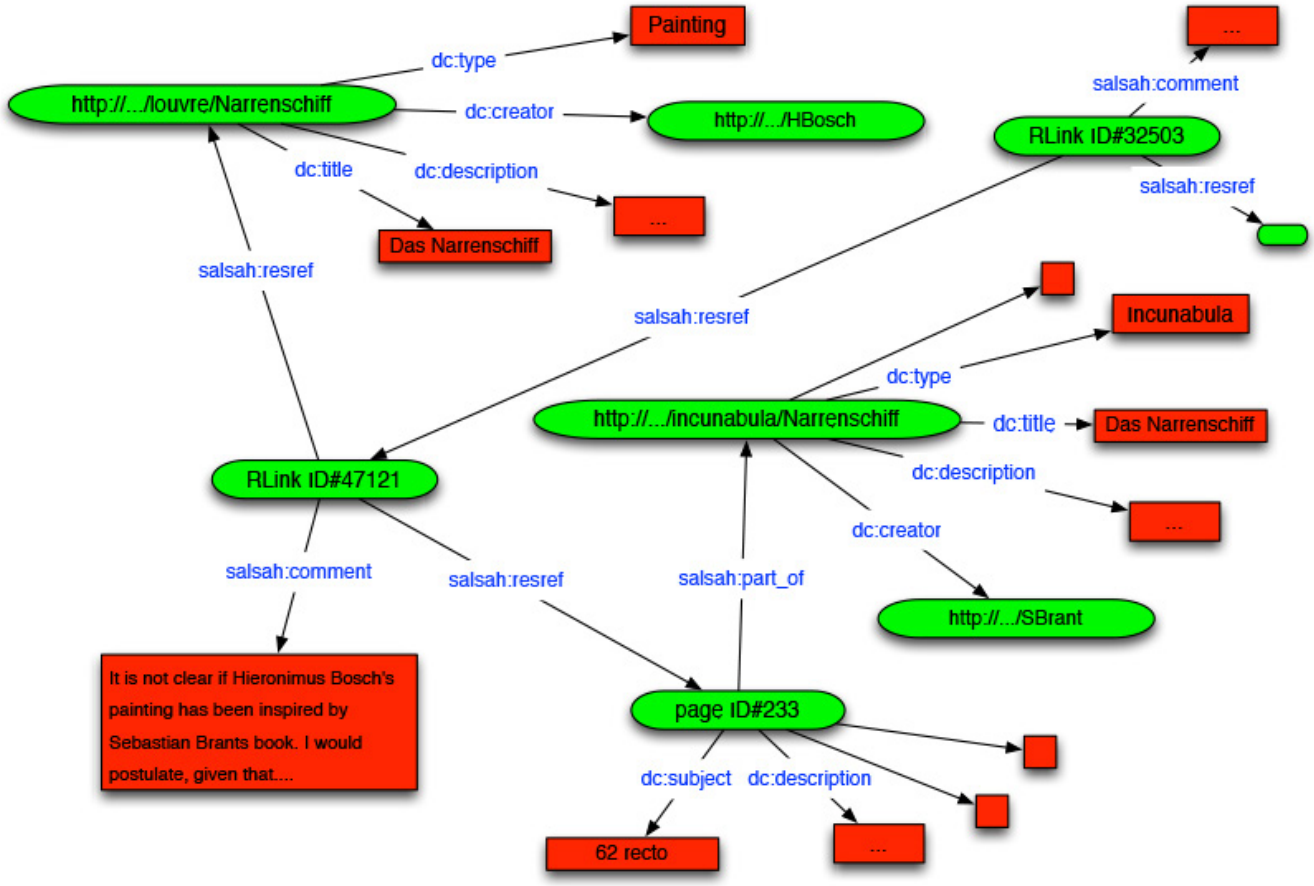
■ 07
W3C Semantic Web, https://www.w3.org/RDF/.

Wenn in einer virtuellen Forschungsumgebung 3D-Grafikelemente dargestellt werden sollen, so nimmt die Komplexität der Darstellungssituation zu. Das Objekt selbst, also das 3D-Modell ist aufwändiger zu beschreiben als beispielsweise eine Fotografie und auch die Beschreibung der Betrachtungssituation benötigt einiges an Metainformation, um Reproduzierbarkeit sicherzustellen. Solche zusätzlichen Attribute müssen ebenfalls in der VRE gespeichert werden können. Dieses Datenmodell kann zum Beispiel als generisches RDF-Modell, einer Ontologie, formuliert und zur Speicherung genutzt werden 08.

■ 08
Ivan Subotic, Lukas Rosenthaler, Heiko Schuldt, A Benchmark for RDF-based Metadata Management in Distributed Long-Term Digital Preservation, DESWeb 2012, in: ICDE 2012 Proceedings

So ist es möglich, die Spezifika einer Szene im 3D-Raum vollständig abzubilden, damit basierend auf den gespeicherten Daten und Metadaten eine vollständige Reproduktion der Betrachtungssituation gegeben ist, die sämtliche Parameter beinhalten muss (Kamera, Licht, Objekt, Objekteigenschaften, Bezugssystem, usw).

☐ 02
Ein Datenmodell wie es in RDF vorkommen kann. Klar erkennbar ist die gerichtete Struktur des Graphen, was schnell zu komplexen Modell führen kann, die aber nicht unübersichtlich werden und die erweiterbar bleiben. (Digital Humanities Lab, Universität Basel)

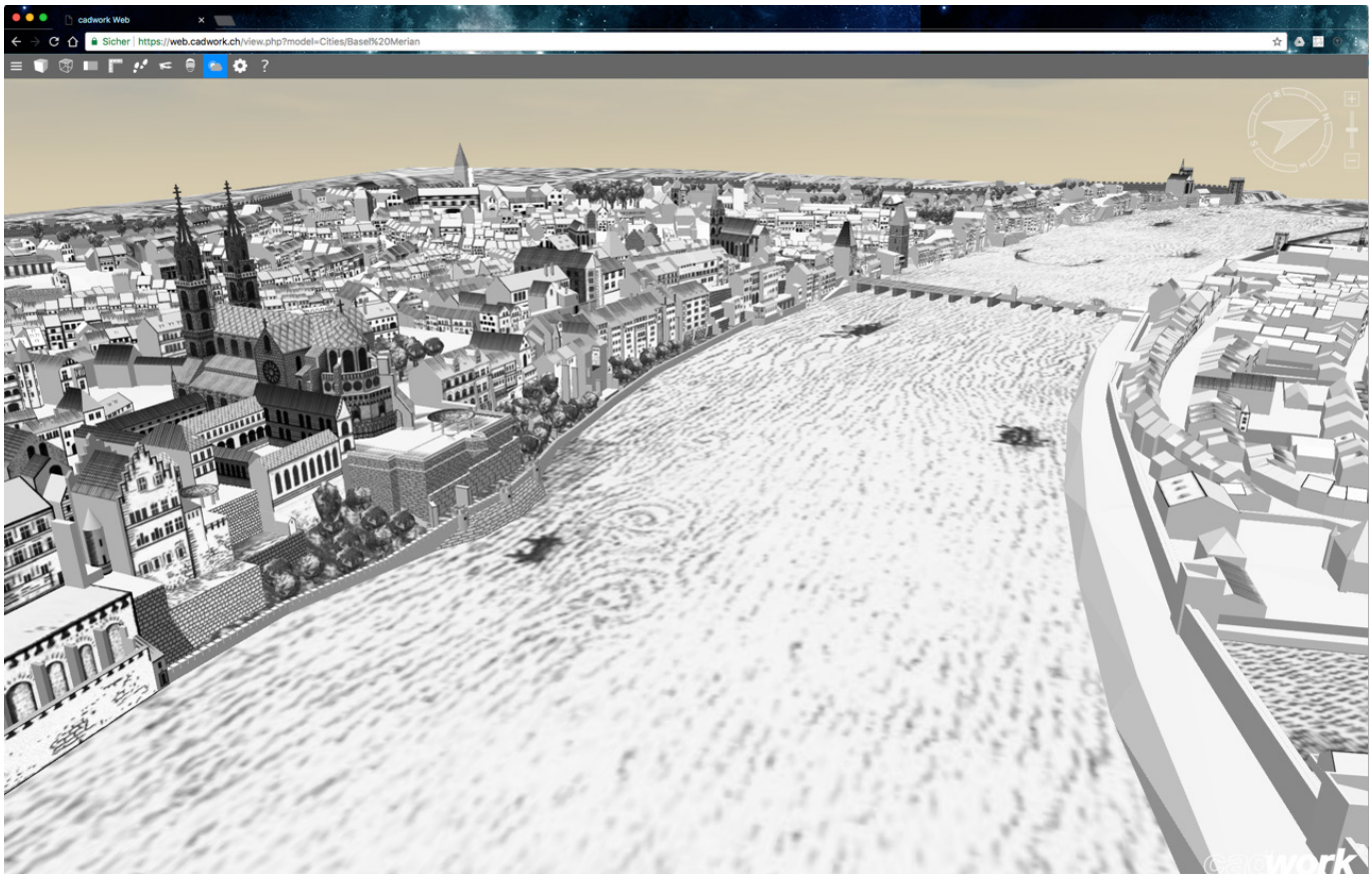


S.4 WebGL

Die Visualisierung von 3D-Objekten in Webbrowsern hat vor allem durch eine Technologie profitiert: WebGL. Diese auf OpenGL basierende Programmierschnittstelle, welche für **embedded systems** bezüglich der Hardwareanforderungen optimiert, d. h. **vereinfacht** wurde, ist heute in fast allen modernen Web-Browsern integriert. WebGL ist ein lizenzfreier Standard, der von der Khronos Group und Mozilla im Zusammenspiel mit der Programmiersprache JavaScript entwickelt wird. Für die Anwendung im Browser heisst dies, dass ohne das Laden von zusätzlichen plug-ins 3D-Funktionalitäten zur Verfügung gestellt werden, deren Leistungsfähigkeit und Funktionsumfang beeindruckend sind. WebGL wird in dieser Form auch auf den meisten mobilen Geräten, wie Smartphones und Tablets, unterstützt, was die Bandbreite des Einsatzgebietes weiter erhöht. Die verbesserte Performance von WebGL erlaubt auch das flüssige interaktive Arbeiten, d. h. lange Renderingzeiten bleiben aus und die Latenz der visuellen Darstellung ist so in einem vertretbaren Rahmen.

WebGL bietet eine Vielzahl von Funktionalitäten, welche von der Darstellung von einfachen Gittermodellen bis hin zu komplex animierten, mit Texturen versehen und beleuchteten Oberflächen reicht. Dass bei diesem grossen Funktionsumfang das Einfügen von grafischen Elementen für die Markierung spezifischer Bereiche problemlos möglich ist, versteht sich vor diesem Hintergrund fast von selbst. Ein Beispiel, welches den Nutzen und die Möglichkeiten von WebGL in einer geisteswissenschaftlichen Anwendung zeigt, ist der Basler Merianplan. Dieser im Original noch immer vorhandene, 400 Jahre alte erste Plan der Stadt Basel wurde von Matthäus Merian d. Ä. aus der Vogelperspektive gezeichnet 03. Damit sich der Plan explorativ erkunden lässt, wurde er von einem Wirtschaftspartner 09 digitalisiert, um die räumliche Tiefe erweitert und so in WebGL dargestellt, um ihn in jedem modernen Webbrowser rendern zu können.

■ 09
Der Plan wurde im Rahmen einer universitären Kollaboration von der Firma cadwork in Basel nach WebGL portiert und erweitert.



☐ 03
Die 3D-Adaption des Basler Merianplans in einem Webbrowser. Der Plan wurde digitalisiert, um räumliche Tiefe erweitert und mit WebGL in einem Browser dargestellt. (Digital Humanities Lab, Universität Basel)

S.5 Reflexion Transformation Imaging RTI

WebGL ist aber nicht nur für das klassische Darstellen von 3D-Objekten in einer Webseite geeignet. Es erlaubt auch die Verknüpfung von ganz unterschiedlichen visuellen Komponenten, wie Texturen, Fotografien und Resultaten von wissenschaftlichen Aufnahmemethoden. Als ein interessantes Verfahren ist hier sicherlich das Reflectance Transformation Imaging (RTI) zu nennen, da es die visuelle Qualität von Oberflächendarstellungen, auch im 3D-Raum, massiv erhöht.

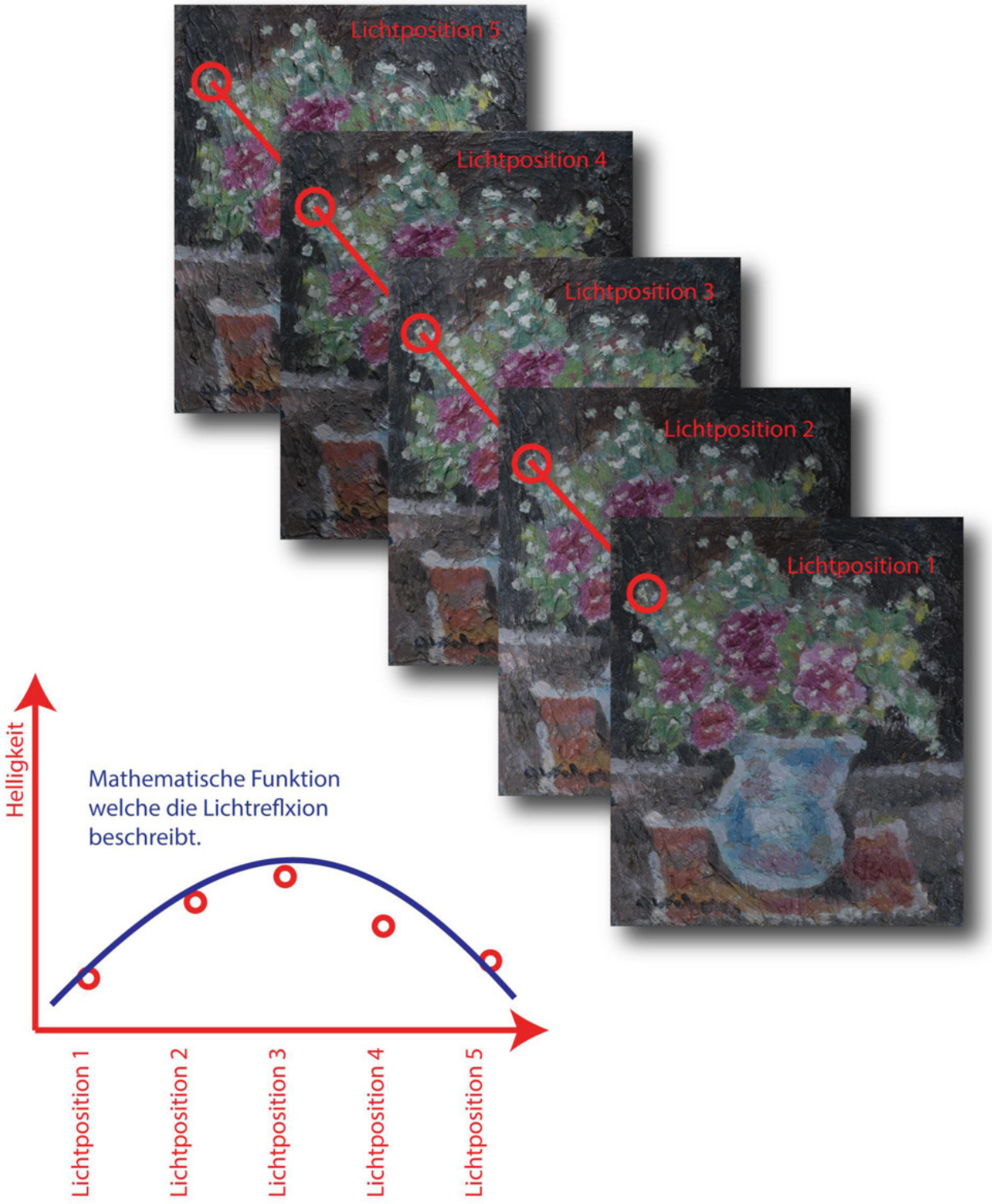
Bei der Beurteilung kulturhistorisch relevanter Objekte ist die Beleuchtung von wesentlicher Bedeutung, denn erst durch die Interaktion von Licht, Oberfläche und Betrachter entsteht der visuelle Gesamteindruck. Wird zum Beispiel der Standort, die Geometrie oder die Farbtemperatur einer Lichtquelle verändert, verändert sich entsprechend auch die Erscheinungsweise des Objekts. Diese Aspekte sind bereits in der planaren Abbildung von Objekten wichtig, in der der Wiedergabe von dreidimensionalen Objekten können sie aber sogar darüber entscheiden, ob eine Darstellung realistisch oder **künstlich** wirkt. Für die Reproduktion von Objekten im 3D-Raum wird Licht ausserdem aktiv dazu eingesetzt, um charakteristische Merkmale der Oberflächenbeschaffenheit von Materialien hervorzuheben, aus denen das Objekt besteht, oder die Rückschlüsse auf den Herstellungsprozess erlauben. Durch eine geeignete Beleuchtung lassen sich zum Beispiel die Pinselstriche eines Gemäldes mit Streiflicht hervorheben oder aber mit mehreren Lichtquellen und geeignetem Einstrahlwinkel nahezu zum Verschwinden bringen.

Ein gutes Beispiel, an dem sich solche Effekte veranschaulichen lassen, ist das Detail einer Wandmalerei in der Ostkrypta des Basler Münsters. 04

☐ 04
Kopf des Bischofs Lüthold von Aarburg, Detail der Wandmalerei in der Krypta des Basler Münsters bei normaler Beleuchtung und im Streiflicht (Digital Humanities Lab, Universität Basel)

Der Kopf gehört zu einer um 1200 entstandenen Darstellung zweier Bischöfe, die sich zu beiden Seiten der Mittelapsis befindet. Bei gleichmässiger Beleuchtung kommen das Motiv des dargestellten Kopfs und die dafür verwendeten Farben deutlich zur Geltung (links). Bei Streiflicht zeigt sich jedoch, dass der als Malgrund auf der Wand aufgebrachte Putz, die als Vorzeichnung dienenden Ritzungen und sogar die verwendete Farbe ein spezifisches Oberflächenrelief mit optisch wirksamen Materialeigenschaften besitzen (rechts). Da sie typische Merkmale des Kunstwerks sind, lohnt es sich, sie fotografisch zu ermitteln, um die bildliche Dokumentation in einem 3D-Modell zu verbessern.

Eine vielversprechende Herangehensweise, um diese Oberflächeninformation zu erfassen, ist das **Reflectance Transformation Imaging (RTI)**. Es wurde in einer ersten Fassung in den 1990er Jahren von Tom Malzbender während seiner Tätigkeit an den HP Labs in Palo Alto entwickelt und 2001 publiziert. Das prinzipielle Konzept von RTI besteht darin, dass aus mehreren Fotografien ein mathematisches Reflexionsmodell gerechnet wird, welches nachträglich die Interaktion, also das Wählen einer Beleuchtungssituation erlaubt. Dafür wird von einem festen Kamerastandpunkt eine Serie deckungsgleicher Einzelaufnahmen angefertigt, bei der die Beleuchtung für jede Einzelaufnahme aus einer anderen, bekannten Richtung erfolgt. Die so aufgenommene Bildsequenz dient in einem zweiten Schritt als Datengrundlage für eine nachträgliche pixelbasierte Modellierung. Dafür werden zunächst die einzelnen Bilder einer solchen Aufnahmeserie deckungsgleich übereinandergelegt. In einem zweiten Schritt wird für jeden spezifischen Ort, welcher die Menge aller Bildpunkte aus den unterschiedlichen Beleuchtungsrichtungen darstellt, ein mathematisches Reflexionsmodell — im Normalfall eine Oberfläche zweiter Ordnung — gefittet, das heisst so parametrisiert, dass die Abweichung aller Datenpunkte zum Funktionsverlauf minimal wird [05]. Die so gefundenen Parameter der Funktion werden in einer entsprechenden Datei gespeichert. Die in dieser Form abgelegten Daten repräsentieren also nicht mehr eine Fotografie im eigentlichen Sinne, sondern ein Computermodell, das in einer geeigneten Umgebung, wie z. B. in einem Browser geladen werden kann, in der es mit geeigneten Komponenten wie WebGL gerendert und dargestellt wird.



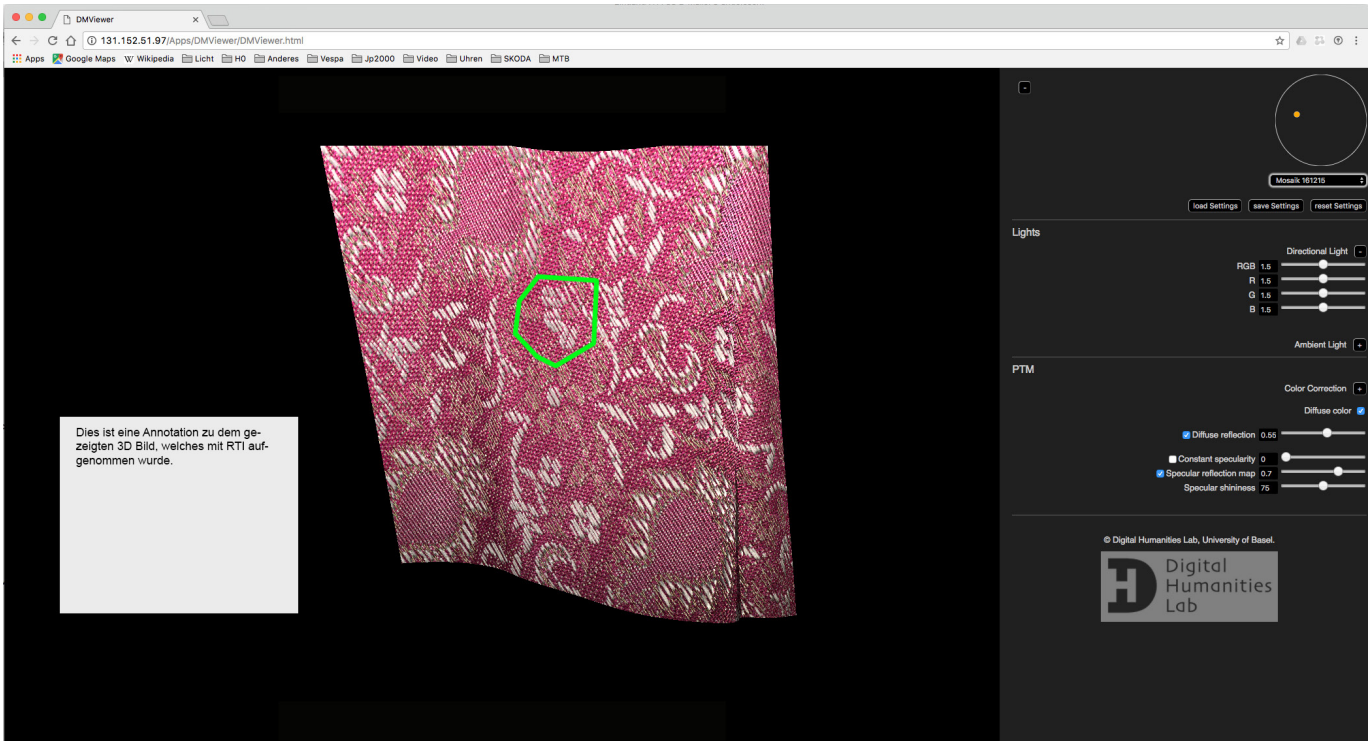
☐ 05
Das Funktionsprinzip von RTI: Fotografische Einzelaufnahmen werden übereinandergelegt und deckungsgleiche Pixelpositionen werden mit einem mathematischen Modell beschrieben. (Digital Humanities Lab, Universität Base

Es zeigt sich, dass genau diese Erweiterungen in der Messung und Darstellung von Kunstwerken viele Vorteile bringen. Im Speziellen hinsichtlich solcher Objekte, die sich durch eine differenzierte Oberflächenstruktur auszeichnen. Neben Münzen, Gemälden und archäologischen Funden, die sich in dieser Form sehr realistisch darstellen lassen, gehören dazu — wie bereits gesehen — mittelalterliche Wandmalereien, aber insbesondere auch Mosaiken aus dieser Epoche. Werden solche Kunstwerke als Ausstattung eines Gebäudes in einen räumlichen Kontext integriert, auf den sie reagieren, so lässt dies aussagekräftige Simulationen zu, die vom Fotorealismus deutlich profitieren. Mit aussagekräftig ist in diesem Zusammenhang die Reproduzierbarkeit einer Darstellung, sowie deren physikalische Korrektheit gemeint. So sollte eine RTI-Darstellung unter spezifischen Beleuchtungssituationen einer konventionellen Fotografie entsprechen und so der fotografische Prozess simuliert werden können. Dies betrifft vor allem die Wirkung der Bilder auf den Betrachter, die sich je nach Lage und in Abhängigkeit von Beleuchtung, Blickwinkel und Bewegung innerhalb des Raums verändert. Am Beispiel eines ravennatischen Mosaiks aus dem 6. Jahrhundert, das sich heute im Berliner Bode-Museum befindet, dokumentiert ein RTI-Modell die Oberfläche und das Reflexionsverhalten der einzelnen Tesserae 06. Im Gegensatz zu einer konventionellen Fotografie mit festgelegter, gleichmäßiger und nicht nachträglich veränderbarer Beleuchtung zeigt es, wie die einzelnen Tesserae das Licht je nach Einfallswinkel, reflektieren. Dabei wird im Vergleich mit einer frontal ausgeleuchteten Fotografie (links) ersichtlich, dass es sich nicht um eine homogene Oberfläche handelt. Vielmehr reflektieren die Steinchen das Licht je nach Lage und Beleuchtung unterschiedlich intensiv (rechts). Besonders gut zeigt sich dies an den Gold-Tesserae. Hier lässt sich mit Hilfe des RTI-Modells das viel gepriesene Funkeln eines Mosaiks wesentlich besser darstellen. Wird eine kalibrierte Hardware für die Aufnahme eines solchen Reflexionsmodells verwendet, so wird ein bestmögliches Mass an Reproduzierbarkeit sichergestellt, was die qualitative und quantitative Vergleichbarkeit von Aufnahmen sicherstellt. Eine solch kalibrierte Lösung wurde an der Universität Basel entwickelt und unter dem Namen Truvis Authentica kommerzialisiert.

☐ 06
Christus, Detail des Apsismosaiks aus San Michele in Africisco, Ravenna, heute Bode-Museum, Berlin, links unter frontaler Beleuchtung und rechts im Streiflicht der PTM-Viewer-Software (Digital Humanities Lab, Universität Basel)

Ein weiterer Vorteil des RTI-Verfahrens gegenüber herkömmlichen Farbfotografien besteht darin, dass neben den Reflexionseigenschaften auch ein Modell der lokalen Topographie der vermessenen Oberfläche berechnet wird. Dabei wird für jeden Bildpunkt die lokale Ausrichtung der Oberfläche im Raum bestimmt, also eine sogenannte **Normal-Map** der Oberfläche generiert, ohne dabei auf ein explizites 3D-Modell des Objektes zurückgreifen zu müssen. Normal-Mapping ermöglicht die Visualisierung von feinen Unebenheiten oder Beschädigungen wie z. B. Kratzern oder Dellen. Damit kann der reliefartige Charakter von realen Oberflächen besser zur Geltung gebracht werden, ohne die Komplexität des zur Visualisierung verwendeten 3D-Modells zu erhöhen. Während der Einsatz von Normal-Maps in verschiedenen Verfahren der Computergrafik Anwendung findet, muss die Map normalerweise in einem zusätzlichen Arbeitsschritt mittels eines 3D-Scanners oder synthetisch durch Modellierung von Hand erstellt und zusammen mit den restlichen Modelldaten gespeichert werden. Im RTI-Verfahren kann die Map jedoch direkt aus den bereits vorhandenen Daten berechnet werden. Dies ermöglicht eine wesentlich verbesserte Realitätstreue und Detailgenauigkeit der Darstellung ohne den Arbeitsaufwand oder Speicherbedarf zu erhöhen. So kann die lokale Ausrichtung der Oberfläche bei der nachträglichen Beleuchtung berücksichtigt werden, was einen Eindruck der Dreidimensionalität erzeugt, welcher mit flachen Texturen basierend auf einfachen Farbfotografien nicht erreichbar ist.

Durch die Kombination solch technologischer Möglichkeiten kann die Aussagekraft einer 3D-Bildaufnahme deutlich erhöht werden: 3D-Oberflächen lassen sich mit RTI-Aufnahmen und unterschiedlichen Beleuchtungs- und Betrachtungssituationen kombinieren. Im gleichen Mass nimmt die Notwendigkeit der vollumfänglichen Speicherung der technischen Metadaten zu, um dadurch die wichtige Reproduzierbarkeit der Aufnahmen sicherzustellen. 07



☐ 07
Eine Reflectance Transformation Imaging Aufnahme, die in einem Browser mit Hilfe von WebGL repräsentiert wird und welche die Animation erlaubt. Auf dem goldbestickten Stoffgewebe ist eine Markierung zu erkennen, sowie ein entsprechendes Kommentarfeld, links im Bildfenster. Auf der rechten Seite sind die Parameter der Betrachtungssituation dargestellt, die im Datenmodell mit abgespeichert werden. (Truvis AG & Digital Humanities Lab, Universität Basel)

S.6 Nachhaltigkeit im Kontext von virtuellen Forschungsumgebungen

Jeff Rothenberg brachte es auf den Punkt, als er 1999 schrieb:

»...digital information lasts forever — or five years, whichever comes first«. [10]

Prinzipiell lassen sich digitale Daten verlustlos kopieren, was sie **unendlich** haltbar macht. Wichtig ist hierbei lediglich, dass die Daten in regelmässigen Abständen auf einen neuen Träger kopiert werden, da alle Trägermaterialien einer natürlichen Alterung unterliegen. Ein Beispiel hierfür sind Textdokumente, deren Schrift ebenfalls digitale Daten — in der deutschen Sprache mit einem Zeichensatz von 26 Grundzeichen — repräsentieren und die in Zyklen umkopiert werden müssen. Die Bibel ist ein solches Dokument: Sie wurde immer wieder abgeschrieben, also umkopiert. Teils geschah dies sogar mittels Schreibern, welche die Bedeutung des Codes der abgeschrieben wurde, nicht **lesen** und somit auch nicht verstehen konnten. So wurde sichergestellt, dass der ursprüngliche Text unverändert überliefert werden konnte. Auch im Digitalen wird dieses erfolgreiche Konzept praktiziert: Digitaler Code wird in regelmäßigen Abständen auf einen neuen Träger kopiert, um so der technologischen Obsoleszenz entgegen zu wirken. Allerdings ist es in der digitalen Welt meist so, dass nicht der Datenträger selbst das Problem darstellt, sondern sich die Technologie, mit welcher die Daten vom Träger gelesen werden, relativ schnell verändert, sodass ein Migrationsprozess ausgelöst werden muss. Das weit verbreitete OAIS-Modell berücksichtigt diesen Wandel der verwendeten Technologie und empfiehlt deshalb ein kontinuierliches **Technologiemonitoring**.

Diese oben genannten Aspekte adressieren die klassischen Probleme der Nachhaltigkeit im Digitalen; d. h. Hardwareobsoleszenz und Fragen zu Datenformaten. Wenn aber digitale 3D-Objekte in einer virtuellen Forschungsumgebung dargestellt und mit ihnen gearbeitet werden soll, so sind plötzlich ganz andere Faktoren ebenfalls wichtig:

Es muss möglich sein, dass die digitalen Objekte referenziert und zitiert [11] werden können. Das beinhaltet auch die assoziierten Metadaten und die Parameter einer spezifischen Betrachtungssituation. Diese Zitierfähigkeit setzt voraus, dass ein eindeutiger Link, typisch ein Uniform Resource Identifier (URI) zum spezifischen Objekt vorhanden ist und dieser auch über mehrere Migrationsschritte unverändert bestehen bleibt. In diesem Zusammenhang ist **The London Charter for the Computer-Based Visualisation of Cultural Heritage** zu nennen [12].

■ **10**
Ensuring the Longevity of Digital Information, Jeff Rothenberg, https://www.clir.org/pubs/archives/ensuring.pdf/.

■ **11**
Stephan Hoppe, Die Fußnoten des Modells. CAD-Modelle als interaktive Wissensräume am Beispiel des Altenberger-Dom-Projektes, in: Frings, Marcus (Hg.), Der Modelle Tugend. CAD und die neuen Räume der Kunstgeschichte, Weimar 2001, S. 87–10, http://archiv.ub.uni-heidelberg.de/artdok/990/.

■ **12**
The London Charter Website, http://www.londoncharter.org/.

Es muss bis zu einem weitreichenden Mass sichergestellt werden, dass die **Historie** eines bearbeiteten Objekts aufgezeichnet wird. Dieses **logging** unterstützt die Reproduzierbarkeit von Forschungsarbeiten. So wird sichergestellt, dass eine Referenz auf eine andere Ressource effektiv gültig bleibt und eine allfällige Änderung des Inhaltes auch nachvollziehbar wird. Ist dies nicht gewährleistet, wäre es möglich, dass z. B. ein Objekt im 3D Raum referenziert wird, dessen Form sich nach der Referenzierung verändert hat, was zu Falschaussagen führen kann.

Die oben genannten Aspekte können nur realisiert werden, wenn eine kontinuierliche Pflege der Soft- und Hardware garantiert wird und bei allen Weiterentwicklungen die Prämisse der Verwendung von offengelegten, möglichst standardisierten Technologien garantiert ist. Diese stellt weniger eine technologische als vielmehr eine organisatorische Herausforderung dar, welche durch die Zentralisierung solcher Infrastrukturen eher realisiert werden kann.

S.7 Fazit

Die Visualisierung von Objekten in einem 3D-Raum kann für die Forschung in Kombination mit virtuellen Forschungsumgebungen eine deutliche Unterstützung der meisten wissenschaftlichen Arbeiten sein, bei denen es um Objekte mit einer räumlichen Ausdehnung geht.

Nebst der makroskopischen Dreidimensionalität sind viele aus der Fotografie bekannte Faktoren wie die geometrische Masshaltigkeit und die Farbtreue von grosser Wichtigkeit. Es wurde gezeigt, dass die vielschichtige Medialität einer dreidimensionalen Abbildung in einer modernen virtuellen Forschungsumgebung mit der notwendigen Qualität zusammengeführt werden kann.

Fabrizio Apollonio

T. Conceptual modelling and cognitive process in 3D virtual reconstruction

→ 3D virtual reconstruction, 3D semantic segmentation, conceptual modeling, knowledge representation

The progresses in ICT brought, within the virtual reconstruction of cultural heritage activity, new theoretical problems related to the interpretation of the meaning (Metadata) and of construction methods (provenance and Paradata) related to information / sources in form of digital 3D data sets. The base for a scientific approach concerns the conceptual modelling and cognitive process in 3D virtual reconstruction. The paper is focused on its theoretical definition as well as on proposing a methodological approach to data modeling behind the 3D reconstructive process. A proper conceptual modeling of the process of virtual reconstruction becomes of fundamental importance in order to take into account all the aspects that come into play: subjectivity, ontic and epistemic vagueness.

The workflow and the methodology are related to the whole of the acquired and used to produce not only the 3D model, but above all the semantic characterization and enrichment of the elements that compose the model. They are based on these operational pipeline steps:

1. Subjective and temporal characterization
2. 3D virtual modeling
3. Semantic enrichment of 3D reconstructed model

The methodological approach proposed, therefore, allows many types of analysis and could introduce new and meaningful innovations to the interpretation methods and techniques concerning architecture. It defines the conceptual model of data that is the basis of the reconstruction process, as well as it provides the appropriate degree of transparency of the adopted process, allowing all researchers to re-think that process in order to qualify the outcome obtained and to propose, based on new knowledge or interpretations, new reconstructive hypotheses.

T.1 Introduction

Within the broad field concerning the hypothetical 3D virtual reconstruction process, unrealized historic artifacts and architectural projects are often considered as peculiar case studies, as well as city plans. They represent projects designed and never built and they introduce specificities, besides the typical issues common to the general digital reconstruction, documented by technical drawings or text only. 01

Over the last decades the progresses in information technology brought, within the virtual reconstruction of cultural heritage activity, new theoretical problems related to the interpretation of the meaning (Metadata) and of construction methods (provenance and Paradata) related to information / sources in form of digital 3D data sets. This means analysis and subjective interpretation of evidences, documentation and architectural / archaeological / artistic artefacts, 01 definition of a proper and transdisciplinary methodology, 02 and the possibility to ensure transparency, comprehensibility and long-term availability of information in virtual reconstruction. 03

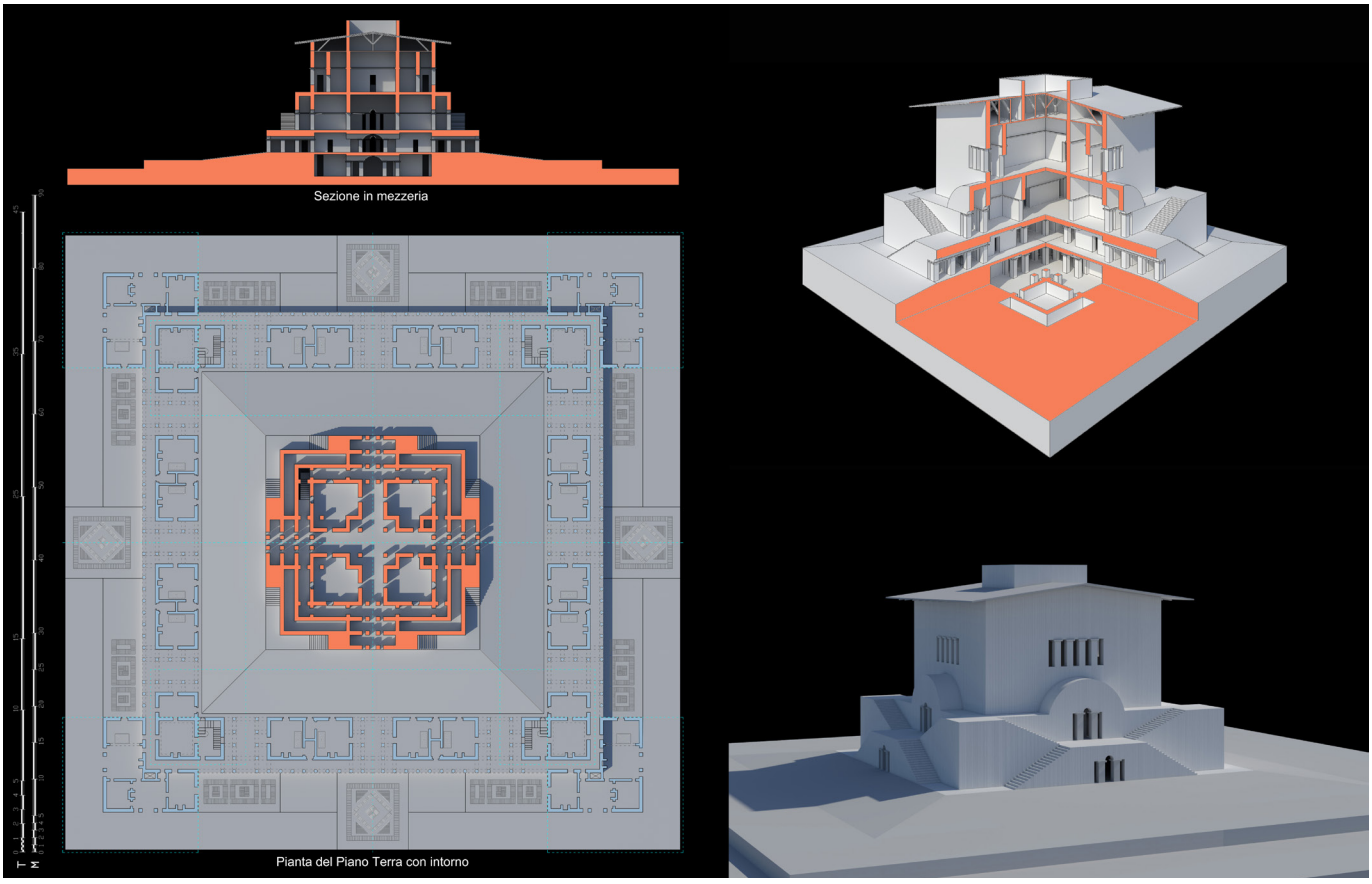
The base for a scientific reconstruction concerns the conceptual modelling and cognitive process in 3D virtual reconstruction. The paper is focused on definition of theoretical approach to virtual reconstruction activity for no longer existing or partially documented cultural heritage artefact, as well as proposing a methodological approach to data modeling behind the 3D reconstructive process. 04

■ 01
Fabrizio I. Apollonio, Classification Schemes for Visualization of Uncertainty in Digital Hypothetical Reconstruction, in: Sander Münster et al., 3D Research Challenges in Cultural Heritage II: How to Manage Data and Knowledge Related to Interpretative Digital 3D Reconstructions of Cultural Heritage, Cham 2016, pp. 173–197; Nicolò Dell'Unto et al., Digital reconstruction and visualization in archaeology: Case-study drawn from the work of the Swedish Pompeii Project, in: 2013 Digital Heritage International Congress, Marseille 2013, pp. 621–628.

■ 02
Fabrizio I. Apollonio, Elisabetta C. Giovannini, A paradata documentation methodology for the uncertainty visualization in digital reconstruction of CH artifacts, in: SCIRES-IT, 5 (1) 2015, pp. 1–24.

■ 03
Piotr Kuroczyński et al., Virtual Museum of destroyed Cultural Heritage, in: Proceedings of the 2nd International Conference on Virtual Archeology, The State Hermitage, St. Petersburg Russia 2015, pp. 54–61; Sorin Hermon et al., The London Charter and its Applicability, in: Future Technologies to Empower Heritage Professionals, VAST 2007, Geneva 2007, pp. 11–14.

■ 04
Fabrizio I. Apollonio et al., 3D Modeling and Data Enrichment, in: XXIV Int. CIPA Symp. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS XL-5/W2, 2013(a), pp. 43–48, 2016.



☐ 01
C.-N. Ledoux: Maison de campagne — Planche 21 — 3D virtual reconstruction based on text and drawings (Fabrizio Apollonio)

The sources-based reconstructive process is a reverse process 05 that begins from the documentary sources, it defines a semantic structure for the case study, then interprets its shapes (dimensional, geometric and morphological consistency), and finally produces a 3D digital model, semantically enriched. This sources-based reconstruction process is developed according to three steps:

1. the analysis and subjective interpretation of available documentary sources with different level of uncertainty and different level of the geometrical accuracy 06,
2. the production of 3D model — semantically structured — with different Level of Definition and characterized by different digital consistency, fidelity and quality concerning geometry, surface, constructive and temporal features,
3. use of documentary sources and knowledge concerning this process in order to semantically enrich the 3D digital model produced.

The reconstruction process is essentially driven by decisions based on several input datasets that are basically interpreted and integrated. If not correctly addressed, this subjectivity, compromises the validity of a whole virtual reconstruction or, eventually, makes it less understandable.

In response to this problem **The London Charter for the computer based visualization of Cultural Heritage** and **Valencia Charter** define the principles for the use, in research and communication of cultural heritage, of computer-based visualisation in relation to intellectual integrity, reliability, documentation, sustainability and access of heritage artefacts (London Charter, Preamble). According to the Principle 4 of the London Charter 07 a proper methodology has to define a correct approach, on one side to Paradata Documentation creating a conceptual scheme able to clarify the relationship between research sources, the implicit knowledge, the explicit reasoning, and the visualisation-based outcomes, and on the other side to Semantic structure of 3D digital model. As it is happening to a large extent in the field of humanities and social science, conceptual modelling is an absolutely useful technique for shaping, exploring, documenting, understanding and communicating artefacts of many kinds.

A proper conceptual modeling of the process of virtual reconstruction has indeed to take into account the subjectivity of the operator throughout the production of the model, to consider both ontic vagueness (i. e. imprecision or inaccuracy) and epistemic vagueness (i. e. reliability or uncertainty), to incorporate intricate and fuzzy temporality issues, to allow the possibility to explore, document and let understandable any data available, incorporating vagueness and subjectivity as much as necessary, and in creating conceptual models for documentation and communication purposes.

From a methodological point of view, therefore, the reconstruction process adopted becomes of fundamental importance. The workflow and the methodology are related to the whole of the data that is acquired and subsequently used to produce not only the 3D model, but above all the semantic characterization and enrichment of the elements that compose the model.

■ **05**
Mieke Pfarr-Harfst, Typical Workflows, Documentation Approaches and Principles of 3D Digital Reconstruction of Cultural Heritage, in: Sander Münster, et al., 3D Research Challenges in Cultural Heritage II. LNCS 10025, Cham 2016, pp. 32–46.

■ **06**
Apollonio 2016; Kuroczyński et al., 2015.

■ **07**
London Charter, Principle 4, http://www.londoncharter.org/principles/documentation.html.

This process can be developed according to three steps operational pipeline:

Subjective and temporal characterization

→ Collection of documentary sources-based data concerning the case study.

→ Analysis of documentary sources and extrapolation of information on the consistency of the artifact (geometrical shape, surface appearance, physical characteristics), through a process of analysis / interpretation inductive / deductive / analogical decision assumed to extract the data based on the evidence, the relationship between information, deduction or conjecture.

3D virtual modeling

→ Definition of a semantic structure of the artifact to be modelled.

→ Reconstructive modeling 3D

Semantic enrichment of 3D reconstructed model

→ Linkage between data available and used in the process of reconstruction and the level of vagueness that characterizes each constitutive element.

→ Validation of the reconstructive hypothesis obtained through the data enrichment of each constitutive element and its displaying.

T.2 Subjective and temporal characterization

The first part deals with the collection and elaboration of available information concerning the case study. Analysing, evaluating, understanding and interpreting the history of an historic (architectural, archaeological, artistic) artefact requires a cross-reference-examination of several kind of evidences, spanning from specific data information concerning the artefact to generic pieces of knowledge concerning its historical-cultural context, theoretical-stylistic references, etc. As we know, any single artefact may be documented by numerous heterogeneous data sources that may vary in type / dimension (1D / textual, 2D / graphical, 3D / solid, etc.), relevance / vagueness or spatial granularity (concerning the artefact and its environment or isolated pieces of it), and in different scales / accuracy (from a single details to the whole artefact). Besides, a single piece of documentation — i. e. a sketch or a manuscript — may refer, at the same time, to various artefacts as well as various level of relevance or granularities. Throughout a hypothetical reconstruction process of the analysis and interpretation of such kind of documentation should produce a **probable reconstructed whole** of some point in the past, based on retrievable evidence and argumentation. 08 The subjective analysis and interpretation of data sources available helps to put in relation artefact elements with primary and secondary evidence, trying to develop the most appropriate possible complex chain of reasoning, able to manage the problems concerned to the heterogeneous nature of documentation: i. e. ambiguity of the textual descriptions, accuracy and exactitude of artistic representations, subjective ability to read / understand / interpret documentation, due to the experience, knowledge and intuition of the analysts.

In parallel the result of this process changes over time, due to the progress of knowledge, the increase of experience, and the evolution of the tools able to intercept the available data.

Among these tools, Information System document and store the different steps of the reasoning, decision and procedures chain adopted throughout the virtual reconstruction process, linking them in the end to the reconstruction output.

Thus, a documentation model in which the clues for the reconstructed elements, and the elaborated arguments around them, became explicit, available and queryable, as well as they can be updated, extended and reused by other researchers in future work.

Within this field Bruseker. Guillem and Carboni, 09 considering the reconstruction of an archaeological site as a case study, propose a high level, generic process model — based on CIDOC-CRM ontology — aimed at documenting the reasoning behind a virtual reconstruction process linked both to its digital outcome and to elements part of an information system storing data regarding the site or monument under reconstruction. Gonzalez-Perez, Martín-Rodilla and Blanco-Rotea 10 — based on ConML provided with the necessary extensions — propose a simple, affordable solution, through a collection of techniques, to capture time and subjectivity in conceptual models of the archaeological record. Even before, Dudek and Blaise 11 worked on the topic concerning analysis and understand the evolution of historic artefacts,

■ 08
Daniel Pletinckx, An EPOCH Common Infrastructure Tool for Interpretation Management, in: EPOCH report, 3.3, 2008.

■ 09
George Bruseker et al., Semantically documenting virtual reconstruction: building a path to knowledge provenance, in: 25th International CIPA Symposium 2015, Taipei, ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS, II-5/W3, 2015, pp. 33–40.

■ 10
Cesar Gonzalez-Perez et al., Expressing Temporal and Subjective Information about Archaeological Entities, in: 41st Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA 2013), 2013, pp. 326–335.

■ 11
Iwona Dudek, Jean-Yves Blaise, Visualizing alternative scenarios of evolution in heritage architecture, in: Stefanie N. Lindstaedt, Michael Granitzer (Eds.), i-KNOW ,11–11th International Conference on Knowledge Management and Knowledge Technologie, ACM International Conference Proceeding Series ACM, New York, 2011, Article No. 45.

which requires the cross-examination of indications ranging from specific pieces of data, to generic pieces of knowledge, proposing that the same artefact could act as a media to integrate heterogeneous indications, enabling information visualisation and retrieval through 2D / 3D dynamic graphics.

Such experiences highlight the importance of this issue, providing at the same time an important disciplinary / scientific contribution. Without going into considerations of the specific techniques adopted (CIDOC-CRM or ConML), the solution proposed by Bruseker et al. [12] can be traced back to a generic process model but, despite being an high level approach, it could be dissuasive for operators [13] (modelers or archeologists) involved in the virtual reconstruction process, since they usually have limited skills due to their different former education to digital tools. Given the valuable contribution of Blaise and Dudeck [14] to he knowledge extraction, elicitation and representation, as well as the operational practices suggested by Gonzalez-Perez et al., [15] but above all on the epistemological difficulty in translating a typical subjective practice into an operational objectivity, we argues that a semantic characterization (see next section) on the characteristics that define / qualify the outcome of subjective and temporal data interpretation process can be more effective and better communicative.

■ 12
Bruseker et al. 2015.

■ 13
See Gonzalez-Perez et al. 2013.

■ 14
Jean-Yves Blaise, Iwona Dudek, What comes before a digital output? Eliciting and documenting Cultural Heritage research processes, in: International Journal of Culture and History, 3 (1) 2017, pp. 86–97.

■ 15
See Gonzalez-Perez et al. 2013.

T.3 3D semantic segmentation

Considering the peculiarities of any CH artefact, an acquiring knowledge process that is able to note and make understandable and reusable the analysis of preliminary data and interpretation criteria used to validate the entire process can be developed through the segmentation of digital models, 16 The segmentation, in fact, is the basic principle for a semantic representation of an artifact and its information-technological storage in an Information / Cognitive System. According to the largely shared principles concerning the Information / Cognitive System peculiarities, 17 a proper cognitive modeling helps discerning different segments of information (including raw data, as well as documentation strategies, documentation results and process of documentation) and re-assemble them together in a structured semantic way to let new information derived or linked to 3D model. 18 As just stated in Apollonio et al. 19, De Luca, Busarayat, Stefani, Véron, Florenzano 20, Blaise, Dudeck 21 the semantic structuring visually assess the related level of knowledge, with its flaws and lacunae, and it carry out comparative operations on the set of data and information held, allowing the compatibility of the digital model with alternative modes of representation. As we can see infra M. Gaiani **The history of Palladian digital 3D models from the spatial grammar to the semantic construction**, 22 the semantic structure applied to 3D digital modeling can be usefully used to re-construct the hypothetical model, to identify the characters, limitations and in-consistencies of those sources, to display the reconstructive conjectures adopted and not documented in the same documentation, and the reconstructive solutions more likely, giving back self-representation to the same instrument.

The method used to organize and structure 3D models is Object-Oriented (see next section) and based on well-established agreement about artifact analysis in which buildings, archaeological finds, artistic artifacts are described through a series of structured elements according to their related disciplinary vocabulary. 23 02 03

■ **16**
Patricia Lulof et al., The art of reconstruction documenting the process of 3D modeling: some preliminary results, in: Proceedings of International Conference on Digital Heritage, Marseille 2013, pp. 333–336.

■ **17**
Iwona Dudek, Jean-Yves Blaise, Using Abstraction Levels in the Visual Exploitation of a Knowledge Acquisition Process, in: i-KNOW '05 Proceedings of the 5th International Conference on Knowledge Management and Knowledge Technologies, Graz 2005, pp. 543–552; Fabrizio I. Apollonio et al., A semantic and parametric method for 3D models used in 3D cognitive-information system, in: Future cities, 28th eCAADe 2010 Conference, Zurich 2010, pp. 717–726.

■ **18**
Fabrizio I. Apollonio et al., 3D reality-based artefact models for the management of archaeological sites using 3D Gis: a framework starting from the case study of the Pompeii Archaeological area, in: Journal of Archaeological Science, vol. 39, 2012, pp. 1271–1287; Giorgio Agugiaro et al., Queryarch3D: Querying and Visualising 3DModels of a Maya Archaeological Site in a Web-based Interface, in: Geoinformatics FCE CTU Journal, 6, 2011, pp. 10–17.

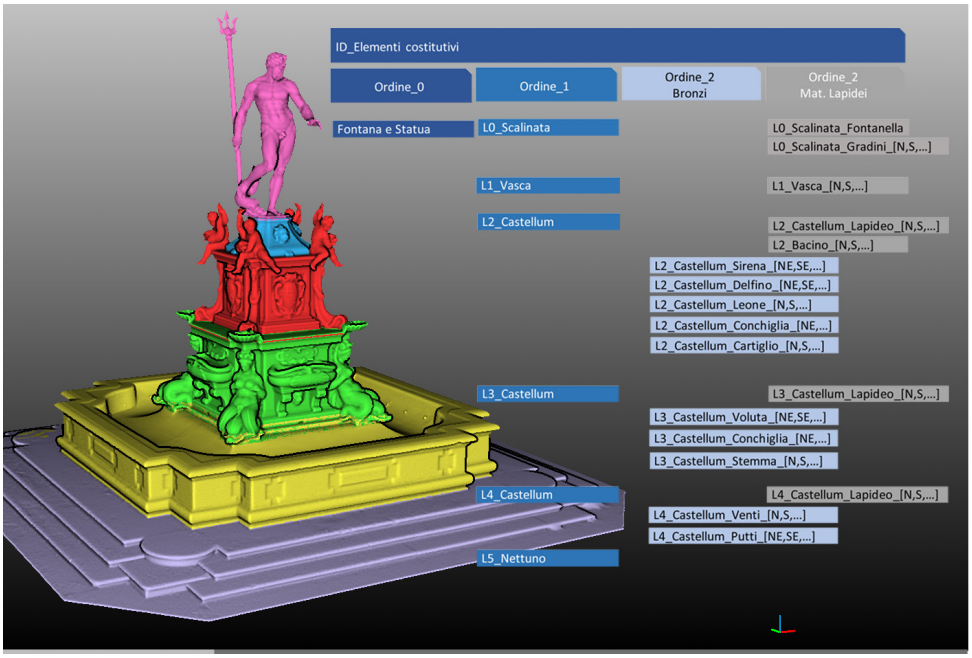
■ **19**
Fabrizio I. Apollonio et al. 2013.

■ **20**
Livio De Luca et al., A semantic-based platform for the digital analysis of the architectural heritage, in: Computers & Graphics, 35 (2) 2011, pp. 227–241.

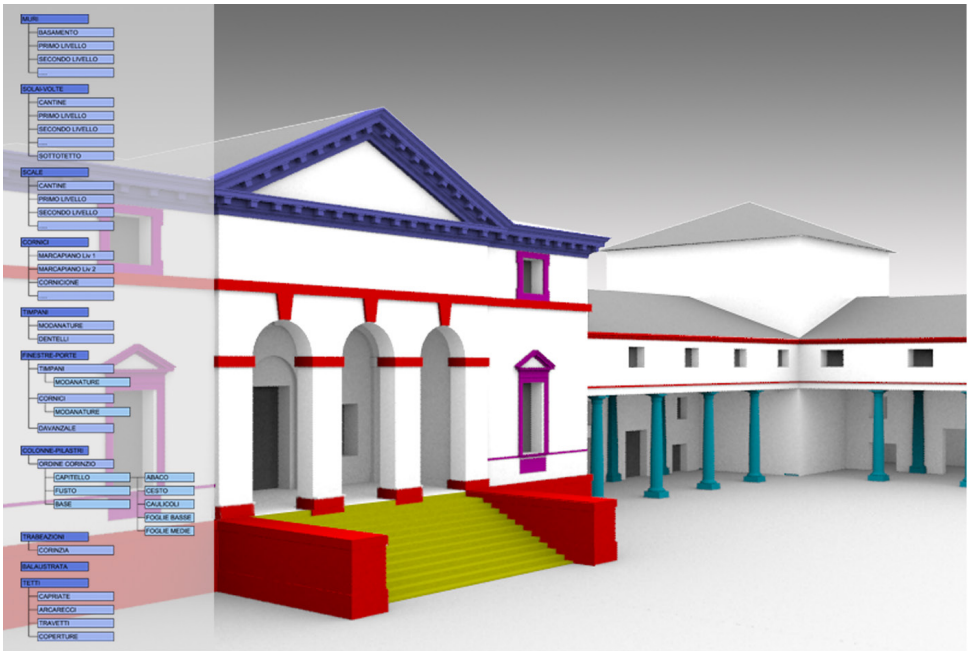
■ **21**
Jean-Yves Blaise, Iwona Dudek, Visual tools decipher historic artefacts documentation, in: Journal of Universal Computer Science, 7th International Conference on Knowledge Management, Salamanca 2007, pp. 456–463.

■ 22
See Marco Gaiani The history of Palladian digital 3D models from the spatial grammar to the semantic construction, infra.

■ 23
George Stiny, Introduction to shape and shape grammars, in: Environment and Planning B: Planning and Design, 7, 1980, pp. 343–351; Livio De Luca et al., A generic formalism for the semantic modeling and representation of architectural elements, in: Visual Computer, 23 (3) 2007, pp. 181–205; Livio De Luca et al., An Iconography-Based Modeling Approach for the Spatio-Temporal Analysis of Architectural Heritage, in: Shape Modeling International Conference (SMI ,10), Washington 2010, pp. 78–89.



☐ 02
A typical semantic segmentation of CH artifacts: Monumental fountain: Fontana del Nettuno, Bologna (u.). (Fabrizio Apollonio



☐ 03
A typical semantic segmentation of CH artifacts: Architectural building: A. Palladio, villa Saraceno (b.). (Fabrizio Apollonio)

This structure — expandable if necessary over several hierarchical levels — allows to manage 3D models, in the subsequent semantic enrichment phase too, in a consistent manner and according with a hierarchically related subsets system.

The criteria for its production need to proceed on three levels:

1. identification of individual artifact parts and thus their linkage among themselves or with further information;
2. definition of mutual and hierarchical relationships among different constitutive elements;
3. attribute management, concerning geometrical (shape, size, spatial position, topological relationship), constructive / surface (physical form, stratification of building / manufacturing systems) and temporal (evolution / transformation over life cycle) features, and related sources of information.

The conceptual modelling starts, therefore, with the abstraction process aimed at identifying the artifact as it is analyzed and understood and the classification of the elements / objects it is composed of and allowing an intuitive orientation within the structure.

The granularity of the segmentation, depends on the level of detail of the available information and the goals of the virtual reconstruction process. 24 The finer the segmentation is the higher the number of identified segments and, clearly, the authoring of the representation becomes more complex. In return, a very fine segmentation allows detailed assignment of information about the building too.

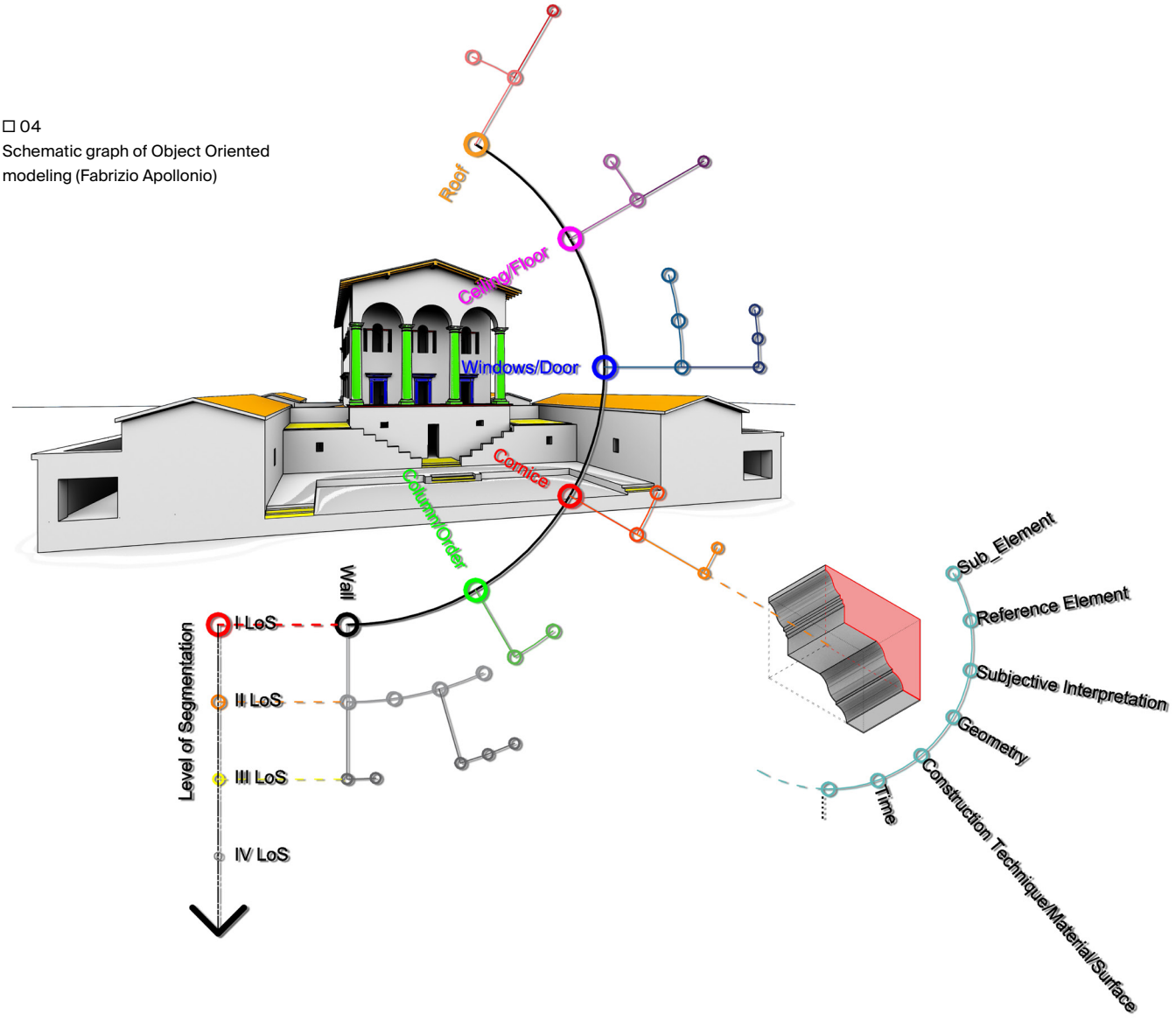
■ **24**
Kuroczyński et al. 2015.

T.4 Object-Oriented Approach

Similarly to basic assumption of BIM (Object-Oriented approach), any artifact is composed of elementary parts, which allows a semantic 3D representation of an artifact from different point of view, following these characteristics: 04

- → 3D semantic models ensure that individual elementary parts are identifiable and thus can later serve as an anchor for information.
- → The graphical, radiometric, as well as the constructive representation is created by composing the different information available and thus makes it easier to represent the artifact appropriately.

☐ 04
Schematic graph of Object Oriented modeling (Fabrizio Apollonio)



The Object-Oriented (OO) modelling approach is, therefore, adopted in order to define — according to UML-classes, their attributes, and relations (associations) among the classes. The process of classification involves systematic assigning similar objects to the classes. As classes are identified, meaningful names (see encoding methodology in Apollonio 25 and Apollonio, Govannini 26) to them are assigned by the user. Another step is the identification of the way objects and classes are mutually connected through links for setting particular hierarchies, relationships and assigning different associations.

Adopting the Object-Oriented modelling approach there is no need to divide / segment the artifact into exterior and interior sub-component and to segment and re-organize the artifact following its functional organization.

Segmenting artifact according to its physical organization (Object-Oriented) allow, in fact, jointly to the topological attributes and association which characterized each single element, to define / get the information concerning the function of a hollow space (i. e. in a building) bordered by floor, walls, ceilings, door, etc.

Any articfact, in fact, exists through the solid features which is composed of, and on a secondary level, by the interclused space as the hollow ones, which allow some function. The former component will be modelled by a mathematical / geometrical construction of physical characteristics that are defined by morphologic rules. The latter derives from the topological relationships among the former (physical component), and has explicit limits created by them: the interclused spaces are identifiable as different hollow volumes that one can interpret following a cognitive process, starting from the analysis of physical solid geometries.

■ **25**
Apollonio 2016.

■ **26**
Apollonio, Giovannini 2015.

T.5 Semantic enrichment

While geometric patterns related to cultural heritage are the primary information structures to be archived in 3D repositories aimed to be indexed, the purpose of qualification and authentication of products of scientific research requires that these models have to be implemented with the corresponding textual Metadata (cataloging, comment and bibliographic notes) and Paradata (information about human processes of understanding and interpretation of data objects) which permit the transparency of information to users in a manner similar to what occurs with notes, comments and references in the traditional publications.

This level defines the set of information that semantically characterizes and enriches the model obtained during the virtual reconstruction process. It is, in turn, the core of information that can provide / guarantee the full transparency of the adopted process and the characteristics that qualify the product obtained.

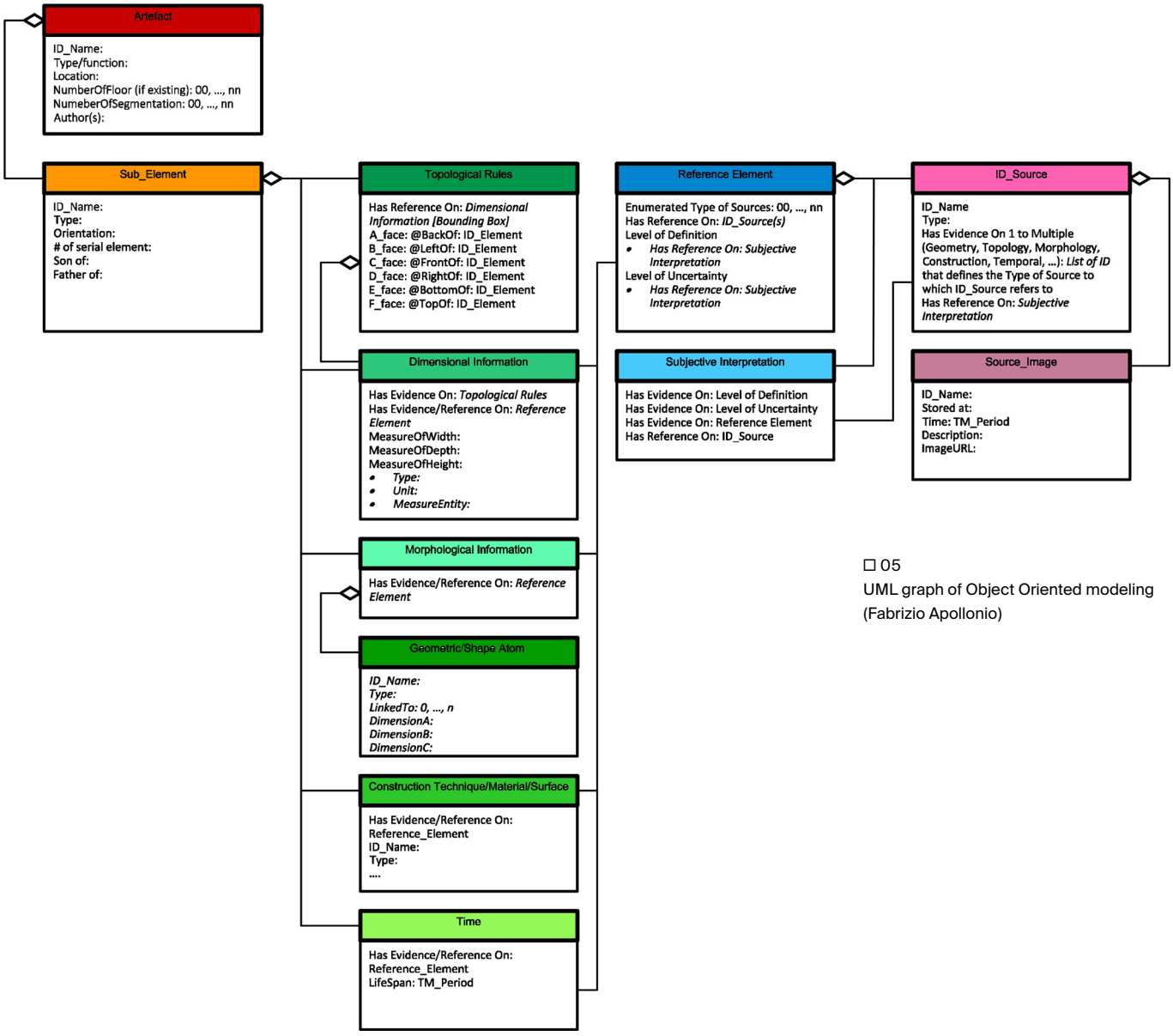
Semantic enrichment is realized at the granularity level of the basic element defined in the semantic segmentation 05 06, and consists of a set of **clusters** of suitable data models that define the characteristics that qualify / define the product model as fully as possible.

These **clusters** are:

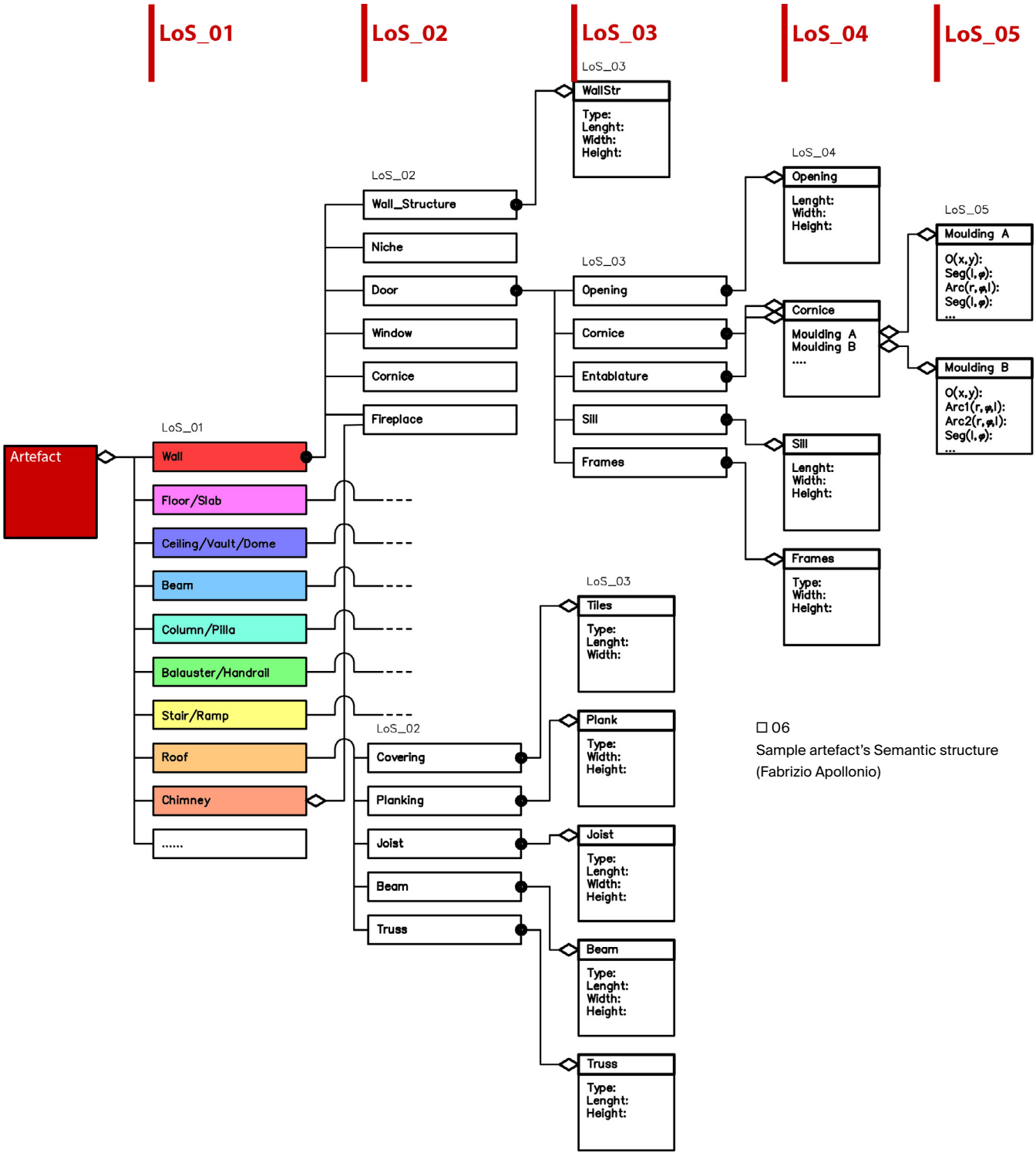
→ Base element identifier
→ Geometric characteristics
→ Topological characteristics
→ Construction / Surface / Surface Features
→ Time identifier
→ Interpretative characteristics of data sources (Subjective Interpretation)

Each **cluster** in turn is structured in identified, descriptive, associative elements that define its components and cross-relationships between elements of the same **cluster** or belonging to other **clusters**.

Concerning the **Subjective Interpretation** it represents an identification workflow for inductive / deductive / analogical / conjectural decision assumed to extract the data based on analysis and interpretation of the evidence, the relationship between information available, having **Evidence** on **Level of Definition**, on **Level of Uncertainty**, on **Reference Element**, and **Reference** on **ID_Source**.



☐ 05
UML graph of Object Oriented modeling
(Fabrizio Apollonio)



☐ 06
Sample artefact's Semantic structure
(Fabrizio Apollonio)

T.6 The cognitive process for representing the semantic structure of information

Systematizing information concerning architectural, structural, geometric, and stylistic items as well as building technologies with related level of accuracy and uncertainty needs to take into account heterogeneous information, able to considering the evolution of our knowledge, producing 2D / 3D dynamic graphics, and adapting our practices to the specific manners of the AH field.

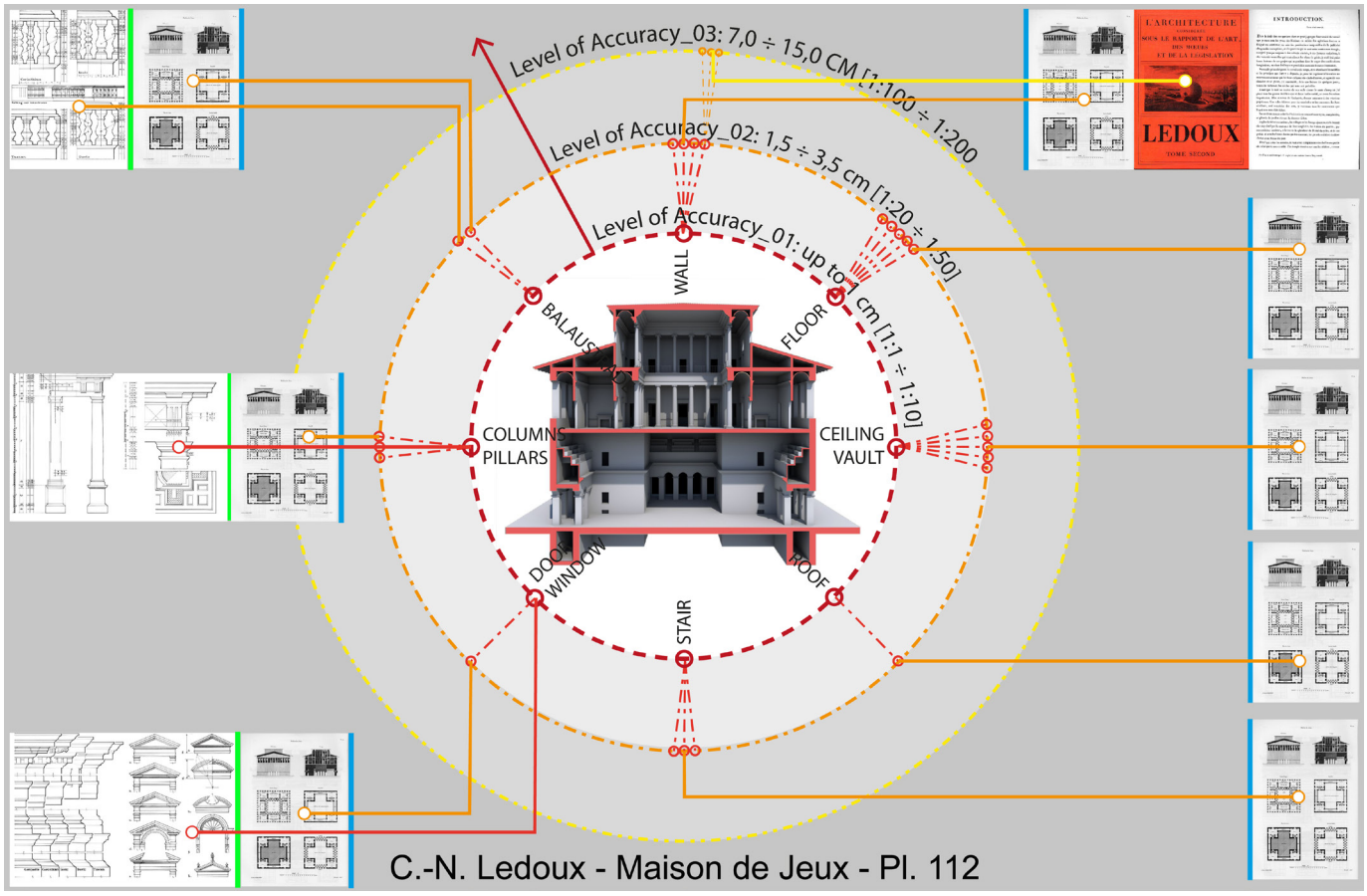
Studying, reconstructing and displaying a hypothetical state of an artifact (or ensemble of artifacts) requires introduction of temporal and documentary additional dimensions. 3D model representation becomes a metaphor of cognitive system related to architectural corpus able to show us different pieces of documentary sources related to each architectural elements. 27 The result is a cognitive graph, 28 as visual metaphor of case study, which aims to restore the hierarchical structure that drives the geometric definition of the 3D model and gives access to documents about the artifact studied.

Due to the relationship between each document in a data set and its corresponding element of the artifact (building as a whole, parts, details, etc.) information structure could be visualized and retrieved inside a 3D model / interface that combines the metaphoric figure of cognitive system. Through this structure, exploiting the semantic graphic codes, the representation is able to:

- → display different levels of accuracy (relationship between architectural detail and accuracy of data sources)
- → display different level of uncertainty (corresponding to each level of interpretation / reliability of exploited data sources)
- → underline inconsistency in the documentation or its analysis;
- → show levels of incompleteness of the investigation;
- → provide an updated visualization of our knowledge concerning the case study.

■ **27**
Dudek, Blaise 2005; Blaise, Dudek 2007; De Luca et al., Véron 2010.

■ **28**
Apollonio, Gaiani, Sun 2013(a).

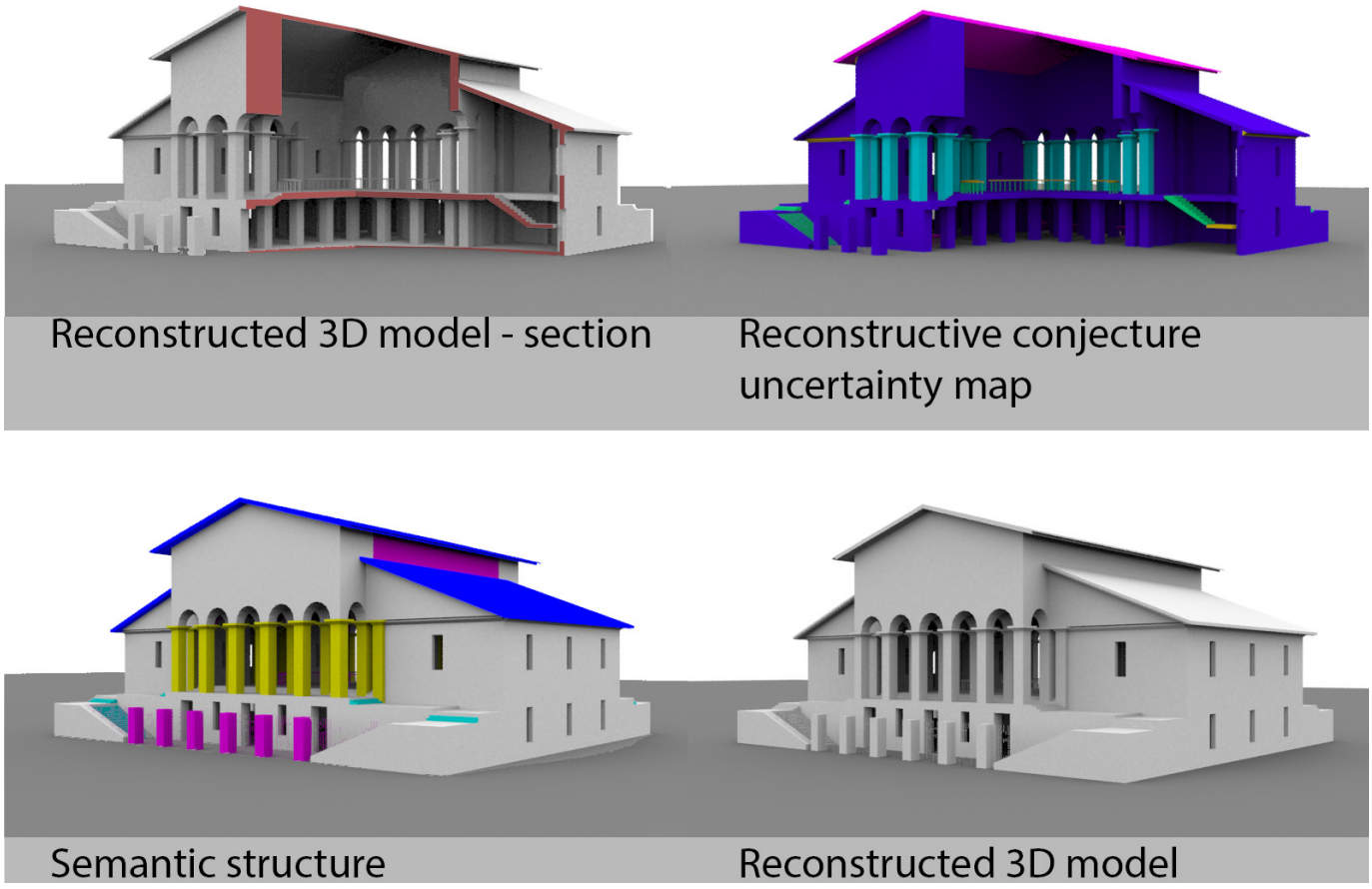


☐ 07
Cognitive graph concerning 3D virtual reconstruction of C.-N. Ledoux, Maison de Jeux – Pl. 112 (Fabrizio Apollonio)

A browsable cognitive graph 07 allow to search, retrieve and get (a) the comparison between data sources and related 3D models, (b) the analysis of the geometric characteristics of the model, through the use of patterns and diagrams that facilitate the reading of correspondence and / or anomalies identified during the analysis of the drawing, or the criteria of ratio used to design its parts, (c) a photorealistic rendering of reconstructed project within its hypothetical / original context, as well as matching any hypotheses alternative to the shaping of some of its parts, (d) the uncertainty display using a density slicing color code, that divides the rendering objects into a few color bands, corresponding to each level of uncertainty. 29 08

The graph is divided into several concentric circles. Each circle corresponds to a different hierarchical level of semantic structure. Each hierarchical level of detail corresponds to a different level of detail, progressively increasing. To an increasing level of detail it corresponds with a similar level of accuracy. Each element making up the 3D model is connected to the corresponding source from which we obtained, by deduction, induction or conjecture, useful information to the definition of its geometric-formal-material characteristics.

■ 29
Fabrizio I. Apollonio et al., Characterization of Uncertainty and Approximation in Digital Reconstruction of CH Artifacts, in: Le vie dei Mercanti. XI Forum Internazionale di Studi, Napoli 2013(b), pp. 860–869); Apollonio 2016.



☐ 08
Monument aux recreation Pl. 87: reconstructed 3D model-section (u. l.); 3D modeling reconstructive conjecture uncertainty map (u. r.); semantic structure (b. l.); reconstructed 3D model (b. r.) (Fabrizio Apollonio)

T.7 Conclusion

The methodological approach developed and applied in many case studies of virtual reconstruction allows many types of analysis and could introduce new and meaningful innovations to the interpretation methods and techniques concerning architecture.

In this paper a methodological approach has been described to define the conceptual model of data that is the basis of the reconstruction process. The objective to be achieved is the building of an adequate knowledge system that will provide the appropriate degree of transparency of the adopted process and provide all researchers with the opportunity, at any time, to rethink that process in order to qualify the outcome obtained and to propose, based on new knowledge or interpretations, new reconstructive hypotheses. The cognitive graph makes the system of knowledge accessible, since the reconstructive hypothesis are based on it, and it produces more interpretative visualizations than philological or perceptually correct. The cognitive graph makes the system of knowledge accessible, since the reconstructive hypothesis are based on it, and it produces more interpretative visualizations than philological or perceptually correct.

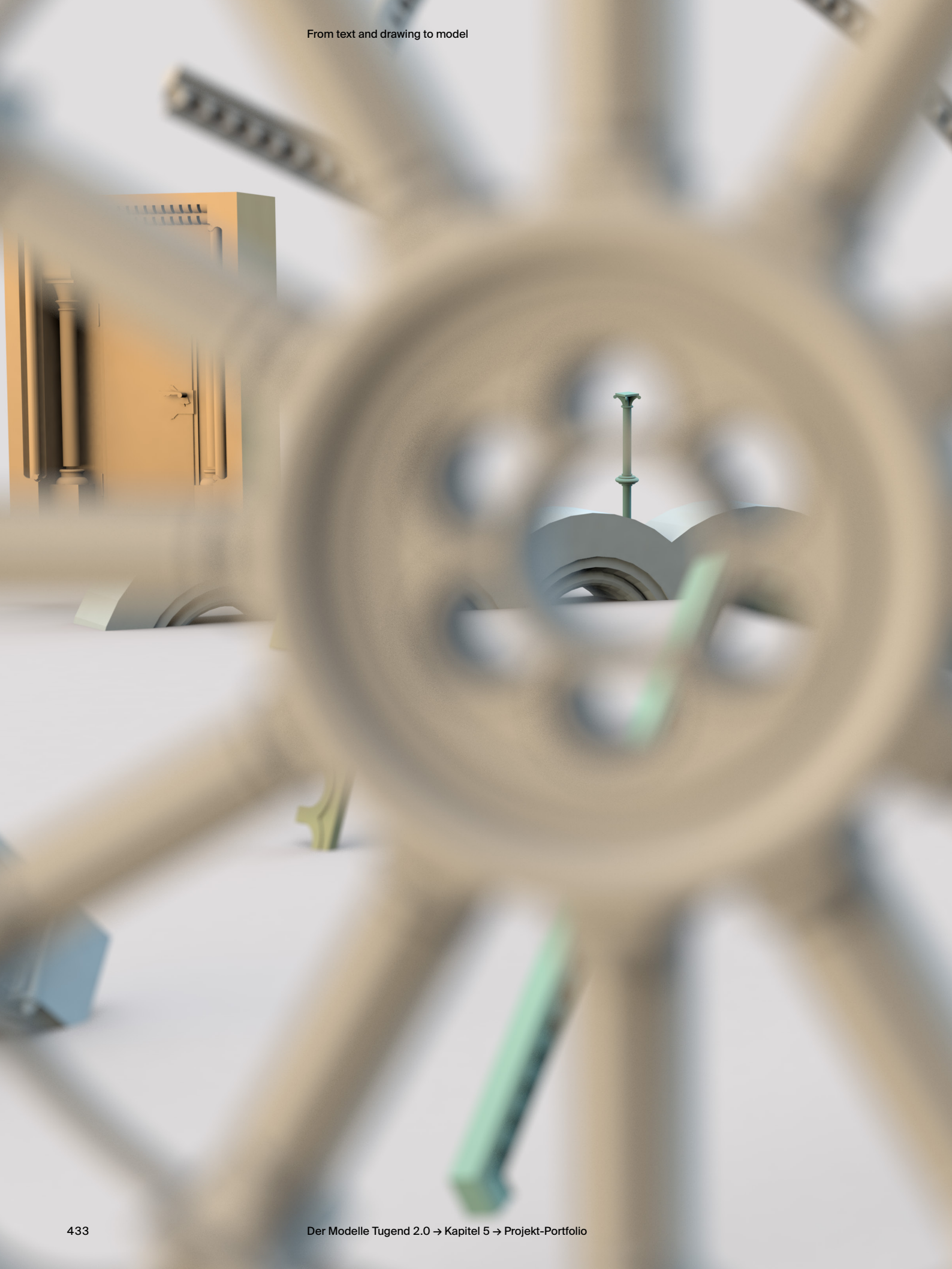
The case study presented in the Project Portfolio amongst the various cases of virtual reconstruction — exemplifies its application to a real case.

Kapitel 5
→ Projekt-Portfolio

Piotr Kuroczyński

Das Kapitel Projekt-Portfolio widmet sich der exemplarischen Darstellung von Vorhaben auf dem breitgefassten Gebiet der digitalen 3D-Rekonstrukion, von nicht mehr vorhandenen Stadtanlagen und Architekturen samt ihrer künstlerischen Ausstattung, über die Freizeitarchitektur (u. a. Karusselle) bis hin zu mechanischen Werkzeugen.

Seit jeher sind Projekte eine wichtige Triebfeder, um Lehre und Forschung nicht nur auf dem Gebiet der digitalen 3D-Rekonstruktion voranzubringen. Aus diesem Grund soll eine Auswahl einen Einblick in Themenstellungen und Forschungsfragen, aber auch Arbeitskonstellationen und Ergebnisse von Projekten im Feld der digitalen 3D-Rekonstruktion anbieten.



Fabrizio Apollonio

I. From text and drawing to model

→ 3D virtual reconstruction, 3D semantic segmentation, C. N. Ledoux, knowledge representation

This case study, amongst the various cases of virtual reconstruction, exemplifies the application of a methodological approach adopted able to allow many types of analysis and to introduce new and meaningful innovations to the interpretation methods and techniques concerning hypothetical reconstruction of projects designed or never built architectures.

Original old drawings and hermetic texts, implemented by different kind of documentary sources, have been used for the digital reconstruction of a large part of the unbuilt projects by Claude-Nicholas Ledoux for his ideal city of Chaux, addressing the issues of architectural coherence from their constructive hypotheses point of view, as well as the use of representation codes able to **reproduce** the graphic characteristics of the original engravings.

The digital reconstruction based on architectural drawings or sketches and supported by textual descriptions and notes, is meaningful inasmuch as it is an exemplary issue to explain the relationship between the certainty of the data used as a source and the accuracy of granularity of the data itself. Each different type of source is characterized by its own specific grade of information granularity that can be transformed into a hypothetical 3D model with its own level of detail. The geometrical definition of each constitutive elementary unit is, therefore, not dependent on the level of detail of the source data (e. g., scale of representation of 2D drawing) but by the type of information that has to be induced, deduced or interpreted. However, a lot of issues related to the formulation of the hypothetical 3D reconstruction of edifices only designed and never built are still to be explored, so we aspire to reach the purpose of describing and representing the whole process of **reinterpretation** accomplished.

I.1 Case study: reconstructive process after Drawing

This project deals about the unbuilt projects by Claude-Nicholas Ledoux. He is one of the Emil Kaufmann's three revolutionary architects 01 who conceived at the end of the 18th Century a publishing work in which he collected a theoretical reflection on architecture and society, designing the ideal city of Chaux. 02 It was conceived as a reformed city for which the author explored a large amount of possible architectural programs, from the stock exchange market to the public bath, from the Pacifère to the Temple of memory, from the Playhouse to the Oikèma.

The book collects hundreds of tables documenting some constructed buildings, fully redesigned and often modified and idealized by Ledoux, alongside numerous new projects for the architecture of the new imagined city.

These case studies start from original old drawings which has to be implemented by different kind of documentary sources 01, able to provide — by means evidence, induction, deduction, analogy — information characterized by different level of uncertainty and related to different level of accuracy.

This project produced the digital reconstruction of a large part of those projects, addressing the issues of architectural coherence from their constructive hypotheses point of view, as well as the use of representation codes able to **reproduce** the graphic characteristics of the original engravings.

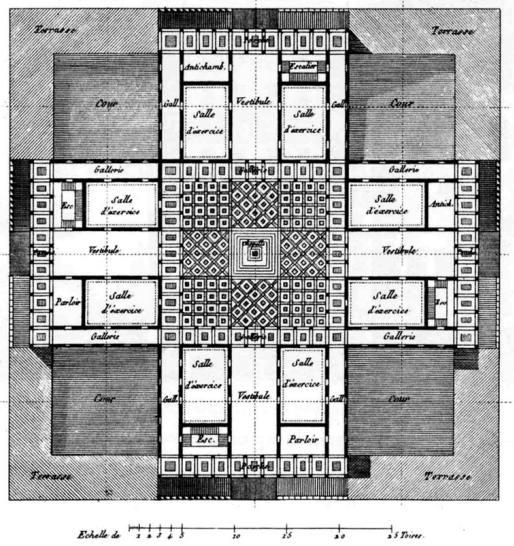
All methods adopted in a digital hypothetical 3D reconstruction process show us that the goal of all researchers is to make explicit, or at least intelligible, through a graphical system a synthetic / communicative level representative or the value of the reconstructive process that is behind a particular result. 03

■ **01**
Emil Kaufmann, Three Revolutionary Architects, Boullée, Ledoux, and Lequeu, Philadelphia 1952. p. 133.

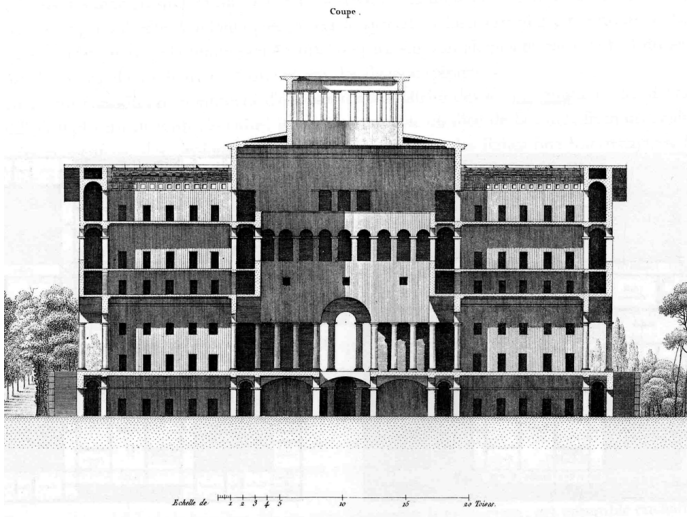
■ **02**
Claude-Nicholas Ledoux, L'architecture considérée sous le rapport de l'art, des mœurs et de la législation, Paris 1804.

■ **03**
Fabrizio I. Apollonio et al., Villa Contarini a Piazzola sul Brenta: studi per un'ipotesi di attribuzione palladiana servendosi di modelli tridimensionali, in: Disegnare idee immagini, 42, 2011, pp. 42–55; Fabrizio I. Apollonio, Federico Fallavollita, Elisabetta C. Giovannini, Riccardo Foschi, Salvatore Corso, The Reconstruction of Drawn Architecture, in: Studies in Digital Heritage, 1 (2), 2017, pp. 1:380–1:395.

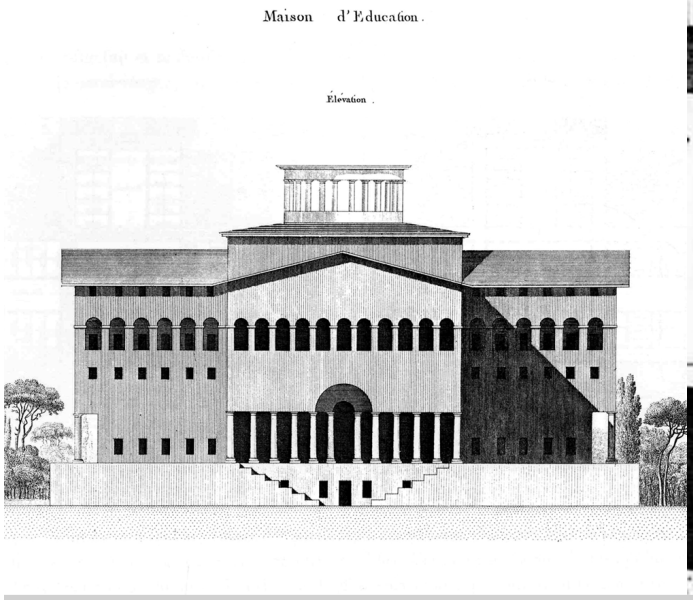
Maison d'Education



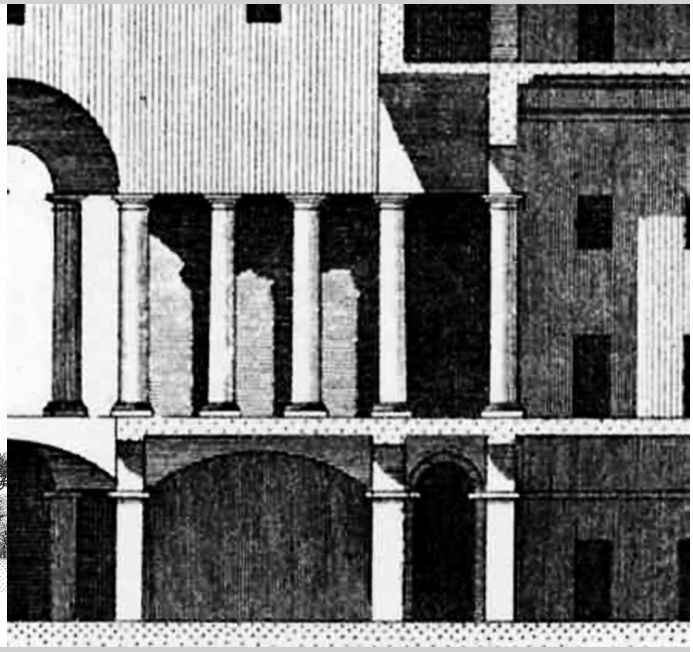
Plan



Section



Elevation



Detail

☐ 01
Claude-Nicholas Ledoux: Maison d'Education. Primary sources (Original tableaux Pl. 105, from L'architecture considérée sous le rapport de l'art, des moeurs et de la législation, Paris 1804, reworked by Fabrizio Apollonio).

I.2 L'Architecture of Ledoux

The large number of studies, projects and works that Claude-Nicolas Ledoux has left us, is an extraordinary heritage still not fully explored and not so well known.

French architect comparable perhaps to Le Corbusier, Claude-Nicolas Ledoux is one of the major figures of the Enlightenment. Hard to keep track of the writings of the 18th Century on the architect and monographs published after the famous text by Emil Kaufmann 04, which inaugurated his rediscovery after a period rather ominous, during which, particularly in the 19th Century, many of his accomplishments have been demolished and its architecture has been violently criticized and described as **bizarre**.

■ **04**
Emil Kaufmann, Von Ledoux bis Le Corbusier, Ursprung und Entwicklung der Autonomen Architecktur, Vienna 1933.

The spectacular achievements like the Saline of Arc-et-Senans or octroi barriers of Paris, alongside a theoretical reflection attested by the publication of the visionary book **L'Architecture considérée sous le rapport de l'art, des moeurs et de Legislation** 05, kept Ledoux busy for more than two decades. The first recordings of the book began, in fact, around 1773.

■ **05**
Ledoux 1804.

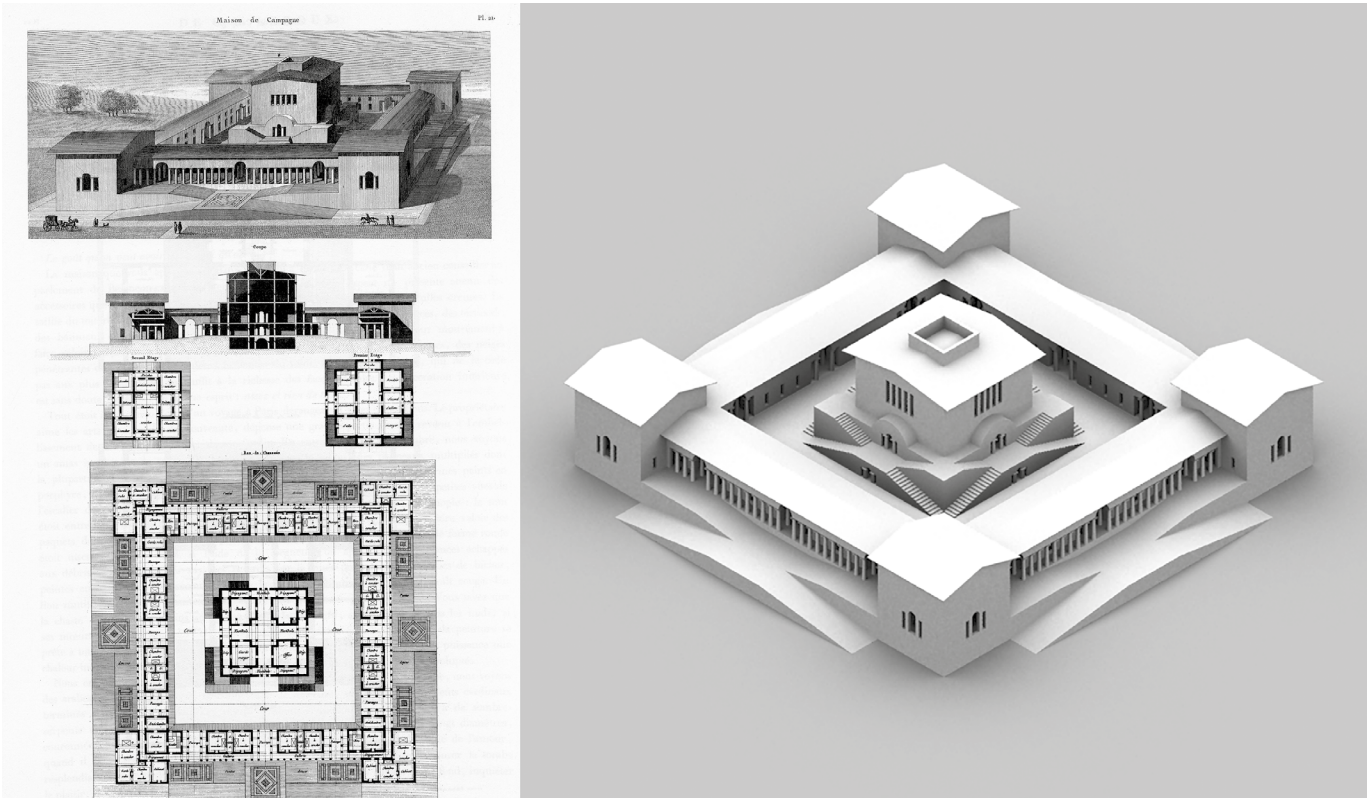
L'Architecture, published in 1804, is only the first of the volumes that Ledoux devoted to his built work while its projects remained on paper. A posthumous volume, with other incisions that Ledoux could not print before his death in 1806, was published by Daniel Ramée in 1847 in Paris. 06 This is a volume without accompanying text, essentially focused on the revolutionary architect built architectures. It composed of a long explanatory text and 125 engravings. The first volume is dedicated mainly to the ideal city of Chaux, the buildings that up (only partly realized) and the theater of Besançon, built in 1776–1784. Inside the section reserved to Chaux, it was made a typological grouping of buildings in order to guide the visitor in the exploration of the architectural work.

■ **06**
Claude-Nicholas Ledoux, Architecture de C. N. Ledoux. Premier volume contenant des plans, élévations, coupes, Paris 1847.

A further field of investigation, which is particularly challenging, consists of the documents published in the book **Inédits pour un Tome III**. It is a collection of one hundred and thirty unpublished planches dessins exhibiting projects for the country houses or incisions to the Castle of Saint-Vrain, for the branch of Clichy or even for churches and burial chapels. In this collection, especially in the seventies tables devoted to private residences, in a sort of intoxicating variation on the theme of space and virtuosity, Ledoux claims the use of a geometry based on a clear articulation of simple figures, typical of his vocabulary, emphasizing yet more the role that domestic cell plays as generating principle of a new social order.

The 125 tables of engravings collected in **L'Architecture** are introduced, described and accompanied by a text, rich in theoretical content, often emphatic and metaphorical. Text and engravings document the achievements and the architect's projects, according to the self-referential model inaugurated by Andrea Palladio in 1570. 07

■ **07**
Andrea Palladio, I quattro libri dell'architettura, Venezia 1570.



☐ 02
Claude-Nicholas Ledoux: Maison de Campagne Pl. 21 (l.) Original tableaux from L'architecture considérée sous le rapport de l'art, des moeurs et de la législation, Paris 1804 — (r.) Reconstructed 3D model by Fabrizio Apollonio.

Deeply influenced by the great reformist thinkers like Jean-Jacques Rousseau, Ledoux processes utopia based on the idea that a completely regenerated architecture could transform society. Starting from the semicircular plant of the Royal Saline of Arc-et-Senans, Ledoux conceived the ideal city of Chaux. A reformed city in which the author explores all possible architectural plans, the stock exchange market, the public toilets, the school, the building to the Community and thet for the satisfaction of pleasure. 02 03

According to Ledoux, architecture should help shape and recognition of different professional spheres. In this way the concept of **architettura parlante** 08 is applied with a primarily educational purpose and not linked to the recognition of the social hierarchy. The Pacifère (common household) as the house of the overseer on the Loue River or the house of the director of Saline, must express the activity that takes place within each building through a monumental language, at the same time extremely light.

■ **08**
The term architettura parlante was coined by the french architect Léon Vaudoyer (1803–1872) to refer to the expressive architecture of C.-N. Ledoux.

The house of the overseer of the Loue will follow these principles across the water of the river itself. For the house of the director is proposed a giant order with rusticated quoins interspersed with squares, crowned by pediment close to oculus that symbolizes the eye of the director who controls his workers. Also the house of pleasure in foul form also responds to an educational and moralizing function.

The darkness of the text and the expanded processing time of these projects do not make the forms of this city always clear and understandable.

Especially as many buildings, mainly those conceived in the mid-70s are not only fully redesigned by Ledoux but often modified and idealized. The aim is to give more consistency to his architectural production by adapting to the style of his early works to his full maturity. The author edits mainly the elevation and more rarely plants and sections.

In the Saline, for example, the attics are mostly replaced by domes; more generally, the moldings are simplified, the rusticated well as sculptural elements tend to disappear. The cube, cylinder and sphere become subparagraphs favorite of his architectural language.

Information technologies offer us opportunities hitherto unexplored and unimaginable in order to reconstruct in an integrated and more fully intelligible that extraordinary masterpiece that is **L'Architecture**.

Without having the ambition to replace the enjoyment and knowledge provided by wonderful tables and engraving with the accompanying text, the digital reconstruction of buildings designed and never built aims to provide a Ledoux for his model of an ideal city, which remained only on paper. This way, they can to be offered again and following new perspectives to historians, architects as well as to the public of non-specialists.

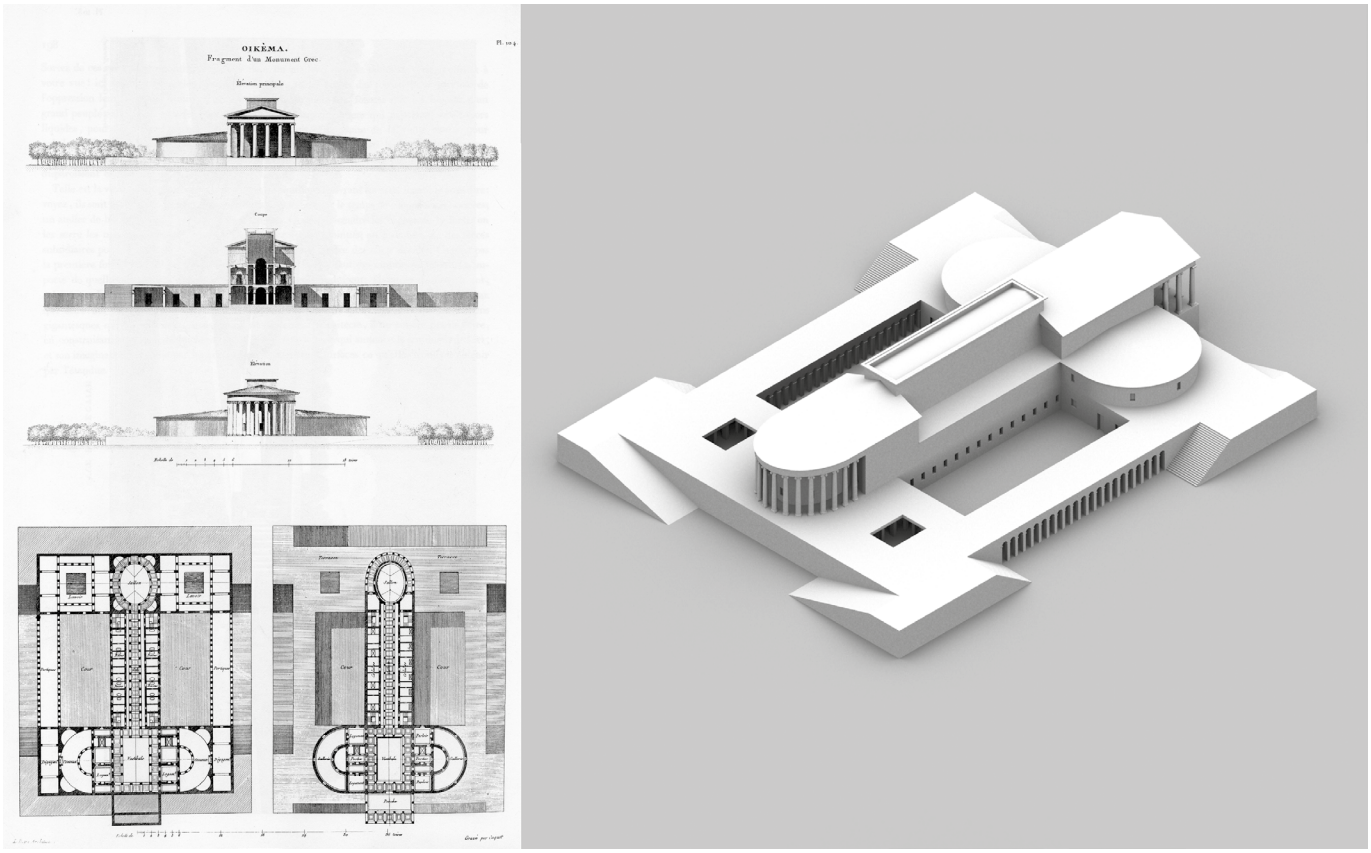
I.3 From drawings and text to 3D digital model

Within the context of virtual reconstruction a huge amount of studies have been carried out on the multidisciplinary approach for processing spatial data (acquisition, manipulation and management) and on defining new protocols in order to offer new opportunities to the reconstruction regarding no longer extant historic objects. 09

The outcomes of virtual reconstructions, as stated in many authors 10, are based on complex chains of reasoning which gives primary and secondary evidence necessary in the authoring of a historically probable hypothesis due to partial data sources available. In order to complete the reconstructive process we may be aware of the presence/absence, certainty / uncertainty, accuracy/inaccuracy of information.

The result of a reconstructive process acts in the definition of three intimately related areas that concur to define the digital consistency of the artifact object of study: Shape (geometry, size, spatial position); Appearance (surface features); Constitutive elements (physical form, stratification of building / manufacturing systems). 11

■ **09**
Sander Münster, Workflows and the role of images for virtual 3D reconstruction of no longer extant historic objects, in: ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS, II-5/W1, 2013, pp. 197–202.; Marc Grellert, Mieke Pfarr-Harfst, 25 Years of Virtual Reconstructions Project Report of Department Information and Communication Technology in Architecture at Technische Universität Darmstadt, in: Proceedings of the 18th International Conference on Cultural Heritage and New Technologies 2013 – CHNT 18, 2013, Wien 2014, pp. 1–13.



☐ 03
Claude-Nicholas Ledoux: Oikèma Pl. 104: (l.) Original tableaux from L'architecture considérée sous le rapport de l'art, des moeurs et de la législation, Paris 1804 — (r.) Reconstructed 3D model by Fabrizio Apollonio.

Defining the shape of an artefact (its geometric characteristics, its size, its position in 3D Cartesian space), as well as its constitutive characteristics (building technologies and material) means face to the definition of a given degree of accuracy, connected with the scale to which the process of modeling could be related to.

Such information is derived by sources that we have collected, distinguished by the deficiency of specific references useful to the formulation, more or less reliable, of the hypothetical reconstructions.

Each of these sources or references is characterized, therefore, with reference to information that can be inferred related to the reconstruction process, by a specific degree of uncertainty / reliability and by a degree of accuracy.

Among the different type of sources, in the case of projects of never built architecture, drawings, sketches, images, pictorial representations and textual descriptions are the only available sources to carry out a hypothetical reconstruction.

■ **10**
George Bruseker et al., Semantically documenting virtual reconstruction: building a path to knowledge provenance, in: 25th International CIPA Symposium 2015, Taipei, ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS, II-5/W3, 2015, pp. 33–40; Piotr Kuroczyński et al., 3D models on triple paths, in: Sander Münster et al., 3D Research Challenges in Cultural Heritage II, Springer International Publishing LNCS Series, 2016, pp. 149–172.

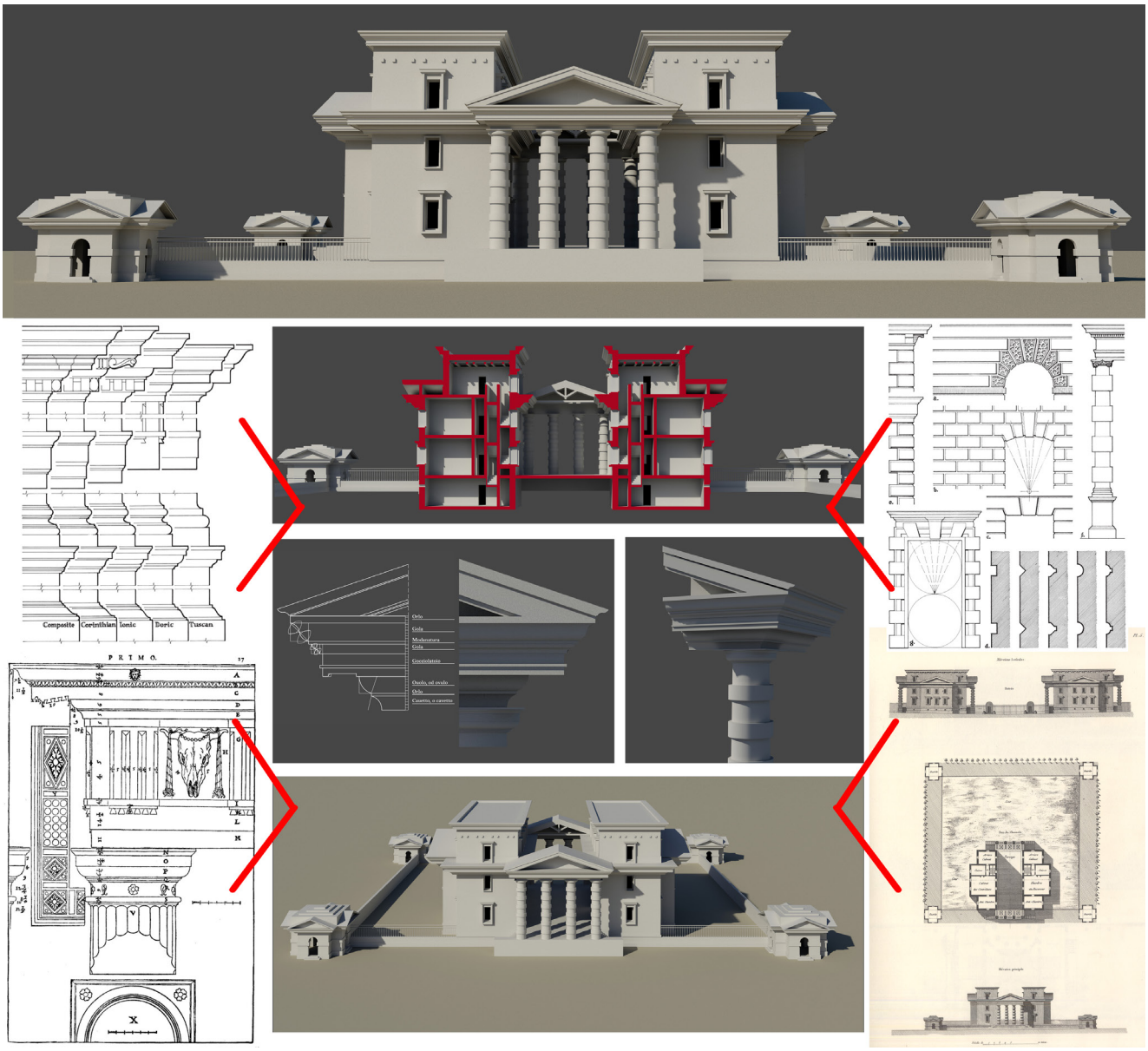
■ **11**
Fabrizio I. Apollonio, Classification Schemes for Visualization of Uncertainty in Digital Hypothetical Reconstruction, in: Sander Münster et al., 3D Research Challenges in Cultural Heritage II, Springer International Publishing LNCS Series, 2016, pp. 173–197.

The Digital reconstruction of the collection of projects designed by Ledoux for the ideal city of Chaux is organized following this approach, leading to a result that does not impoverish the original content and provides with new insights the scholars. The reconstruction process can take place according to the following steps: 04

- → analysis and understanding of the text published in **L'Architecture**, a sort of storytelling, in order to let the prose more intelligible, sometimes hermetic and obscure that characterizes the text;.
- → analysis and understanding of the drawings regarding the projects for the edifices designed by Ledoux, and collected in hundreds of engraving plates.
- → definition of a semantic structure.
- → 3D Modeling based on a semantic structure.
- → definition of the rendering techniques of the surface characteristics.
- → the text, in particular in the case of Ledoux, constitutes a matter of extreme importance since it allows to complete, in some cases, the information concerning the projects that can not be inferred directly from the drawings.

These detailed engravings published in **L'Architecture**, in fact, collect refined quality drawings that represent — as in a sort of manual or treatise — plans, sections, elevations whose task is the description and documentation of the formal, the geometric, the functional distribution and the architectural characteristics of different kind of buildings. In some case they are illustrated by perspective views that render project within a typical country-landscape context, characterized by trails, paths, tree lines or masses of trees, mountains, rivers, with some human figures and animals. All the plates reproducing technical drawings are accompanied by a graphic bar scale in Toises du Chatelet. 01

This made it possible to determine the corresponding measure in meters according to the conversion that consider a Toise du Châtelet equal to 1,949 meters. The resolution of 600 dpi (236.22 px/cm) used for digital scanning in TIFF format allows to evaluate the accuracy of the digital model that is drawn on the order of ± 2 cm, also taking into account error inherent in the assessable drawing, on the basis of lesser thickness graphic sign.



☐ 04
Claude-Nicholas Ledoux: Barriere du Chemin de St. Denis: (top) perspective of reconstructed 3D; (bottom) the different parts of the reconstructed 3D model and the relative documentary sources: primary, secondary and tertiary. (Fabrizio Apollonio)

These are not drawings in scale of the detail, but considering the ensemble, through which it is not possible — in general — to deduce information related to architectural details, the graphic signs were interpreted. The Ledoux laminae represent, in fact, the different buildings designed, collecting in each sheet drawings in very different scales of representation. Depending on the size of the building he switches, in fact, from drawings in scale of around 1:150 for the Maison de Commission, of the Saline of Arc-et-Senans, to drawings in scale of around 1:250 for Maison d'Employee, from drawings in scale of around 1: 384 for Bains to drawings in around 1:500 for Panarèthéon.

The details of the architectural apparatus (moldings cornices, architectural orders, balustrades, cornices and lintels of doors and windows, etc.) can be derived, in some cases, by the text written Ledoux, where he describes the ornaments that would characterize an edifice or part of it, or the number of columns and their intercolumns of a colonnade.

As a preliminary step we identified some design references belonging to the author's methodological sphere more or less contemporary to the case study. Those references belongs to the drawing used as a source, in search of stylistic similarities that they can present and therefore they can be used as a means of verification for all formal and architectural features. Vice versa, to solve several basic design issues, we conversely used as reference books or treatises of architecture, in which the architect exposes his formulas for orders, for rooms measurements, for the design of the staircaises, and the architectural details (columns, pilasters, moldings, architraves, sizing of doors and windows, etc.). As a result these can be taken as the reference for the entire design system. Other elements, whose features couldn't have been model on the information in the drawing, required more perceptive interpretations referencing to other treatises, i. e. **I Sette libri dell'architettura** by Serlio. 12 Their primary focus was on the building systems used at that time in order to formulate reconstruction theories that were plausible from a technical, structural and design point of view.

The text is sometimes evocative, allusive, hermetic where in the description of **Vue perspective de la porte d'entrée de la Saline de Chaux. (Planche 35)** 13, he refers to the rules that underpin the harmony of »Those who circumscribe their genius in the pentameter (five measures, the five orders) of the school are abused« 14, in others he is accurate when he suggests as an exemplary case in describing the rules of the columns of the Place of Louis XV, »They have ten diameters, the intercolumning nearly four. The entablature is between the quarter and the fifth. The ones you see have five, the one spread. The cornice is between one-third and one-quarter«, to go back to allude only to the general regulatory principles »the pediments that have abjured their ancient proportion to dominate everything around them«.

■ **12**
Sebastiano Serlio, Tutte l'opere d'architettura di Sebastiano Serlio Bolognese, Venezia 1584.

■ **13**
Ledoux 1804, pp. 107–108.

■ **14**
Ledoux 1804, p. 108.

He is still precise and detailed in the description of the **Coupe de la porte d'entrée de la Saline. Coupe du batiment des ouvriers (Planche 36)**:

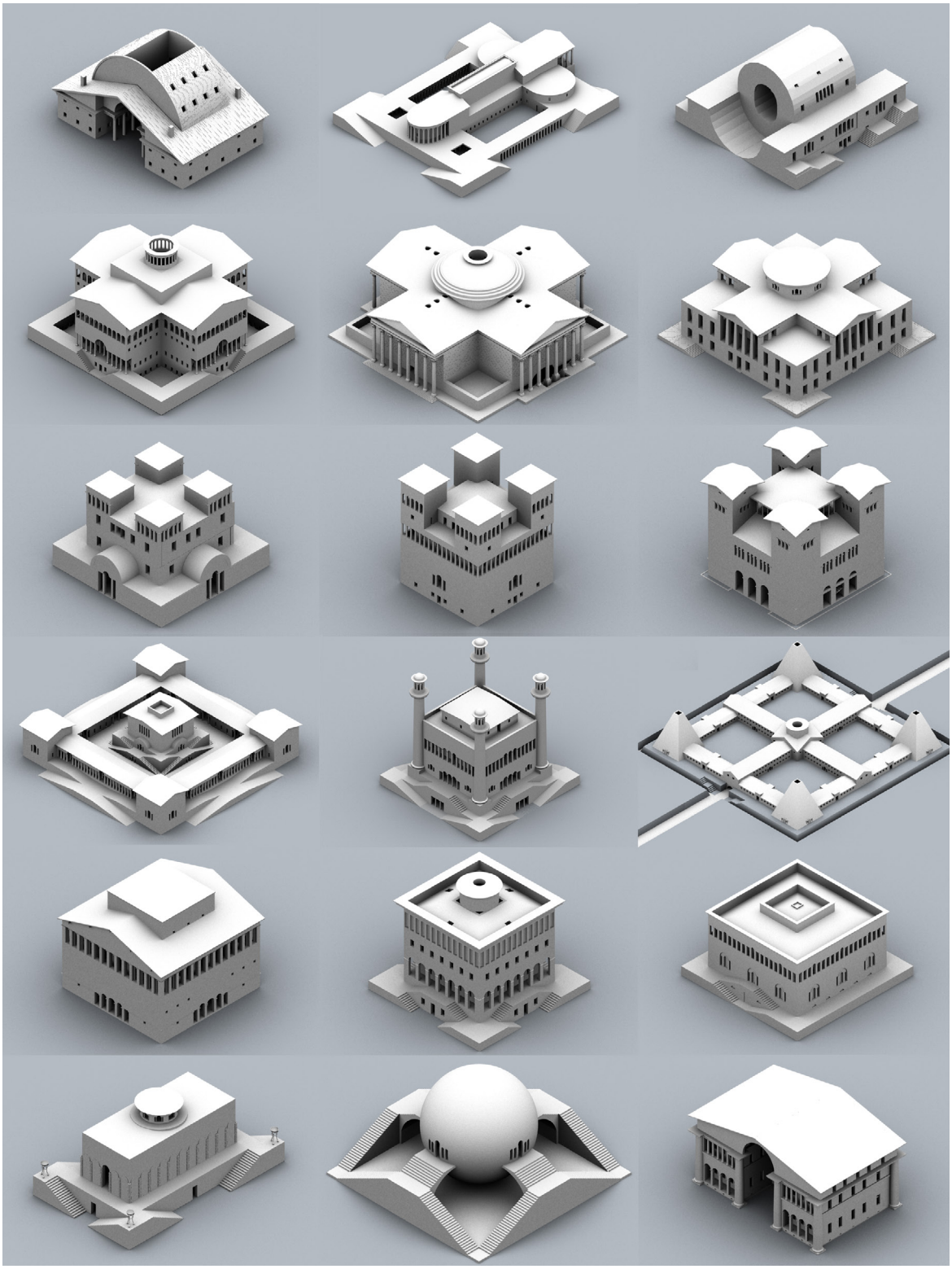
»Look at the first section, it indicates a very strong diameter; the intercolumning tightens to add to its power that the proportion commands. … The profile of the cornice is great because there are few divisions. The rock astonishes the spectator; the divisions of the plates establish the levels; the framework of the roofs even offers resorts to the convenience that does not neglect any, and easy links with the buildings on the side«. 15

■ **15**
Ledoux 1804, pp. 109–110.

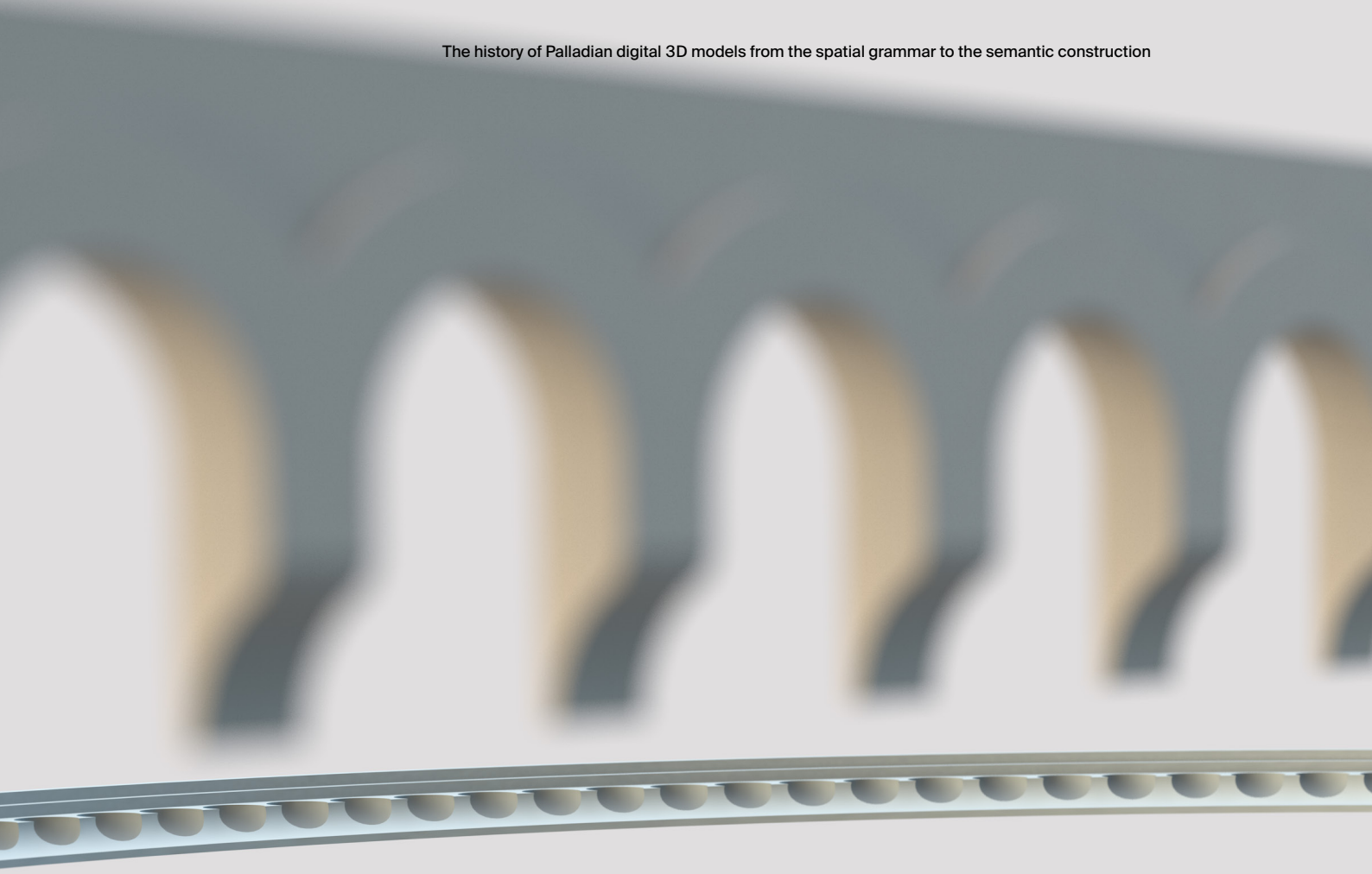
Where there is no any indication you need to find the references in the works or in the same architects mentioned by Ledoux, the temples of Paestum, the Propylées in Athens, the masterpieces of Mnésiclès or Palladio, or moreover to refer to the numerous works (edifices) that the French architect built throughout his distinguished career, some of which still exist: the Saline of Arc-et-Senans, Théatre de Besancon, Rotonde de la Villette, Hotel d'Hallwyl, Barrière du Throne, to mention a few.

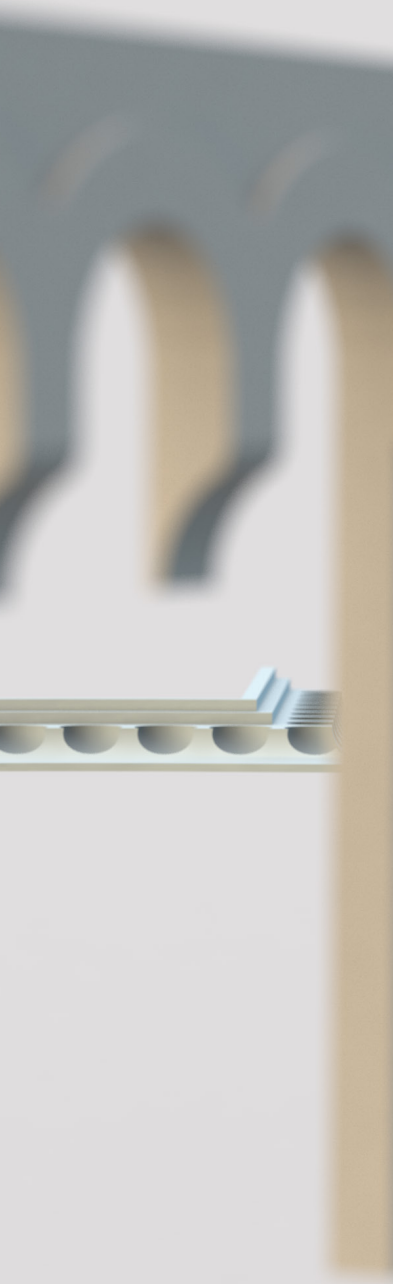
I.4 Conclusion

The digital reconstruction based on architectural drawings or sketches and supported by textual descriptions and notes, is meaningful inasmuch as it is an exemplary issue to explain the relationship between the certainty of the data used as a source and the accuracy of granularity of the data itself. Each different type of source is characterized by its own specific grade of information granularity that can be transformed into a hypothetical 3D model 05 with its own level of detail. The geometrical definition of each constitutive elementary unit is, therefore, not dependent on the level of detail of the source data (e. g., scale of representation of 2D drawing) but by the type of information that has to be induced, deduced or interpreted. However, a lot of issues related to the formulation of the hypothetical 3D reconstruction of edifices only designed and never built are still to be explored, so we aspire to reach the purpose of describing and representing the whole process of **re-interpretation** accomplished.



☐ 05
Claude-Nicholas Ledoux: Samples of 3D virtual reconstructed models after L'architecture considérée sous le rapport de l'art, des moeurs et de la législation, Paris 1804 (Fabrizio Apollonio).





Marco Gaiani

II. The history of Palladian digital 3D models from the spatial grammar to the semantic construction

→ 3D modelling, Andrea Palladio, high-quality rendering, historical reconstruction, real-time rendering, semantic modeling, shape grammar

This paper presents a critical history of the Palladian digital 3D models starting from the Stiny & Mitchell spatial grammar to the reconstruction as **instauratio** suggested by Howard Burns during the years 1990, finally to the semantic modeling developed from the end of the last century. This narration faces up central topics of the whole history of the digital 3D reconstruction applied to the architecture field, mainly concerning the strategy followed. Palladian 3D model construction techniques and the final outcomes, marginally follow the well-recognized path of photorealistic interpretation of a lost past. In the Palladian case the use of digital technology as interpretation tool involved a philological analysis of unbuilt projects, unfinished works and disappeared architectures, developing — as shows the rich and systematic contributions of William Mitchell — techniques and methods to construct the 3D models as cognitive and interpretative system. The feature of Palladio's drawings to be flattened patterns of spatial solutions and the existence of a grammar described by the architect (his The Four Books of the Architecture), allowed many attempts to reconstruct the complete project from partial representations, with the aim of discover design intents, the logic of architecture and possible interpretations of the original drawings.

The paper aims to describe not only the many attempt and results from different group, but also to provide an in-depth analysis of methods and techniques, both investigating its origins in architectural design and methods of historical architecture analysis, and illustrating digital implementations and developments allowed contributions to capture the qualities of the built projects, the deficiencies of those abandoned, the complexities that have endangered some achievements.

II.1 Introduction

This paper presents a critical perspective of the digital 3D models demonstrating the works of the architect Andrea Palladio, an exceptional and impressive figure in the panorama of 16th Century architecture, whose opera had a tremendous impact and influence in the following centuries all over the world. 01 In our opinion, the subjects described here play a key role in the whole history of the digital 3D reconstruction applied to the historical architecture field and architecture theories, for reasons related to the methods and the techniques developed to tackle the issues that lie in representing and interpreting his work.

■ 01
Guido Beltramini, Howard Burns (Eds.), Palladio, Venezia 2008.

Motivations regarding the subject are well explained by Wolgang Lotz:

»Since the eighteenth, the name of Andrea Palladio (1508–1580) has stood for architectural perfection. [...] The reasons for the present interest in Palladio lie in particular qualities of his work. [...] many of his buildings have remained practically unaltered, so that it requires no historical imagination to see them in their original form. Finally, Palladio founded his own enduring fame by a book of illustrations and comments on his own work.« 02

■ 02
Wolfgang Lotz, Architecture in Italy, 1500–1600, London 1995, p. 147.

Motivations regarding the digitalization of the Palladio work are well explained by the title of the Howard Burns essay **La creazione di un'architettura sistematica e comunicabile** that well clarifies the great interest in Andrea Palladio's architecture since the first stages of Information Technology. 03

■ 03
Howard Burns, Andrea Palladio (1508–1580): la creazione di un'architettura sistematica e comunicabile, in: Guido Beltramini and Pino Guidolotti (Eds.), Andrea Palladio: atlante delle architetture, Venezia 2000, pp. 3–12.

The direction given to the Palladian studies by the analysis of Rudolf Wittkower's book **Architectural Principles in the Age of Humanism** (1949) 04 and Colin Rowe's essay **The Mathematics of the Ideal Villa** (1947) 05 connoted the Palladian architecture as an outstanding subject to give a seductive look to an instrument that, rather than offer introspective ability, imposed constraints.

■ 04
Rudolf Wittkover, Architectural Principles in the Age of Humanism, London 1949.

■ 05
Colin Rowe, The Mathematics of the Ideal Villa, in: Architectural Review, 101 (3) 1947, pp. 101–104.

Specifically, Palladio is an excellent subject to demonstrate typical features of digital 3D modelers. The drawings are just flattened patterns of three-dimensional solutions. Visualizing them in 3D allows us to notice quickly and clearly the advantages of built projects; the defects of abandoned projects; the complexities that have endangered some of his realizations. Finally, Palladian 3D model construction techniques and the final outcomes, marginally followed the well-recognized path of photorealistic interpretation of a lost past, a re-interpretation of the photorealistic appearance of the **envois** of French architects **pensionnaires** in Rome during the 19th Century.

In the Palladian case, the use of digital technology as interpretation tool involved a philological analysis of unbuilt projects, unfinished works and disappeared architectures — as shows the rich and systematic contributions by William Mitchell — developing techniques and methods to author the 3D models as cognitive and interpretive system. The existence of a grammar

■ 06
Andrea Palladio, I Quattro libri dell'architettura, Venezia 1570.

■ 07
Howard Burns, Conference at seminar Da Palladio a Desgodetz – Progetti non realizzati e monumenti antichi: una collezione di modelli virtuali, Ferrara 28–30 October 1996.

described by the architect (its treatise **I Quattro Libri dell'architettura** published in 1570) 06, allowed many attempts to reconstruct the complete project from partial representations, with the aim of discovering design intents, the logic of architecture and possible interpretations of the original drawings.

At the ground of this work is the concept of **instauratio** detailed by Howard Burns 07, as method allowing to find a convincing solution to the problem of missing parts.

Instauratio recall one of the fundamental points of the Renaissance culture: the aim to restitute the articulated, rich ancient world from the today ruins. The method to approach this restitution lies in the use of rules from the same system. E. g. the grammar, the syntax, a Latin vocabulary are the tools that allow to extract the meaning from the context and to understand and complete the missing. Applying this method to the study of the architecture by Palladio, the rules for integrating missing or unclear parts can be found in its treatise. **I Quattro libri** provides grammar, vocabulary and syntax to be used to proceed in finding a missing part. The text illustrates shapes, general proportions and rooms and bedrooms; Palladio's types for buildings, villas and stairs.

Above all digital technology was used to provide important contributions to highlight the significant of the objects partially lost in the translating the 2D of the paper sheet to 3D space. Our paper aims to describe not only the many attempts and results from different group, but also to provide an in-depth analysis of methods and techniques developed and used.

II.2 First trials starting from the shape grammar

In 1986 both Howard Burns and William J. Mitchell were named at the Harvard Graduate School of Design (GSD). Few month later they began a close collaboration working on Palladio architecture, continued until the Mitchell dead in 2010.

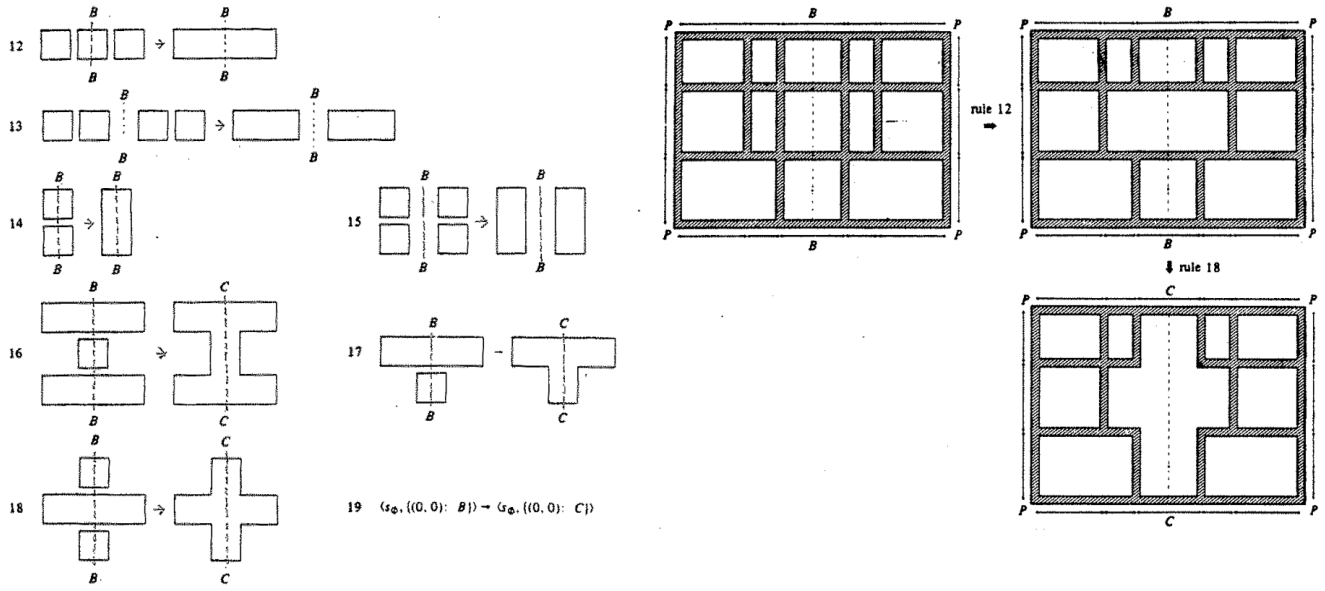
Mitchell's interest in Palladio started more than a decade before of its nomination at GSD, when he published a trilogy of papers with George Stiny, and demonstrated a Palladian grammar that applied 72 rules to generate the plan of Villa Foscari at Malcontenta 08 01. Stiny and Mitchell's grammar was the first explicit, formally rigorous characterization of Palladian villas that was simultaneously analytic and generative. The rules of the grammar explicate the conventions underlying villa plans and can be applied to generate the villa plans in Palladio's **I Quattro Libri**, as well as innumerable other new, hypothetical, or possible plans in the Palladian style. Authors take **top-down** approach which gradually refines a starting generic condition to approximate a Palladian villa. The essay **The Palladian grammar,** fully explains method and aim:

■ 08
George Stiny, William J. Mitchell, The Palladian Grammar, in: Environment and Planning B, 5 (1) 1978, pp. 5–18; Ibid, pp. 189–198; Ibid, pp. 199–206.

»In this paper a first attempt is made to recast parts of Palladio's architectural grammar in a modern, generative form. The rules of a parametric shape grammar … that generates villa ground plans are specified. In many cases these rules are direct translations of Palladio's explicit canons of design; in others, they are based on examples of villa plans in the **Quattro Libri**.« 09

■ 09
Ibid, p. 5.

□ 01
The Palladian grammar, rules for room layout and generation of the room layout for the Villa Malcontenta (G. Stiny, W. J. Mitchell)



The so defined grammar generates the main features of most of Palladio's villa plans as drawn in the book. The same Palladian method fueled this new processing. Sketching quickly and on a small-scale Palladio tends to draw further alternatives rather than to rework sketches with which he is not satisfied [10]. Thus, on a sheet like RIBA X/22 verso Palladio was able in ten or fifteen minutes to generate most of the solutions that were compatible with the site and with his architectural system [11].

The process is basically semi-automatic and could be performed by a computer: one can easily experience it for his own by arbitrarily drawing a site, and then trying to insert into it all characteristic features of a Palladian palace. The resulting drawings are not essentially new designs: they rely heavily on memory and the real moment of **invention** is well upstream from the apparent moment of the composition.

A key point of the Mitchell & Stiny work is that they shaped the algorithm through a linguistic standpoint [12]. The villa is thought of as an architectural **sentence** that is constructed through the treatment of **grammatical** rules to basic **words**. The words themselves are generated through a process called parametric shape grammar, whereby labels applied to lines, points, and other basic shapes become the place of transformations and substitutions. In their discussion of the Palladian grammar, however, Stiny and Mitchell point to work needed to complete their grammar. For example, the details of plans proportions, the designs of facades, and historical questions relating Palladio to his neoPalladian successors need to be investigated further [13]. At this point the collaboration between Mitchell and Burns begins, introducing new major elements:

- → a more consistent cultural environment to develop researches based on a systematic collaboration with the Centro Internazionale di Studi di Architettura Andrea Palladio (CISAAP), the most important institution focused on Palladio studies. [14] The main result of this collaboration was a later project for a Palladio Virtual Museum, a heterogeneous database of history and architecture [15];
- → a more convincing reconstructive approach based on the notion of **instauratio**;
- → more consistent 3D reconstruction techniques based on the general notion of **design knowledge** following the — at that time — emerging CAD paradigm of knowledge-based design [16]. In the Mitchell's **design knowledge** vision shape grammar systems are putted in a rather Aristotelian view of design knowledge: things have their uses, these uses can be defined by specifying rules of usage, and application of the rules yields designs in which elements are employed appropriately to contribute to the functioning of the whole [17]. So Stiny and Mitchell's Palladian grammar is generalized into a design technique in which elements of classical architecture are used to put together country dwellings in the Veneto;
- → the use of 3D digital models instead of 2D patterns as a representation tool brings new contributes to the ability of a grammar to accurately capture the whole knowledge. 3D modeling technique allow a systematic analysis of problems and solutions and facilitate the assembling of both

■ **10**
Howard Burns, The Lion's Claw: Palladio's Initial Project Sketches, in: Daidalos, 5 1982, pp. 73–80.

■ **11**
Andrea Palladio, twenty alternative plans for modernizing the house of Camillo Volpe, Vicenza Late 1560s; pen and dark brown ink; 315x392 mm., London, RIBA Library, Drawings and Archives Collection, sc. 219/XI/22r.

■ **12**
George Stiny, and William J. Mitchell, The Palladian Grammar, in: Environment and Planning B, 5 (1) 1978, p. 5.

■ **13**
Terry Knight, Possible Palladian Villas by George Hersey and Richard Freedman, Review, in: Journal of Architectural Education, 44, 1994, pp. 258–260.

■ **14**
Palladiomuseum, www.palladiomuseum.org.

■ **15**
Daniel Tsai, The Palladio Web Museum — a Heterogeneous Database of Architecture and History, in: CAADFutures 1997, 1997, pp. 655–662.

■ **16**
Richard D. Coyne, Michael A. Rosenman, Anthony D. Radford, Bala M. Balachandran, John S. Gero, Knowledge-Based Design Systems, Reading 1990.

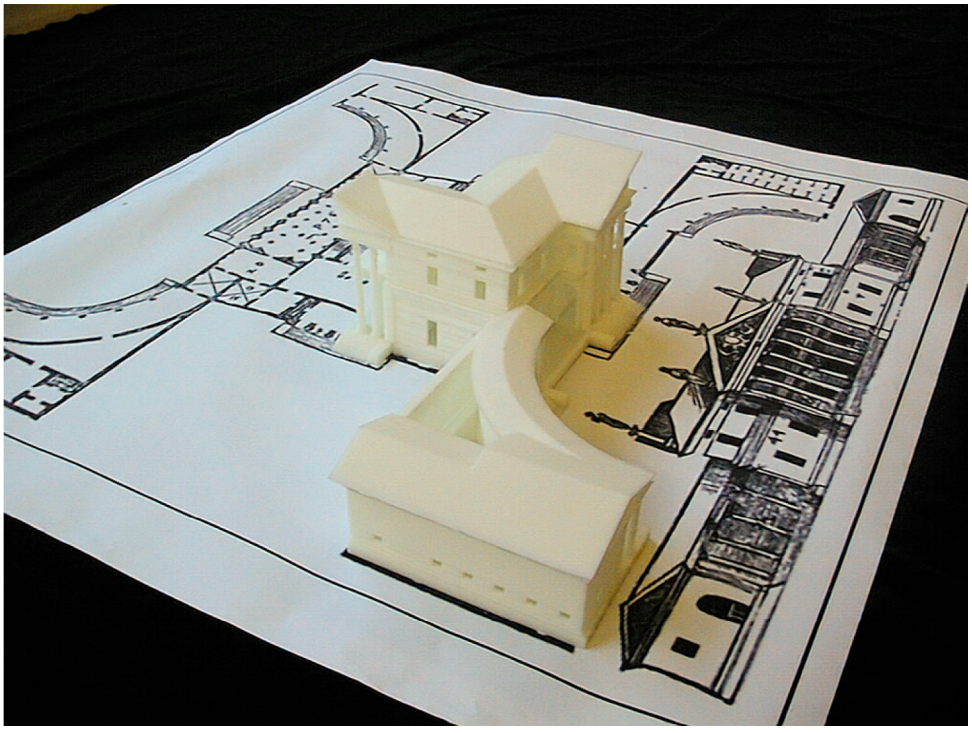
■ **17**
William J. Mitchell, Three paradigms for computer-aided design, in: Automation in Construction, 3, 1994, pp. 239–245.

artifacts and information to form a coherent view. Analytical reconstructions of unbuilt, destroyed or incomplete works allow the development of a robust grammar;

→ the involvement of the students in the development of computer models of all the villas published in Palladio's book. As the students started to develop their own interests in the work, the results were far more divergent than Mitchell had originally expected. The original idea of simple renderings evolved into the building of physical models using 3D printing technology.

Lawrence Sass, one of best Mitchell's students, systematized some years later this research path 18. Sass demonstrated how Palladio's text could be applied to the reconstruction of an entire villa exclusively by rules, from the foundation to the roof. The rules used to reconstruct each villa have been rewritten in a format that allows a direct application to a computer program or shape grammar. The nature of 3D rules (versus 2D rules) associated with 3D printing techniques defines a new grammar type based on assembly, physical modelling, and manufacture, the so-called construction grammar 02.

■ **18**
Lawrence Sass, Reconstructing Palladio s Villas: a computational analysis of Palladio's villa design and construction process, in: ACADIA Proceedings, SUNY Buffalo, 2001, pp. 212–226; Lawrence Sass, A Palladian construction grammar — design reasoning with shape grammars and rapid prototyping, in: Environment and Planning B, 34 (1) 2007, pp. 87–106.



□ 02
3D print of Palladio's un-built Villa Mocenigo at Meledo by Larry Sass (Larry Sass)

We just remark that the Sass goal was to reconstruct Palladio's ideal intentions by the rules expressed in Books One and Two of **I Quattro Libri** and not rules coming from the built [19].

The process developed involves qualitative and quantitative methods for evaluating and testing the process and resulting model. The new construction grammar is made of 3D parametric descriptions and rules based on full-scale materials and material assembly. These construction rules do not determine appearance; instead, they define assemblage of physical objects in 3D space. Alternatively, a design rule for a shape grammar builds shapes and shape relationships for visual evaluation; design rules tend not to provide functional or structural information for the manufacture of objects. The method used to build the construction grammar was inferred collecting information from three sources. The first one was the onsite analysis of existing villas. Secondly, rules were derived from drawings in **I Quattro Libri**. Then, as a third source, information on building elements was taken as described in **The Portico and the Farmyard** [20]. These will be also the starting points of the following studies by the same group and other scholars around the world.

■ **19**
Lawrence Sass, Reconstructing Palladio's Villas: An Analysis of Palladio's Villa Design and Construction Process, PhD diss., MIT, 2001.

■ **20**
Howard Burns, Andrea Palladio 1508–1580: the Portico and the Farmyard, London 1975.

□ 03
Reconstruction of project for Palazzo Porto in Vicenza. Elevation on Contrà Porti and longitudinal section from drawings RIBA, XVII, 9r, 12r. (Pier Carlo Ricci)

II.3 Semantic as 3D modelling technique

In the Academic Year 1993–94 Howard Burns moved from Harvard to the University of Ferrara. There he led, always helped by students, 3D model construction works starting from Palladian unbuilt designs. These are usually a plan, an elevation or a half-section half-elevation 03. The rest of the project is missing or never developed by Palladio.

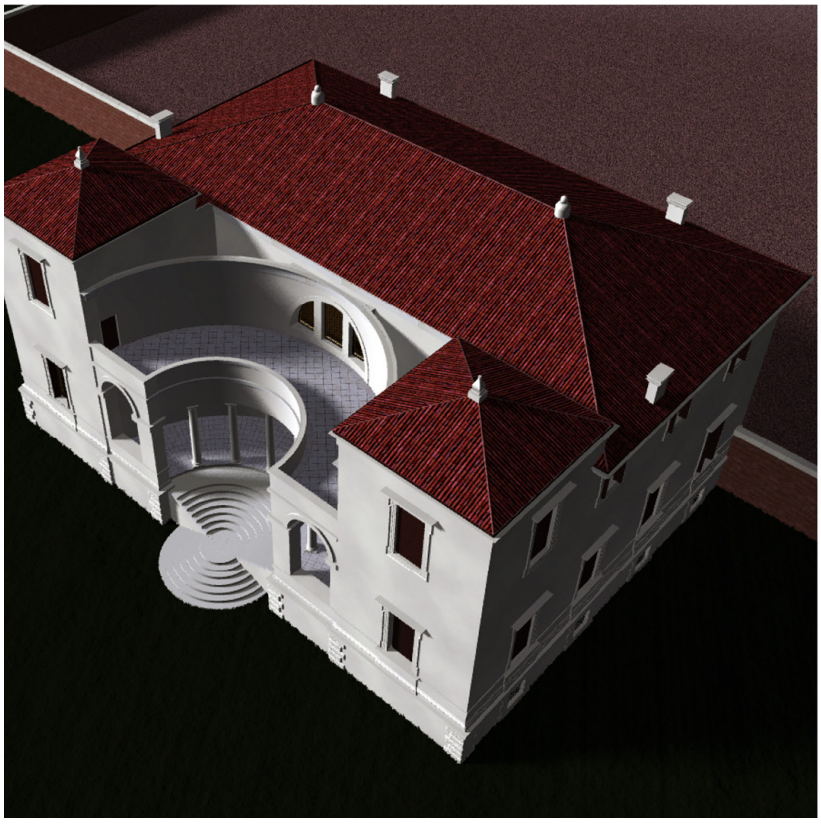
At the end of 1997, after 4 years of extensive experimentation, three 3D digital models of Villa Pisani at Bagnolo, an emblematic case study of the typical Palladian issues found in the analysis of Palladio's corpus, were done 21. These 3D models are an excellent demonstration of the techniques developed in those years with the students and with a new research group that systematized all the new ideas and methods shaped 22.

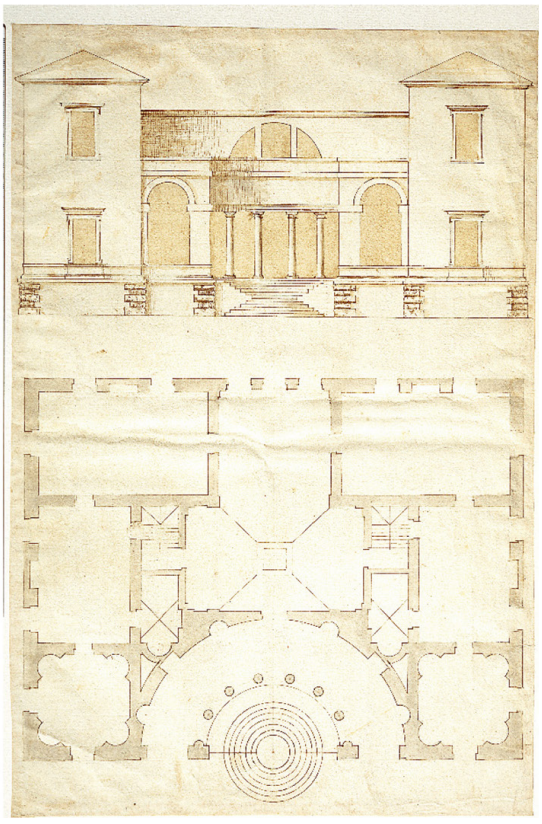
The first model represents one of the projects that Palladio developed for the villa: the solution depicted in the drawing RIBA XVII, 17 04. This plan is more complex than the built villa, echoing the architecture of the Roman baths as well as Bramante's buildings he had previously seen in Rome.
Being more expensive, however, it was probably not approved by the client.

The second 3D model represents the villa and the surrounding countryside around the villa in 1569, thanks to the availability of extremely detailed maps 05. Palladio had great ability not only in designing the villa but also in landscaping the surrounding terrain.

■ 21
Howard Burns, Villa Pisani a Bagnolo, in: Palladio, Venezia 2008, pp. 64–71.

■ 22
Guido Beltramini, I modelli per villa Pisani a Bagnolo (Vicenza), in: Paesaggio urbano, pp. 31–32.





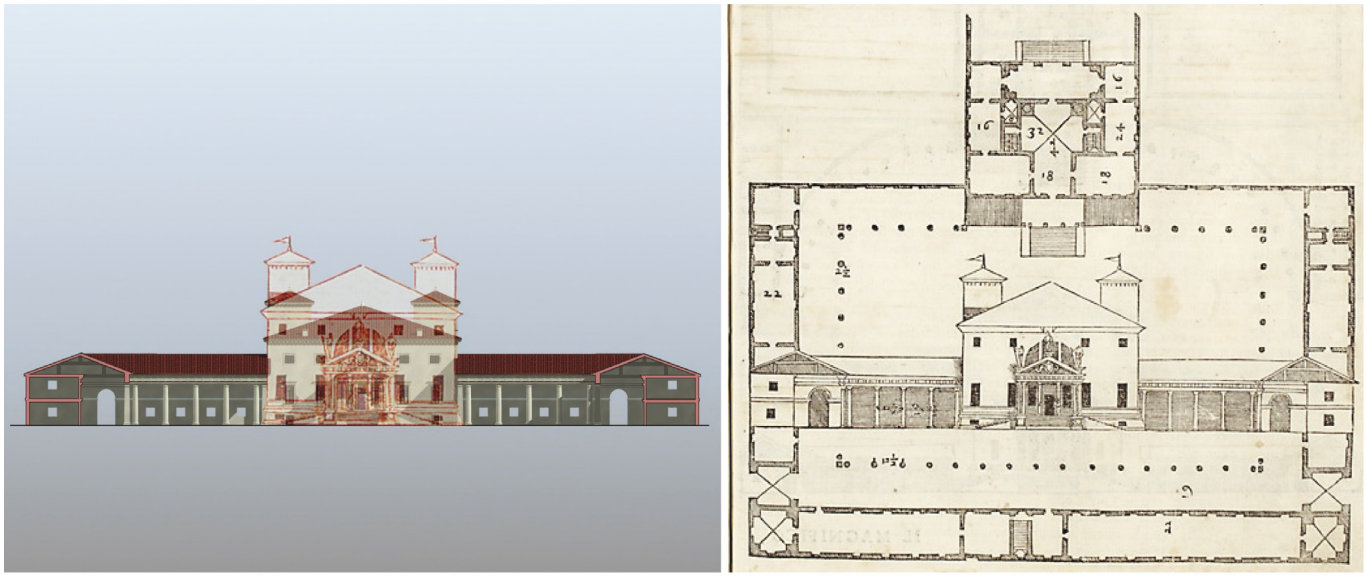
☐ 04
Villa Pisani at Bagnolo: hypothesis of reconstruction from RIBA XVII/17 drawing with the covering of the loggia at esedra settled arbitrarily (Marco Gaiani)

☐ 05
Villa Pisani at Bagnolo: 3D model of the actual state, facade towards the courtyard and view of the loggia towards the courtyard (Marco Gaiani)

The last 3D model represents a version of the villa as it appears in **»I Quattro Libri«**, with embellishments like the pronaos to the back wall overlooking a large closed colonnaded courtyard 06. The reconstruction shows up all the natural and functional faults of Palladio's addition. The output of 3D model construction of the Villa Pisani was a 20-minute long photorealistic computer animation (15000 frames) computed on a Silicon Graphics Origin server, visualizing the three solutions of the villa 07.

The 3D models were not made simply for visualization purposes only, rather as **architectural cognitive systems**, able to create multiple representations: interactive objects to be included in a 3D data-base or a hypertext or in web-based systems; analytical images; visualizations able to support the preservation of the building.

☐ 06
Villa Pisani at Bagnolo: solution from Palladio's drawing on the Quattro Libri dell'Architettura, showing the difference between the Palladio's drawing and the built villa (left: visualization by Marco Gaiani, 1997; right: drawing from Palladio's I quattro libri dell'architettura, Venice 1570)



☐ 07
Villa Pisani at Bagnolo 1997 computer animation: images from the movie (Marco Gaiani)

This solution allowed the development of a consistent method allowing to describe: the relationship between the existing building and Palladio's drawing; features and limits of the graphic framework provided by Palladio's drawings; the solutions that cannot be univocally solved and their possible variants; and how the building could interact with the surroundings at the design time.

An **architectural knowledge representation** could be depicted as a series of structured objects using a specific architectural lexicon. **I Quattro libri** are an outstanding example of hierarchical **architectural knowledge representation**, where structure and level of detail are systematically organized. Following this logic, the existing building and the interpretative hypotheses of the unbuilt solutions of Villa Pisani were considered as an assembly of generic objects; these objects retain a structural logic inherent and relative to the whole, embedding at the same time their constructive history. This method is certainly in line with the Mitchell's design knowledge and shape grammar, however starting point and purpose are different.

Unlike ideal models of Palladio's treatise, the starting point of Villa Pisani's models is surveyed data and geometries able to illustrate the **real life** of the building. The developed method used cubic polynomial curves and non-uniform rational beta-spline surfaces (NURBS).

Secondly, a cognitive strategy based on the idea of similarity to the real, taking advantage of Tomás Maldonado [23], theoretical thought, was set up. The aim of this cognitive strategy was not to create a generative semi-automatic system but to constantly define the level of certainty of that reconstruction, and to emphasize invariants and variables related to design, construction and a-posteriori interpretation. Due to the similarity and homology between architectural buildings and their 3D digital representations, an architectural knowledge system can describe a series of structured objects using a specific architectural lexicon, like that of structure and organization in the Andrea Palladio treatise **I quattro libri**. The use of a cognitive strategy for model construction is not only a technique to see a building as a cognitive system, the usual working hypotheses with a hierarchical structure, but also to have self-representative results.

■ **23**
Tomàs Maldonado, Reale e virtuale, Milano 1992.

The 3D modeling system developed was based on the accepted and general convention whereby structures are described as a series of structured objects using a specific architectural lexicon. Following the classification method of Tzonis and Oorschot [24] the architectural space is subdivided following their level of **abstraction** (clustering, topological and metric).

As reference, the semantic classification work applied to 3D digital modeling and developed by Paul Quintrand et al. [25] was used. They stated that the association of semantics and architectural shape is possible only considering the building as a system of knowledge: the model is extracted from its description while its representation is defined according to the objectives of the analysis. The use of this information system then let the users perform studies based on context and semantic content, providing a quick and efficient solution to the problem of presentation of aggregated and hierarchical data. Due to the different typologies of objects we defined two different groups of interpretation and structural formulation for the final architectural complex:

■ **24**
Alex Tzonis, Luc Oorschot, Frames, Plans, Representation Conceptdictaat Inleiding Programmatische en Functionele Analyse, PhD diss., Delft University of Technology, 1987.

■ **25**
Paul Quintrand, Jacques Autran, Michel Florenzano, Marius Fregier, Jacques Zoller, La CAO en architecture, Paris 1985.

A first group (2D-to-3D modeling) consisting of individual elements derived from pure geometric primitives (architectural lexicon) and built up using unambiguous logic. The primitives were put together mechanically in a pre-ordered manner to become objects like bases, capitals, shafts etc. and when assembled co-axially, they appear as a column or a series of columns supporting an entablature, etc.;

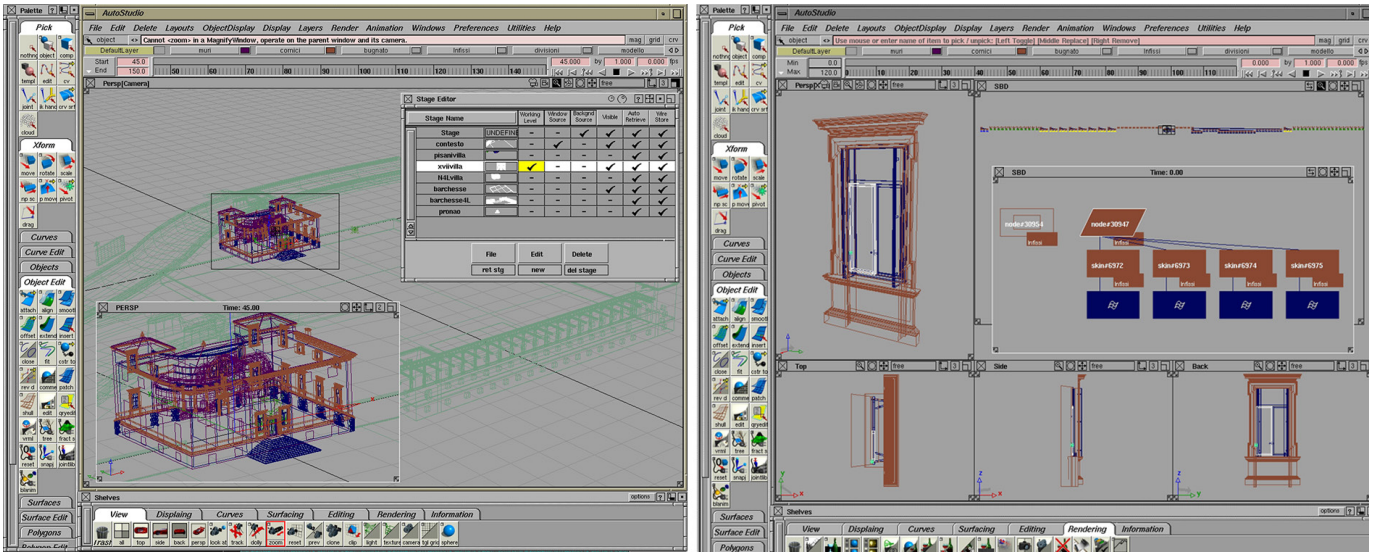
A second group (reality-based modeling) referred to the construction of complex parts, i. e. an architectural whole (a cornice, window, basement, internal and external volumes etc.). Any complex system comprising similar elements was hierarchized to determine which parts should undergo transformations.

The method was implemented using Alias Studio graph system called Scene Block Diagram 26 08 and extensively used since 1993 approaching many other cases 27.

■ 26
This was a NURBS modeler state-of-the-art, still on market and known as Autodesk Alias.

■ 27
Marco Gaiani, Translating the architecture of the real world into virtual reality and vice-versa: 7 years of experimentation with »conservation and representation«, in: Canada – Italia Workshop, Heritage Applications of 3D Digital Imaging proceedings, CD-Rom, Ottawa 1999, pp. 30–46.

☐ 08
Villa Pisani at Bagnolo: two different levels of interpretation and structural formulation of semantics defining the architectural complex (Marco Gaiani)



At the time, the 50 Mbyte 3D model of the villa did not allow any interactive visualization. We just remember the file opening time on the powerful Silicon Graphics Maximum Impact used was 7 hours. However, this solution allowed to switch quickly between the three different versions of the Villa Pisani, reusing most of geometry and materials implemented as simple variants of the 3D model scene graph. Typical example is the solution of the façade toward the courtyard.

The user was able to switch between the three different solutions simply checking different stages in the Alias stageset windows 09. Over time, the semantic organization of the 3D models allowed to generate outputs for several different uses:

simulation of many villa's features for the multimedia CD-Rom **Andrea Palladio — Le Ville**, in the **Exhibit** section able to show six themes related to the architecture of the Palladian villa: villa, site, project, architectural language, construction, and life at the villa 28 10. The user is able to leaf through texts illustrated by drawings, maps or a range of other documents contained in the database, including animated digital reconstructions and virtual visits;

interactive studies of Palladio's constructive and design villas solution by Howard Burns for the exhibition Andrea Palladio e la Villa Veneta da Petrarca a Carlo Scarpa held in Vicenza in 2005 and its catalog 29;

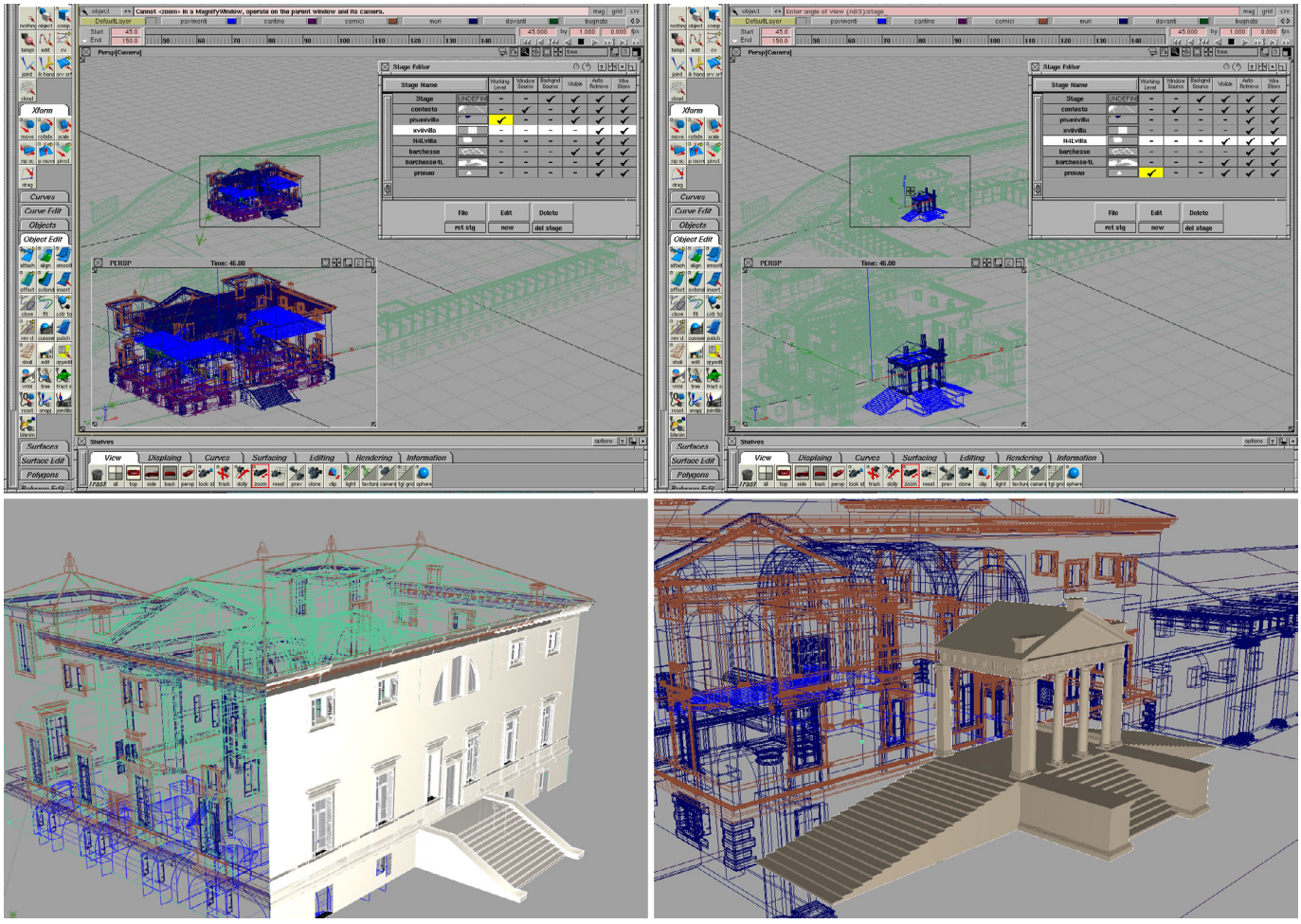
real-time rendering (RTR) side-by-side comparison of different design solutions 30.

■ 28
Guido Beltramini, The Multimedia CD-ROMs of the CISAP: A resource for the study of architectural history and for the scientific examination and promotion of the works of Palladio, in: VSMM 2002 proceedings, Seoul 2002, pp. 791–799.

■ 29
Guido Beltramini, Howard Burns (eds.), Andrea Palladio e la villa veneta da Petrarca a Carlo Scarpa, Venezia 2005.

■ 30
See paragraph: RTR techniques for design analysis and a Palladian 3D geodatabase.

☐ 09
Villa Pisani at Bagnolo: solution of the façade toward the courtyard in the two different versions. The user was able to switch between the three different solutions simply checking different stages in the Alias stageset windows (Marco Gaiani)



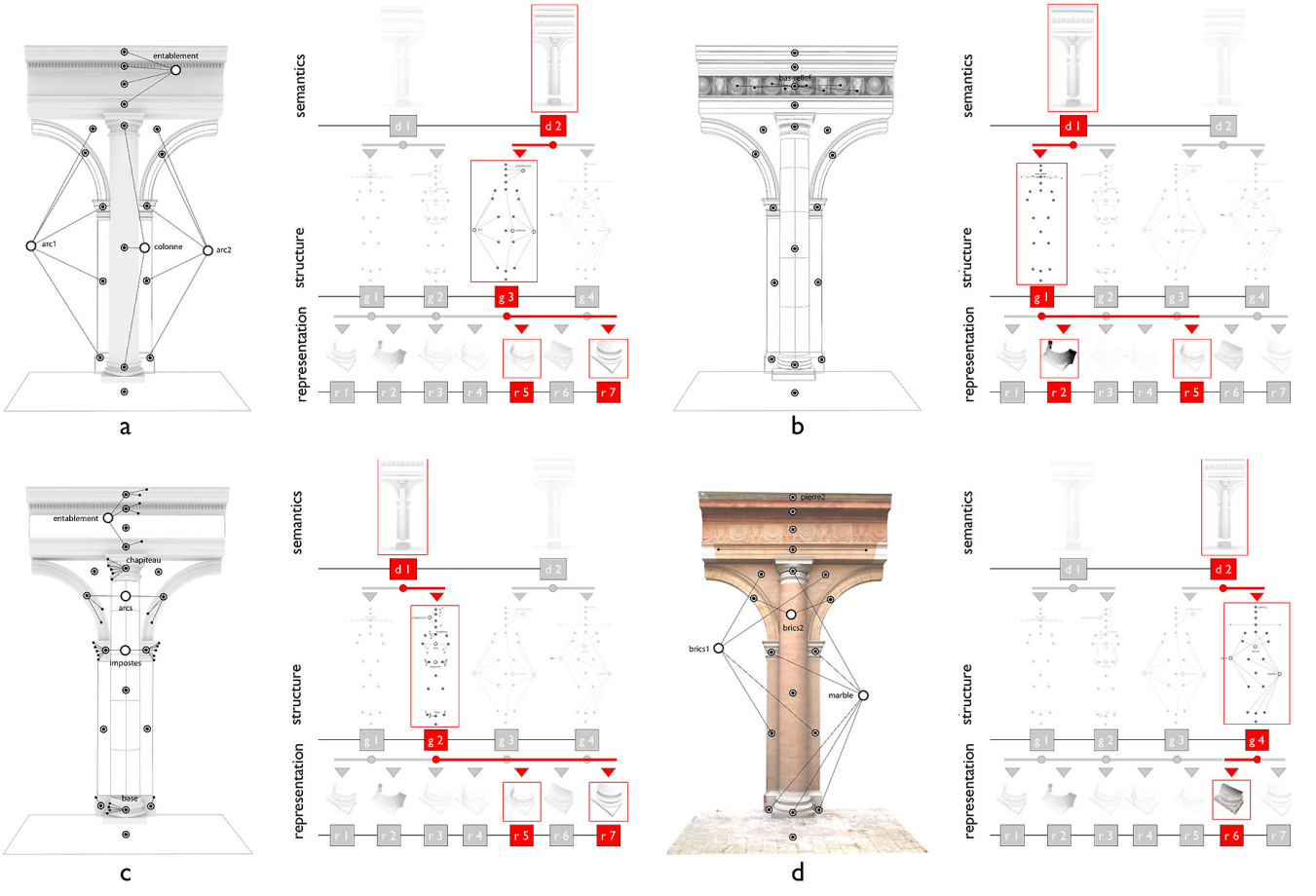
☐ 10
A screenshot of the Exhibit in the multimedia CD-Rom Andrea Palladio – Le Ville (Marco Gaiani)

■ 31
Livio De Luca, Paul Véron, Michel Florenzano, A generic formalism for the semantic modeling and representation of architectural elements, in: Visual Computer 23, 2007, pp. 181–205.

■ 32
Livio De Luca, Chawee Busarayat, Chiara Stefani, Noemie Renaudin, Michel Florenzano, Philippe Véron, An Iconography-Based Modeling Approach for the Spatio-Temporal Analysis of Architectural Heritage, in: Shape Modeling International Conference (SMI '10), Washington 2010, pp. 78–89.

Ten years later the Villa Pisani work, Livio De Luca 31 presented a methodological approach to the semantic description of architectural elements completely coherent with Ferrara's techniques but much more consistent and easy to use [11]. De Luca, furthermore, in a later work, extended the method to the structuring of heterogeneous information, including the documentation of the state of conservation, the indexation and retrieval of iconographic sources, and the analysis and representation of spatiotemporal changes 32. This will be also the development line of the 3D models developed in collaboration with the CISAAP by the group of the University of Bologna who collected the Ferrara experiences.

□ 11
3D model construction based on semantics: four »points of view« on Convento della Carità in Venezia detailed starting from the same morphological cutting. Analysis of the order (a), analysis of sculptures (b), analysis of mouldings (c), analysis of materials (d) (Livio De Luca)



II.4 RTR techniques for design analysis and a Palladian 3D geodatabase

The works at MIT, at the University of Ferrara and other around the world (we just recall studies by Livio De Luca, Alberto Sdegno 33 12 and Paolo Clini 34) demonstrated consistent techniques to study the Palladio's design strategies and many unclear key steps of his work.

However, they did not provide response to the key issues of the organization of the large amount of Palladian relevant data (Palladio drawings dispersed in several archives around the world, the largest existing photo library devoted to Palladio (over 5,000 photos), approximately 1,200 survey drawings, Palladio's writings), nor allowed a quantitative approach to the analysis in 3D of the whole **corpus palladianum**: 54 constructions spanning houses, public buildings, palaces, churches, bridges.

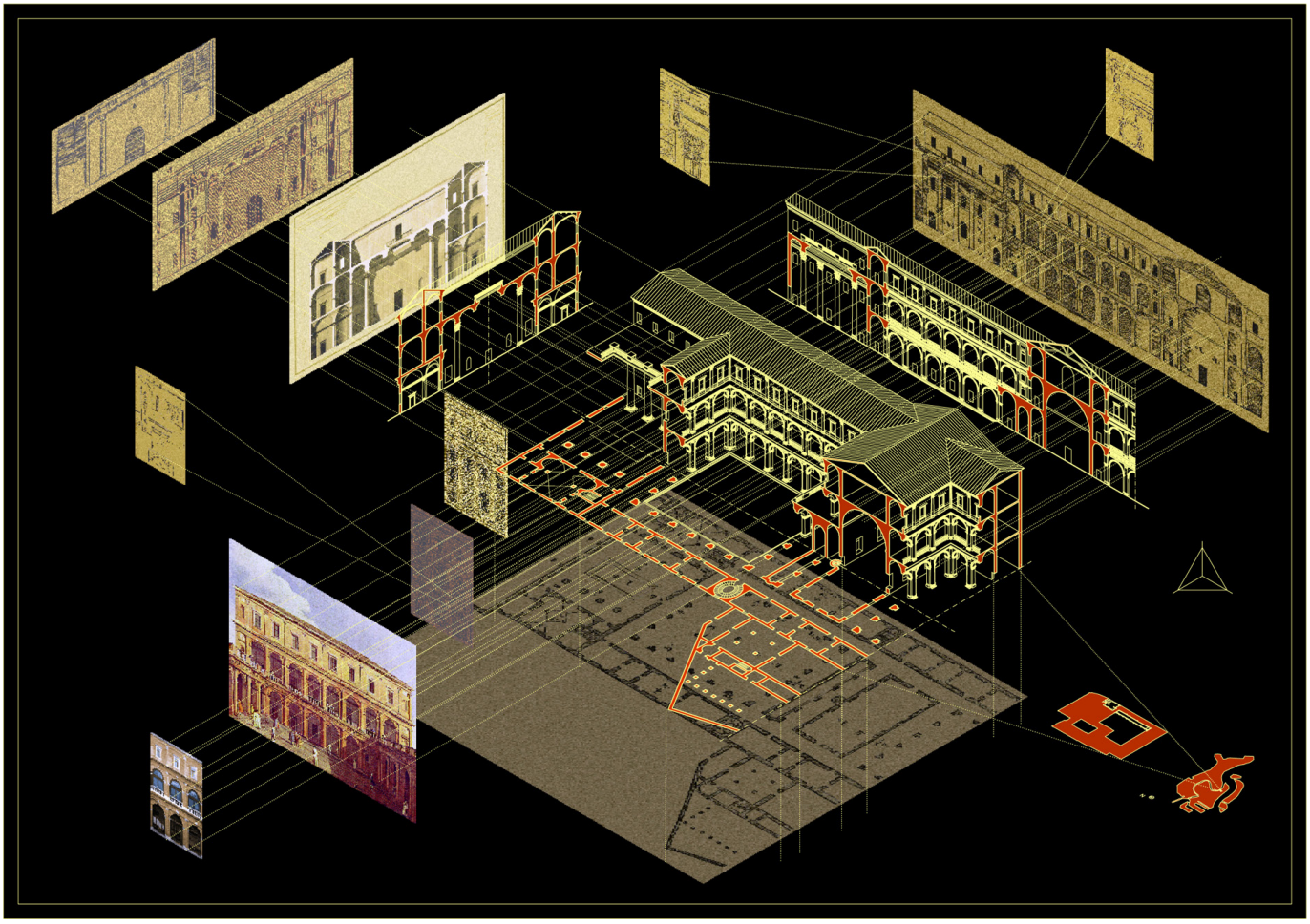
To give solution to these problems, CISAAP activated **Digital Palladio** project in 2002 with the aim to digitalize the whole Palladio's works documentation 35.

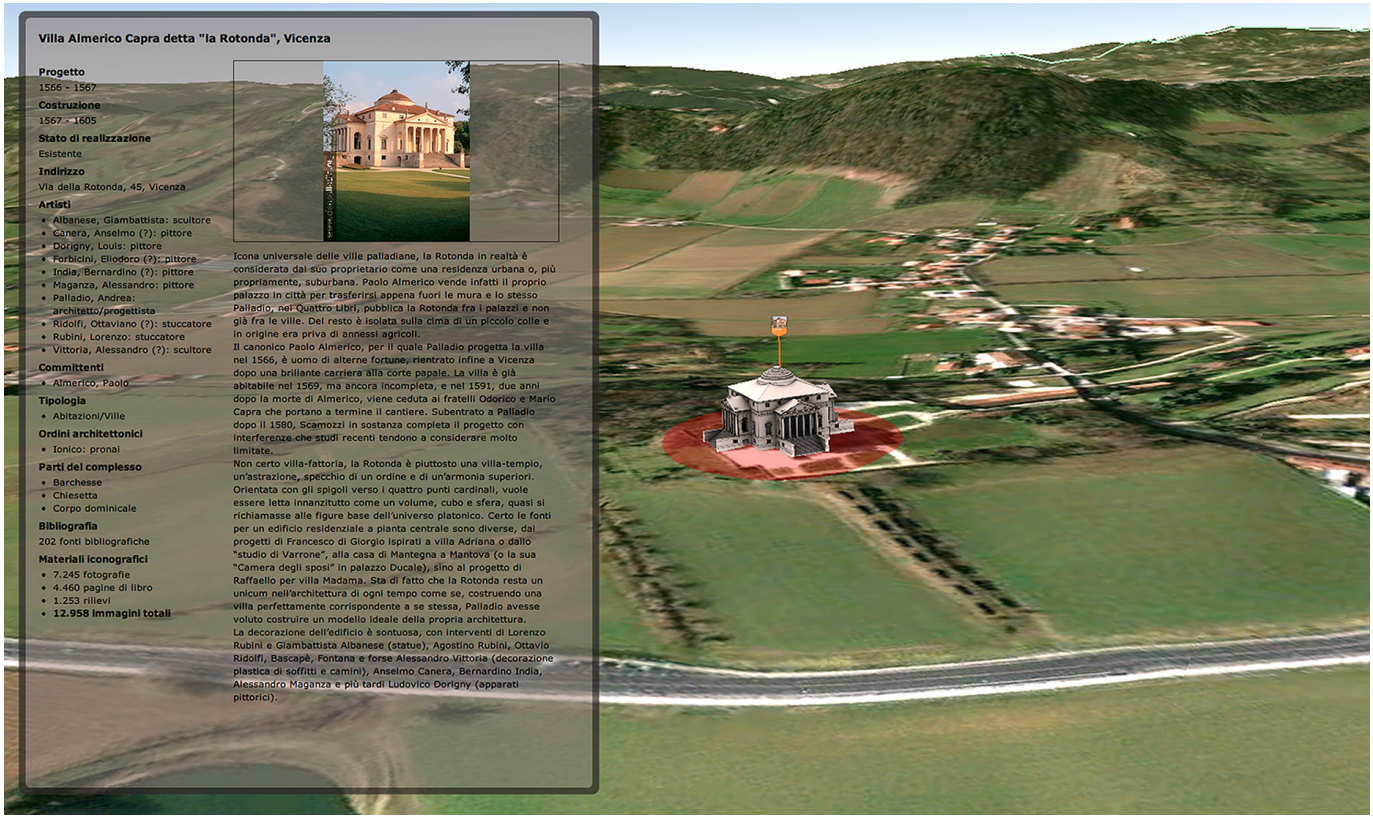
■ 33
Alberto Sdegno, Digital Palladio, Venezia 2005.

■ 34
Paolo Clini, Andrea Palladio. Per un catalogo critico dei rilievi. Storia e prospettive, in: Palladio 15208–2008 – II simposio del cinquecentenario, Venezia 2008, pp. 405–412.

■ 35
Guido Beltramini, Marco Gaiani (eds.), Una metodologia per l'acquisizione e la restituzione dei giacimenti documentali dell'architettura. I materiali per lo studio di Andrea Palladio, Milano 2003.

□ 12
Digital reconstruction of the on Convento della Carità in Venezia and iconographic sources (Alberto Sdegno)





☐ 13
Andrea Palladio – 3D Geodatabase: interface with a descriptive card
(Marco Gaiani)

Mainly, CISAAP launched in 2010 the **PALLADIOLibrary** project [36], a new Information System (IS) that, using new information technologies now available to all, aimed at the unification and display of all the key materials for understanding and appreciating Andrea Palladio's work.

The core application of **PALLADIOLibrary** is **Andrea Palladio – 3D geodatabase** (AP3D), a complete 3D web geo-database based on GoogleEarth [37], where 3D models rendered in real-time support the whole IS [13]. The application was conceived as the preferred interface of the Palladian database from different output devices and working at different levels of iconicity, giving an easily and user-friendly access to individual buildings and whole information system to different types of users: tourists, architecture historians, architects, curators, and managers.

The most complex issue faced in the development of AP3D was the construction of the 3D models, core of the representation and description of Palladio works. To solve this problem, a new standardized process was developed to construct, manage and visualize the 3D models, keeping a substantial homogeneity of representation and data quality and ready to be used by different operators and researchers at different places and times.

■ **36**
Guido Beltramini, Marco Gaiani, (eds.), Palladio Lab – architetture palladiane indagate con tecnologie digitali, Vicenza 2012.

■ **37**
Micheal T. Jones, Google's Geospatial Organizing Principle, in: Computer Graphics and Applications, 27, 27 (4) 2007, pp. 8–13.

The evolved pipeline is based on three mutually linked modeling aspects (subdivisions into literally defined and / or constructed parts and visualization) that allow the construction of high-definition models, their classification, and the allocation of additional information to each architectural element, besides the geometrical-dimensional details. 3D models could be obtained from multiple and sometime integrated sources and technologies: 2D drawing plot of manual survey, photogrammetry, laser scanners 38. Finally, we focused on the quality procedures assessment to ensure consistency and reliability of data throughout the whole pipeline, as well as a new semantic reality-based structure.

Semantic construction method used is basically described in Apollonio et al. (2010) 39 integrated with the De Luca observations 40; it refers to the real built object and can identify highlights and describe not only the scheme but also the constructive rules.

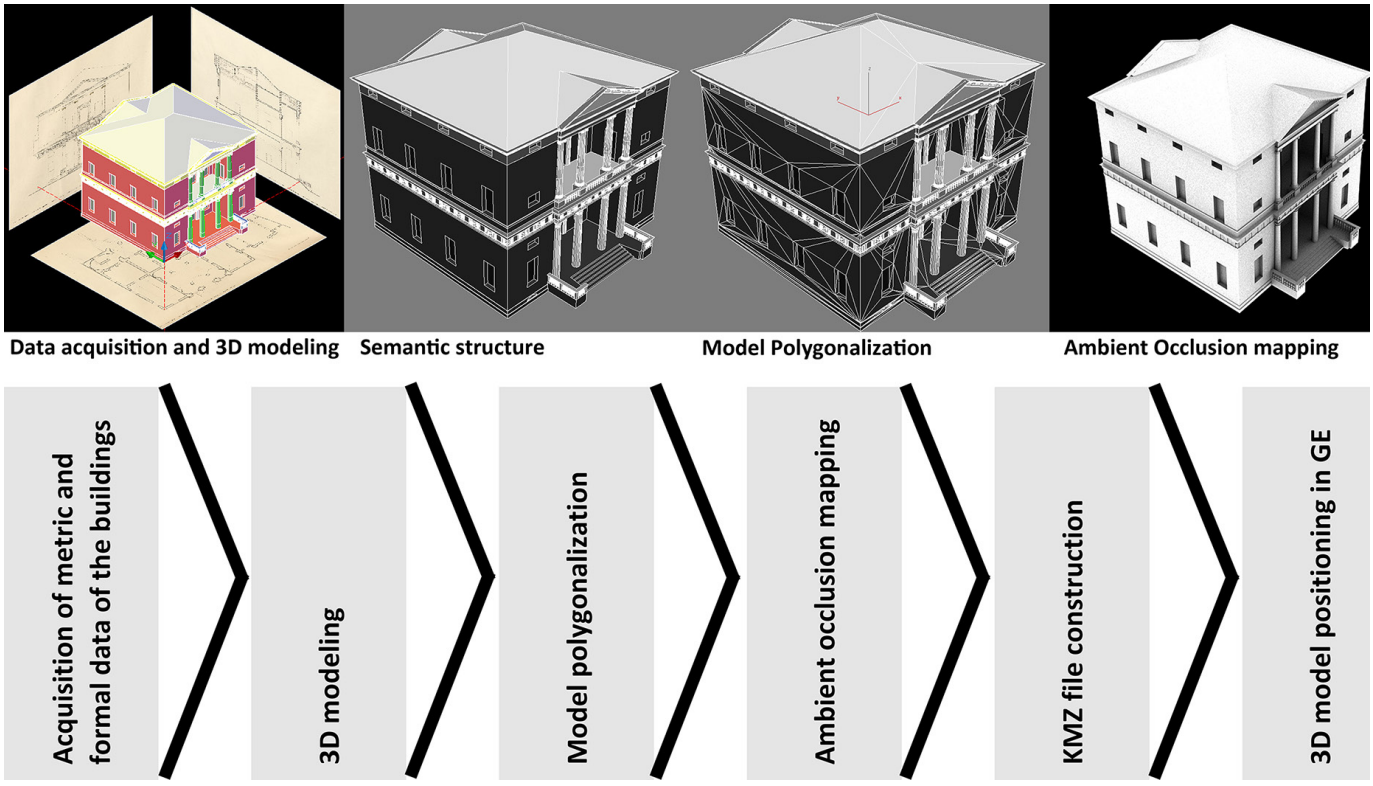
■ **38**
Fabrizio I. Apollonio, Simone Baldissini, Paolo Clini, Marco Gaiani, Caterina Palestini, Camillo Trevisan, The PALLADIOlibrary geo-models: an open 3D archive to manage and visualize information-communication resources about Palladio, in: ISPRS Archives, XL-5/W2, 2013, pp. 49–54.

■ **39**
Fabrizio I. Apollonio, Cristiana Corsi, Marco Gaiani, Simone Baldissini, An Integrated 3D Geodatabase for Palladio's Work, in: The International Journal of Architectural Computing, 8, 2010, pp. 107–129.

■ **40**
Livio De Luca, Methods, formalisms and tools for the semantic-based surveying and representation of architectural heritage, in: Applied Geomatics, 6 (2) 2014, pp. 15–139.

The final visual appearance of 3D models was conceived as a reinterpretation of the Palladian graphics evolving the contour techniques employed for the engraved plates of its treatise, excellent for 2D drawings to a solution reflecting the Palladian **adumbratio** more appropriate for the 3D visualization. AP3D 3D models are rendered using the Ambient Occlusion (AO) shading technique. 41 14

■41
Martin Knecht, State of the Art Report on Ambient Occlusion, TR, Wien 2007.



□14
Andrea Palladio – 3D geodatabase: 3D Model Construction Pipeline (Marco Gaiani)

51 high resolution semantic 3D models were made resulting as an extensive Palladian landscape able to be continuously updated with the advancement of studies. Many of the fifty-one 3D models were constructed starting from the so-called **Corpus dei rilievi delle fabbriche palladiane** drawn up in the 70s by Andrei and Ewa Soltan and Mario Zocconi. Drawings consist of a set of tables at different scales depending on the type of representation and detail (1:100 – 1:10). The 3D models of the Venetian churches (San Francesco della Vigna, San Pietro di Castello, San Giorgio Maggiore and Redentore) were made from an integrated laser scanner and photogrammetric survey carried out by the IUAV in Venice. The 3D models of Villa Valmarana in Vigardolo, Villa Trissino in Meledo, the wing of Villa Thiene in Cicogna, the bridge on the Tesina in Torre di Quartesolo and the Ponte Vecchio in Bassano, are the result of a new surveying method based on **all in one** instruments, and the integration of spherical panoramas photogrammetric and laser scanning data. 42 15

■42
Marco Gaiani, Fabrizio I. Apollonio, Paolo Clini, Ramona Quattrini, A mono-instrumental approach to high-quality 3D reality-based semantic models application on the PALLADIO library, in: 2015 Digital Heritage, Granada 2015, pp. 29–36.

☐ 15
Andrea Palladio — 3D geodatabase: a mono-instrumental approach to high-quality 3D reality-based semantic models (Marco Gaiani)

The use of 3D RTR techniques, enabling real-time side-by-side visualization comparison and interpretation of different variants and solutions, introduce new analysis and interpretation techniques of architecture exploiting two separate but complementary directions.

The first involves photorealistic images using global illumination rendering techniques; nothing more than a progress of Renaissance painting techniques and, to a certain extent, a continuation of the desire of 15th and 16th Century artists and intellectuals to investigate the world and nature using the drawing.

The second direction is the use of rendering for data visualization and involves a work more interpretative than philological, based on the idea of simplification rooted in the **model construction** operations.

The use of interactive consultation techniques RTR-based with the aim of comparison and interpretation of different variants and solutions was introduced in 2008 43. The application, reusing the Villa Pisani 3D models made in 1997, by means of the original construction techniques which fostered a long-term preservation, was intended to allow the real-time assessment of the differences between the three Palladio projects side-by-side and at a photorealistic quality of the image with a resolution twice of the original. 16

■ **43**
Marco Gaiani, Modelli di Palladio – modelli palladiani, in: Palladio 1508–2008, il simposio del cinquecentenario, Venezia 2008, pp. 396–400.

☐ 16
Side by side RTR visualization of two different façade solutions of Villa Pisani at Bagnolo: left, today solution, right solution from Palladio's RIBA XVII/17 drawing (Marco Gaiani)

Among several works carried out over the years using RTR techniques certainly one of better successful is the verification of the Guido Beltramini theory that the Palladio's drawing conserved in London at RIBA and classified XVII/15r represents the first nucleus of the Villa Contarini at Piazzola sul Brenta is certainly one of the most successful. 44 17

The 3D model built to demonstrate Beltramini's hypothesis 45 allows:

→ comparison between the original drawing and the 3D model;
→ analysis of the geometric and proportional features of the 3D model;
→ photorealistic visualization of the Palladio's design into the surrounding.

■44
Guido Beltramini, Andrea Palladio, Plan and elevation of a villa for two brothers (Villa Contrarini at Piazzola?), in: Charles Hind, Irena Murray (eds.), Palladio and His Legacy, A transatlantic Journey, Venezia 2010, pp. 75–76.

■45
Fabrizio I. Apollonio, Guido Beltramini, Giacomo Fabbi, Marco Gaiani, Villa Contarini a Piazzola sul Brenta: studi per un'ipotesi di attribuzione palladiana servendosi di modelli tridimensionali, in: Disegnare Idee Immagini, 42, 2011, pp. 42–55.

□ 17
Villa Contarini reconstruction based on the RIBA XVII/15r drawing: RTR visualization of the comparison between the model and the design of the façade (Marco Gaiani)

Through the semantic structure of 3D models and the use of RTR techniques, the application is not only meant to show a realistic rendered solution of Palladio's work [18], but also to visually assess the level of knowledge of each solution used to coherently construct the model, with its flaws and lacunae [19]. Semantics specifically describe: the relationship between the existing building and a 3D image of Palladio's drawing; the features and limits of the graphic framework provided by Palladio's drawing RIBA XVII/15r; possible reconstruction theories not linked to the drawing itself; the solutions that cannot be univocally solved and their possible variants; and finally, the way in which the most plausible reconstruction theory could interact with the surroundings at the time of the design.

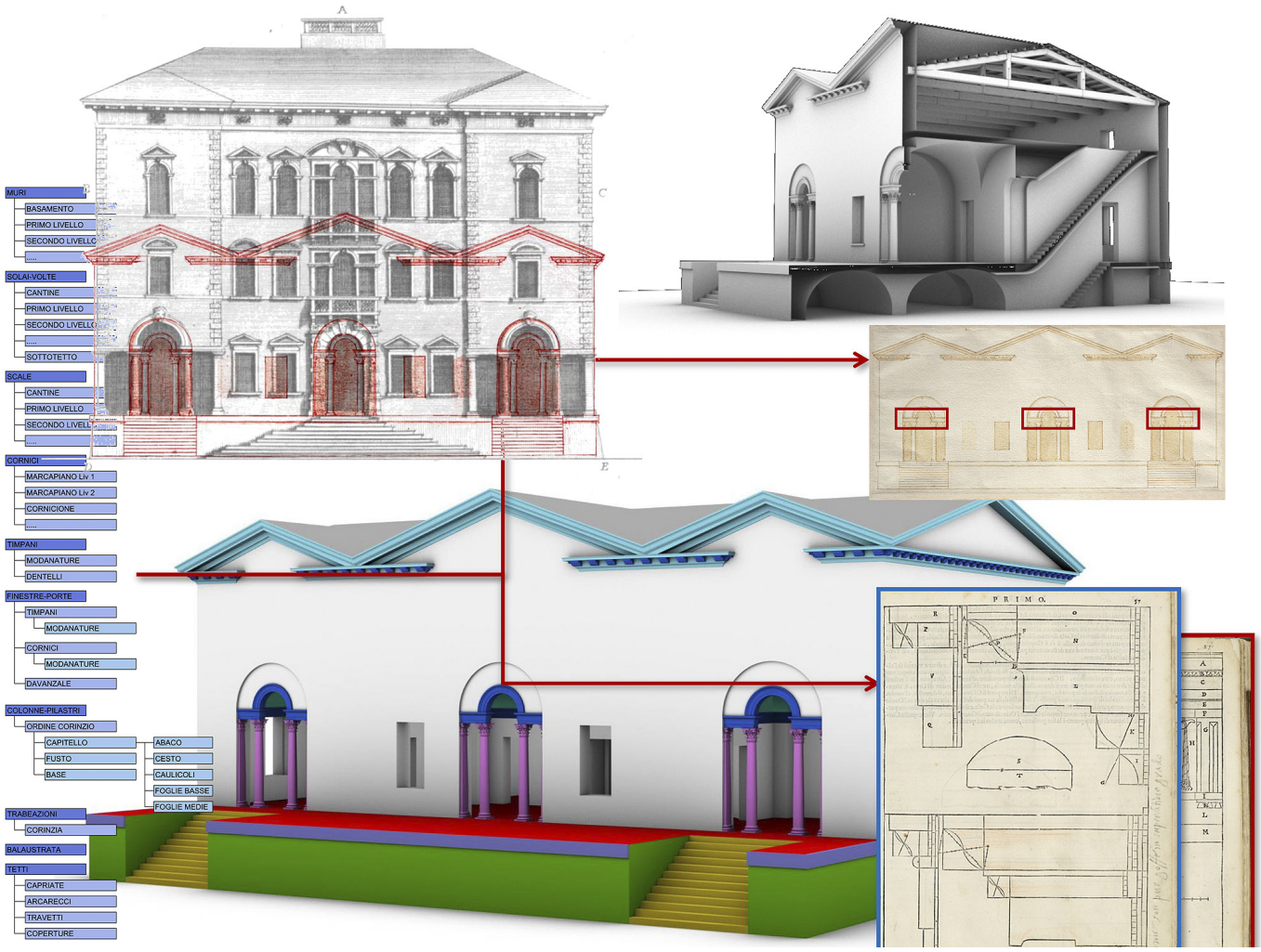
The Villa Contarini work focus also on the quality assessment procedures adopted to ensure consistency and reliability of data throughout the entire 3D model construction process, trying to face a major problem of the 3D reconstruction from multiple sources and exploiting typical proprieties of digital systems. Beyond the analysis specifically conducted (ex-post), digital systems allow the collection and systematization (ex-ante) of operations to determine the geometry of the elements that contribute to the definition of an architectural work, becoming themselves explanatory values of the geometric-formal genesis of that building.

□ 18
Villa Contarini reconstruction based on the RIBA XVII/15r drawing: RTR photorealistic visualization of the main façade (Marco Gaiani)

Further details on the data model (knowledge representation) allowing to fully understand the construction and the features of the 3D model are in this same book [46].

■46
See Fabrizio I. Apollonio, Conceptual modelling and cognitive process in 3D virtual reconstruction, in: Conference on Cultural Heritage and New Technologies, 8–10.11.2017, Vienna 2017.

□19
Villa Contarini reconstruction based on the RIBA XVII/15r drawing. The reconstruction process of Palladian drawing with its sources and face the today building (Marco Gaiani)



II.5 Conclusions

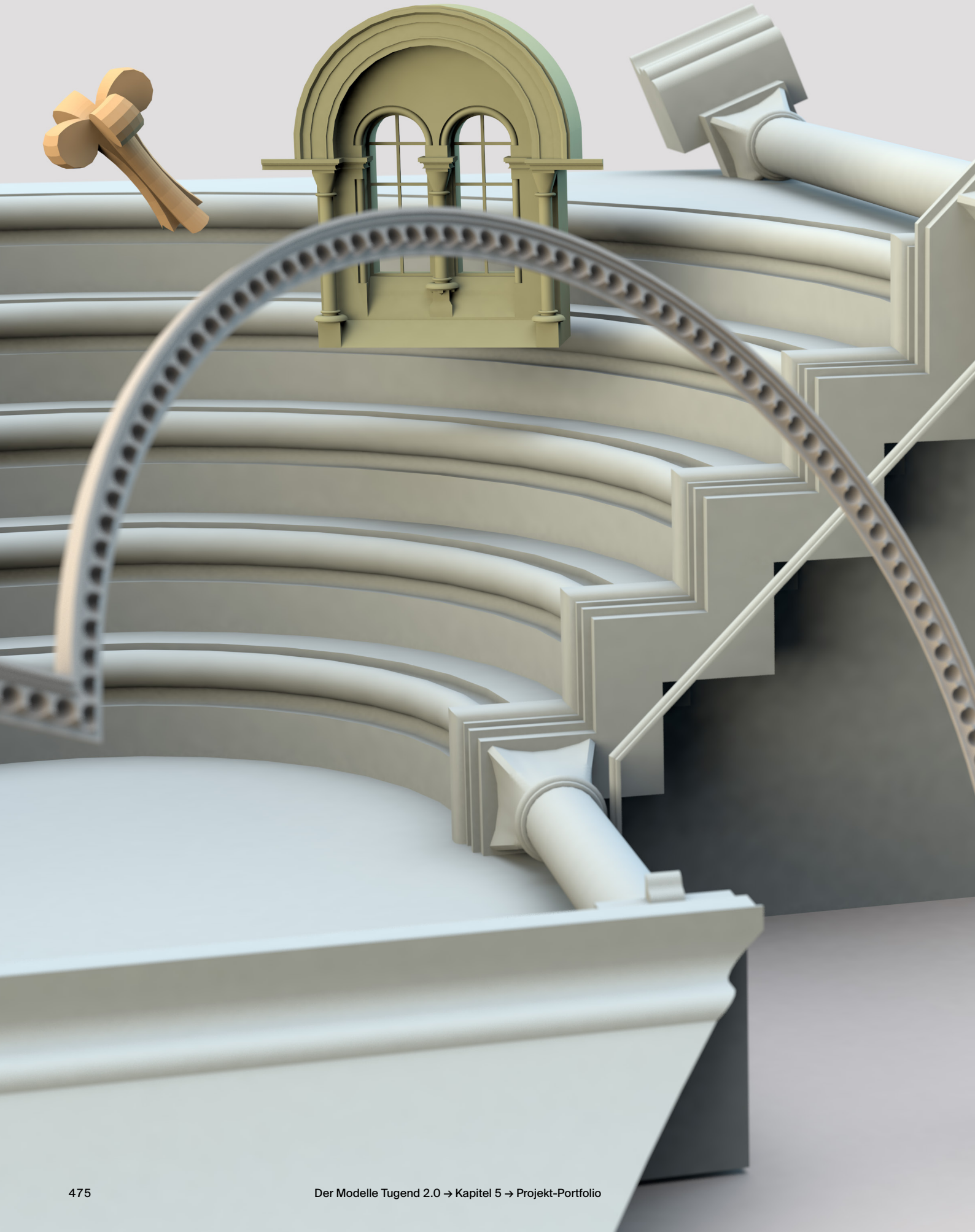
We think that William Mitchell well summarized problems, aims, goals, solutions described in this paper in one of his last essays:

»The use of three-dimensional digital modelling software, combined with rapid prototyping to create physical models, enables a more disciplined and scholarly approach to reconstruction than has been common in the past. The outcome of the reconstruction process must be a logically consistent three-dimensional object; there is no room to fudge. And a carefully structured digital model provides a framework for documenting the evidence and arguments supporting a reconstruction choice, and for showing possible variants — much as with scholarly footnotes in the editing and reconstruction of ancient texts.« 47

■47
William J. Mitchell, Larry Sass, From Drawing Collections to Virtual Museums Representing, Preserving, and Studying Architecture in the Digital Era, in: Palladio 1508–2008: il simposio del cinquecentenario, Venezia 2008, pp. 401–404.

Palladio's architecture and Palladian drawings and texts are, in this context, an extraordinary field of experimentation with their clear design thinking and their measurable and observable solutions. They provide a detailed language of architectural form, a specification by means of formal grammars, an easy interpretation, and a specific role in structuring design thinking. It's possible to observe not only specific Palladio's architecture, but to reexamine central issues of design theory giving a comprehensive and systematic treatment of the logical foundations of design thinking.

The forty years long illustrated path demonstrated these sentences from both point of view of technologies and media developed and used and of findings of investigations carried out.



Marco Canciani, Federica Chiappetta, Corrado Falcolini, Manuela Michelini, Maria Pastor Altaba, Mauro Saccone, Alice Scortecci

III. A methodology for virtual reconstruction at different scales: Environmental, architectural and archaeological heritage.

→ 3D survey, augmented reality, heritage, virtual reconstruction

This contribution focuses on methodologies for virtual reconstruction of cultural heritage in various contexts: from urban and environmental to architectural and archaeological setting. This study is aimed to make the virtual reconstruction as objective as possible, with a minimization of the level of uncertainty related to individual elements and based on scientific contributions from various disciplines: 3D Survey, Archaeological Restoration, Mathematics, Geographic information systems. According to this deductive method, virtual reconstruction hypotheses are the result of a process starting with data collecting in a database and acquired from laser scanning and photogrammetry detection, followed by the study of ancient sources, from the analysis of most recent research, and finally return the original object in a 3D model consisting of geometric entities and mesh models, relative to the individual fragments. The aim of this research is threefold: to extend the knowledge of ancient structures, strongly transformed over time, through the integration of three-dimensional identification and modeling methodologies; to offer the tools for a better readability of monuments, through virtual and augmented reality systems; to deepen the learning of case studies through the creation of multimedia databases, which can be viewed and consulted by everyone.

III.1 Introduction

The preservation of artworks and sites belonging to the cultural heritage, more and more at risk of destruction or abandonment due to natural or manmade events 01, increasingly requires the development of a methodology for the acquisition, elaboration and interpretation of data which should be not only scientifically validated but also easily achievable and replicable in any context. Starting from the London Charter in 2009, where a clear definition of data, metadata and paradata was given, many recent studies have also focused on the traceability of the data source, the degree of uncertainty that specific data can have and the transparency of the data procedures 02.
Based on these considerations, our research has been directed to the definition of a method that would link 3D models to a database that would gather all available data. Thanks to a multidisciplinary approach involving several scholars from various scientific fields, the research has been able to address many aspects of virtual reconstruction, from methodological to more specific and application issues.

■01
Canciani, Spadafora, Farroni, Flavio Mancini, Rinalduzzi &Saccone 2017, pp 75–83.

■02
Bentkowska-Kafel, Denard & Baker 2012 and Apollonio, Fallavollita & Giovannini 2015, pp. 189–194.

III.2 Related works

In these late twenty years, the interest for virtual cultural heritage has arrived to the point that a huge number of proposals of virtual reconstruction have been developed. Based on digital technology, those proposals have contributed to the enrichment of the physical experience of the real monument, archaeological site or artefact by the addition of information or objects not really tangible.

In the Italian context, these several implementations have the common purpose to obtain a user friendly virtual product, but differ in the outcome, among which: 2D reconstructions, il Museo Virtuale della via Flaminia antica 03; 3D reconstructions with fix point of observation, Villa di Livia 04, L'Ara com'era 05; 3D reconstructions, spatially navigable, Quirinale 3D VR 06, and, for the small-scale object, The David restoration project 07.

Among the initiatives undertaken at the international panorama, who use 3D models for virtual reconstruction, and develop this new dual path of research, that concerns not only the multimedia characteristics of the final product and the advanced technologies used to obtain it, but also the entire process of reconstruction, we can find several projects comparable to those **made in Italy**: the cases of Rome Reborne 08,

■03
Forte, Pescarin, Pietroni, & Rufa, 2006, pp. 189–196.

■04
Forte 2007.

■05
L'Ara com'era is a project promoted in 2016 about the Ara Pacis by Roma Capitale, Assessorato alla Crescita Culturale – Sovraintendenza Capitolina ai Beni Culturali.

■06
Quirinal 3D VR is a software for the virtual navigation at the Palazzo del Quirinale, realized by Digital Lighthouse in 2016.

■07
Callieri, Cignoni, Ganovelli, Impoco, Montani, Pigni, Ponchio & Scopigno 2004, pp.16–21.

■08
Dylla, Frischer, Mueller, Ulmer & Haegler 2009, pp. 62–66.

Nantes en 1757 09 and Virtual Williamsburg 10 are focused on the creation of navigable 3D digital models, or Virtual Sarmizegetusa 11 that has also the aim to develop multimedia applications that involve the upgrade of the visitor experience, while enabling a better comprehension of the archeological remains.

In this context, our research, carried out by a series of different studies, has highlighted the need of a specific methodology as rigorous and scientific as possible based on a hierarchical classification of the reconstruction models by using a standardized vocabulary. Particularly, in architectonical and archaeological field, the reconstructions have availed themselves of the classical architectonical orders, starting with Vitruvio (Vitruvio book III, 3, 10–13 and book IV, 1, 7; 11), through the studies of XV's ancient architecture, to arrive to recent studies of codification of the terminology used in archaeological areas 12.

In this way, the 3D model of virtual reconstruction is divided in sub elements, related between them and arranged in a hierarchical tree structure, matched with a corresponding structure of database, organized in assemblies and subassemblies.

We can find a lot of research with the aim to create **a semantic description models**, as described by L. De Luca 13, and equally many researches, derived from the studies of Harris 14, which describe a wall's stratigraphy using a matrix. In this context, fits perfectly the research project of the Castel of Shawbak 15, whose stratigraphy data, that come up from the archaeological analysis and 2D and 3D models, are linked to an archaeological database, which reaches the single element, defined as **atomized** informative unit.

Some application experiences, developed in recent years, have allowed us to refine this methodology and have been a valid test sites, in particular: in an urban context, the experience of Villa Adriana in Tivoli 16 and of the Aurelian Walls 17, in the field of archaeology, the study of The Titus's Arch at Circus Maximus 18 19, Latina Gate and Castro Pretorio at Aurelian Walls 20.

■09
Billen et al., 2012, pp.19-26.

■10
The project Virtual Williamsburg was born in 2008 from the collaboration of IAHT (Institute for Advanced Technologies in the Humanities) at the University of Virginia, and the Colonial Williamsburg Foundation (CWF).

■11
Virtual Sarmizegetusa, Romania (2013–2016). A project result of the collaboration between the National Museum of History of Transilvania (MNIT) and the Cultural Heritage and Applied Technologies Institute (ITABC) of the Italian National Research Center (CNR) that have organized several missions during the years 2013–2016, that have taken into consideration different study-cases of digitalization of antique architecture using non invasive techniques in the Sarmizegetusa Ulpia Traiana archeological site.

■12
Batley 2005.

■13
De Luca, Véron & Florenzano 2007, pp. 181–205.

■14
Harris 1989.

■15
Drap, Seinturier, Chambelland, Gaillard, Pires, Vannini, Mucciotti & Pruno 2009, pp. 320–328.

■16
Canciani, Chiappetta, Michelini, Pallottino, Saccone & Scortecci 2014, pp. 129–136.

■17
Canciani, Michelini, Saccone, Scortecci & Zampilli 2017, pp. 193–207.

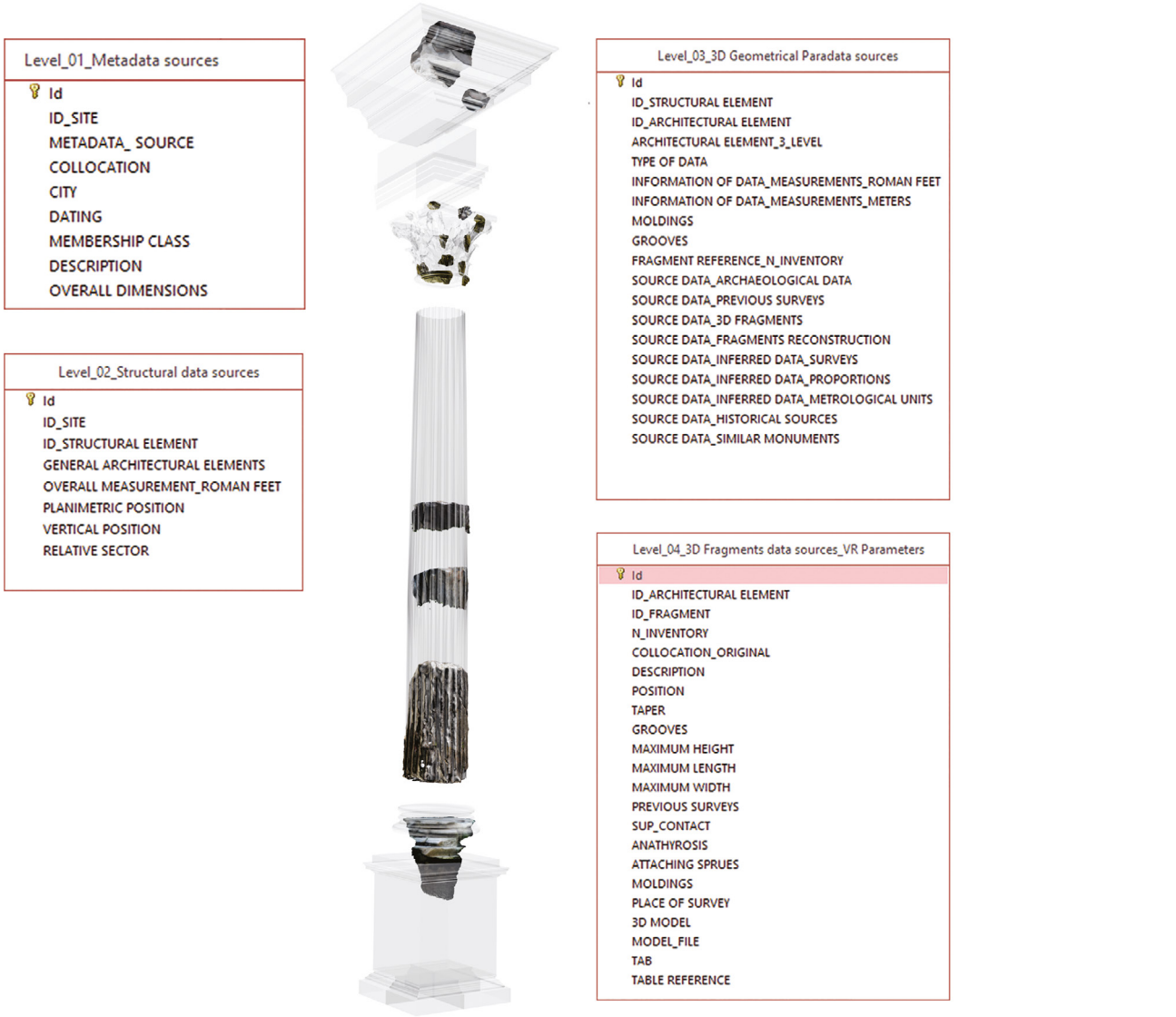
■18
Canciani, Falcolini, Buonfiglio, Pergola & Saccone 2013, pp. 61–66.

■19
Canciani, Falcolini, Buonfiglio & Pergola 2014, pp. 393–412.

■20
Canciani, Persiani, Saccone & Zampilli 2017, pp. 209–231.

III.3 A structured method for virtual reconstruction

This study aims to develop a procedure of Virtual Reconstruction (VR) in line with the latest researches, based on the gained experiences and, if possible, in a more structured form. In our method, the data are divided into two groups: the first group refers to 3D objects and their specific elements (mesh models, related to archaeological data, and geometric models, related to reconstruction data), positioned according to a unique spatial coordinates system based on a chosen reconstruction hypothesis; the second group concern a database, which collects all the data (metadata e paradata). 01



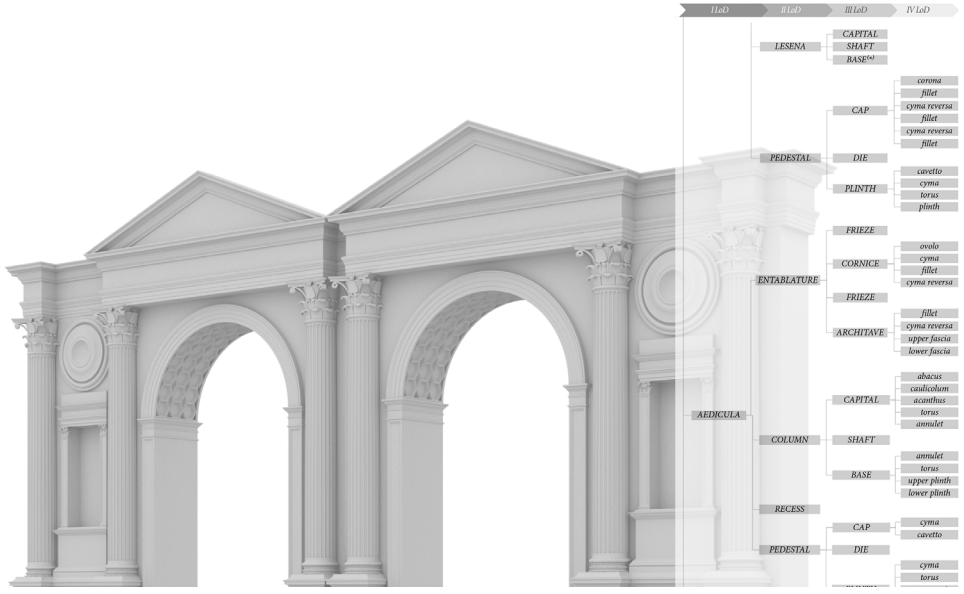
☐ 01
A 3D model of column subdivided by entablature, capital, shaft, base and plinth and the corresponding structure of database, subdivided in 4 levels of detail. (M. Canciani)

This structure of database, according to a similar one described in 21, is branched into four hierarchical levels:

1. In the first level the study object is filed according to general metadata sources (titling location, typology, description, dimension etc.) and shows the main historical and documented references (such as texts, images, drawings, etc.), which can describe general features and that can become a morphological or dimensional data).
2. In the second level, the individual elements are classified according to their specific peculiarities (original position, overall size, description, belonging to groups of main elements etc.). The archeological data are acquired by an acquisition through integrated survey (with laser scanners, photogrammetric, topographic, traditional survey) concerning the whole site and the particular elements.
3. In the third level, the more specific parts of the case of study, belonging also to the previous level, are classified bringing the main paradata sources (allowable minimal and maximal dimensions, in situ and original position, proportion, metrological verification etc.) to reconstruct the 3D geometrical original model of each element by procedures and algorithms developed by the working group, as briefly described above. The results of this specific processing contribute to improve and adjust the virtual reconstruction model. These results also allow to track the source from which the data are derived and the degree of uncertainty of each element. 22 02
4. In the fourth level, every 3D element (or mesh model) of the archeological fragments is described by those features which are useful for virtual reconstruction (VR parameters). An analysis of paradata sources (geometrical, analytical, proportional, metrological, constructive etc.) is realized, comparing the individual parts and their connecting elements, carried out through the database queries.

■21
De Luca, Véron & Florenzano 2007, pp. 181–205.

■22
Apollonio, Fallavollita & Giovannini 2015, pp. 189–194.



☐ 02
Porta Aurea in Ravenna: a digital hypothet
reconstruction.
(E. C. Giovannini)

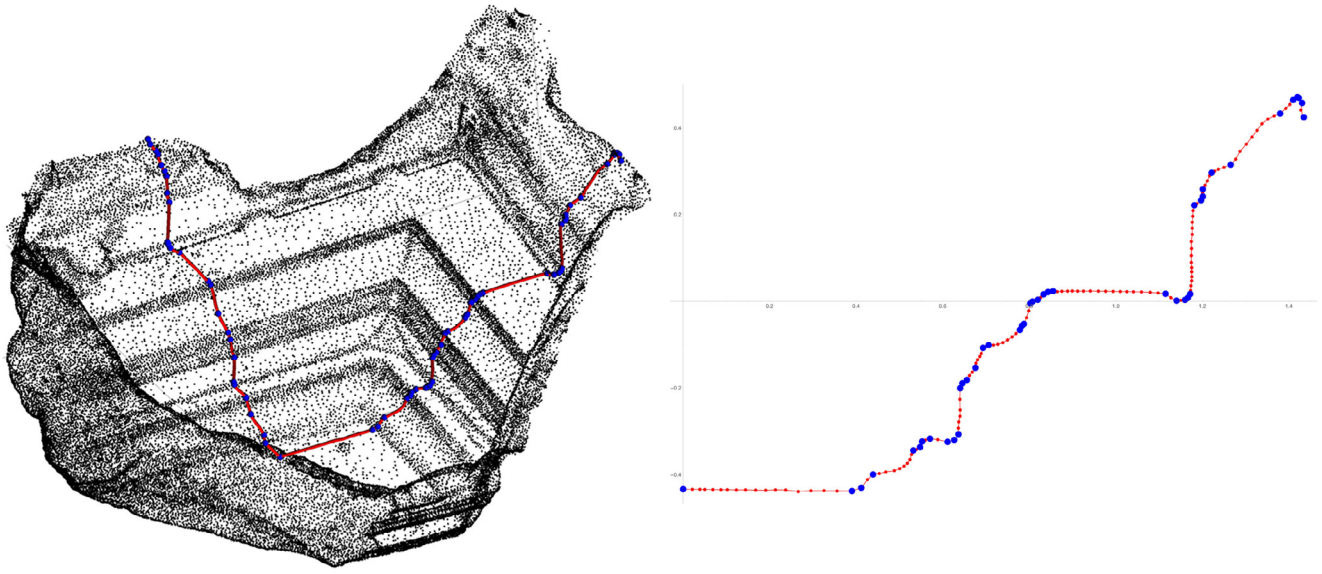
III.4 Algorithms for virtual reconstruction

Statistical and mathematical methods have been used in several steps of the procedure starting from the point clouds of the surveyed objects. We have looked for solutions of different problems such as parameterization of planar sections, best cylinder approximating a portion of a column and its high precision contour sections, segmentation based on colour or normal gradients, fracture lines extraction and their parametric representation, comparison between curves and contact surfaces for matching probability of different fragments.

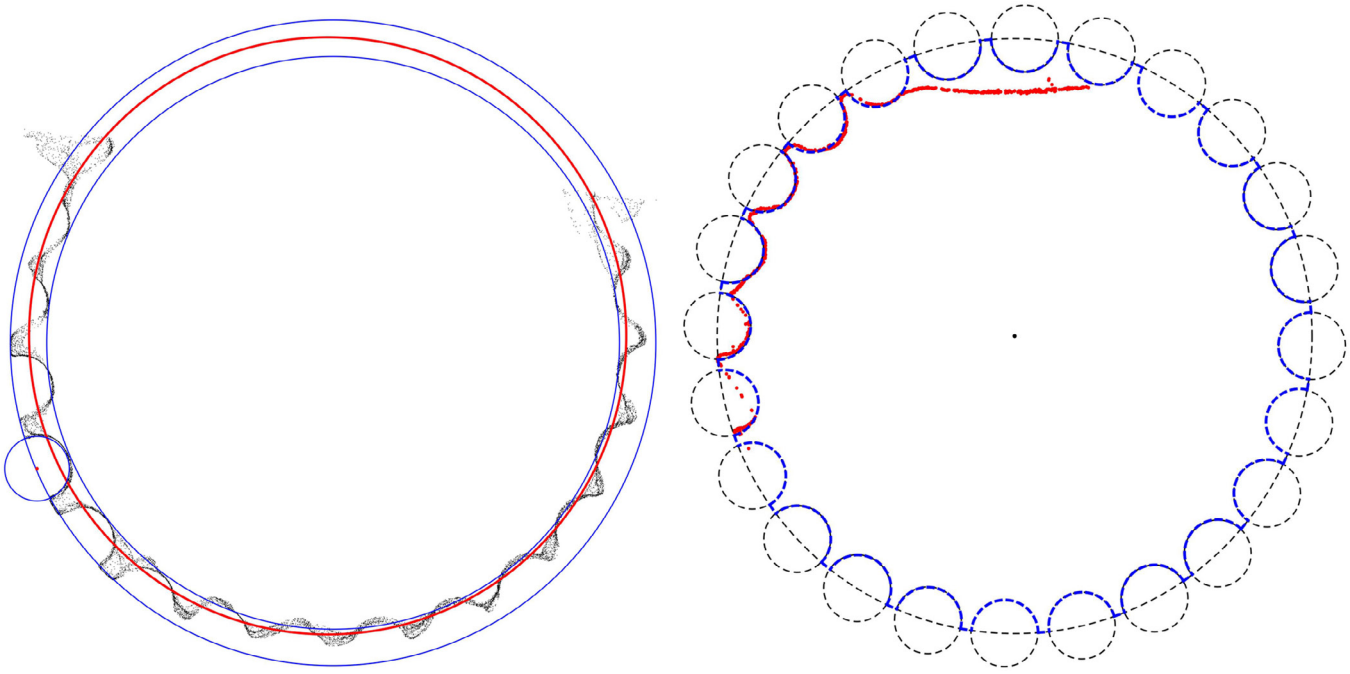
An example of the procedure to find moulding's profile of an entablature fragment 03 of the Arch of Titus: in the corresponding oriented point cloud find a relevant plane of section which optimize points selection analyzing their normal component (average normal to the closest faces of the corresponding triangulated surface) and look for a parametric curve fitting the points; then automatically select some nodal point on the parametric curve (i. e. point of discontinuity in the direction of normal vectors, inflection points etc.) allowing an automatic geometrical moulding construction which can be translated in feature elements of the database and used in virtual reconstruction procedures 3) and 4) of Section 2).

The requested orientation of the point cloud could be achieved analyzing statistical properties of nearby normal directions and checking precise alignments using specific properties and symmetry.

☐ 03
a moulding section of a surveyed entablature fragment and, on the right, its interpolating curve and automatic nodal points detection. (C. Falcolini)



Analogue procedure for the best section of a column fragment 04: in this case the optimal orientation is the result of a least squares problem to detect the best cylinder containing the fragment and the extraction of a piece-wise regular parametric curve of section enable a very precise estimation of column features on a proper scale. Comparing cylindrical projections of the point cloud with several section models, allows a very precise measure of column and flutings radii and then a possible drum reposition along the virtually reconstructed column taking also into account historical and architectural order information about the shape of a vertical section, entasis and tapering.



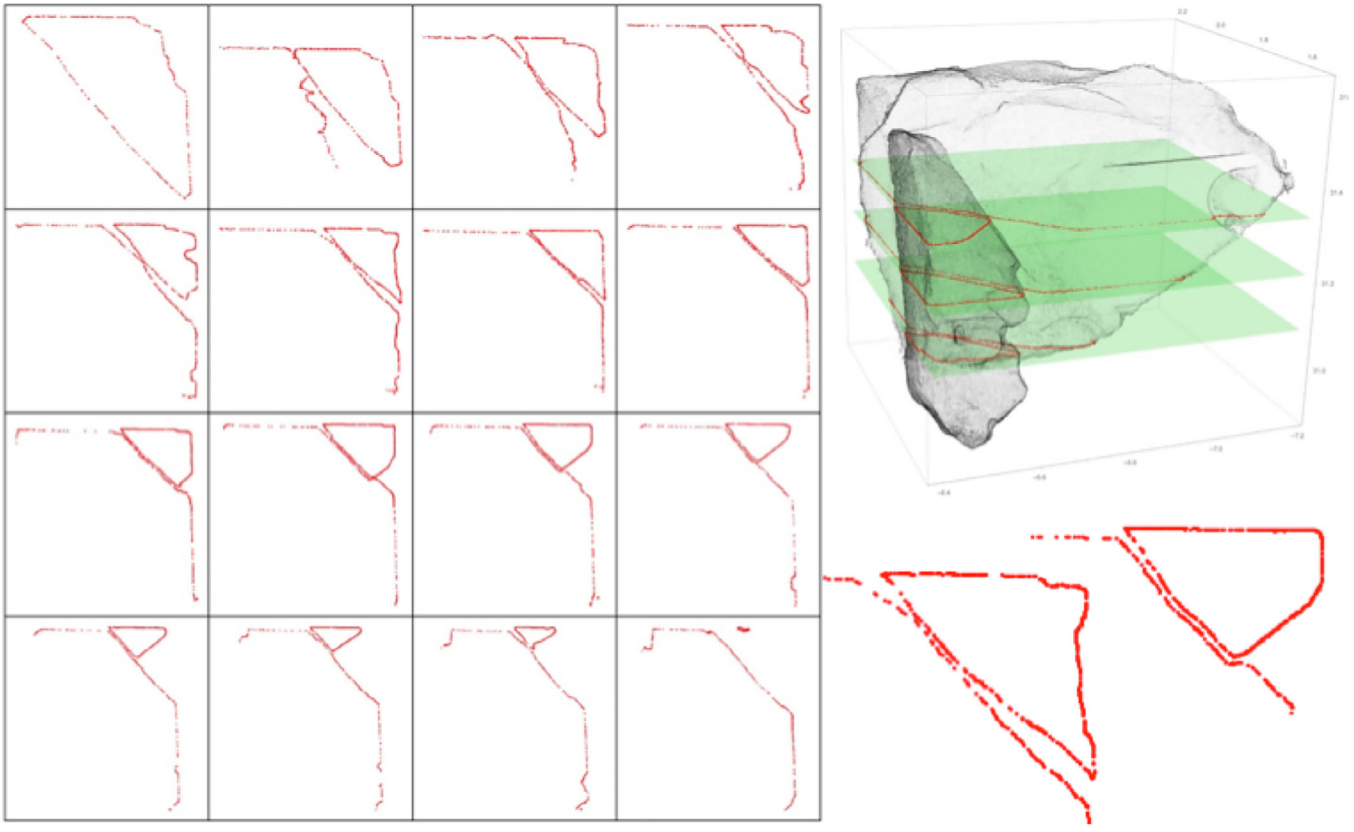
☐ 04
Construction of a column section model for two different drum fragments. The model applies, with the same column and flutings radii, to both fragments.
(C. Falcolini)

A second example is related to matching procedures for possible adjacent fragments using contact curves and surfaces: it applies to the virtual reconstruction of the Arch of Titus's epigraphy.

In the first case, we have calculated matching probability for all possible couples of fragments and since we had a given fixed plane of the epigraphy, a first rough orientation was implicit, and we selected possible adjacent pieces to test their contact surfaces.

The algorithm used parallel planar sections 05, with their parametric representation, of closer and closer position of the two fragments, carefully changing their orientation to optimize contact profiles. An exact solution was difficult to find due to the very irregular shape of the ruined fragments and to the small relative size of the final contact surface which resulted to be very irregular and not simply connected.

☐ 05
parallel planar sections of two possibly adjacent fragments of the Arch of Titus's epigraphy. On the right, two aligned pieces and their sections at minimal and maximal distance. (C. Falcolini)



III.5 The virtual reconstruction in environmental heritage: the case study of Villa Adriana

The study on Villa Adriana utilitas allowed the recovery of an important part of the value of the villa, almost unknown until some decades ago 23. The natural consequence of the Vitruvian principle is the detection of the original routes, one of the most direct tool to restore the original villa functioning.

The extension of the archaeological site required the realization of a GIS — to map the current status in order to develop various surveys through thematic cartographies — that shows the data collected from the physical inspection and from the scientific research.

This method — that produces analysis layouts both in 2D and 3D — employs a general model of the current state based on the individual buildings and the original routes (the key elements). Through the use of GIS the whole complex was examined, with the application of cognitive data — regarding each building, the ancient roads, the current street network and the other elements of the villa — as parameters of virtual reconstruction.

The graphics processing of a general plan was the basis for the identification of the ancient routes: it is a tool with the specific aim of representing all the necessary elements for the proper interpretation of the ancient project.

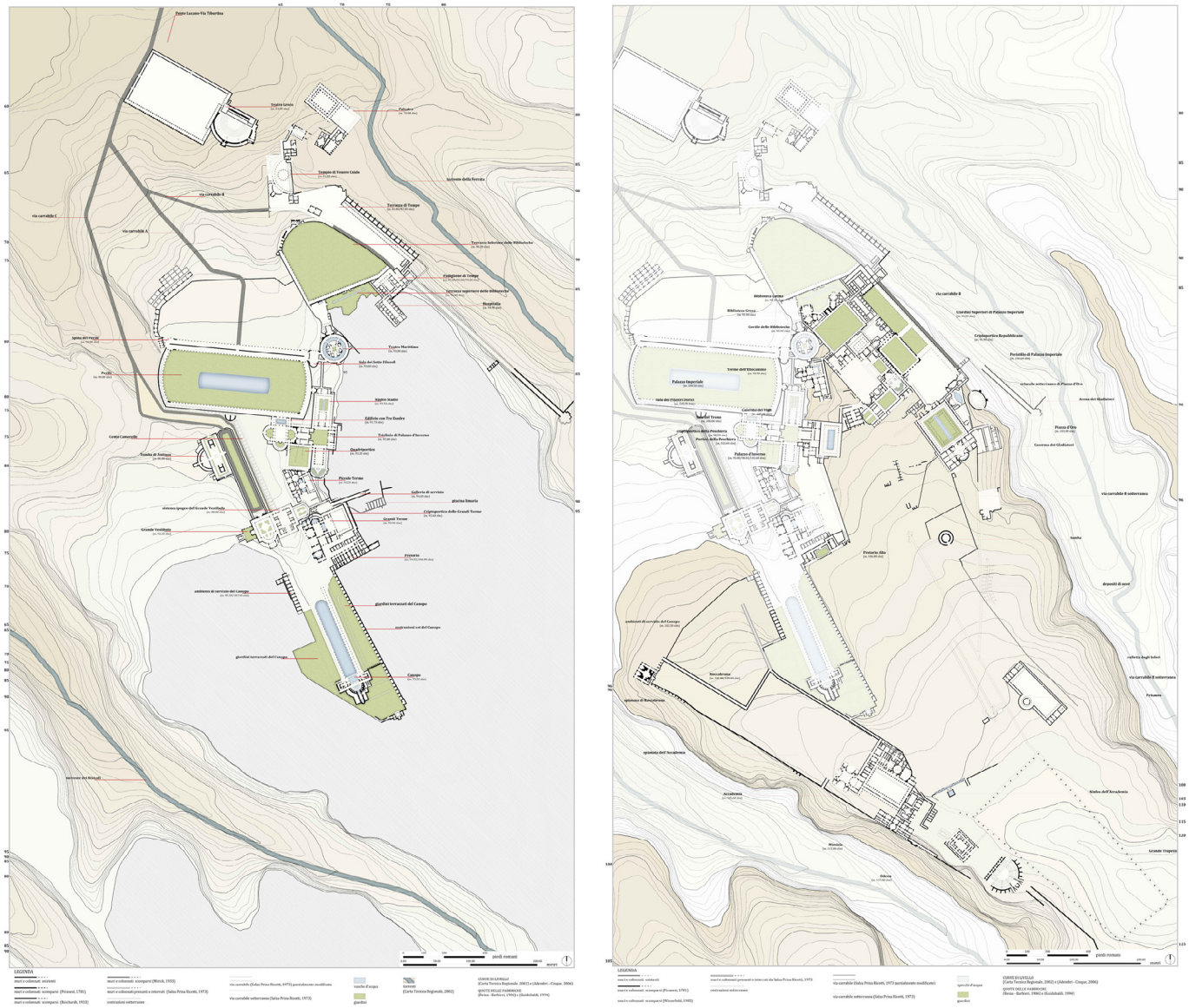
The same model was also used by M. Michelini and A. Scortecci for the redaction of the last georeferred plan 24. The new plan is outlined on a georeferred orthophoto 25 with the other graphic sources -georeferred, too. 06 07

These materials are the basis for the GIS. The virtual reconstruction required a structure divided in two series of data; the first one for the 2D and 3D objects of specific elements, rebuilt and relocated to the hypothetical position with the original orientation, in accordance with a univocal system of coordinates; the second one is organised in a semantically structured database, in reference to its relating spatial organization.

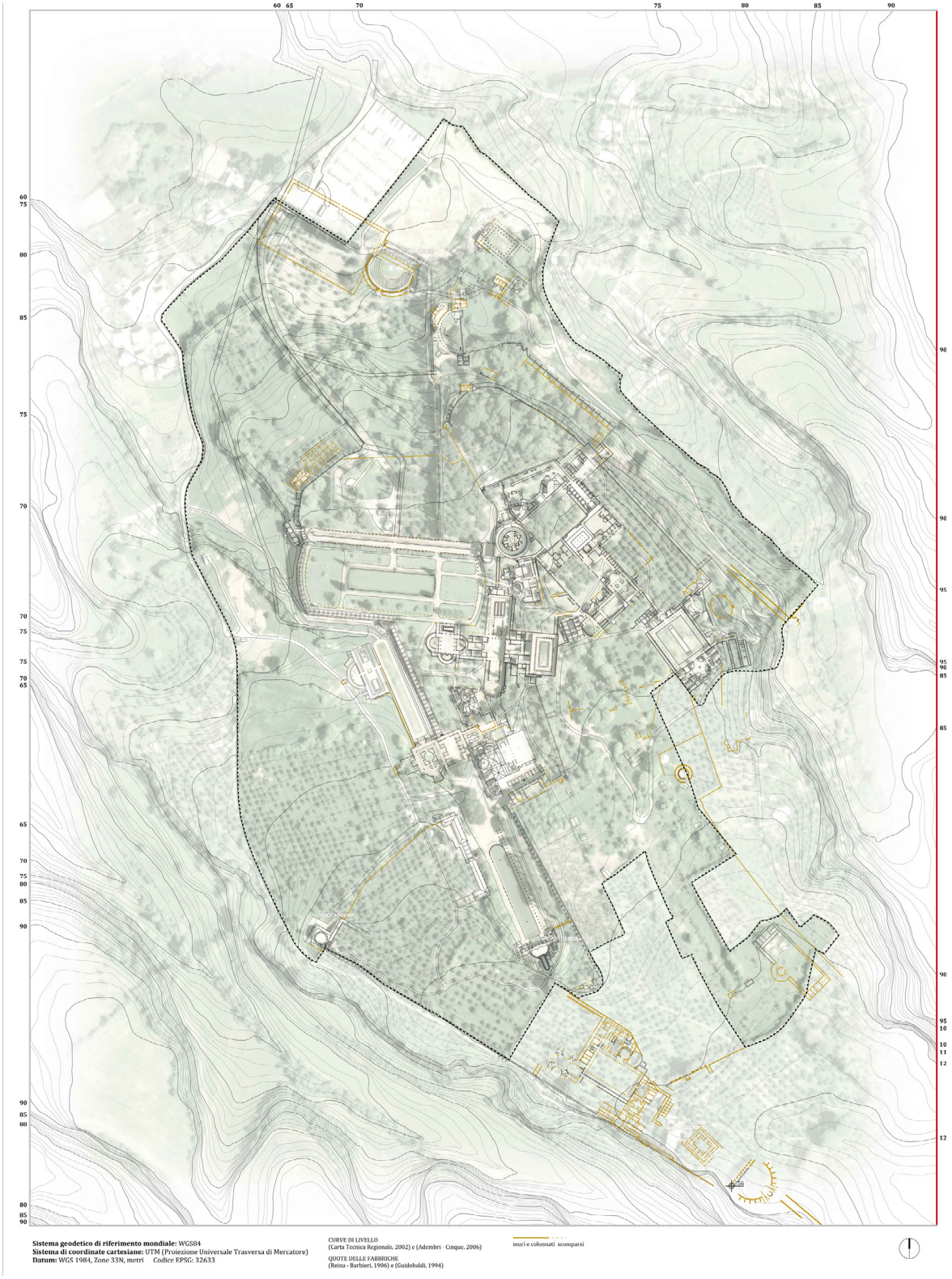
■23
Salza Prina Ricotti 1982, pp. 25–55.

■24
The survey was conducted as part of a degree thesis (University of Roma Tre — Department of Architecture, Degree thesys in Architecture — Restoration, M. Michelini, A. Scortecci, I percorsi antichi di Villa Adriana: nuovi strumenti di valorizzazione, supervisors M. Canciani, E. Pallottino, assistant supervisors F. Chiappetta, Z. Mari, M. Saccone, 2013).

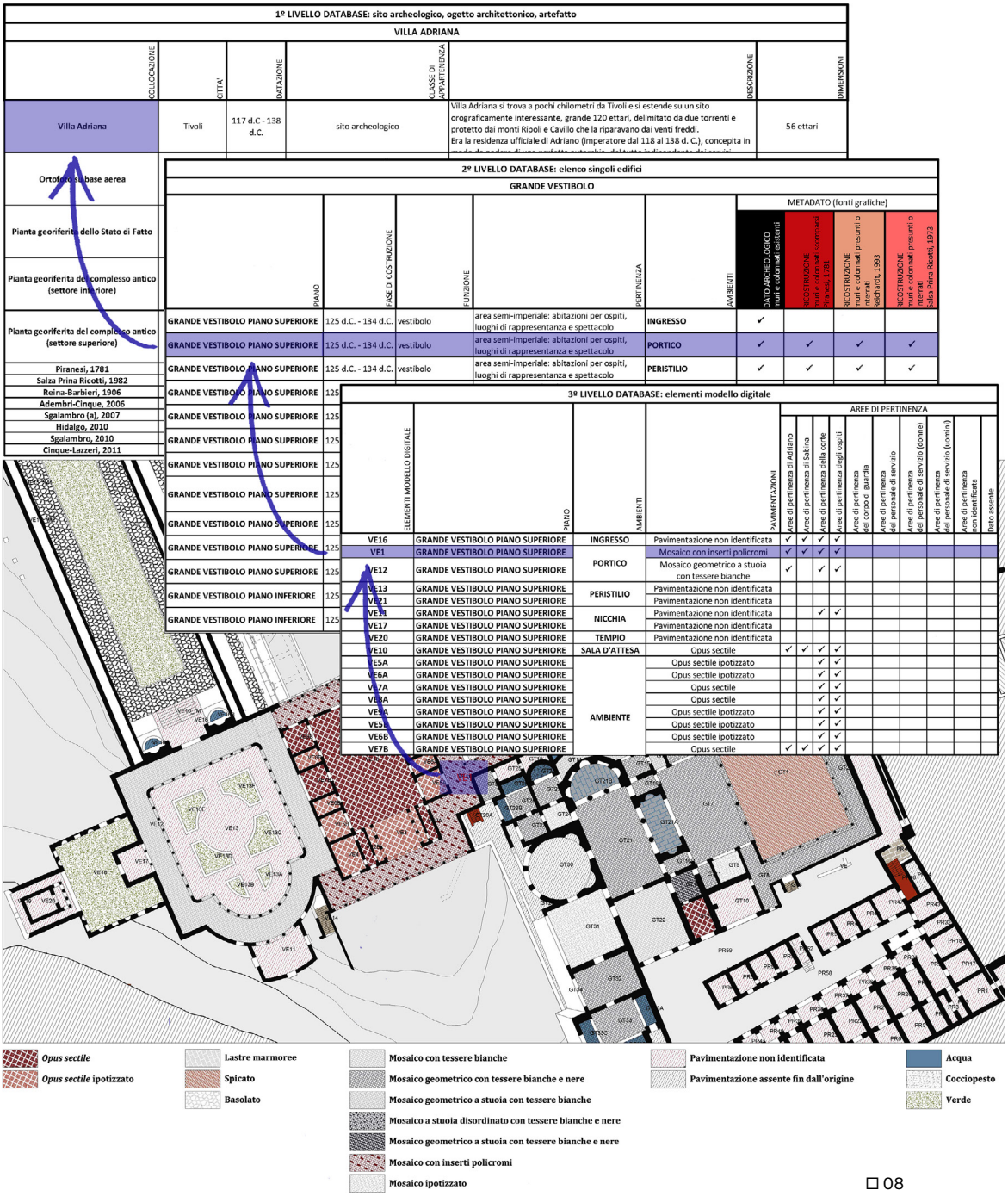
■25
Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Ortofoto a colori (part. Villa Adriana) 2006, http://www.pcn.minambiente.it/GN/.



☐ 06
Georeferred plan of Villa Adriana (lower and upper sectors). The vanished archaeological ruins here reported, the water and the vegetation derive from historical surveys and specific studies. (M. Michelini, A. Scortecci)



☐ 07
Georeferred plan of the current state of Villa Adriana. (M. Michelini, A. Scortecci)

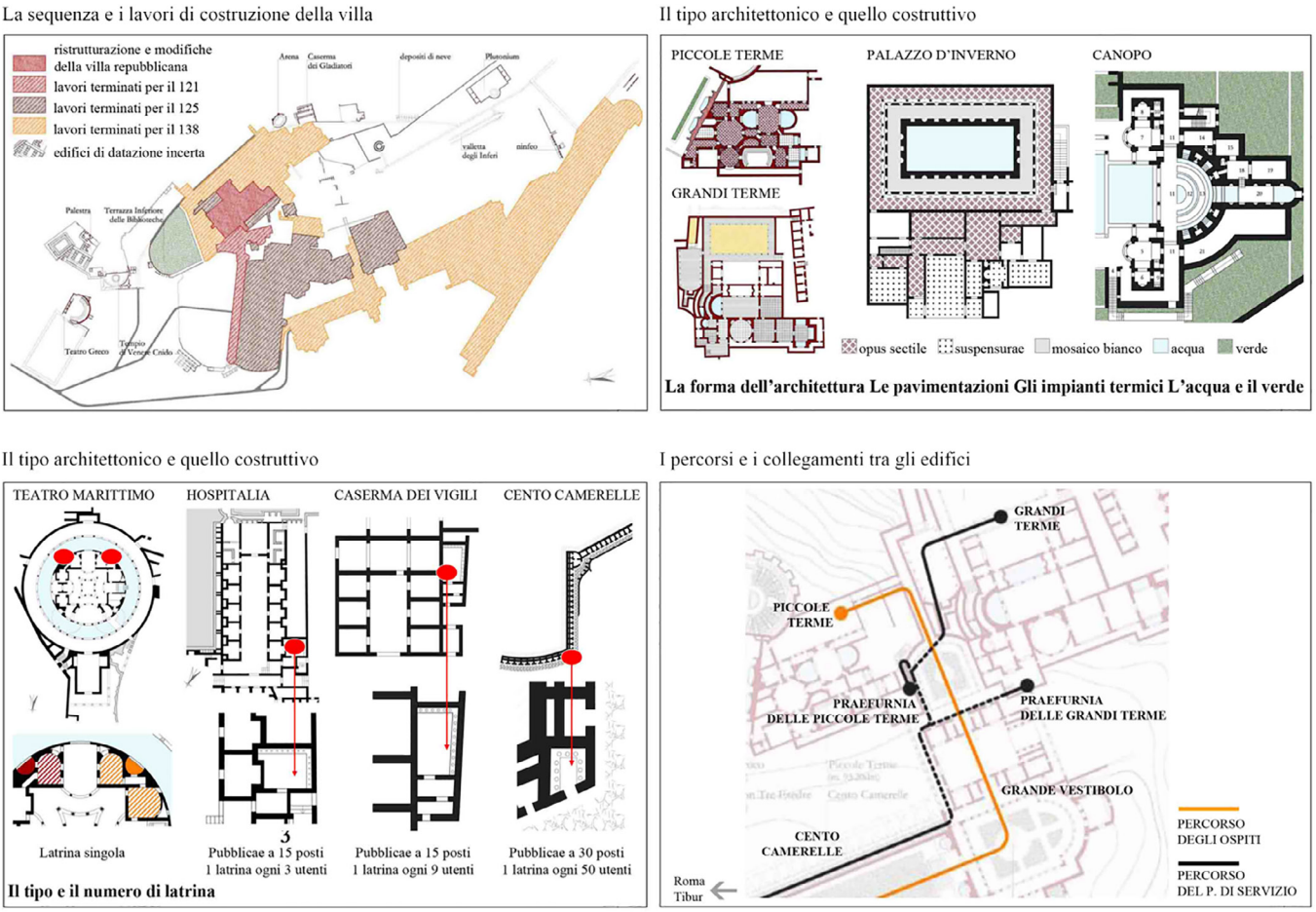


☐ 08
GIS, data structure and thematic maps.
(M. Michelini, A. Scortecci)

This structure is shaped in hierarchical levels; 1st a generic one in which the archaeological is catalogued according to the general features (titling, location, category, overall dimensions, etc.); 2nd a middle level, in which each element is described through its specific features (typology, location, description, etc.); and 3rd, in which the most important parts of the elements in the second level are classified conforming to the data useful for the virtual reconstruction (location, function, presence of helpful features for the connection of the various parts etc) 08

At the environmental scale, the individual buildings were surveyed and examined to highlight the ancient routes by the analysis of some constant VR parameters, related to functional, constructive and decorative elements, systematically compared. 26 09

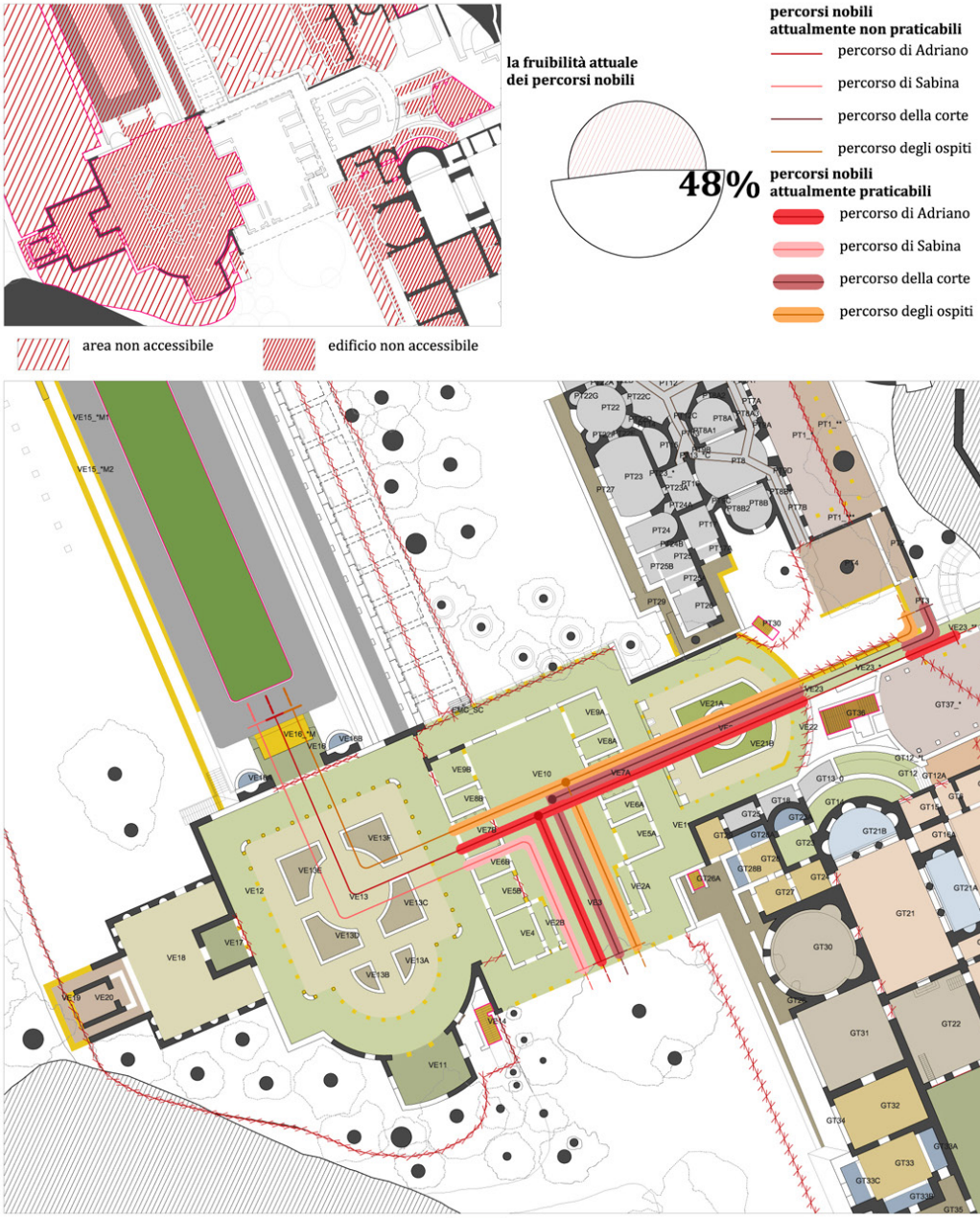
■26
Chiappetta 2008.



☐ 09
Parameters and methods employed for the identification of the ancient routes. (F. Chiappetta)

The analysis allowed the identification of the intended use of the various areas and their inhabitants: the emperor Hadrian, his wife Sabina, the court, the guests and the domestic workers.

At the architectural scale, GIS employs 2D and 3D models as bases for gathering the collected data. The detailed study concerns the Great Vestibule (Grande Vestibolo), the villa monumental entrance: multiples paths and connections unravel from this building, spread on two clear levels (the lower one, for the domestic service, and the upper one for the nobility).



☐ 10
Example of analysis made with GIS. (M. Michelini, A. Scortecci)

Nowadays, the ruins of the building lay on the most popular touristic route but the preservation condition and almost total inaccessibility diminished it to a simple passage. Therefore, GIS has been the instrument to increase the information about the site, as it has produced specific analysis regarding functions, pertinence, original pavements, preservation conditions and accessibility of the building. [10]

The last outcome from the research was the publication of a mobile application (Android and IOS) [27] in 2015. It is a simple prototype, but it includes all the potentiality of a valid tool for the proper fruition of the archaeological site. (See other bibliography) [28].

■27
Guida multimediale: i percorsi antichi di Villa Adriana, 2015. POR FESR Lazio 2007–2013. Scientific supervisor F. Chiappetta, creative designer M. Michelini, thematic specialist A. Scortecci. Production of Ohana film and music Srl.

■28
MacDonald & Pinto 1997; Mari, Reggiani & Righi 2002, pp. 16–29; Salza Prina Ricotti 2001.

III.6 The virtual reconstruction in archaeological heritage: the Arch of Titus at Circus Maximus at Rome

The project of the reconstruction of Arch of Titus at Circus Maximus takes part of the collaboration between Università Roma Tre, Dipartimento di Architettura [29] and Sovrintendenza Capitolina ai Beni Culturali [30], at the project of Requalification of the environment and enhancement of the archeological discoveries at Circus Maximus and surrounding public spaces of Via dei Cerchi and Porta Capena Square in Rome [31] [32].

The contribution of our multidisciplinary group consists on the development of a methodology that supports the virtual reconstruction; this methodology is principally based on three-dimension modelling of fragments and their connection with a multilevel database that collects different types of information.

According to the 3D survey of the different fragments, the VR parameters considered for the reconstruction are: the in-situ fragments (which are directly related to original geo-referenced coordinate system), the original orientation of the fragments, their metrological verification, the sequence of mouldings, the geometric reconstruction of their sections and the connecting elements with other fragments (anathyrosis, trace of pins, sections on the mouldings, contact surfaces). By secondary procedures and calculations, we have identified the original position of the fragments on the basis of the corresponding portion of the general 3d survey.

Then, all the specific information regarding each single fragment (general dimensions, details and specific characteristics such as mouldings, place where found, main sections, original orientation and hypothetical architectonical element of belonging) has been indexed and registered in a minor database, organized by tabs. These tabs and their contents compound the fourth specific level of the general database, which is useful to compare fragments and to find analogies between them, as well as to catalogue them in categories and relevance for the VR reconstruction. [11]

■29
The working group about Virtual Reconstruction of Roma Tre University, Department of Architecture, is formed by: M. Canciani (coordinator), C. Falcolini, M. Saccone, G. Romito, B. Mammì, M. Pastor Altaba.

■30
The working group of Sovraintendenza Capitolina ai Beni Culturali is formed by M. Buonfiglio, S. Pergola, A. Coletta.

■31
Canciani, Falcolini, Buonfiglio, Pergola & Saccone 2013, pp. 61–66.

■32
Canciani, Falcolini, Buonfiglio & Pergola 2014, pp. 393–412.

IMMAGINI	NUMERO DI INVENTARIO	FRAMMENTO	COLLOC. ORIG.	DESCRIZIONE	POSIZIONE	MODANATURE	SEQUENZA MOD.	ALTEZZA MOD.	mis.01	mis.02	mis.03	mis.04	mis.05	mis.06	mis.07	mis.08	mis.09	mis.10
77	CM432	SET_04	-	-	non *in situ*	-	xx											
80	CM437	SET_04	-	-	non *in situ*	NO	-	-										
86	CM445	SET_04	-	-	non *in situ*	NO	-	-										
47	-	F_27	BALAUSTRA / APPOGGIO	Frammento in marmo lunense	interrato	SI		xx										
99	CM88	-	ARCHITRAVE / FREGIO		non *in situ*	SI	xx	xx										
13	CM1190	-	ATTICO	Coronamentomarmo bianco lunese	non *in situ*	SI	LIS-GLD-LIS-GLD-LIS-CVT-CRN-PDN-SFT-LIS-OVL-LIS-DEN-TON-LIS-OVL	20	115	20	55	20	20	153	20	180	17	79
14	CM1191	-	ATTICO	Coronamento angolare marmo bianco lunese	non *in situ*	Si	LIS-GLD-LIS-GLD-LIS-CVT-CRN-PDN-SFT-LIS-OVL-LIS-DEN-TON-LIS-OVL	20	115	20	55	20	20	153	20	180	17	79
6	CM92	-	ATTICO	Cornice con mensola marmo bianco lunese	non *in situ*	SI	LIS-OVL-LIS-DEN-TON-LIS-OVL	17	79	17	53	30	13	56				
97	CM86	F_24	ATTICO	Frammento in marmo lunense	non *in situ*	SI	LIS-GLD-LIS-GLD-LIS-CVT-CRN-PDN-SFT	20	115	20	55	20	20	153	20	180		
15	CM1093	-	ATTICO/ZOCCOLO MODANATO	Frammento marmo bianco lunese	non *in situ*	SI	TON-GRR-LIS-TON-GRR-LIS-TOR-FSC	19	114	23	19	138	21	82	724			
17	CM82	F_02	COLONNA / BASE	Base di colonna in marmo bianco lunense	***in situ***	SI	TOR-LIS-SCZ-LIS-TON-TON-LIS-SCZ-LIS-TOR-PLT	99	20	51	10	20	20	10	77	28	124	141
20	CM1195	-	COLONNA / CAPITELLO	Frammento marmo bianco lunese	non *in situ*	NO	-	-										
21	CM251	set-01	COLONNA / CAPITELLO	Frammento marmo bianco lunese	non *in situ*	NO	-	-										
22	CM252	set-01	COLONNA / CAPITELLO	Frammento marmo bianco lunese	non *in situ*	NO	-	-										

☐ 11
Arch of Titus 4thLevel of database. Example of data tab of some of the analyzed fragments with the VR parameters. (M. Pastor Altaba).

As part of the initial phase of analysis, along with the 3d survey of the fragments, we have collected all the different historical sources that describe general and specific features of the monument. These documents are useful to recognize the architectonical elements of the arch and to place each fragment on its hypothetical original position.

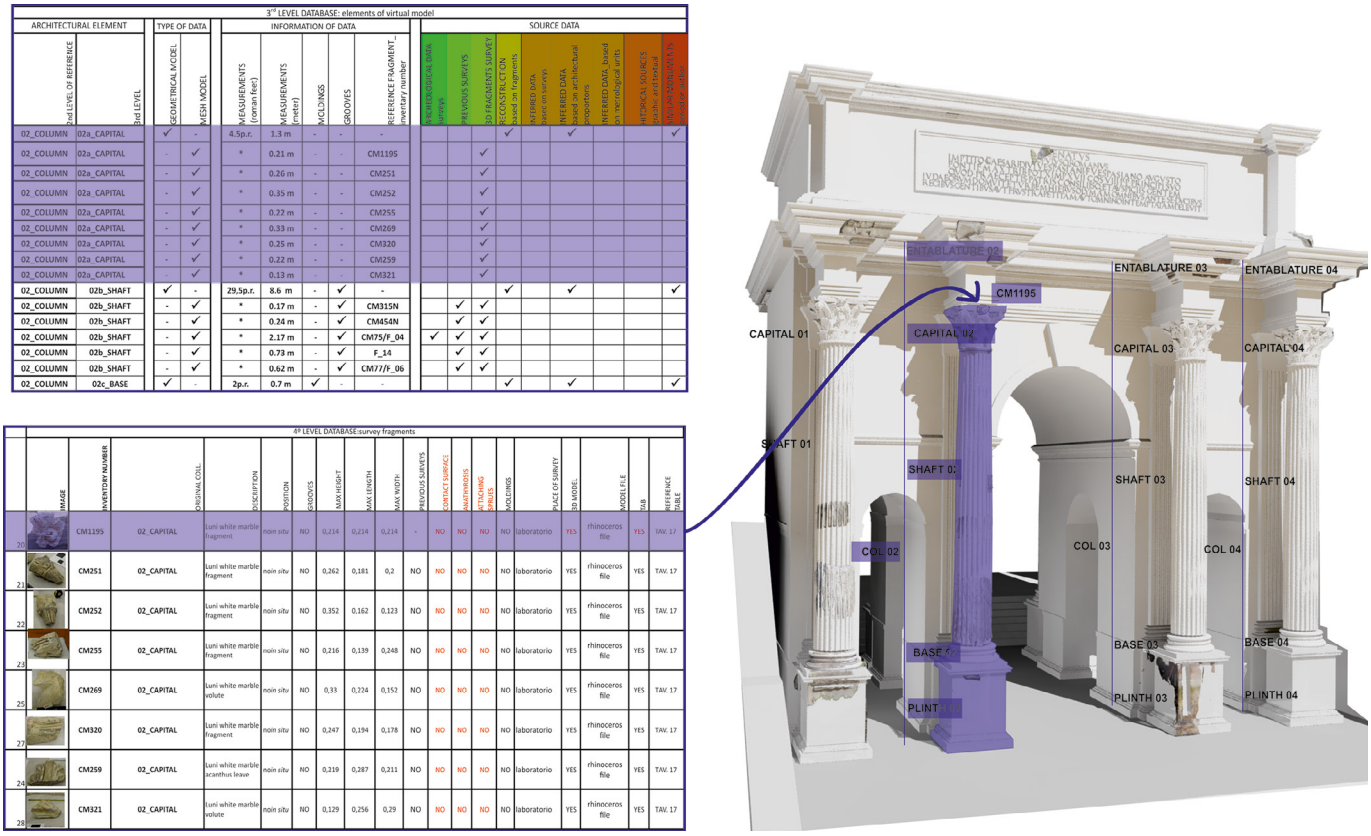
We call all this information metadata sources, their nature is both graphic and textual (mosaics, coins, precedent surveys, images, drawings, historical texts, etc.) and they make up the first level of the database.

To complete this initial phase, we have identified the hierarchal semantic organization of the main architectonical elements of the arch and have listed them in the so called second level of the database. Then, we have connected the general architectonical elements to each single fragment registered in the initial database.

In a second phase of elaboration of the data, a third level database has been aimed to further analyze each single architectonical element of the arch. This analysis consists on the elaboration of a detailed virtual geometrical 3D model of each architectonical element, based on the information obtained by the 3D survey of the fragments and their scaled virtual mesh models.

The information specifically related to this level of the database has been linked not only with the second level of the specific fragments but also with the first one (metadata and related documents), obtaining additional information regarding the uncertainty level of the VR reconstruction, as described in 33. This information could also be organized in an independent level of database and its corresponding graphic visualization document could be directly created if we entered all the tabular information in a general Architectural Informative System. 12

■33
Apollonio, Fallavollita & Giovannini 2015, pp. 189–194.



3rd LEVEL DATABASE: elements of virtual model

ARCHITECTURAL ELEMENT		TYPE OF DATA		INFORMATION OF DATA					SOURCE DATA									
2nd LEVEL OF REFERENCE	3rd LEVEL	GEOMETRICAL MODEL	MESH MODEL	MEASUREMENTS (roman feet)	MEASUREMENTS (metric)	MOLDINGS	GROOVES	REFERENCE FRAGMENT - inventary number	PRE-PRESERVATIVE DATA - survey	PREVIOUS SURVEYS	3D FRAGMENTS SURVEY	RECONSTRUCTION based on fragments	INFERRED DATA based on surveys	INFERRED DATA based on architectural proportions	INFERRED DATA, based on terminological units	HISTORICAL SOURCES (books and textual sources)	TRUSTWORTHINESS (based on author's experience)	
02_COLUMN	02a_CAPITAL	✓	-	4.5p.r.	1.3 m	-	-	-				✓		✓			✓	
02_COLUMN	02a_CAPITAL	-	✓	*	0.21 m	-	-	CM1195			✓							
02_COLUMN	02a_CAPITAL	-	✓	*	0.26 m	-	-	CM251			✓							
02_COLUMN	02a_CAPITAL	-	✓	*	0.35 m	-	-	CM252			✓							
02_COLUMN	02a_CAPITAL	-	✓	*	0.22 m	-	-	CM255			✓							
02_COLUMN	02a_CAPITAL	-	✓	*	0.33 m	-	-	CM269			✓							
02_COLUMN	02a_CAPITAL	-	✓	*	0.25 m	-	-	CM320			✓							
02_COLUMN	02a_CAPITAL	-	✓	*	0.22 m	-	-	CM259			✓							
02_COLUMN	02a_CAPITAL	-	✓	*	0.13 m	-	-	CM321			✓							
02_COLUMN	02b_SHAFT	✓	-	29,5p.r.	8.6 m	-	✓	-				✓		✓				✓
02_COLUMN	02b_SHAFT	-	✓	*	0.17 m	-	✓	CM315N		✓	✓							
02_COLUMN	02b_SHAFT	-	✓	*	0.24 m	-	✓	CM454N		✓	✓							
02_COLUMN	02b_SHAFT	-	✓	*	2.17 m	-	✓	CM75/F_04	✓	✓	✓							
02_COLUMN	02b_SHAFT	-	✓	*	0.73 m	-	✓	F_14		✓	✓							
02_COLUMN	02b_SHAFT	-	✓	*	0.62 m	-	✓	CM77/F_06		✓	✓							
02_COLUMN	02c_BASE	✓	-	2p.r.	0.7 m	✓	-	-				✓		✓				✓

4th LEVEL DATABASE:survey fragments

	IMAGE	INVENTORY NUMBER	ORIGINAL COLL.	DESCRIPTION	POSITION	GROOVES	MAX HEIGHT	MAX LENGTH	MAX WIDTH	PREVIOUS SURVEYS	CONTACT SURFACE	ANATHYROSIS	RETOUCHING SPHERES	MOLDINGS	PLACE OF SURVEY	3D MODEL	MODEL FILE	TAB	REFERENCE TABLE
21		CM1195	02_CAPITAL	Luni white marble fragment	noin situ	NO	0,214	0,214	0,214	-	NO	NO	NO	NO	laboratorio	YES	rhinoceros file	YES	TAV. 17
21		CM251	02_CAPITAL	Luni white marble fragment	noin situ	NO	0,262	0,181	0,2	NO	NO	NO	NO	NO	laboratorio	YES	rhinoceros file	YES	TAV. 17
22		CM252	02_CAPITAL	Luni white marble fragment	noin situ	NO	0,352	0,162	0,123	NO	NO	NO	NO	NO	laboratorio	YES	rhinoceros file	YES	TAV. 17
23		CM255	02_CAPITAL	Luni white marble fragment	noin situ	NO	0,216	0,139	0,248	NO	NO	NO	NO	NO	laboratorio	YES	rhinoceros file	YES	TAV. 17
25		CM269	02_CAPITAL	Luni white marble volute	noin situ	NO	0,33	0,224	0,152	NO	NO	NO	NO	NO	laboratorio	YES	rhinoceros file	YES	TAV. 17
27		CM320	02_CAPITAL	Luni white marble fragment	noin situ	NO	0,247	0,194	0,178	NO	NO	NO	NO	NO	laboratorio	YES	rhinoceros file	YES	TAV. 17
24		CM259	02_CAPITAL	Luni white marble acanthus leave	noin situ	NO	0,219	0,287	0,211	NO	NO	NO	NO	NO	laboratorio	YES	rhinoceros file	YES	TAV. 17
28		CM321	02_CAPITAL	Luni white marble volute	noin situ	NO	0,129	0,256	0,29	NO	NO	NO	NO	NO	laboratorio	YES	rhinoceros file	YES	TAV. 17

□ 12
Arch of Titus: database structure with table of the 3rd level, where data sources and levels of uncertainty are indicated; as well as a 4th level, where the paradata useful for reconstruction are shown for each fragment. (M. Canciani)

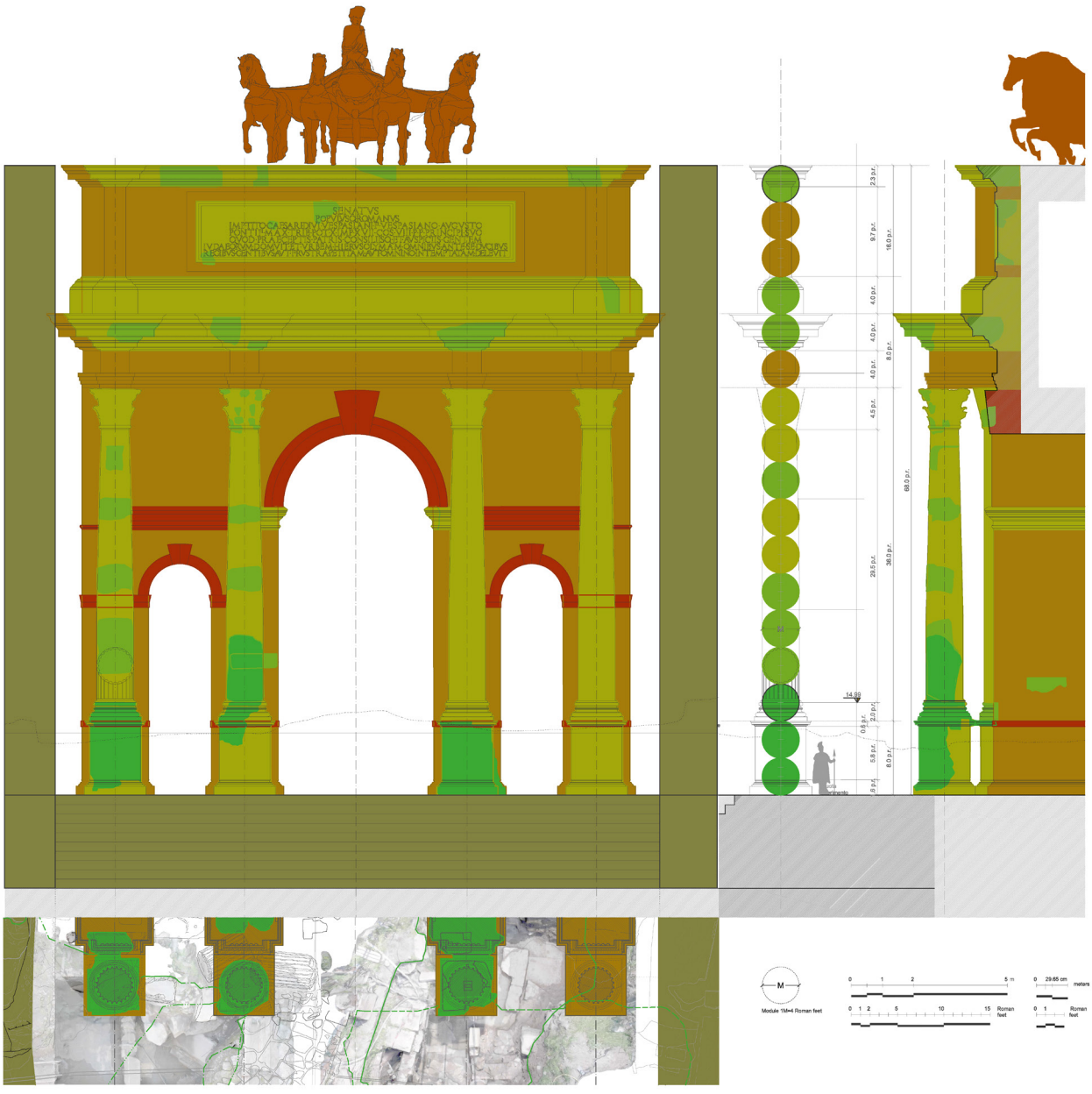
After all the analysis and elaboration of the information is done, in a third phase of VR data representation, we have prepared different elaborations: a first planimetric reconstruction, in which georeferenced 3D models related to the excavations are superimposed; a second altimetric reconstruction (section and elevation), in which the proportions, size of individual parts and the matching conditions with the original dimensions of reference are verified in the overall context; a third volumetric reconstruction, combining the first two ones, in which all the 3D texturized models of the fragments are relocated in a general reference geometric model in their most congruent hypothetical original position. 34

■34
In the specific case of the capitol of the column, due to the fact that the direct source of information (i. e. the relative fragments) was scarce we have been forced to take into consideration a theoretical 3D model of a typical capitol of the same historic period as main reference. Then, studying and comparing the surface of the relative fragments and the theoretical model (using mathematical procedures, as explained in paragraph 4 of this paper) we have found the relative position of the fragments and have been able to scale the geometric 3D model.

The planimetric reconstruction, referred to the original position of the elements of the arch on their horizontal projection, has been carried out on the basis of the elements still standing and the historical documentation (3D survey and first level of database). These elements in situ, described by their textured 3D model, have fixed the main measures and helped us to complete the equivalent data for the parts where there is a lack of information (third level of database).

The first altimetric reconstruction, a front view, is based on the hypothetical reconstruction in elevation of the columns, and takes as the main reference the still standing fragments and the historical documentation of architectural orders, proportions, and sizes (Vitruvio book III, 3, 10–13 and book IV, 1, 7; 11), registered in the metadata database, as well as the metric unit of the age, the roman foot. The combination of these three parameters has fixed some minimal measures and has established the proportions of the different elements. This first altimetric reconstruction is also been used to represent the level of uncertainty (from green to brown) and the source from which the data are obtained. 13

The second altimetric reconstruction, a section view by the centrafornix, has been prepared before reaching the third dimension. In this case, the main profile section of the fragments has been taken as the principal data. In combination with different additional horizontal sections, developed along the height of the arch, it has allowed us to determine and produce the final most probable hypothesis of reconstruction by a VR three-dimensional model.



Origin of paradata, data - Level of uncertainty

- Archaeological data; 3D model of Archaeological excavations and in situ fragments
- Survey February 2012
- Excavation Survey September 2012
- Excavation Survey October 2015
- Excavation Survey January 2016
- Reconstruction based on previous surveys and historical images of the archaeological site; Survey by Giovanni
- Archaeological data derived from 3D survey and analysis of fragments belonging to the different architectural elements
- Reconstruction based on 3D measurements of the fragments and the comparison with classic architecture.
- Circus's overall reconstruction (conducted by the Capitoline Superintendency of Rome).
- Reconstruction based on iconographic historical sources (coins / mosaic of Luni, Forma Urbis) and documentary (Anonymous by Einsideln)
- Reconstruction based on similar monuments of the same period or architect; Arch of Constantine.
- Reconstruction based on data derived from archaeological survey of fragments, analisys of classical architectural and metrological

☐ 13
Arch of Titus: Front view with plan and the section. In the drawing, the different sources and the level of uncertainty of the data (from green to brown).
(M. Pastor Altaba).

III.7 Castro Pretorio at the Aurelian Walls in Rome

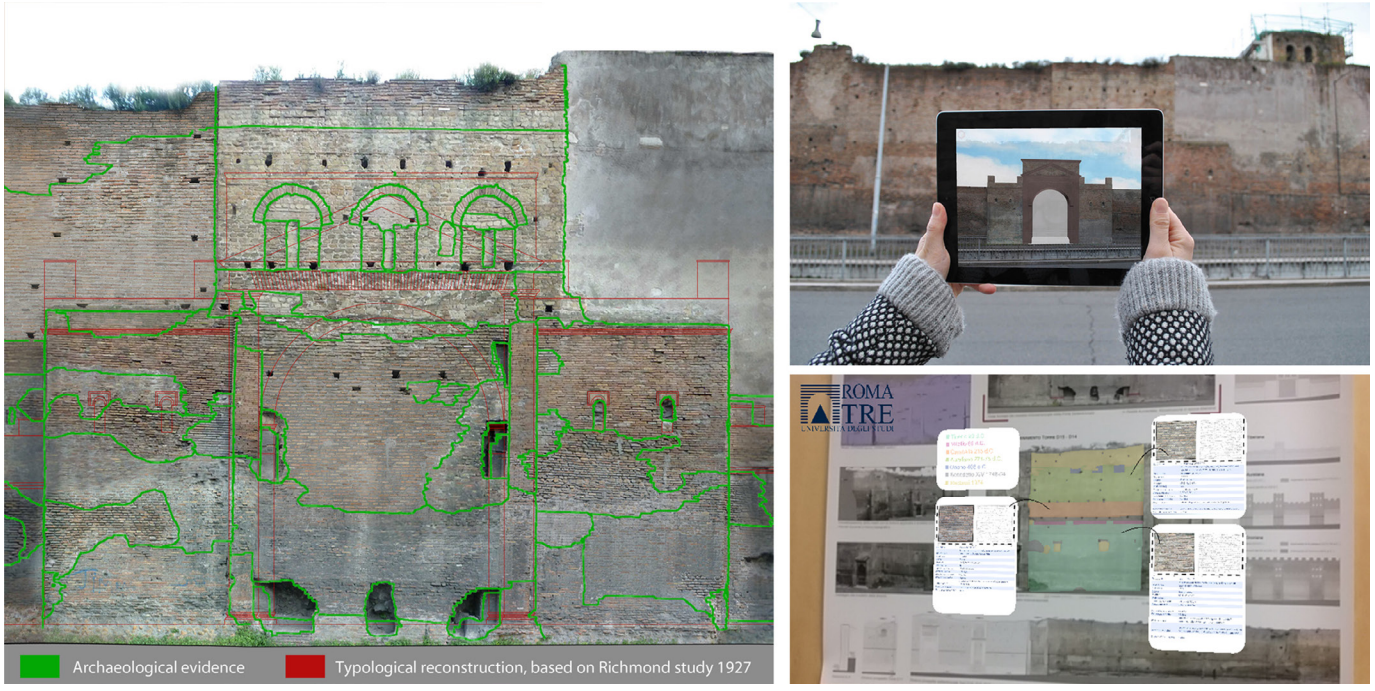
The virtual reconstruction of Castra Praetoria, is a part of a bigger project made in Rome by a group of researchers from University of Roma Tre in partnership with **Sovraintendenza Capitolina ai Beni Culturali** [35]. This virtual reconstruction has two focuses, first of all we want to improve the accuracy with the archaeological evidence, and second one we want to find a way to verify our results in site, superimposed on the monument.

Castra Praetoria was the name given to the big military encampment built in Rome by the Emperor Tiberio between 21 and 23 a. D. [36]. After two thousands of years, transformations, destructions, and restorations, the ancient walls of Castra Praetoria are a very large and complex patchwork of information, stratigraphy and wall building techniques.

■35
Dipartimento di Architettura dell'Università Roma Tre: Carlo Baggio, Marco Canciani, Corrado Falcolini, Andrea Filpa, Giorgio Ortolani, Simone Ombuen, Anna Laura Palazzo, Elisabetta Pallottino, Ivana Spadafora, Laura Tedeschini Lalli, Michele Zampilli. Sovrintendenza Capitolina: Francesco Giovanetti, Maria Gabriella Cimino. Dipartimento di Studi Umanistici UniRoma3: Maura Medri.

■36
Canciani, Conigliaro, Del Grasso, Papalini & Saccone 2016, pp. 931–937.

□ 14
The northern door of »Castra Praetoria«. Archaeological evidence and augmented reality. (M. Saccone)

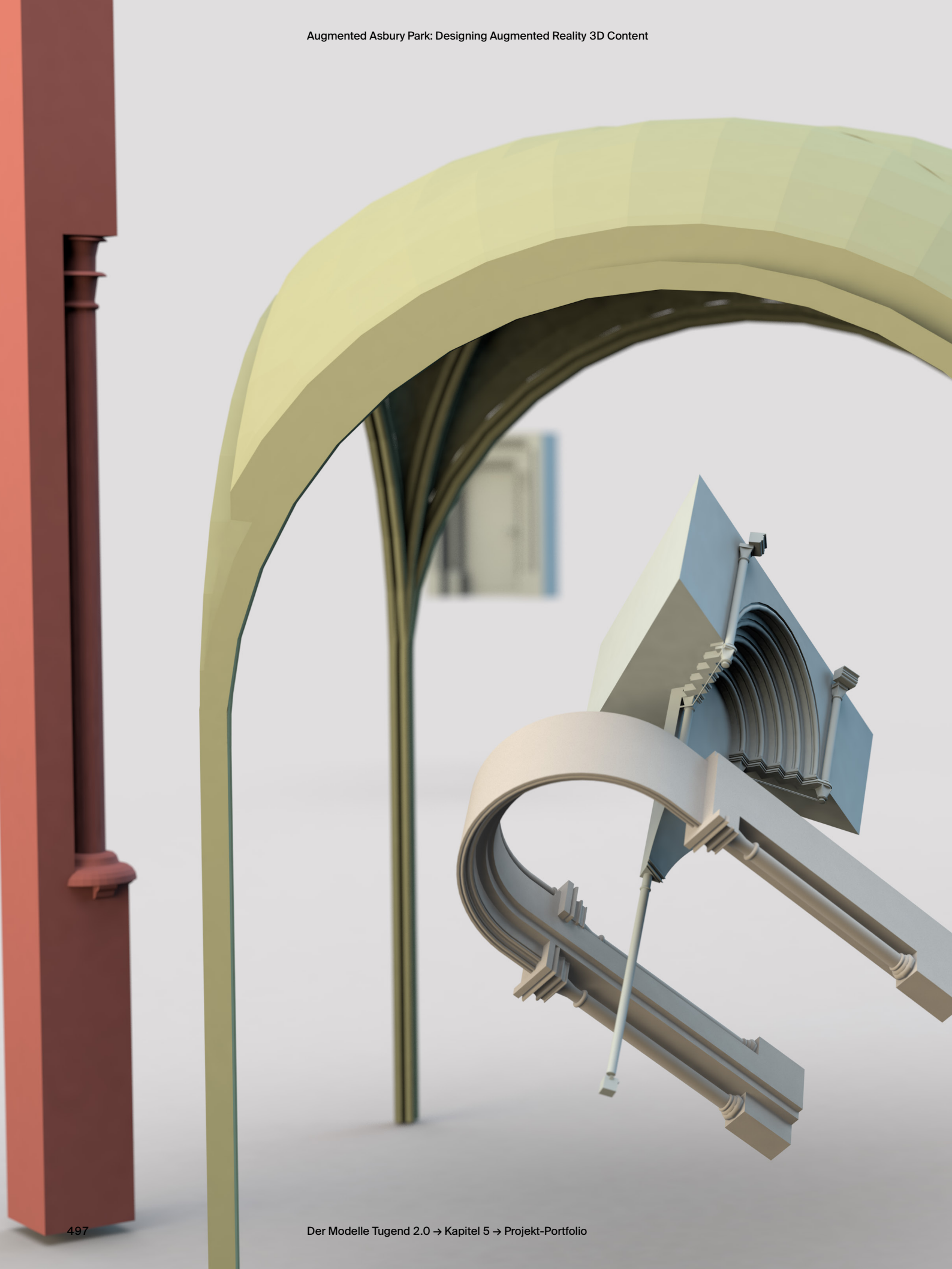


So, the first part of this study wants to detect, organize and manage the archaeological evidence. We started with a 3D survey, to acquire 3D photogrammetric models of our monument. Using this model and orthophotos we worked in partnership with archaeologists to identify the wall's stratigraphy. To improve and manage the accuracy of our VR, according to our methodology, we create two level of hierarchical database: the first one is the study of general characteristics and the typology, based on Richmond's study 37; the other one is based on archaeological evidence and comes from the 3D survey. The VR parameters came from both database: the first one contains 3D surface model, the second one 3D mesh model. To verify our results on site, we first create a combined 3D model with archaeological evidence and typological reconstruction. Then we use an augmented reality system, a technology that superimposes a 3D model on a user's view of the real world. So, the archaeological data, the virtual reconstruction, and all the building techniques are visible on site using a smartphone or tablet, and this help our researcher to check results and improve knowledge. 14 This first step allowed us to verify the wall stratigraphy. In the future we will improve the Augmented Reality to manage useful data for restoration and maintenance such as state of deterioration and cracks survey.

■ 37
Richmond 1927, pp. 12–22.

III.8 Conclusion

The aim of this research is twofold: first of all, to refine the proposed methodology, by applying it in other cases of study in addition to those presented; the second one, to better support the process of philological reconstruction of a site. This process, which historically has always been based on the subjective choices of archaeologists, in the context of virtual reconstruction can become a more rigorous study, always as a prerogative of the archaeologists, but validated through numerical and scientific analysis of data, as much objective as possible.



Edward Johnston, Michael Richison,
Marina Vujnovic, William Rodriguez Elias

IV. Augmented Asbury Park: Designing Augmented Reality 3D Content

→ augmented reality, boardwalk history, community mapping, digital design, experience design, history, interactive design, local history, locative media, memory, mobile technologies, new media, three-dimensional modelling, virtual architecture

Using digital 3D design and augmented reality (AR), our collaborative team was able to rebuild experiences of past buildings and structures that are no longer on the boardwalk in Asbury Park, New Jersey, USA. Our project, Augmented Asbury Park, is a free mobile experience involving 3D visualizations of key historic landmarks in augmented reality from the Asbury Park boardwalk in New Jersey. This paper will share our rationale, process and current challenges with creating AR 3D content related to this project.

IV.1 Introduction

Using digital 3D design and augmented reality (AR), our collaborative team was able to rebuild experiences of past buildings and structures that are no longer on the boardwalk in Asbury Park, New Jersey, USA. Our project, **Augmented Asbury Park**, is a free mobile experience involving 3D visualizations of key historic landmarks in augmented reality from the Asbury Park boardwalk in New Jersey. This paper will share our rationale, process and current challenges with creating AR 3D content related to this project.

IV.2 Project Inspiration and Rationale

Some of the most powerful intellectual examination of the interaction between culture, technology and communication was offered by James Carey in the 1980s. His seminal work **Communication as Culture: Essays on Media and Society** (1989), among other debates, poses questions about the role of technology on the ways we communicate and co-create culture. His works remind us of the importance of history and memory in building and maintaining a sense of community. Technology has often been seen as a culprit when it comes to what many have identified as the pervasive loss of a sense of community. But as scholars and creative practitioners, we see the potential of harnessing technology to design experiences that re-create and maintain a sense of community and build culture. Technology, in our view, has the tremendous ability to record and preserve memory. It is our conviction, that communication technology in both transmission view (sending information) and ritual view (construction and maintenance of shared beliefs in a specific time and place) in Carey's sense, has the ability to maintain that sense of community as much as the ability to have an adverse effect on it. In our practice, we tend to subscribe to the view of technology as a culture-building tool. In particular, we believe that AR technology can extend Carey's (1989) ritualistic view of communication, because it has the capacity to capture and re-create what was deemed lost, across time and space.

Our project was guided by those ideas and what we experienced in practice, communicating directly with people in the Asbury Park community in New Jersey. Asbury Park is a coastal town one-hour south of New York City with rich history. Founded in the late 19th Century, this town was built as a resort with hotels, a boardwalk filled with entertainment for the lower and upper crust of the American east coast. Its heyday spanned from early 20th Century to 1960s when several social, economic and political influences contributed to its fall in prosperity. We found that the memories of those **glory days** have been logged in people's minds. In 2011, local artist John Viggiano, Richison and Vujnovic used the abandoned historic Asbury Park Carousel House to re-construct, through art and oral history, experiences of rides that once occurred in that space. People could see actual images of carousel horses projected on an inflated parachute, and at two different

■ 01
Mike Richison, Documentation of The Living Carousel, Asbury Park, NJ, https://vimeo.com/44201645.

stations they could use motion to spin the horses, which would also trigger music that once played in the carousel house. They could also listen to pre-recorded testimonials of people from the community who narrated their experiences of riding on the carousel. 01 01

□ 01
The Living Carousel in the Asbury Park Carousel House (Richison 2011/ CC-BY-SA 2.0)

Positive public reception of this project and stories that we heard from the participants inspired us to begin the **Augmented Asbury Park** project. We wanted to counter that sense of loss of history and engage people's memories. What drew us to using AR is that we wanted people to be able to spatially interact with the project's 3D content on their own devices in real time. AR allows users of a smartphone, tablet, or headset to move their devices around and see digital 3D content overlaid on top of their real experience through optical viewing systems within their devices. AR technology for us was and is a tool through which the present can be disrupted, and people can become connected through sharing meaningful information. In that process, a new sense of community, perhaps even new shared meanings can be created.

To begin this project, the authors first traveled to Hatfield, Pennsylvania to visit the Philadelphia Toboggan Company (PTC) to learn about Carousel #87, the carousel that was housed in the Asbury Park Carousel House. Using AR, our initial idea was to re-create the carousel that once occupied that space. However, that journey took us to a much larger project, recreating

several different historical landmarks of the Asbury Park Boardwalk, which are no longer there. We combined historical research, interviewing of community members, collaborating with community organizations, and AR technology to deliver our project back to the community.

IV.3 AR 3D Content Creation

This project has involved multiple iterations of 3D content creation and revision. To begin the project, we started by doing research and collecting reference photographs both on and off site. Next, we connected with the Asbury Park Public Library and scanned imagery from hundreds of postcards. We also visited online resources. After collecting reference imagery, our team began creating 3D models based on guidelines provided by Metaio. 02

In regard to technique, the focus in creating 3D models for mobile AR platforms is minimizing the number of polygons in your model and maximizing the amount of detail that can be displayed in images applied as textures. Otherwise, it will take longer for the models to load on a mobile device. Generally, we aimed to keep our models under 5,000 polygons. We used several programs including Autodesk Maya, Autodesk 3DS Max, and Maxon Cinema 4D to create our 3D content. Also, we used image-editing software to optimize the texture images for web-based platforms using JPEG compression methods. Liam Rodriguez Elias, David Corniola, and Joseph Seminerio have been essential contributors for the creation and evolution of the project's 3D content.

□ 02
Augmented Carousel — on left: reference image, on right: 3D model (Johnston, Richison 2014–2017/CC-BY-SA 2.0)

The 3D models were exported as OBJ files with their accompanying texture files. Then, we uploaded these models to the appropriate server and tested for load times both on and off site. We found that higher resolution textures rendered faster for the off-site poster experience of the project content, because wireless internet connections and cellular reception were easier to access away from the boardwalk.

The complete list of our project assets is as follows:

- → Palace Amusements, originally built in 1888, demolished in 2004
- → Boardwalk Carousel, built in 1932 and dismantled and sold in 1992
- → Sky ride and Boardwalk Amusements
- → Wreckage of S. S. Morro Castle, beached in 1934
- → New Boardwalk Casino, built in early 1930's and partially demolished in 2006
- → Original Boardwalk Casino, built 1903, destroyed by fire in 1928
- → Monterey Hotel, built in 1912, demolished 1963
- → Natatorium, first built in 1912
- → 7th Avenue Pavilion, built in 1905

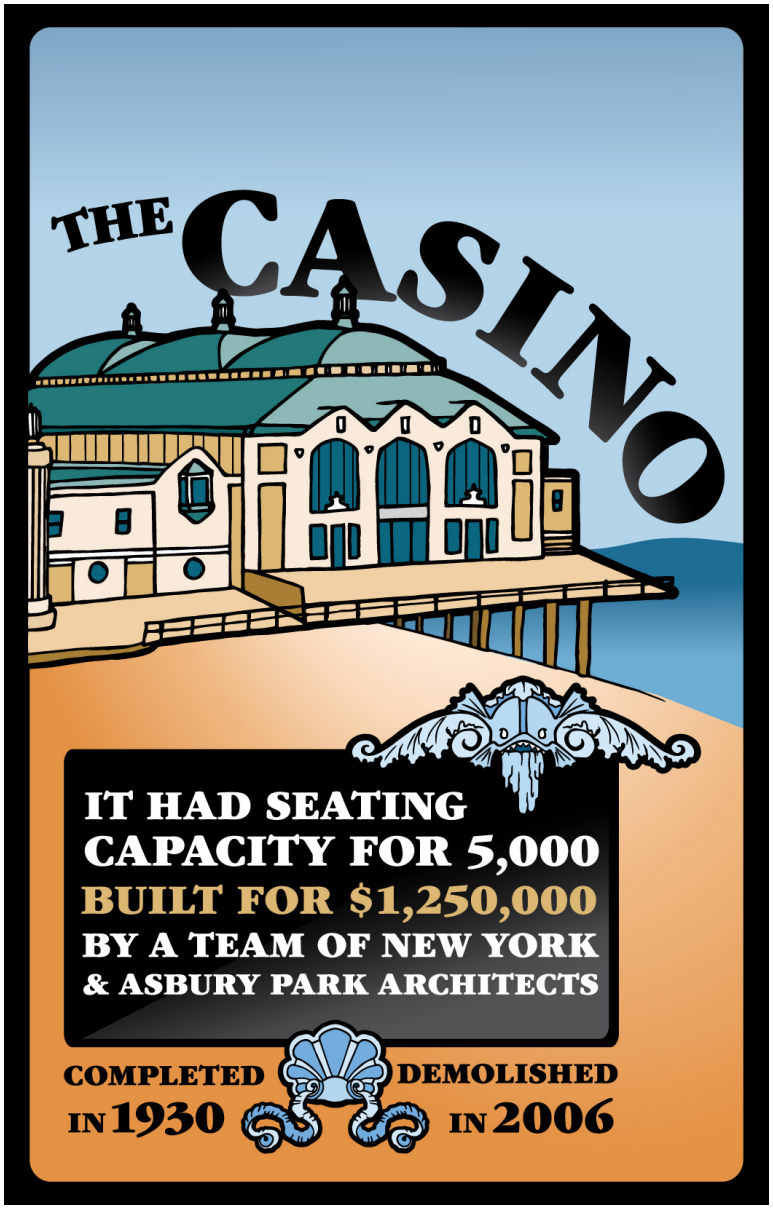
Please find marker-based AR experiences of each of these assets on the homepage of our project website at **www.augmentedasburypark.com**. Multiple rounds of testing became very important for (1) positioning the AR 3D content in front of the marker image for optimal viewing and (2) determining a workable file size of texture images for real-time optimal rendering. Quite often, the orientation of a 3D model in 3D modeling software differs from the orientation within an AR platform. After uploading the 3D model and seeing its orientation there, we would then go back into the 3D modeling software and adjust the orientation.

Recently, we updated three of our models of the Boardwalk Carousel, Palace Amusements, and the Sky ride with animation. This process involved reconstructing the topology of some of the original 3D models, exporting the 3D scenes into COLLADA files, uploading the models to the Augment AR platform, and testing how well the Augment platform reads the models and renders them in real time.

We paid special attention to the pattern of the horses' movements on a carousel. We used keyframe animation to recreate that movement, because the Augment application did not have the capability of reading expressions. Animating models such as the Ferris wheel and the carousel had to be done in a loop. Every time a node completes its 360-degree progression, the animation will repeat indefinitely. This allows for a smoother render in augmented reality. The Sky ride did not use the loop technique, because it is a linear sequence. However, each time a chair completes its path, it disappears and returns to its original position.

IV.4 Implementation of 3D Content within AR Platforms

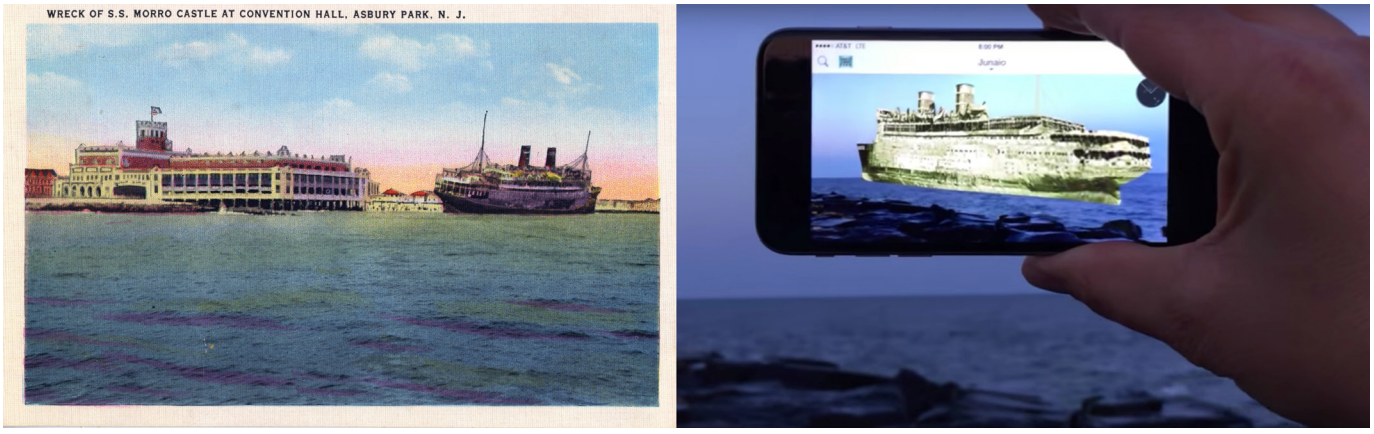
Augmented Asbury Park makes use of two different methods of registering AR content — through a marker (called marker-based) or via a specific geographic location (referred to as geo-locational). The ideal way to view the project is to stand on the actual Asbury Park Boardwalk with a mobile device. A viewer is then able to view the various assets onsite, from various angles — all allowing for a sense of scale and place. The assets are spread out over several hundred meters and grow or shrink according to where the viewer stands. **Augmented Asbury Park** can also be viewed anywhere using markers. With marker-based augmented reality, a 3D asset is snapped to a flat image. In this case, a set of ten posters became an integral part of the project. 03 Both methods of presenting assets had their set of opportunities and challenges.



☐ 03
Updated Poster of the Augmented Casino
(Richison 2017/CC-BY-SA 2.0)

Because **Augmented Asbury Park** is primarily about a place (speaking geographically and historically), special emphasis was placed on the on-site experience. The project originally ran on Junaio, a mobile augmented reality browser created by Metaio, a software development company. In order to see the project, viewers had to download the free Junaio app onto their mobile devices, then scan a barcode specific to the project. The barcode prompted Junaio to download a set of 3D assets called a channel — in the case of **Augmented Asbury Park**, the geo-locational channel contained eight historical models. Each model was accompanied by a set of PHP instructions that dictated its placement, orientation, and scale. These attributes would change with regard to where the viewers stood and in which direction they pointed their phones. Junaio would tap into the locational data (global coordinates) and accelerometer data (tilt of the phone) and adjust the model accordingly. The resulting effect gave a true feeling of the presence of a building or other structure. Video documentation of this experience was collected and is available online. 02 An example of this content can be seen below. 04

■ **02**
Ed Johnston, Augmented Asbury Park — AR Geo Channel, https://youtu.be/xJP48is1AWA.

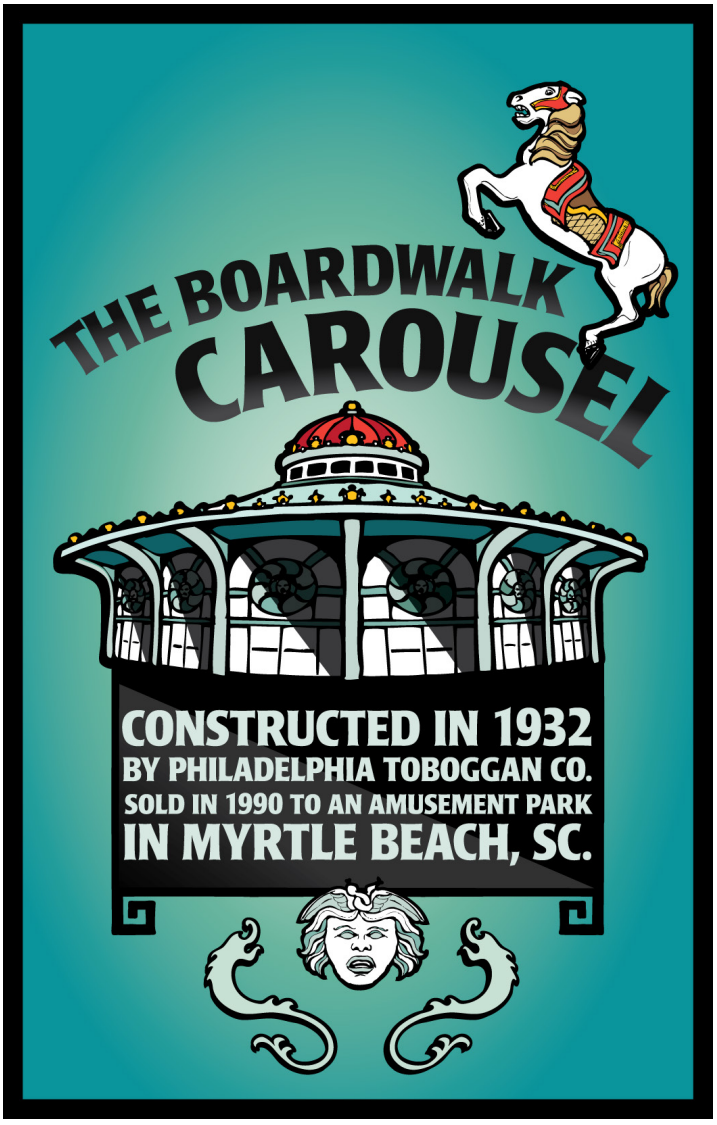


□ 04
Postcard of S. S. Morro Castle (Courtesy of the Asbury Park Public Library), Right: Geo-locational S. S. Morro Castle 3D Model (Johnston 2016/CC-BY-SA 2.0

In order to encourage content creation for adopters of these techniques, Metaio created detailed instructions as to how to access its API and enter parameters to ensure a somewhat believable experience. 3D assets were first compressed and uploaded. We opted to store our geo-locational assets on our own server rather than Metaio's upload service. Alongside the 3D content was a PHP script that housed information such as the longitude and latitude of each model as well as its scale and orientation. After dropping our models into the experience, we **camped out** on the boardwalk using a laptop and the wireless hotspot on our cell phones to adjust the coordinates, angle, and size of each model. The majority of models presented little difficulty, but the process involved checking the models from multiple viewpoints and adjusting the code as needed. Often, the models needed to overlap or complement

existing structures — as was the case with the Carousel — which had to live inside the existing Carousel House, the Casino — a model that had to cover the still-standing Casino, and the Morro Castle — a shipwreck that was the subject of many iconic postcard images.

In an effort not to exclude anyone — in particular those who may have been unable to travel to the Asbury Park boardwalk, the project can be viewed offsite on a set of markers. Augmented reality markers can be any image — anything that would allow the camera in a mobile device to register a stable platform. In order to get the marker-based experience to work, viewers would again scan a barcode within the Junaio app. Instead of walking around to specific locations, viewers would point their phones at one of the markers to see a model associated with that particular marker. We took this opportunity to create a suite of carefully crafted markers that could double as informative posters, allowing the experience to happen anywhere. As of mid-2018, these marker-based experiences are live and accessible through the free Augment mobile app. Please find directions for accessing this content at **www.augmentedasburypark.com**.



☐ 05
Updated Poster of the Augmented Carousel (Richison 2017/CC-BY-SA 2.0)

With the exception of the carousel drawings (which were drawn in 2011 for an earlier iteration of the carousel project), all illustrations were executed specifically for this project. Illustrator Sarah Buzzard was instrumental in helping us with many of the custom illustrations. Graphic designer Amanda Stojanov provided layout assistance on five of the ten posters, and Richison served in the role of art director and lead graphic designer. The posters were printed in limited editions using archival inkjet paper and ink. While working on design elements of the project, the goal was to build a brand and a look that referenced the history of Asbury Park's boardwalk — in particular the opulence of the demolished structures, the mystery surrounding particular events, and the boardwalk's fun and whimsical environment. The art direction of the project called for a determined color scheme, a closely related set of typefaces, a precise style of illustration, and a group of functional and informative infographics. The posters were featured in two local exhibits and several informal poster sessions throughout the community. The augmented reality aspect of the posters allowed them to function in a variety of scales from small badges to page-sized graphics to full-scale art pieces. [05]

IV.5 Community Engagement

The technology and the 3D content of this project were strengthened by the community-based efforts of the team. In order to build the content used in this project, the team conducted research into the overall history of the Asbury Park Boardwalk and into the individual sites. Beginning with the Carousel, library research, fieldwork, and interviews were conducted. We are indebted to two local historians: Asbury Park Library librarian Robert Stewart and Asbury Park Historical Society President Don Stine.

The postcard archive at the Asbury Park Public Library was extensive. We were able to sort through their collection of thousands of postcards in order to build a visual catalog of our chosen sites. Many of the postcards we scanned were rare and precious. These images were vital to the textures used in our models and served also as references for placement of the 3D assets. [04] Mr. Robert Stewart was kind and generous and helped us a great deal.

Mr. Don Stine provided overall information about the boardwalk and each of the sites. His knowledge of the importance of each site also helped in the editing process. Some sites were well documented and therefore not difficult to research. The structure that provided the most difficulty was the boardwalk sky ride. Stine had actually worked at the amusement park as a teenager and was able to provide anecdotal information about the short-lived sky ride.

Once the project was live, the team found novel ways to build interest and to demonstrate how to download and interact with the assets. A challenge for interactive creative work is encouraging individuals to actually participate. The Asbury Park boardwalk is a very fun, yet extremely distracting environment

for an interactive augmented reality experience, and we had to grab attention very quickly and compete with the shops and other activities. We found that the best way to build an audience was through a walking tour. The walking tour is a very simple format, and it is a format that most people are accustomed to. Where **Augmented Asbury Park** added to the usual format was through the technology of the smart phone and the 3D content. We even went so far as donning vintage suits and hats on opening weekend — an eye-catching yet extremely uncomfortable strategy for the middle of summer.

The team worked to promote and share the project both before and after its launch. In the weeks leading up to the launch date, we crafted a press pack, which led to a number of interviews and coverage in local and regional press. In the weeks prior to launch, the team also gave a TEDx talk and conducted workshops on augmented reality. During the project's run, **Augmented Asbury Park**'s posters were the subject of several exhibits — both formal and informal. The poster exhibit was also an effective way to continue to keep the project alive offsite and during the offseason.

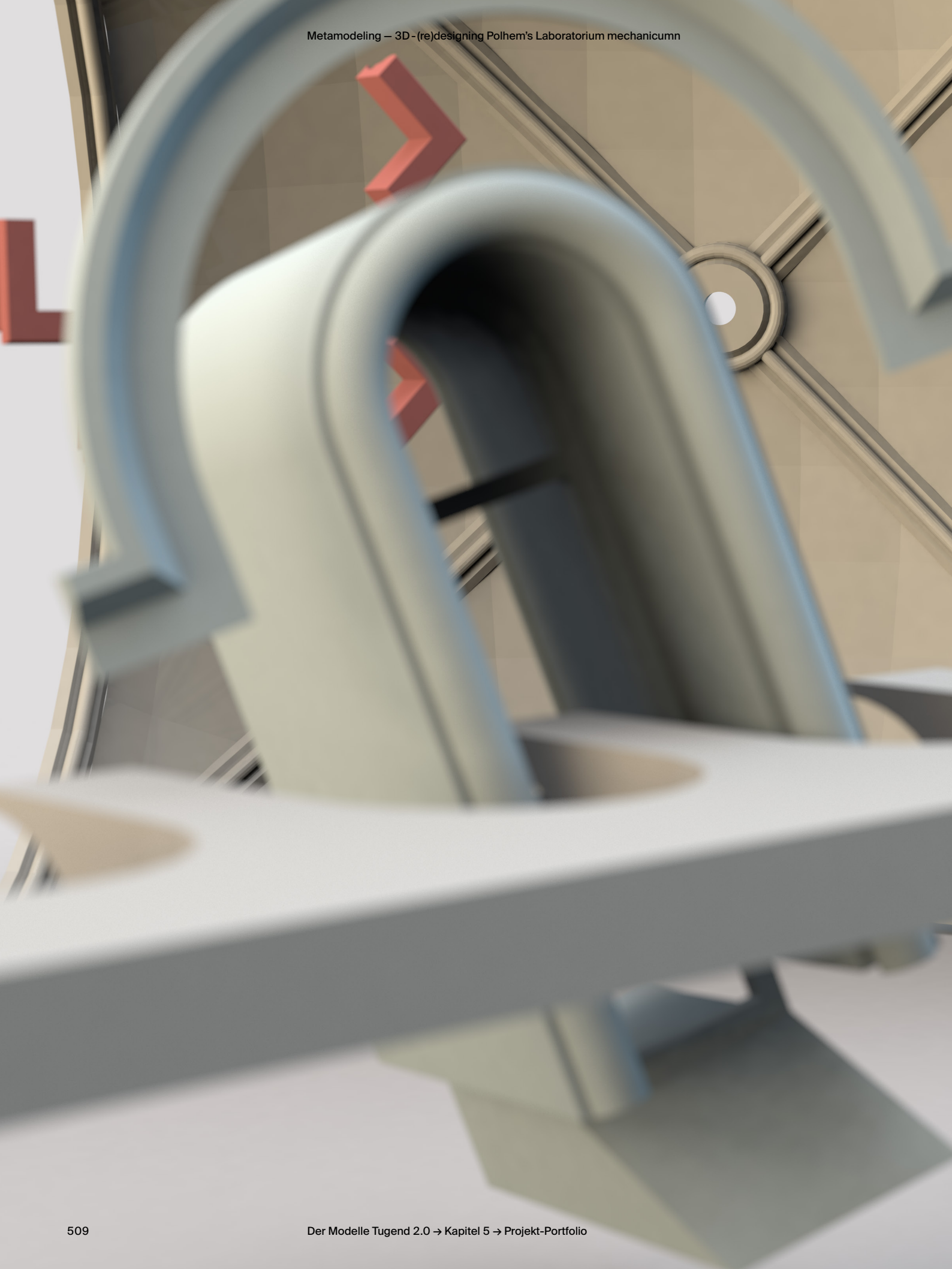
IV.6 Current Challenges with AR

Three challenges with AR 3D content currently are stability of platforms, level of detail, and archiving. The biggest challenge currently with geolocational AR 3D content is that the Metaio platform and Junaio mobile app were taken offline in early 2016. After testing different platforms, Augment emerged as a platform through which we could make our marker-based AR 3D content live again. As of mid-2018, we have not been able to reactivate our geo-locational content due to the need for a stable, easily accessible platform.

We could have modeled some structures with a great level of detail. However, keeping polygon count low and texture files as small as possible is essential for mobile platforms. Also, we think that a solution for archiving AR 3D content needs to be developed.

IV.7 Conclusion

Through **Augmented Asbury Park**, our collaborative research team has continued to find ways of sharing AR 3D models of buildings and structures, which used to stand on or near the Asbury Park Boardwalk. While there are challenges with creating AR 3D content, we look forward to continuing to find ways of designing engaging experiences that share lost history with the public.



Pelle Snickars

V. Metamodeling — 3D-(re)designing Polhem's Laboratorium mechanicumn

→ 3D visualisations, digital methods, Christopher Polhem, media modalities

Based on selected parts of the collections at the Swedish National Museum of Science and Technology, the aim of the research project, Digital Models, is to explore the potential of digital technologies to reframe Swedish industrialisation and its stories about society, people and environments. This book chapter presents the work done with one model, the Swedish 18th century inventor Christopher Polhem's so called mechanical alphabet. His small wooden models were once built to pedogogically illustrate different mechanical principles. At a time when heritage institutions are exploring how new digital technologies can broaden access to their collections, the chapter recounts the ways in which our project has tried to metamodel Polhem's alphabet in different digital formats, especially in 3D. Which attributes of the models that are transferred and displayed is not an imperative trait of digitisation per se — only of one particular process. The chapter discusses three forms of 3D visualisations of Polhem's alphabet executed in altered media modalities — provoking a confrontation between stupid scanning versus intelligent simulation. Situated at the intersection between digitising archives and visualising history, the chapter interrogates the specificity of digitisation, with the ultimate goal of developing a 3D methodology of relevance for the cultural heritage domain. Authority and material authenticity are its trademarks. Yet, as this chapter will show, 3D visualisations will always cater (in one way or the other) to interpretation of museological objects selected for (re) presentation — even if institutions are totally explicit and open about their digital practises.

During the summer of 1765 a young German scholar, Johann Beckmann (1739–1811), embarked upon a trip to Sweden and Uppsala University. Beckmann was a man of enlightenment, and today he is a well-known figure within the history of science and technology. His trip to Sweden in the mid 1760s (meeting, for example, Carl Linnaeus) made a lasting impression. 01 During his trip Beckmann wrote a diary in which he described his Swedish whereabouts. A particular interest was contemporary technological improvements: **14. Sept. fuhren wir … in das berühmte Fahlun, welche Stadt nicht anders aussieht, als wenn sie die Residenz des Vulcans wäre.**

In Falun, Beckmann inspected mining techniques and machines. One water-powered mine hoist, designed by **der ehemalige Kunstmeister Rundin, ein Schüler des grossen Polhems** was particularly impressive. 02

Somewhat surprisingly, however, apart from one exception Beckmann made no further remarks to the finest and most important predecessor within the mining-invention-trade: the scientist and pre-industrial inventor, Christopher Polhem (1661–1751). Polhem had passed away some 15 years earlier when Beckmann visited Sweden. During the early 1700s Polhem had, among many things, made a number of mechanical improvements at the Falun mine, foremost revolutionary hoisting machines. In addition — at the nearby village of Stjärnsund — he had set up a preindustrial community with a semi-automated factory powered entirely by water. Polhem was a practical man, but also an original thinker on science, engineering and philosophy. 20,000 of his manuscript pages have survived, and Polhem was, for example, a great influence on Emanuel Swedenborg's later natural philosophy. For a number of years Swedenborg was, in fact, an assistant to Polhem at Stjärnsund. In Beckmann's diary, however, Polhem was only mentioned when the young German vividly described the so called, Royal Model Chamber in Stockholm.

»Die Modelkammer ist auf dem alten Schlosse und verdienet von einem jeden Liebhaber der Physik und Mathematik besehn zu werden«, Beckmann avidly stated. »Sie wurde zuerst von Polhem angelegt, dessen Maschinen doch nicht alle hier sind, weil sie im Brand verlohren gegangen.« 03

The Royal Swedish Model Chamber was a precursor to Polhem's, **Laboratorium mechanicum**, a collection of educational, miniature wood models of basic mechanic principles, equipment, hoisting machines and water gates invented (mostly) by himself. Basically, the **Laboratorium mechanicum** was a facility for training Swedish engineers — before any formal university or polytechnic education existed — as well as a laboratory for testing and exhibiting Polhem's models and designs. A royal decree from 1697 had inaugurated the **Laboratorium mechanicum**, but its history until the emergence and establishment of the Royal Model Chamber in 1756, remains obscure and hard to trace. 04

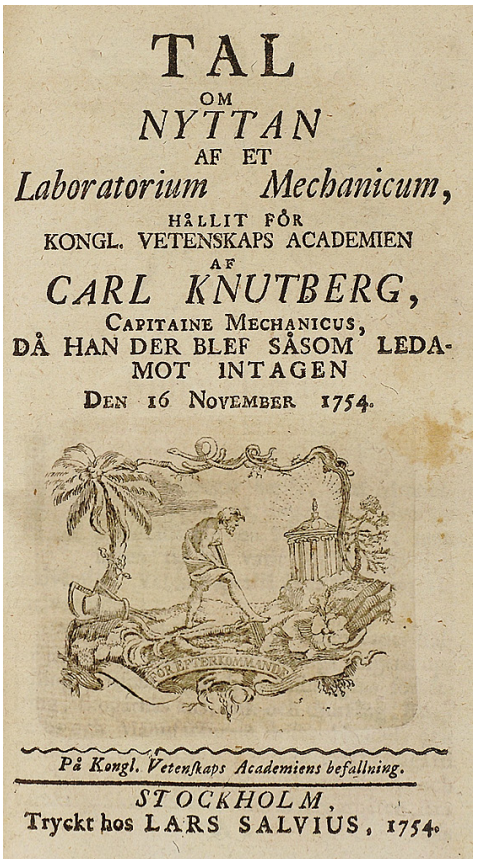
■ 01
»Ohne Zweifel sind die Anregungen, die er während seines Aufenthaltes in Upsala von Linné erhielt, für seine Lebensarbeit bestimmend geworden«, it was for example claimed in 1911 by botanist Thedor Magnus Fries in an introduction to Beckmann's travel diary — which Uppsala University published the same year as a centenary tribute Th. M. Fries (Hg.), Johann Beckmanns schwedische Reise in den Jahren 1765–1766: Tagebuch. Mit Einleitung und Anmerkungen im Auftrage der KGL. Universität Upsala, Upsala 1911. Fries is quoted from page III.

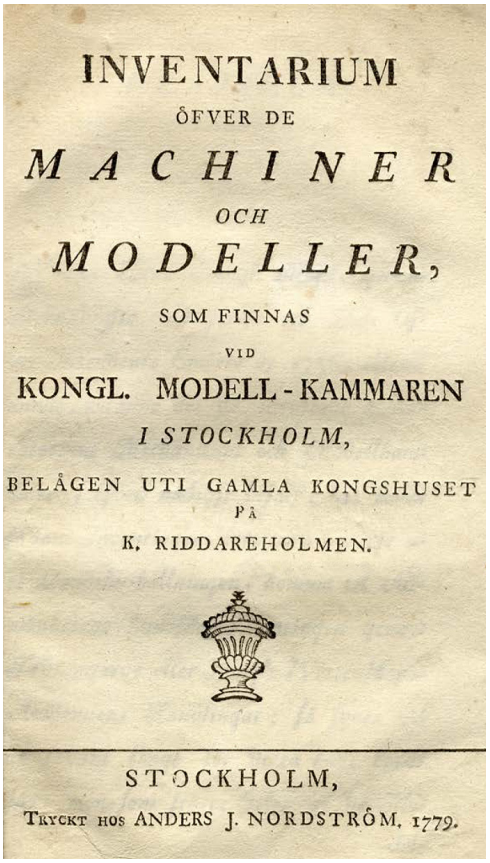
■ 02
Beckmann 1911, p. 60, 64.

■ 03
Ibid., p. 130.

■ 04
Arvid Bæckström, Kongl. Modellkammaren, in: Daedalus. Tekniska museets årsbok 1959, Stockholm 1959.

Some models of the **Laboratorium mechanicum** were located in Stockholm, others in Falun and at Stjärnsund. In fact, during Polhem's lifetime the collection of models became increasingly scattered. Around the time of his death, however, efforts were made to assemble his models in the capital to form an institution for the information and dissemination of technology 01.


TAL
OM
NYTTAN
AF ET
Laboratorium Mechanicum,
HÅLLIT FÖR
KONGL. VETENSKAPS ACADEMIEN
AF
CARL KNUTBERG,
CAPITAINE MECHANICUS,
DÅ HAN DER BLEF SÅSOM LEDAMOT INTAGEN
DEN 16 NOVEMBER 1754.
På Kongl. Vetenskaps Academiens befallning.
STOCKHOLM,
Tryckt hos LARS SALVIUS, 1754.


INVENTARIUM
ÖFVER DE
MACHINER
OCH
MODELLER,
SOM FINNAS
VID
KONGL. MODELL-KAMMAREN
I STOCKHOLM,
BELÅGEN UTI GAMLA KONGSHUSET
PÅ
K. RIDDAREHOLMEN.
STOCKHOLM,
TRYCKT HOS ANDERS J. NORDSTRÖM. 1779.

□ 01
Book frontispieces of Carl Knutberg's, Tal om nyttan af et laboratorium mechanicum, hållit för kongl. vetenskaps academien (Stockholm, 1754), as well as the inventory (of models and machines) at the Royal Swedish Model Chamber in 1779 (compiled by Jonas Nordberg), Inventarium öfver de machiner och modeller, som finnas vid kongl. modell-kammaren i Stockholm, belägen uti gamla kongshuset på k. Riddareholmen (Stockholm, 1779).

During the latter half of the 18th century, the Royal Swedish Model Chamber [**Kongl. Modellkammaren**] was located at the fashionable Wrangels Palace on Riddarholmen in Stockholm. The institution was open to the public, and counted as one of the finest physical model collections in Europe, even a distinguished 18th century **tourist attraction**. 05 When Beckmann made his visit during the autumn of 1765, the model chamber had been in operation for a decade:

»Es ist ein sehr grosser Saal, auf welchem mehr als 100 Modelle stehn. Die mehrsten sind mechanische, einige gehören zur Experimental Physik, und einige wenige sind Modelle von Kirchen und Pallasten.« 06

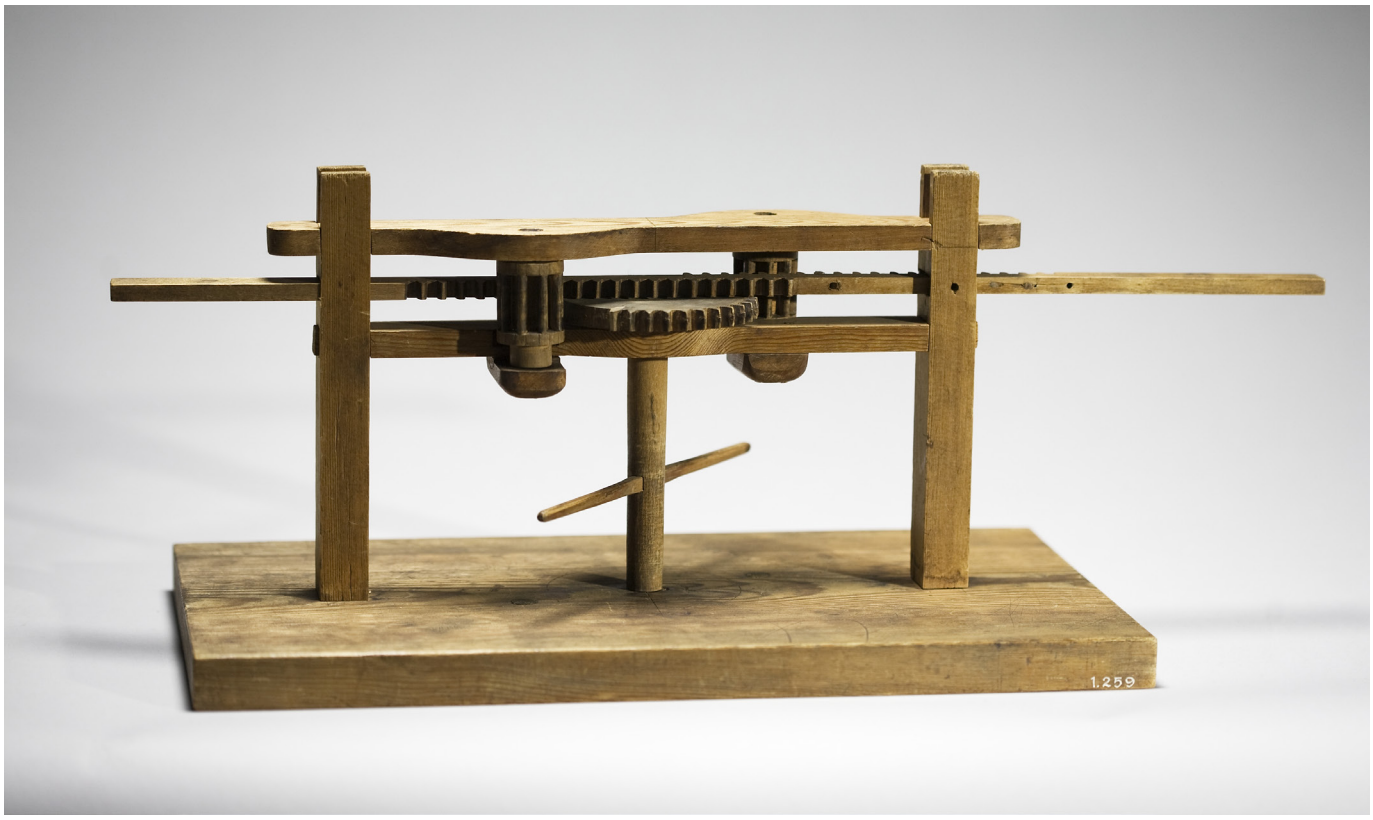
The real treasures of the model chamber was Polhem's mechanical alphabet. The small wooden models were built to illustrate different mechanical principles. Initially, it consisted of some 80 models of machine elements like the lever, the wheel and the screw, and Beckmann seems to have understood the basic ideas behind these wooden models immediately:

■ **05**
Torsten Althin, Nya avdelningar Kongl. Modellkammaren, Fysikaliska experiment, Mekanisk ljudåtergivning, in: Daedalus. Tekniska museets årsbok 1947, Stockholm 1947. Around 1800 both the Spanish General Miranda and the dutch traveler Johan Meerman visited the model chamber in Stockholm: Miranda i Sverige och Norge 1787: General Francisco de Mirandas dagbok från hans resa september-december 1787, Stockholm 1950; Johan Meerman, Reise durch den Norden und Nordosten von Europa: In den Jahren 1797 bis 1800, Wien 1811.

■ **06**
Beckmann 1911, 130.

»Das so genante mechanische ABC war artig, es waren nämlich kleine Modelle von allen Arten der Bewegungen und einfachen Maschinen, die die Anfangsgründe der ganzen Mechanik enthielten.« 07 02.

■ 07
Ibid., p. 131.



□ 02
Models from Polhem's from the early 1700s. Actual models — whether in the form of originals or copies — can today be found at the Mining Museum in Falun as well as at the Swedish National Museum of Science and Technology in Stockholm.

V.1 Model Biography

According to Christopher Polhem, **mechanics** underpinned all knowledge: **mechanics is the foundation of all philosophy [heela philosophien]**, as he stated in one of his many unpublished manuscripts. 08 As a pre-industrial inventor working during the early 1700s, he sincerely believed that **physical models** were always superior to drawings and abstract representations. Since a writer naturally had to know the alphabet in order to create words and sentences, Polhem argued that a contemporary **mechanicus** had to grasp a similar mechanical alphabet to be able to construct and understand machines. It was hence as important for a mechanic

»to know all the cogs, levers, and hooks of a machine as it was important to a scholar to know the letters of the alphabet.« 09

This seems to have been Polhem's main idea for constructing and establishing the different wooden models in his alphabet.

Swedish historians of science, however, have had a hard time to figure out exactly what kind of letters (or sentences) that Polhem's alphabet actually referred to. 10 Then again, the small models physical concreteness **and** enigmatic character did contributed to the fame of the collection. Hence, in more than one way, Polhem's alphabet is indeed **the coming into being of scientific objects.** 11 The cultural biographies of these models also display a fascinating history. As stated, during the second half of the 18th century Polhem's alphabet was exhibited at the Royal Swedish Model Chamber. In 1802, however, a fire devastated part of Wrangels Palace. Most models were saved and after — again — being scattered for more than two decades, they were transferred to a newly established pedagogical institution of science, **Teknologiska Institutet**. It was founded in 1827 and later changed its name to **KTH Royal Institute of Technology**. During the 19th century both the model chamber and the mechanical alphabet were used as pedagogical equipment during the establishment of KTH, Sweden's first polytechnic and prime institution of higher education in technology. However, within the interdisciplinary research project.

Eventually, all models became dated. During the 1920s, Polhem's alphabet — and other remaining artefacts from the model chamber — were consequently transferred to the newly established Swedish National Museum of Science and Technology. The museum was founded in 1924 and opened to the public in 1936. Essentially, ever since Polhem's models have been exhibited as a kind of **meta-museological artifacts**. In a museological context their pedagogical quality gained a new meaning — from **actual** technological principles to **historically** situated mechanics. Biographies of things can make salient what might otherwise remain obscure 12, as Igor Kopytoff once famously remarked.

■ **08**
Most of Christopher Polhem's manuscripts (which are notoriously hard to read and ineptly spelled) are collected at the National Library of Sweden. »Afskrift af Chr. Polhammars bref 1696 till Bergs Collegium ang. hans utländska resa och förslag till inrättandet af ett mekaniskt laboratorium«. Unpublished manuscript from the Polhem collection at the National Library of Sweden — Polhem, Christopher X 265:1.

■ **09**
David Dunér, Daedalus of the North: Swedenborg's mentor Christopher Polhem, in: The New Philosophy, CXIII (3&4), 2010, pp. 1077–1098.

■ **10**
The literature on Christopher Polhem is vast (but foremost published in Swedish). For an introduction — with a special emphasis on the mechanical alphabet — see for example, Sten Lindroth, Christopher Polhem och Stora Kopparberget, Uppsala 1951; William A. Johnson, Christopher Polhem, The Father of Swedish Technology, Hartford 1963; Mikael Lindgren, Christopher Polhems testamente, Stockholm 2011 and particularly, David Dunér, Tankemaskinen. Polhems huvudvärk och andra studier i tänkandets historia, Nora 2012.

■ **11**
Lorraine Daston, Introduction, in: (Hg.), Lorraine Daston, Biographies of Scientific Objects, Chicago 2000, p. 1.

■ **12**
Igor Kopytoff, The cultural biography of things: commoditization as process, in: (Hg.), Arjun Appadurai, The social life of things. Commodities in cultural perspective, Cambridge 1986, p. 67.

After a longer period of restoration, a dedicated exhibition centered around Polhem's mechanical alphabet and the Royal Model Chamber opened at the National Museum of Science and Technology in 1947. During the late 1960s the exhibition was reorganised and from the late 1990s and onwards 30 models have been on permanent display. The mechanical alphabet fitted neatly in different museological exhibition contexts — both in Stockholm and at the Mining Museum in Falun (where some models were also located). The models were small and displayable, and could easily be framed as pedagogical museological objects **avant la lettre**. Without exaggeration, the cultural-historical and pedagogical significance of Polhem's mechanical alphabet has been of great important for the Swedish National Museum of Science and Technology as **a prime model collection** concerning the history of technology and science — both as a pedagogical tool and as a way of displaying and visualising principles of technology.

V.2 Digital Models

At a time when heritage institutions are exploring how new digital technologies can broaden access to their collections — in a similar way that **physical models** did before — it seemed appropriate to use Polhem's alphabet and try to metamodel it in different digital formats, especially in 3D. As is well known, the technologies

> »needed to digitize, publish, and print cultural heritage resources in three dimensions (3D) are increasingly within reach of memory institutions.« 13

3D formats of physical models (in both virtual and 3D print) can be used to give new access, preserve and eventually even **play with** archival collections. As Valeria Vitale has argued, 3D visualisation is today a broad term used to loosely define miscellaneous computer generated threedimensional representations of objects. In its application for cultural heritage, 3D is often »divided into ›3D modeling‹, which involves the use of Computer Aided Design (CAD) software and the creation of 3D content from scratch, and ›3D imaging‹, which involves the digital recording of information on the shape and colour of existing objects.« 13 The division between these two strains is, however, far from clear-cut. Different 3D techniques are usually blended, and Vitale has also stressed that a major concern with 3D is that such »visualisations are completely ›opaque‹«. 13

It is simply difficult — if not impossible — for audiences, the public or the academic community »to assess the accuracy of the visual outcome or the soundness of the hypotheses represented« 14 used within different modeling or scaning procedures.

■ **13**
Richard Urban, Collections Cubed: Into the third dimension, http://mw2016.museumsandtheweb.com/paper/collections-cubed-into-the-third-dimension/.

■ **14**
Valeria Vitale, Transparent, Multivocal, Crossdisciplinary: The Use of Linked Open Data and a Community-developed RDF Ontology to Document and Enrich 3D Visualisation for Cultural Heritage, in: Gabriel Bodard (Eds.) & Matteo Romanello, Digital Classics Outside the Echo-Chamber: Teaching, Knowledge Exchange & Public Engagement, London 2016, p. 148.

In general, 3D heritage activities are still in their infancy — and the same goes for Swedish memory institutions. However, within the new interdisciplinary research project, **Digital Models. Techno-historical collections, digital humanities & narratives of industrialisation** parts of Polhem's mechanical alphabet is currently being both 3D scanned, 3D printed and 3D modelled by different software. Based on selected parts of the Swedish National Museum of Science and Technology's collections, the project aim is to explore the potential of digital technologies to reframe Swedish industrialisation and its stories about society, people and environments. Situated at the intersection between digitising archives and visualising history, the project in short interrogates the **specificity of digitisation** — with the ultimate goal of developing a methodology of high relevance for the cultural heritage sector. 15

If, as Fiona Cameron once argued, museum culture is perceived as series of practices for defining **object value and meaning**, and particularly so regarding the concepts of **material authenticity, originality, and aura**, then digitisation is (and has always) been a threat — the digital object as a **terrorist**, as Cameron alluringly put it. Such an **apocalyptic view of the material / immaterial relationship** was according the her (writing some ten years ago) based on the fear

»that as 3D simulations become more convincing, surrogates will merge in ›form‹ … with the physical object, and viewers will be unable to perceptually distinguish the replica from the real. Collections could then become obsolete, thus undermining museum culture and practice.« 16

Traditionally, museum culture have also underscored the difference in classification between originals and reproductions — with digitisation **by nature** belonging to the latter. Yet, in the case of Polhem's mechanical alphabet things get complicated since his models are oscillating between originals and copies — and variations thereof. Models were over centuries constantly repaired with new parts inserted in aged wooden frameworks, and today it is more or less impossible to accurately date models, let alone the chronological differences in parts.

Digitising Polhem in 3D and adding these **new digital objects** to the museological politics around originals and / or copies, indeed makes matters even more complicated. Then again, the **double movement from object to data, and from data to object** is a fundamental (and philosophical) question that today haunts not only the heritage domain. Following Yuk Hui and arguments in his book, **On the Existence of Digital Objects**, the same relation between objects and data will all likely be an ongoing project

»that will continue to develop over the coming decades. It presents us with new forms of objects, constituting a new milieu in need of further reflection.« 17

■ **15**
The project »Digital Models« is a collaboration between the Swedish National Museum of Science and Technology, with a national responsibility for technical and industrial heritage, and the digital humanities hub, Humlab at Umeå University. It is headed by the author of this book chapter, and involves three researchers, two programmers and four museum staff members. The project is funded by approximately one million euro by the Royal Swedish Academy of Letters, History and Antiquities, and runs between 2016 and 2019. For more information — http://digitalamodeller.se/in-english/.

■ **16**
Fiona Cameron, Beyond the Cult of the Replicant: Museums and Historical Digital Objects — Traditional Concerns, New Discourses, in: (Hg.) Fiona Cameron & Sarah Kenderdine, Theorizing Digital Cultural Heritage. A Critical Discourse, MIT Press, 2007, p. 51.

■ **17**
Yuk Hui, On the Existence of Digital Objects, Minneapolis 2016, p. 52.

He is all likely right, and the research project **Digital Models** departs from the fact that the process of digitisation creates a representation **that shares some of the attributes of an original**, to quote William J. Turkel — but as he also states: **not all of them.** Which attributes that are transferred, displayed, and (eventually) preserved is not an **essential trait** 18 of digitisation **per se**, only of **one** particular process (of which there can be many). The potential **circulation** back and forth between the digital and the object should hence be seen as an integrated part of the digitisation process:

»what can be converted from analogue to digital can always be converted back into various analogue forms. These processes of materialization complement processes of digitization.« 19

■ **18**
William J. Turkel, Hacking history, from analogue to digital and back again, in: Rethinking History 15 (2), 2011, pp. 299–312.

■ **19**
Turkel 2011. For a further discussion around relational models between the analogue and the digital, see William J. Turkel & Devon Elliott, Making and Playing with Models: Using Rapid Prototyping to Explore the History and Technology of Stage Magic, in: (Hg.) Kevin B. Kee, Pastplay: Teaching and Learning History with Technology, Ann Arbor 2014.

It might sound banal, but digitisation is consistently related to various forms of materialisation; procedures are reciprocal and digitisation / materialisation can be executed in many different ways — especially regarding 3D. Arguably, best practise within the heritage domain today differs substantially. Consequently, the research project **Digital Models** uses and perceives digitisation as a **diversified activity**, with results that vary depending on hardware, software and infrastructural set-up. The latter is especially important, and as Zack Lischer-Katz has argued, discourses on the **immateriality of digital information** have during the last decade slowly given way to a rethinking of digital materiality as

»media archives are increasingly converting their collections into digital form, stored less and less on shelves in climate-controlled vaults, and instead stored and accessed through data servers.« 20

■ **20**
Zack Lischer-Katz, Studying the materiality of media archives in the age of digitization: Forensics, infrastructures and ecologies First Monday 22(1–2), 2017, http://www.firstmonday.org/ojs/index.php/fm/article/view/7263.

Another point of departure for our project is hence that digital archives are more **invisible** than traditional archives, since the mechanisms regulating them are virtually hidden behind a graphical user interface (which obviously is in conflict with historical methodologies emphasising source criticism). 3D digitisation (whether in the form of scanning, rendering or modeling) is no exception. Moreover, what is regularly forgotten when theorising the digital transfer of archives and museological collections is that the infrastructures that harness digitisation activities are usually conditioned by **concrete and mundane matters** like outsourced entrepreneurial enterprises and companies — who in our project does the practical digitisation work — price charged, speed of deliverance etcetera. Digitisation is hence **also** a commercial service.

V.3 Modeling Polhem

It is to state the obvious that material selected for digitisation will affect outcome and results. Our research project, **Digital Models**, is therefore conceptually arranged around the digitisation of **three different categories** of materials that in altering ways mirror three phases of industrialisation. [21] This book chapter, however, is solely concerned with Polhem's models — and only 3D digitisation of them, not 3D print. Evidently the chapter is related to an increased academic interest around the **material conditions** of historical knowledge production, research and education — as well as the ramifications of digitisation. 18th century physical models as Polhem's mechanical alphabet (and the often sophisticated craft involved in constructing them), testifies for instance to the historical **use of scale** — i. e. letting the large be represented by the small — and the idea that **the same laws apply to both**. It is something we take for granted today, **but this was far from obvious for the contemporaries of Polhem.** [22] Paramount, however, these types of historical objects should be understood in relation to the different scientific and didactic **practices** in which they were used. As has been convincingly argued in the edited collection, **Das materielle Modell**, the physical appearances of models are simply secondary to their usage:

»Materielle Modelle sind nicht durch physische Merkmale zu definieren und von anderen wissenschaftlichen Objekten zu unterscheiden. Vielmehr teilen materielle Modelle Funktionen in der wissenschaftlichen Praxis. Ein materielles Objekt ist genau dann ein materielles Modell, wenn es als Modell verwendet wird. Materielle Modelle lassen sich somit nur verstehen, wenn sie durch ihre Anwendungen betrachtet werden.« [23]

It is not always entirely clear what it means to digitise something. The project **Digital Models** on the one hand makes a general analyses of the specificity of digitisation (via three different collections of materials). On the other hand, the project also address the challenges of digitising disparate forms of data and visualisations in immersive, virtual reality environments. Following the London Charter on computer-based visualisation of heritage, it promotes **intellectual and technical rigour in digital heritage visualisation** — yet, in what way should one 3D digitise Polhem's models and his **Laboratorium mechanicum**? The London Charter defines principles for the use of computer-based visualisation methods **in relation to intellectual integrity, reliability, documentation, sustainability and access.** Indeed, the charter recognises that the range of available computer-based visualisation methods is constantly increasing. Still, what is the exact relation between **technical rigour** and virtual heritage in a software culture permeated by constant updates? [24]

■ **21**
The different materials are: (A.) parts of the business leader and industry historian Carl Sahlin's extensive collection. (B.), all editions of the museum yearbook, Daedalus (1931–2017), and (C.) physical models from Polhem's mechanical alphabet. Following the project set-up, these different heritage materials and industrialisation phases correspond to three methodological approaches: traditional digitisation (A.), mass digitisation (B.) and 3D digitisation (C.). Digitisation methods are hence correlated with different industrial-historical periods, and in effect will result in three sets of digital tools and applications focused on various narratives of Swedish industrialisation.

■ **22**
Philip Gerlee & Torbjörn Lundh, Scientific Models. Red Atoms, White Lies and Black Boxes in a Yellow Book, Cham 2016, p. 25.

■ **23**
David Ludwig, Cornelia Weber, Oliver Zausig (Hg.), Das materielle Modell. Objektgeschiten aus der wissenschaftlichen Praxis, Paderborn 2014, p. 13.

■ **24**
The London Charter for the Computer-Based Visualisation of Cultural Heritage, http://www.londoncharter.org/fileadmin/templates/main/docs/london_charter_2_1_en.pdf, p. 4, 2.

In order to investigate the specificity of three-dimensional scanning, rendering and modeling — as well as to provoke a confrontation between **stupid scanning** versus **intelligent simulation** — we decided to apply three forms of different 3D visualisations of Polhem's alphabet executed in altered media modalities. First of all, we used an ordinary iPhone — and the Agisoft Photoscan software — to repeatedly photograph one of Polhem's models. Secondly, we collaborated with the professional Swedish animator Rolf Lindberg who computer-animated some models (rather than scanning them). Finally, we CT-scanned three models — that is, X-ray computed tomography — at Linköping University Hospital in a collaboration with the Center for Medical Image Science and Visualization.

V.4 Generating 3D Models from Photographs

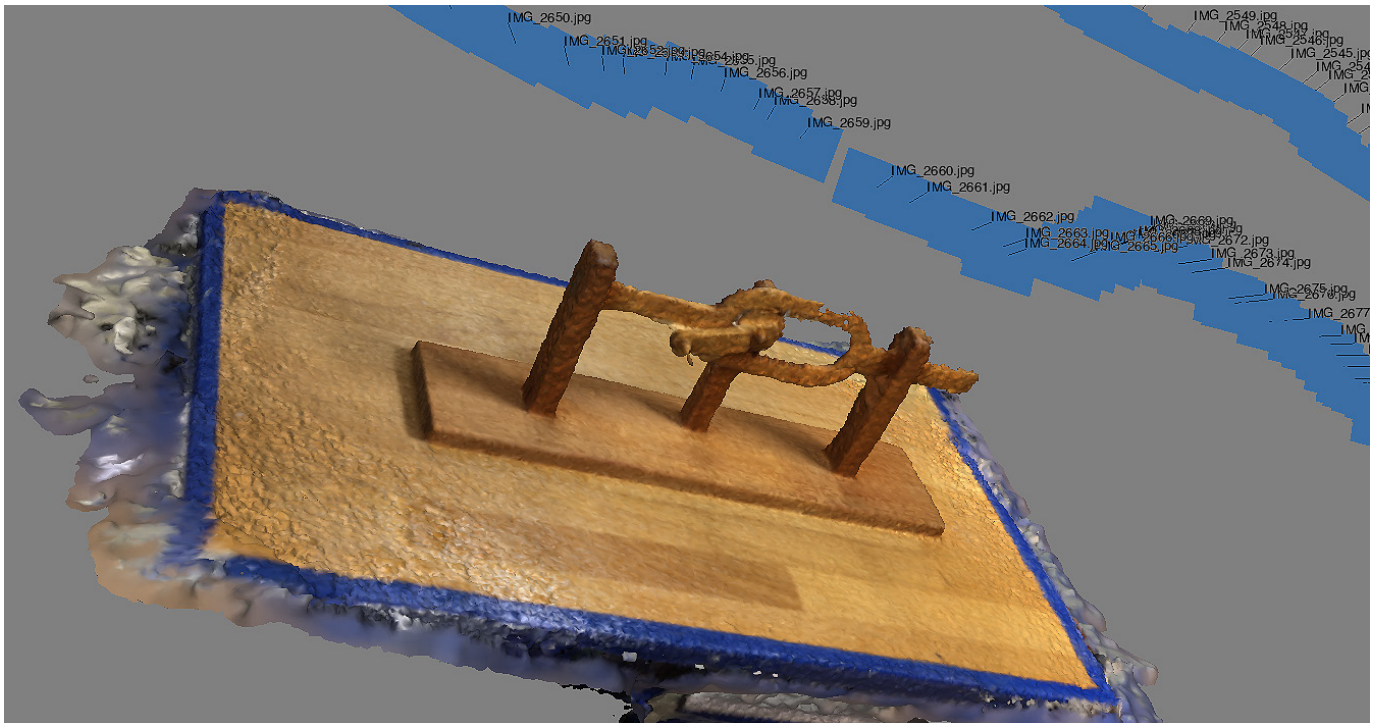
On the market today there exists a number of cheap and simple 3D apps. The Autodesk 123D Catch, for example, can generate 3D models from a number of photographs taken by basically any smart phone; it **lets you create 3D scans of virtually any object.** 25 The basic principle is that one walks around an object taking successive photographs, and then the software combines them into a three dimensional representation. Even if the commercial slogan to **turn ordinary photos into extraordinary 3D models** is exaggerated, apps like Autodesk 123D Catch (and the like) do a decent job in rendering three-dimensional representations, and especially so if the objects are not too detailed, lightning conditions are good and the smartphone has a decent camera.

However, there is in fact no need to use a dedicated 3D application. In order to scan one of Polhem's model in the **simplest way possible**, within our project we put a copy of one model from the mechanical alphabet on a desk in the basement of the Swedish National Museum of Science and Technology. In essence, we prepared nothing (and thus mimicked the behaviour of a normal museum visitor). We simply took an iPhone and walked around the model taking perhaps 100 hundred photographs in rapid succession with poor light conditions. The digitisation procedure, from grabbing the model from the shelf to photographing it, literally took less than a minute. The images were then loaded into Agisoft PhotoScan, a software that **performs photogrammetric processing of digital images and generates 3D spatial data.** A free 30-day trial is available online (but we used a pirated pro version). Agisoft PhotoScan does indeed produce quality and accurate results, and online it is explicitly stated that the digital photogrammetry technique can be used **in GIS applications, cultural heritage documentation, and visual effects production as well as for indirect measurements of objects of various scales.** 26

■ **25**
Autodesk 123D Catch, http://www.123dapp.com/catch.

■ **26**
Agisoft PhotoScan, http://www.agisoft.com.

Rendering a three dimensional object in Agisoft PhotoScan is a procedure in different steps. First one loads and aligns the images, creating a **point cloud** from them. Secondly, the software builds a **dense cloud**, and subsequently a **mesh** with different textures (**shaded**, **solid** or **wireframe**). The different executions takes a substantial amount of time, however. The computer (we used a standard MacBook Air) had to work for a few hours in order to produce a computational model, in which we were able to zoom in and out, rotate, show camera angles etcetera. 03



☐ 03
Simple scanning of one wooden model from Polhem's mechanical alphabet — using an iPhone and the software Agisoft Photoscan. The IMG.jpg-markers indicate where photographs were taken.

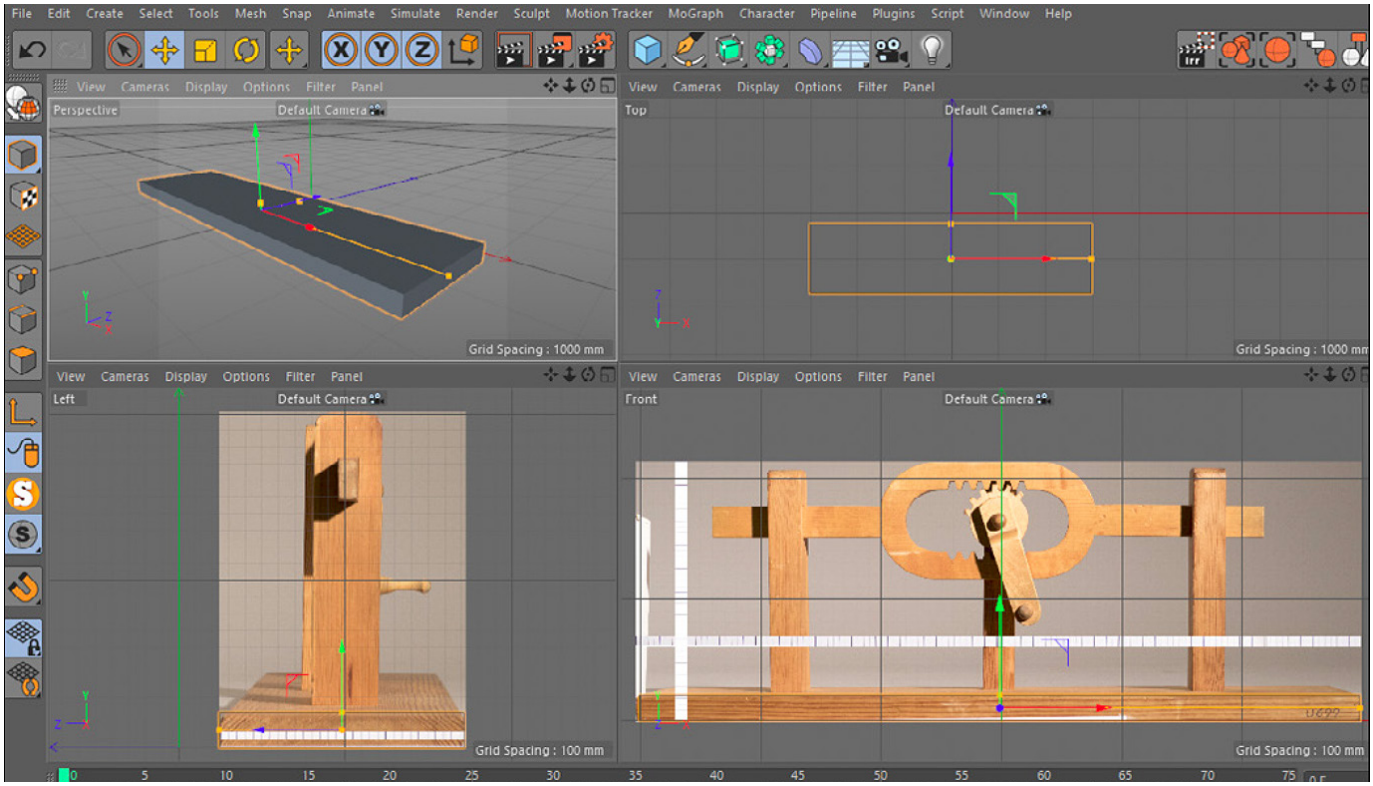
As is evident from the illustration, the resulting 3D image of Polhem's model nevertheless became inadequate. We repeated the scanning procedure, but results were similar. Stupid scanning, in short, produces stupid results. Above all, deficient outcome was due to bad lightning conditions and the impossibility to really hold the iPhone steady (when walking around the model). The instability of the photographic act is in fact better compensated in various 3D apps. Still, these do not produce a computational model which one can work with (as in PhotoScan). We also made an experiment, photographing one of Polhem's model at the Mining Museum in Falun through a glass display (the model was placed on a rotating plate). Circumstances thus resembled that of a regular visitor (trying to make a 3D copy). Agisoft PhotoScan was able to process the poor images — albeit with a reconstruction time of 61 hours.

V.5 Computer-Animated Models

Our second set up in metamodeling Polhem in 3D involved a collaboration with animator Rolf Lindgren. He was invited to the museum, where he took a few photographs of three different models from the mechanical alphabet (originals and copies). His purpose of photographing the models was foremost a way to measure (and compare) them with a centimeter ruler, necessary for computational simulation. Some images were also taken of model details. Lindgren's photographs (taken by a normal digital camera) were then aligned and straightened in Photoshop before being loaded into the software Cinema 4D, a professional 3D package. 04 27

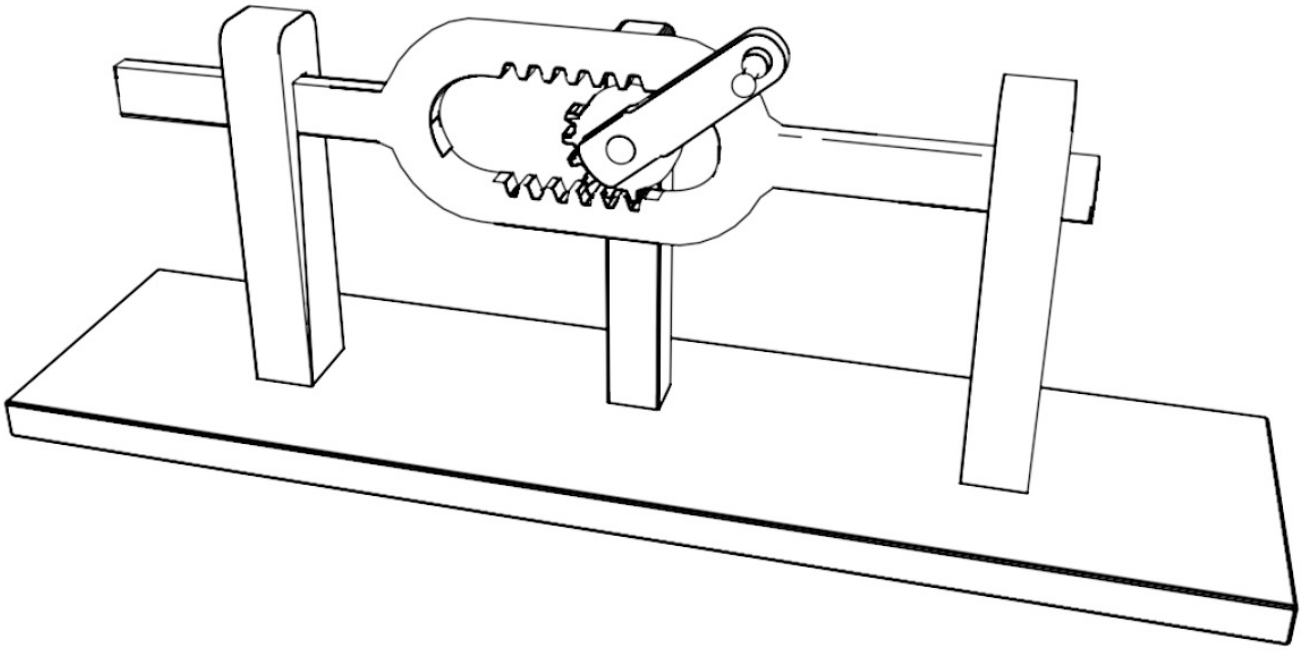
■ 27
On the software Cinema 4D, https://www.maxon.net/en/.

☐ 04
In a project collaboration with animator Rolf Lindberg, he simulated a model from Polhem's mechanical alphabet — by way of a few photographs — and constructed a brand new virtual object in the software Cinema 4D.



Essentially, Lindberg designed a new virtual object within Cinema 4D — loosely based on his prior photographs — where scale and details were attributes that really mattered to him. Cinema 4D lets users design (or in this case redesign) objects with sophisticated **cloner lightning** and **camera** functionalities. Hence, to reconstruct one of Polhem's models, Lindberg started with a number of geometric shapes in three dimensions (a cube, a polyhedron, a sphere etcetera). As is evident from 04, initially, Polhem's model hence

resembled a **literal model** placed onto a three dimensional spatial grid. Geometric shapes were then computationally altered and adjusted; i. e. edges were rounded, holes were cut, new shapes inserted, a cogwheel cut out from a spheric shape etcetera. Different textures were afterwards applied to the model, including shadows to accentuate depth. The are a number of default textures in Cinema 4D; and naturally different ones for wood as well.
A software algorithm can also imitate wooden textures from a photograph.
Finally, Lindberg used the camera functionality within the software to record model rotation, making a video from different angles, including zooming in and out of details. 05



☐ 05
Simulating Polhem in Cinema 4D step by step — from a rudimentary three dimensional drawing to a detailed cogwheel with wooden textures.

Metamodeling Polhem in Cinema 4D raises a number of questions regarding both accuracy in representation and authenticity vis-à-vis the original, auratic cultural heritage object. Rather than actually 3D scanning a model (an index), one might argue that the work process for animator Lindberg involved a number of **iconic steps** — that is, **likenesses**. The result was a 3D model, which Lindberg also displayed as a two-dimensional animation (i. e. 3D rendering). In one way, Lindberg hence reversed the representational process, since the original object (Polhem's model) was reduced to a kind of image replica he only needed a few photos for the new virtual model he constructed.

The difficulty in rendering Polhem's models based on **technical rigour in digital heritage visualisation** [28] — to quote the London charter again — became especially problematic regarding animations of **model movement**. Naturally, computer code could make the cogwheel (in the model above) run completely smooth. In the original model, however, the cogwheel caused a lot of friction; the model was made of wood after all. We hence asked Lindberg to make friction more noticeable in his animations when the cogwheel moved (which he did). In fact, the tricky issue of **how to represent friction** in a technical rigours way in 3D, became an interesting research question for us. As is often the case, digital representations are often too good. The problem is common in the heritage domain; how to deal with and think about the exact representation of color, for example, when digitising older photographs or films? Lindberg has, in fact, prior worked with the Swedish Film Institute in restoring silent films and animated intertitles, and often argued that his textual animations were inappropriate in relation to the original print. How stained and smudge should an original silent cinema intertile actually look like? From a heritage perspective the question always comes down to **interpretation**. In a similar manner, friction in relation to movement in Polhem's models also became a question of interpretation, even if (in this case) we could actually look at the original models and see how they behaved friction wise when the cogwheel was turned.

■ **28**
The London Charter 2009, p. 4.

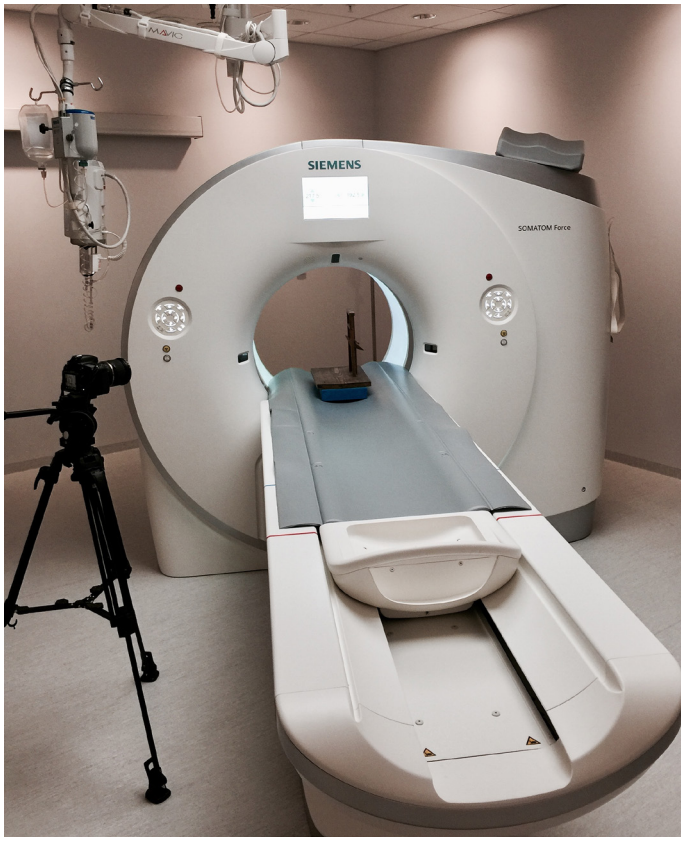
V.6 CT-Scanning Models

The issue of how to interpret friction in 3D also became apparent in our final scanning setup. Since an interactive 3D model cannot really represent movement — it then becomes a static (i. e. non-interactive) animation — moving from simple scanning modes to more intelligent ones as CT-scanning, does not really solve the **friction problem**. Nevertheless, the third way in which we scanned Polhem's model was indeed our most ambitious. In a collaboration with the company Interspectral — a visualisation software company focused on volumetric rendering and 3D digitisation — and the Center for Medical Image Science and Visualization (CMIV) at Linköping University Hospital, we performed a three dimensional CT-scan of five models from Polhem's alphabet. CMIV conducts

»focused front-line research within multidisciplinary projects providing solutions to tomorrow's clinical issues.« 29

Some projects have a slant of medical humanities to them, but basically CMIV's mission is to develop methods (and tools) for image analysis and visualisation within healthcare and medical research. Scanning old wooden models from a pre-industrial inventor was, hence, an exception — even to the extent that the U. S. History Channel was present the day we scanned our models (shooting footage for a forthcoming documentary on new technological ways of analysing objects from the past). 06

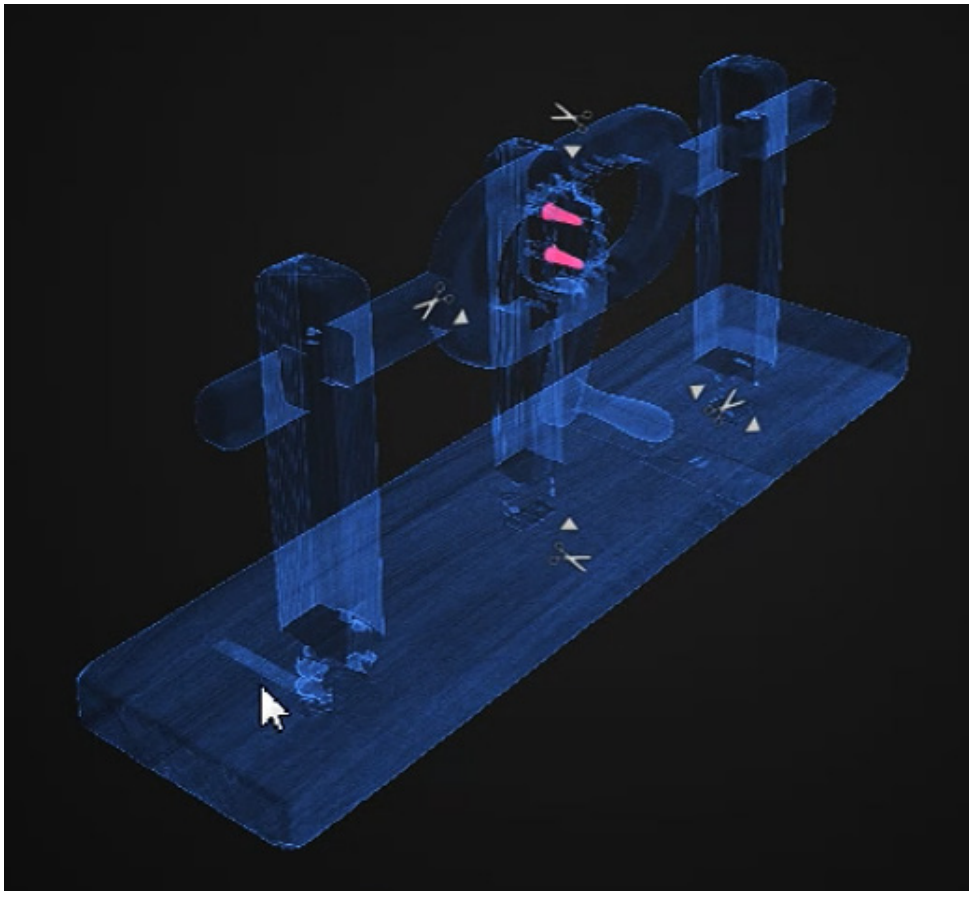
■ **29**
For further information around the Center for Medical Image Science and Visualization (CMIV) at Jönköping University, https://www.liu.se/?l=en&-sc=true.



□ 06
CT-scanning a model from Polhem's mechanical alphabet at the the Center for Medical Image Science and Visualization (CMIV) at Linköping University Hospital.

As one of few medical image centers in the world, CMIV has a state of the art Siemens CT Force scanner. It produces extreme high resolution images, making it possible for example to monitor blood flows. CT-scanning is a procedure with multitudinous images taken from different angles to produce a cross-sectional and tomographic 3D image. CT-scanning hence differs from more conventional line of sight 3D scanning methods such as laser scanning and photogrammetry. In essence, CT-scanning produces virtual image slices of an object (or usually a person), allowing one to see the inside (of a body). The scanner which we loaded Polhem's models onto, is actually regularly used within medical forensics and criminal investigations at the Linköping University Hospital to locate bullets in victims.

Basically, our idea of CT-scanning Polhem was to 3D digitise models in an undoubtedly sophisticated manner. In addition, CT-scans would allow us to see the inside of models without breaking them. It would give cues as to how they were constructed and put together. Some models are more complex mechanical wooden structures than others — and naturally, all are too fragile to take apart without destroying them. CT-scanning, however, has nothing to due with chronological issues, i. e. trying to date models. Moreover, the CT-scan was done in collaboration with the company Interspectral, and the deal was that they would deliver 3D images where we could both see inside models, and where parts of the models could also be virtually separated. We were hence able to look inside five of Polhem's models through the software Inside Explorer. 07



☐ 07
Inside Polhem — CT-scanning a model in collaboration with the company Interspectral made it possible to see inside models without breaking them.

Inside Explorer is a touch screen software developed by Interspectral that enables

»users to explore objects that have been scanned with 3D x-ray. Using touch gestures users can examine complex 3D data in an intuitive and exciting way.« 30

The software is designed for public use, and interestingly geared towards the heritage sector. Interspectral has, for example, collaborated with the the Dutch National Museum of Antiquities and 3D scanned a three-met-re-long mummified Egyptian crocodile which the Inside Explorer software lets users peek inside. 31 The same software made it possible for us to alter between the modes of **Solid wood** or **Shell & Metal**. In addition, we could rotate Polhem's models and look inside them from different angles. Nevertheless, there was in fact not much to reveal — apart from a few screws and differences in wooden density. Arguably, a mummified crocodile potentially unveils more astonishing things than old wooden models.

■ **30**
For information about Interspectral's software Inside Explorer, http://www.interspectral.com/inside-explorer/.

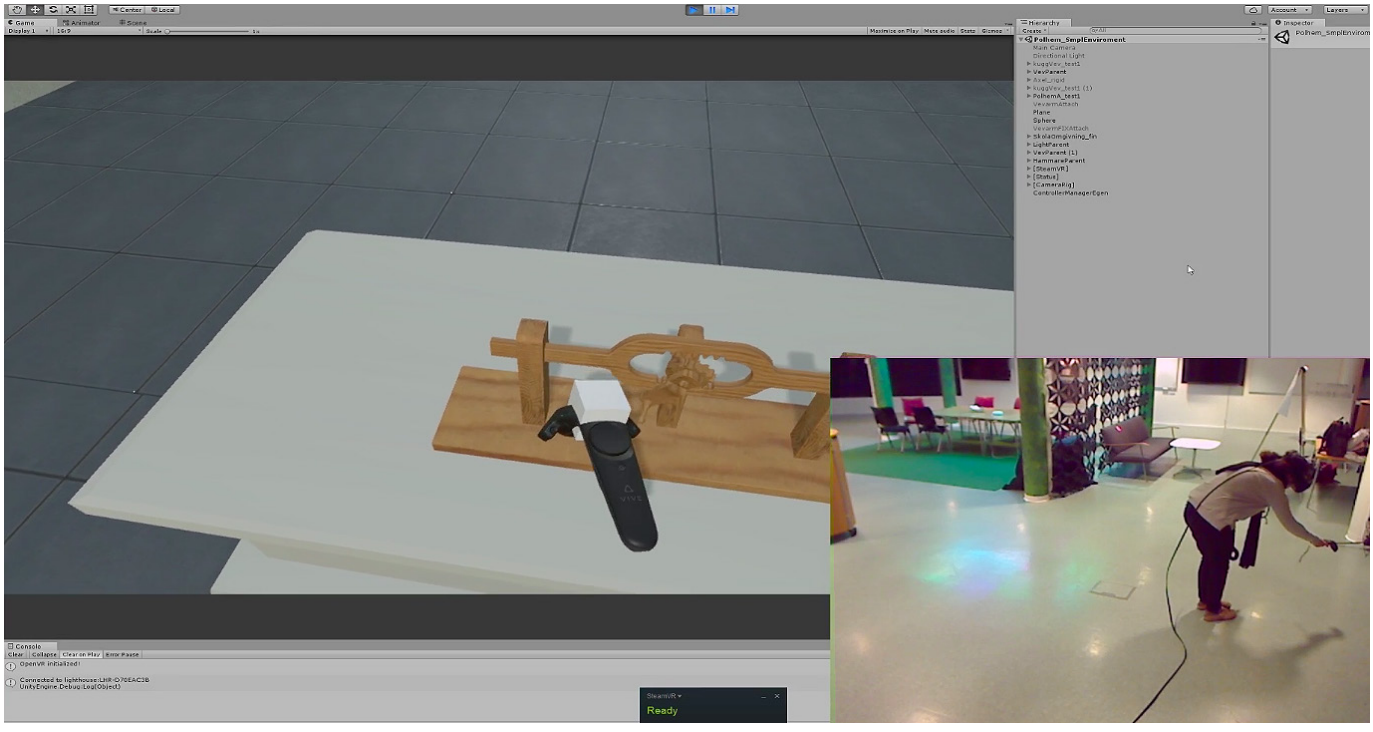
■ **31**
For further information on the mummified Egyptian crocodile, http://www.interspectral.com/projects/rmo/.

V.7 Concluding Remarks

As is evident from the digital interventions and short empirical descriptions in this book chapter, scanning, rendering and modeling (parts of) Christopher Polhem's **Laboratorium mechanicum** can be done in a number of ways. To the three different set ups above, we could easily have come up with a number of additional digital arrangements. Within the project **Digital Models** we have also worked with a fourth way to literally (re)present Polhem's mechanical alphabet by building a **virtual reality model** of the Royal Swedish Model Chamber — approximately at the time of Johann Beckmann's visit in 1765. 08

Through the usage of HTC Vive glasses — and the software Unity — we have virtually metamodeled how the Royal Swedish Model Chamber looked like in the mid 1760s. The task, however, has proven to be somewhat difficult since there are no known illustrations or archival documents as to what the interior of the model chamber actually looked like. Nevertheless, the purpose is on the one hand to increase historical understanding about the the model chamber and Polhem's models via visualisation and virtualisation, as well as to examine and investigate the potential of VR-technology in rendering a distinct historical place and time (i. e. look, feel, touch and sound). On the other hand our idea is to examine different forms of interactivity by inserting a number of Polhem's models in the virtual model environment, and hence experiment with novel ways to use the pedagogical quality of his models.

☐ 08
Remodeling Johann Beckmann's 1765 visit to the Royal Swedish Model Chamber — in virtual reality.



To sum up, using Polhem's mechanical alphabet as a case, this book chapter has shown how differences in 3D digitisation will result in representations that share some attributes with the original models, but not all of them. The **specificity** of 3D digitisation depends on factors as selected materials, scanning, rendering and modeling procedures, software and hardware — not to mention funding. It goes without saying that the contrast between self-scanning Polhem's models and CT-scanning them at a university hospital is foremost one of money. The purpose, however, of these try-outs of multiple scanning procedures within our project has been to raise awareness within the heritage domain that 3D digitisation and visualisations can be done in various ways. It might not come as a surprise, and naturally the London charter recognises a wide range of available computer-based visualisation methods. Yet it is quite another matter for a heritage institution as the Swedish National Museum of Science and Technology to have the ability to **practically** test differences in 3D procedures and results.

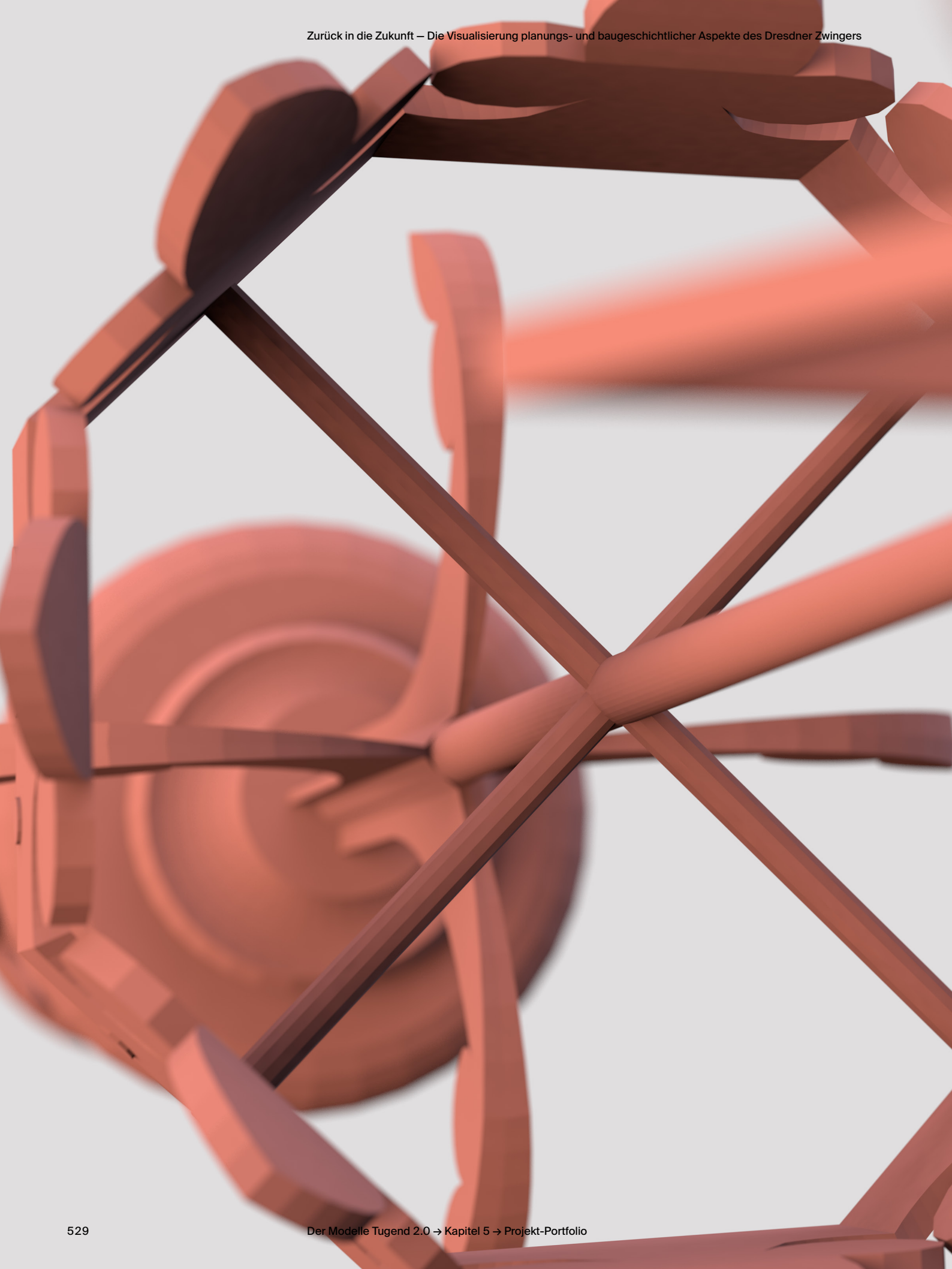
Finally, within the contemporary heritage domain one might argue that the relation between **data and object** is currently being negotiated (and perhaps also renegotiated). At least the claim can be made as far as 3D visualisations are explored. One of the major concerns, however, regarding 3D within the heritage sector, is that without knowledge of the three dimensional scanning and/or modeling process, and not

»knowing enough about the process of building both the 3D visualisation and its interpretation, the public's only choice is to trust the authority of the cultural institution.« 32

■ **32**
Vitale 2016, P. 149.

Authority and material authenticity are trademarks of the heritage domain. Yet, as this book chapter has shown, 3D visualisations will **always** cater (in one way or the other) to interpretation of museological objects selected for representation — even if institutions are totally explicit and open about their digital practises. Evidentially, when working with 3D, heritage institutions should be attentive to, and include information about the technological set up.

Suffice to say, one should — last but not least — also acknowledge that 3D appearances of Polhem's models will on nearly all occasions be secondary to their actual historical usage. Following Polhem, physical models were always superior to drawings and abstract representations. But if the models within the mechanical alphabet are interesting as physical traces of the material foundations of scientific knowledge, the question is if Polhem would have considered 3D visualisations in a similar manner. Within the project **Digital Models** we would like to think that he would have approved.



Dirk Welich, Peter Heinrich Jahn, Markus Wacker

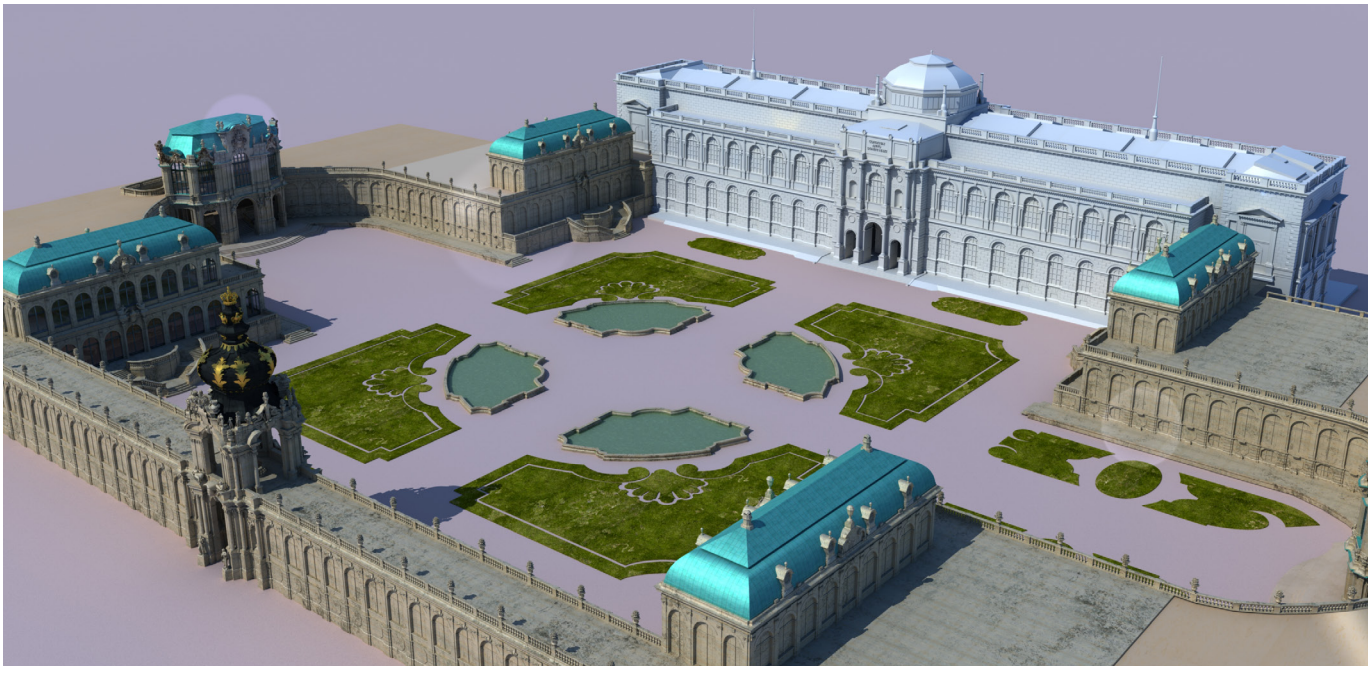
VI. Zurück in die Zukunft — Die Visualisierung planungs- und baugeschichtlicher Aspekte des Dresdner Zwingers

→ 3D-Modellierung, Architektur, Didaktik, Virtuelle Realität (VR), Immersion

Der Beitrag stellt die virtuelle Modellierung verschiedener Planungs- und Bauzustände des so genannten Dresdner Zwingers vor, einem aus Barockzeit und Historismus stammenden Garten- und Gebäudeensemble von hohem kulturellen Wert als Baudenkmal wie auch als Touristenziel. Ausgangspunkt war der Wunsch, eine umfängliche digitale Bibliothek an 3D-Modellen für eine öffentliche Präsentation der Bau- und Kulturgeschichte des Dresdner Zwingers anzulegen. Die Modellierungsarbeiten wurden unter Leitung der Autoren in die Ausbildung von Medieninformatikern an der HTW Dresden integriert. Bereits während der Bearbeitung hat sich gezeigt, dass das angewendete Verfahren auch eine wissenschaftliche Analysemethode für die Architekturgeschichte sein kann. Nach ersten Versuchen fotografischer und filmischer Modellvermittlung ist eine im Zwinger zu installierende Multimedia-Präsentation mit Erlebnisformaten erklärtes Ziel der besucherdidaktischen Bemühungen. Außerdem sind dem anfänglichen Modellierungsprojekt diverse Folgeaktivitäten entwachsen: die Entwicklung eines Dokumentationstools für quellenbasierte digitale 3D-Modellierung und speziell für das Zwingerprojekt die Konzeption einer damit als Interface operierenden Online-Modelldatenbank, die Erweiterung des Modellierspektrums auf das dem Zwinger benachbarte Residenzschloss sowie die Kooperation mit einem historisch ausgerichteten digitalen modell- und fotobasierten Stadtdokumentationsprojekt.

☐ 01
Dresden, Zwinger, Innenhof in Richtung barocker Pavillongruppe am Wall, rechts angeschnitten die Gemäldegalerie aus dem 19. Jh.
(SBG; Foto: Claudia Hübschmann, 2017)

☐ 02
Dresden, Zwinger, 3D-Modell des Baubestands (noch lückenhafter Modellierstand 2012) mit wirklichkeitsnaher Texturierung der barocken Partien, um die neutral belassene Gemäldegalerie des 19. Jhs. als deren Ergänzung zu veranschaulichen. (SBG / HTW; Modelleure: Philipp Hackbarth, Falk Schieber, Michael Marschner und Steve Kuttig)



VI.1 Projektbeschreibung

Das im Titel genannte digitale 3D-Modellierungsprojekt der Staatlichen Schlösser, Burgen und Gärten Sachsen gGmbH (SBG) läuft seit 2006 in Kooperation mit dem Studiengang Medieninformatik der Fakultät Informatik/Mathematik an der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Dresden. Modellierungsgegenstand ist der von den SBG kuratierte **Dresdner Zwinger**, ein überwiegend barockes, jedoch erst im 19. Jahrhundert vollendetes Bautenensemble von internationaler Bedeutung, das sich heute als eigentümliche Mischung aus Schlossgarten, museal genutzter prachtvoller ehemaliger Festarchitektur und monumentalem historistischen Museumsbau darbietet. Den Ursprung des Zwingers bildete eine Orangerie. 01 [01] [02] [03] Am Anfang des Projekts stand die Aufgabe, die einzelnen Bauzustände in Form virtueller 3D-Modelle in einer Ausstellung zur Genese des Dresdner Zwingers zu veranschaulichen. Die Modelle sollten dem Besucher insbesondere die Vorstellung der nicht mehr vorhandenen Bau- bzw. der nie realisierten Planungszustände des Zwingers erleichtern. [04] Im Vordergrund stand also vornehmlich die didaktische Anwendung der Forschungs- und Arbeitsergebnisse.
Die Studierenden der HTW erhielten auf diesem Weg die Möglichkeit, im Rahmen ihrer Ausbildung im Fach 3D-Modelling an einem praxisrelevanten Thema zu arbeiten. Ursprünglich war die Projektlaufzeit auf circa zwei bis drei Jahre angelegt, jedoch hat die Fülle und Vielschichtigkeit des in den Archiven vorhandenen Quellenmaterials schnell zu einer Erweiterung des Projekts geführt. Sie brachte nicht nur eine Verlängerung der Projektlaufzeit mit sich, sondern auch eine ganz wesentliche Ausweitung der Fragestellungen, deren Beantwortung durch architekturhistorische Forschung erreicht werden sollte. 02 Es ergaben sich folgende Arbeitskomplexe:

1. Grundlage des Projektes bildet die revisionistische quellenbasierte Recherche der komplexen, von Wechseln und Brüchen durchzogenen Planungs- und Baugeschichte des Dresdner Zwingers. Sie ermöglicht gleichsam einen phänomenologischen Einblick in die Ideengeschichte der barocken Planungspraxis am kurfürstlichen Hof Augusts des Starken. Zugleich werden damit die bestehenden Erkenntnisse zum Quellenmaterial (bestehend aus zeitgenössischen Entwürfen, Plänen und Bilddokumenten) überprüft, insbesondere die systematische Zuordnung vereinzelt überlieferter Aufrissentwürfe zu bestimmten Planungsstadien und innerhalb derselben zu einem konkreten Standort. Durch die Bearbeitung konnten einige Korrekturen am bestehenden Forschungsstand vorgenommen werden. 03 Insoweit bewegte sich das Projekt im üblichen Rahmen der architekturhistorischen Forschungspraxis.
2. Die Übertragung der zweidimensionalen Grund- und Aufrisse in dreidimensional modellierte Baukörper und deren Implementierung in den jeweiligen als vereinfachtes 3D-Modell angelegten historischen Stadtraum kommt, zumindest der formalen Erscheinung nach, einer Realisierung der Entwurfsstände nahe. Folglich müssen die in 3D modellierten Baukörper zunächst im Sinne einer Simulation auf

■ 01
Begonnen im Jahr 1709; vorübergehende Einstellung des Baus 1728; der Museumsbau, die sog. Gemäldegalerie, erbaut 1847–55. Letztere beherbergt die Sammlung »Alte Meister«, zukünftig auch die Antikensammlung. In den barocken Gebäudeteilen sind zudem die Porzellansammlung sowie der Mathematisch-Physikalische Salon untergebracht, allesamt den Staatlichen Kunstsammlungen Dresden unterstehend. Der Name Zwinger bezieht sich auf die Lage zwischen Residenzschloss und den einstigen Festungswällen. Siehe z. B. Dirk Welich, Der Zwinger. Dresdens berühmter Festbau, Leipzig 2002.

■ 02
Peter Heinrich Jahn, Dirk Welich, Zurück in die Zukunft — Die Visualisierung planungs- und baugeschichtlicher Aspekte des Dresdner Zwingers, in: Staatliche Schlösser, Burgen und Gärten Sachsen Jahrbuch, 16, 2009, S. 51–72, insbes. S. 51, 67 f., sowie dies. zus. mit Markus Wacker, Back to the Future. Visualizing the Planning and Building of the Dresden Zwinger, in: Stephan Hoppe, Stefan Breitling (Hg.), Virtual Palaces, Part II: Lost Palaces and their Afterlife — Virtual Reconstruction between Science and Media (PALATIUM e-Publications Volume 3), München 2016, S. 267–301, inbes. S. 267–277, http://www.courtresidences.eu/uploads/publications/virtual-palaces-II.pdf.

■ 03
Siehe Jahn, Welich 2009, S. 51–67.

ihre bauliche Realisierbarkeit hin überprüft werden. Dafür ist es zwingend notwendig, dass die Entwürfe ausgedeutet sind. Hierin liegt ein besonderer Mehrwert: Durch die Ausdeutung werden bestehende Planungslücken (sog. gaps), die die meisten Planzeichnungen aufweisen, aufgedeckt. Insofern geht es bei der 3D-Modellierung um die Etablierung einer architekturhistorischen Forschungsmethode.

3. Über die unstrittige Tatsache hinaus, dass 3D-Modelle Architekturzeichnungen leichter verständlich machen und damit per se wunderbare didaktische Vermittlungsinstrumente sind, stellt sich zunehmend die Frage, welche Vermittlungsarten bei virtuellen Modellen (präsentiert bei den SBG klassischerweise innerhalb von Ausstellungen) zum Einsatz kommen können. Infrage kommen dank der modernen digitalen Entwicklungen neuartige Präsentations- und Erlebnismöglichkeiten über Projektionen, VR-Brillen, Apps und vieles mehr.
4. Schließlich wird über eine semantische Online-Datenbank an der Bereitstellung des bearbeiteten umfänglichen Materials für den wissenschaftlichen Diskurs gearbeitet. Die 3D-Modelle weisen naturgemäß **gaps** auf (vgl. 2.). Es bedarf daher einer transparenten und nachvollziehbaren Dokumentation aller Erkenntnisse (Paradaten), Metadaten und offener Fragen, also eines Interfaces zwischen Modell, Original und weiterer Quellen. Im Zusammenhang mit der Entwicklung eines Interfaces stellt sich zwingend die Frage nach einer geeigneten architekturhistorischen Forschungsmethode.

☐ 03
Dresden, Zwinger, Luftaufnahme. (SBG)

☐ 04
Nicht ausgeführter Plan von Matthäus Daniel Pöppelmann zum Ausbau des Dresdner Zwingers, um 1715/16. (Sächsisches Staatsarchiv — Hauptstaatsarchiv Dresden, 10006 OHMA, Plankammer, Cap. 01A, Nr. 26)

VI.2 Projektdurchführung

Zu 1

Recherche und Modellierung: Insgesamt wurden von circa 35 bisher bestimmten Planungs- und Bauzuständen des Dresdner Zwingers, seiner Erweiterungsbauten und der neuen Überplanungen des Schlossareals 14 als virtuelle 3D-Modelle rekonstruiert. Fünf davon zeigen über einen längeren Zeitraum bestandene Bauzustände, acht versuchen im Sinne einer baulichen Simulation die nicht verwirklichten Pläne zu visualisieren. 05 06 Je nach Informationsgehalt der Quellen sind die Rekonstruktionen verschieden detailliert ausgearbeitet und seitens ihrer Kubatur zum Teil durchaus auch unvollständig. 09 Eingebunden in den jeweiligen historischen Stadtraum geben sie trotzdem eine wirklichkeitsnahe Vorstellung von der städtebaulichen Wirkung der einzelnen Zustände, die über die Dimension der eigentlichen Architektur hinausgeht. Am Projekt mitgewirkt haben über neun Jahre hinweg — der anfängliche Projektzeitraum hat sich deutlich verlängert — 30 Modellierer als wechselnde Bearbeiter von einzelnen Zeitschnitten; wechselnd insofern, da die Bearbeitungszeit eines Zeitschnitts den Zeitrahmen des Studienmoduls eines Studierenden weit überschritten hat. Erst im Verlauf des Projektes ergaben sich nicht nur aufgrund der wechselnden Bearbeiter, sondern auch der unterschiedlichen Herangehensweise beim Modellieren systematische Richtlinien, welche die Kompatibilität der Modelle sicherstellen sollte.

Wichtige Festlegungen, die getroffen wurden, waren:

→ Anlegen einer Modellierdatenbank, um einzelne Baugruppen und Objekte weiterverwenden zu können 07,
→ der Detailgrad des Modells, vorwiegend Quadmodellierung sowie
→ Vermeidung beziehungsweise weitgehender Verzicht auf Glättungsgruppen.

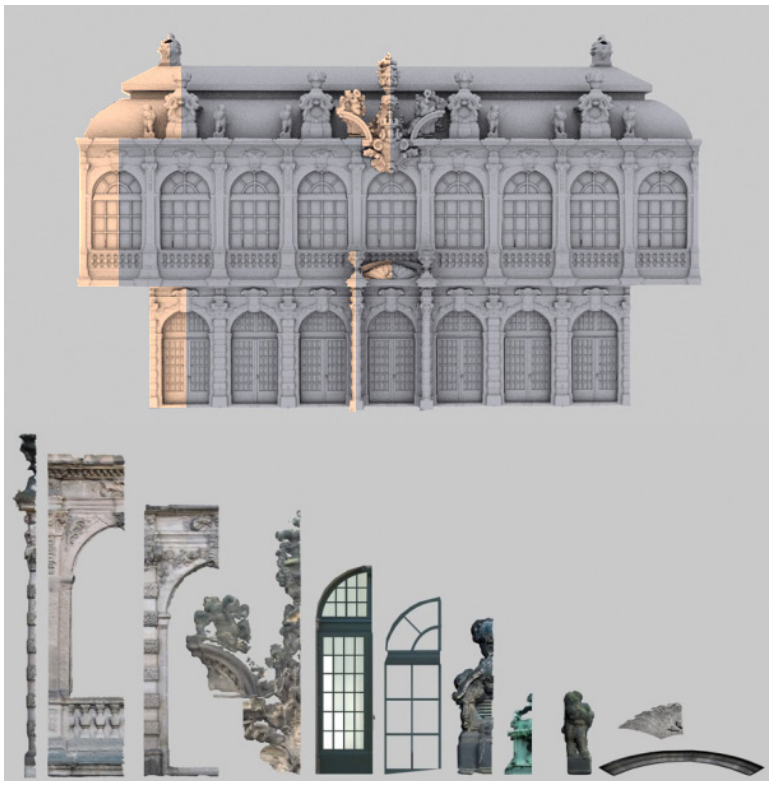
Modelliert wurde auf Grund- und vor Aufriss, soweit die digital aufbereiteten Quellen idealerweise beides liefern konnten. 04 08 In der Regel ist die Quellenlage aber disparat und weist neben Plänen und Aufrissen, die weitestgehend einer Architekturzeichnung entsprechen, auch Bildquellen auf, die einen hohen Interpretationsspielraum zulassen, wie beispielsweise grafisch oder in Gemälden wiedergegebene Ansichten (sog. Veduten). Deren Aussagen zu Architekturformen oder -details können lediglich im Indizienverfahren die Annahmen stützen, die man aufgrund von Stilkunde und Symmetrie- oder Analogieschlüssen vermutet; eine Beweisführung ist an diesem Quellmaterial also nur bedingt möglich. 05

■ 04
Jahn, Wacker, Welich 2016, S. 277 ff., bzw. Sander Münster, Peter Heinrich Jahn, Markus Wacker, Von Plan- und Bildquellen zum virtuellen Gebäudemodell. Zur Bedeutung der Bildlichkeit für die digitale 3D-Rekonstruktion historischer Architektur, in: Sabine Ammon, Inge Hinterwaldner (Hg.), Bildlichkeit im Zeitalter der Modellierung. Operative Artefakte in Entwurfsprozessen der Architektur und des Ingenieurwesens (eikones), München 2017, S. 291–320, hier S. 302–306.

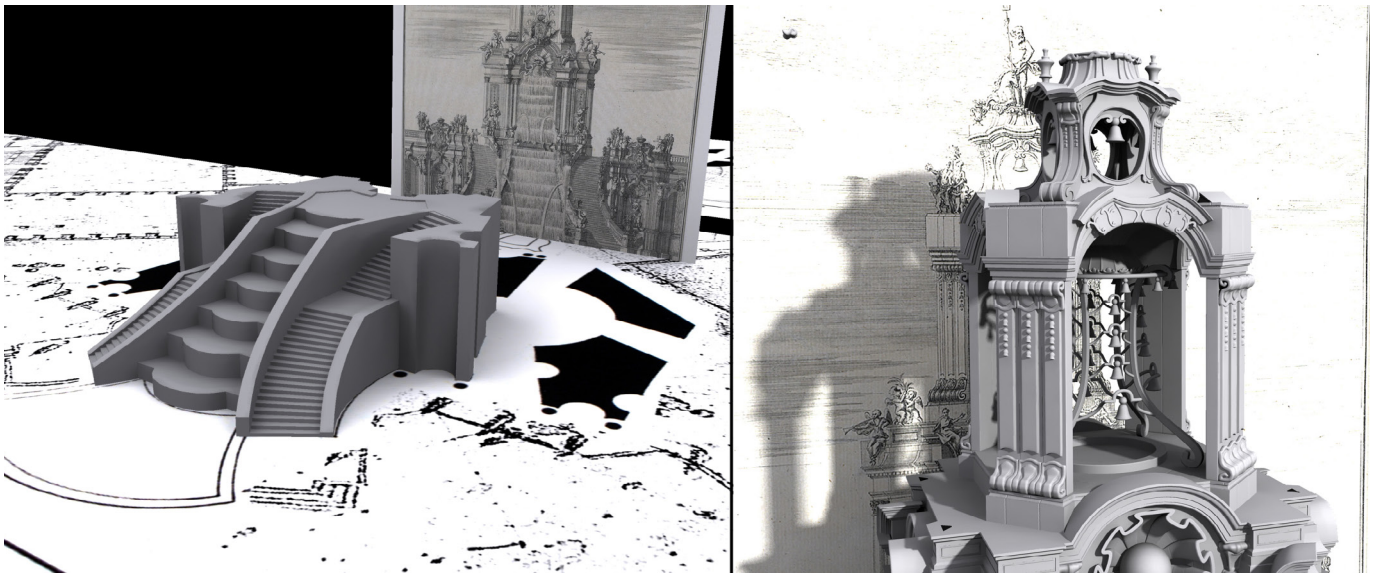
■ 05
Münster, Jahn, Wacker 2017, S. 294–302.

□ 05
Die für die Modellierung ausgewählten 14 Zeitschnitte anhand maßgeblicher Bild- bzw. Planquellen im Überblick, dabei die baulich nicht realisierten Planungen rot umrandet. (Fotocollage von Peter H. Jahn)

☐ 06
Die für die Modellierung ausgewählten 14 Zeitschnitte anhand der Modelle im Überblick, dabei die baulich nicht realisierten Planungen rot umrandet. (Fotocollage von Peter H. Jahn)



☐ 07
Modellierdatenbank am Beispiel eines Saalpavillons. (HTW; Modelleur: Philipp Hackbarth)

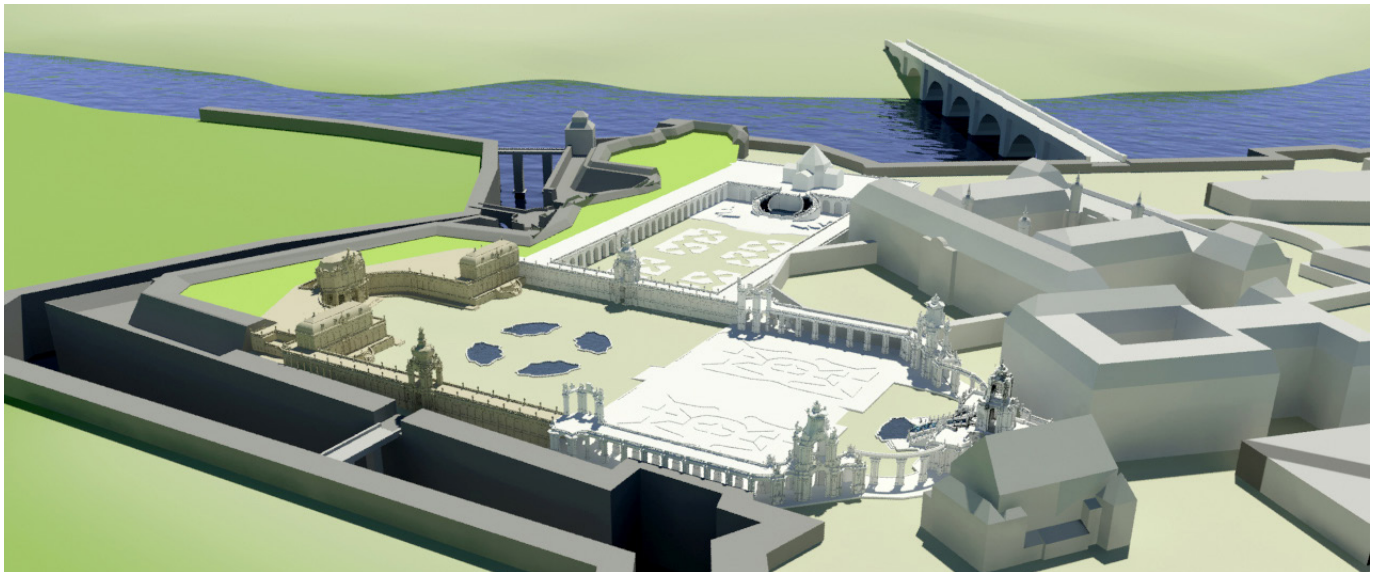


☐ 08
Modellierung auf Grundriss vor Aufriss am Beispiel des Kaskadenturms von Zeitschnitt 5. (09 und 13)
(HTW; Modelleur: Toni Seifert)

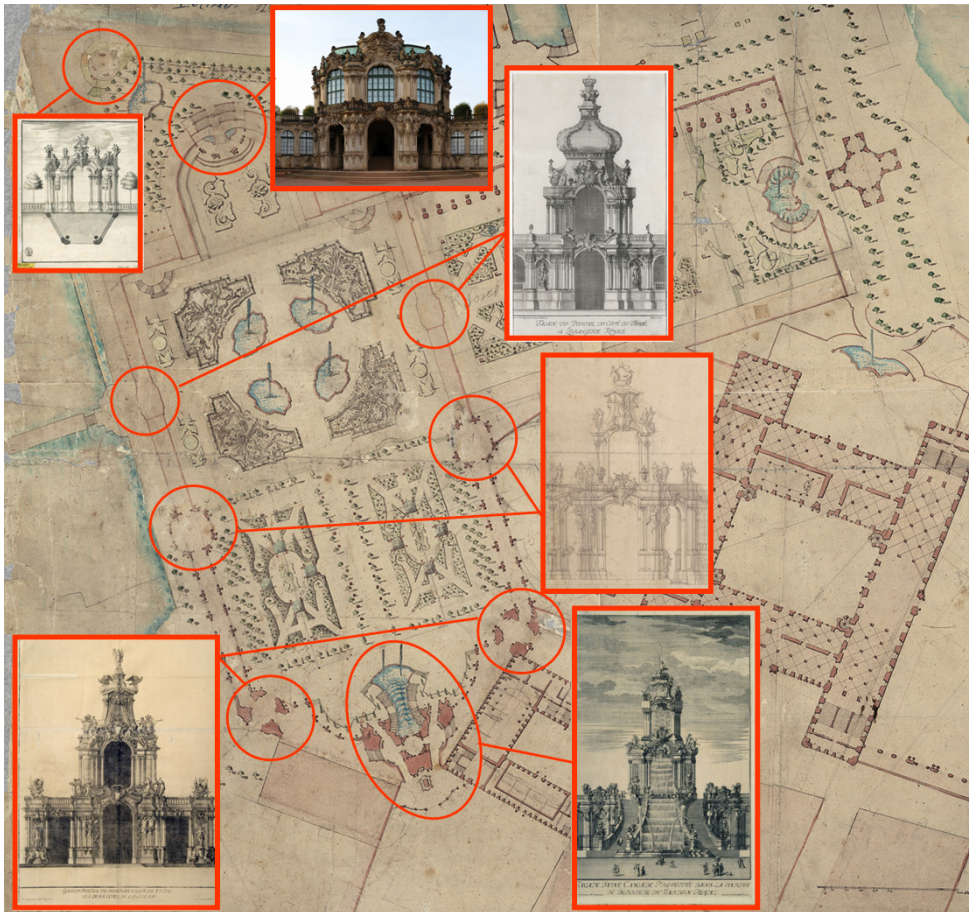
Zu 2

Modellkonzeption: Probleme bei der Konzeption von 3D-Modellen 09, welche verworfene Planungen baulich simulieren sollen, bereiteten vor allem die vielen zwischen den Grundrissen und den zuordenbaren Aufrissen herrschenden Divergenzen sowie die aus partiellem Fehlen von Planmaterial herrührenden Planungslücken. 10 Besagte Divergenzen sind das Ergebnis eines planerischen Arbeitsprozesses, welcher das mühselige und zeitraubende Zeichnen der zu einer Gebäudevisualisierung notwendigen Teilpläne, insbesondere der auf den Grundriss folgenden Aufrisse, pragmatisch zum Visualisieren von Varianten nutzt. Diese Varianten können entweder im Sinne von Alternativen gleichwertig sein oder der Entwurfsoptimierung dienen. Planungslücken entstehen dadurch, dass ein Plansatz aufgrund vorzeitiger Ablehnung nicht fertig ausgearbeitet wird, oder durch Überlieferungsverluste, im Fall des Dresdner Zwingers zuletzt infolge des Zweiten Weltkriegs. Um diese Differenzen im Sinne kohärenter Modelle eliminieren oder zumindest minimieren zu können, war es notwendig, soweit wissenschaftlich vertretbar, rekonstruierend vorzugehen (also die **gaps** so gut wie möglich zu schließen). Dazu wurden Logiken des im Barock und auch noch im Historismus gebräuchlichen antikisierenden Architektursystems (Säulenordnung, Rapport, Symmetrie etc.) sowie der historischen Bautechnik (Statik u. ä.) angewandt. Bei Grundriss-Aufriss-Divergenzen galt es vorab zu entscheiden, welcher Teilplan aussagekräftiger hinsichtlich des gesamten zu modellierenden Gebäudes ist und dadurch als Modelliergrundlage Priorität besitzt. Manchmal musste aus perspektivischen Entwurfsvisualisierungen ein fehlender Grund- oder Aufriss abgeleitet werden. 06

■ **06**
Jahn, Wacker, Welich 2016, S. 285–293, bzw. Münster, Jahn, Wacker 2017, S. 298–302.



☐ 09
3D-Modell gemäß Verortungsschema in 10 (Stand 2012), gezeigt in Vogelschau und kombiniert mit abstrakt gehaltenem Umlandmodell; am Uferwall ein mangels eindeutiger Aufrissquelle (gap) in abstrakten Kubaturen belassener Pavillon. (SBG / HTW; Modelleure: Philipp Hackbarth, Falk Schieber, Toni Seifert, Chris Leister, Romy Ebert und Rainer Uhlemann)

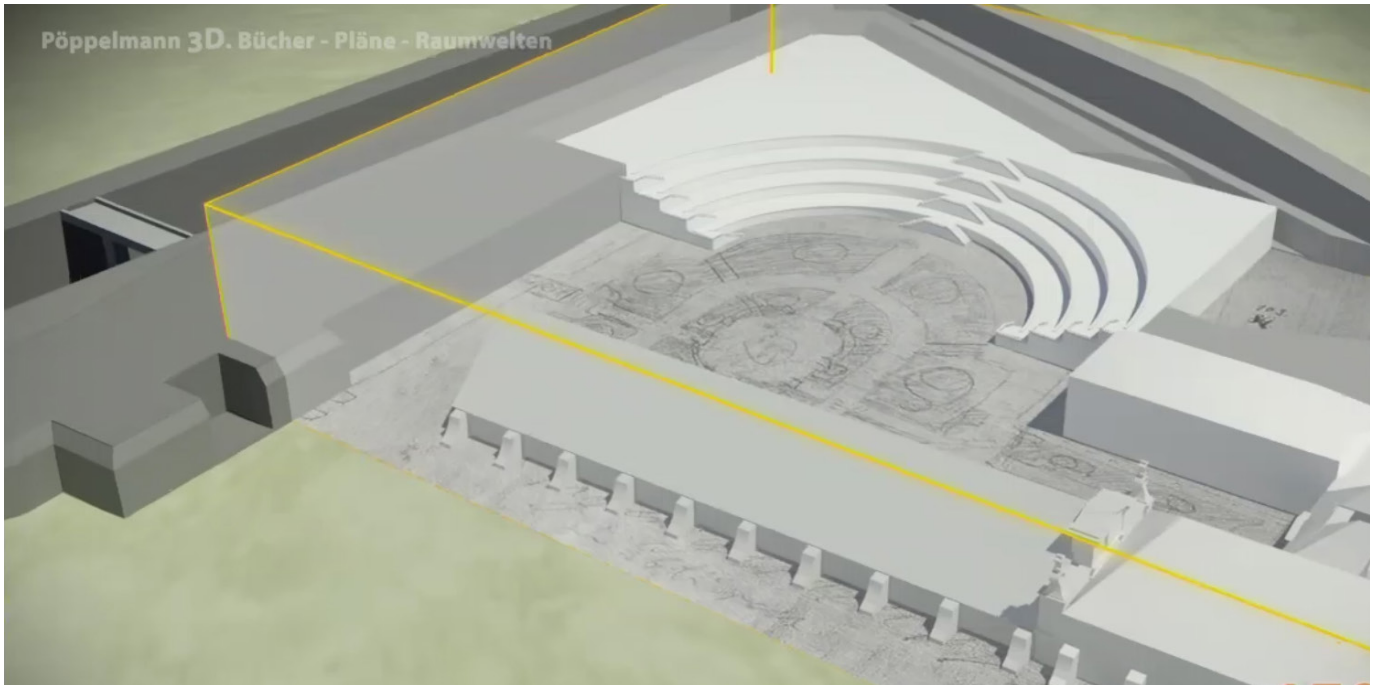


☐ 10
Schema zur Aufrissverortung innerhalb einer Zwingerplanung Matthäus Daniel Pöppelmanns (wie 04; die Zuordnung gegenüber veraltetem Modellierstand in 09 aktualisiert) mit Inkaufnahme von Diskrepanzen (gaps) zwischen Grundriss und Aufrissen. (Fotocollage von Peter H. Jahn)

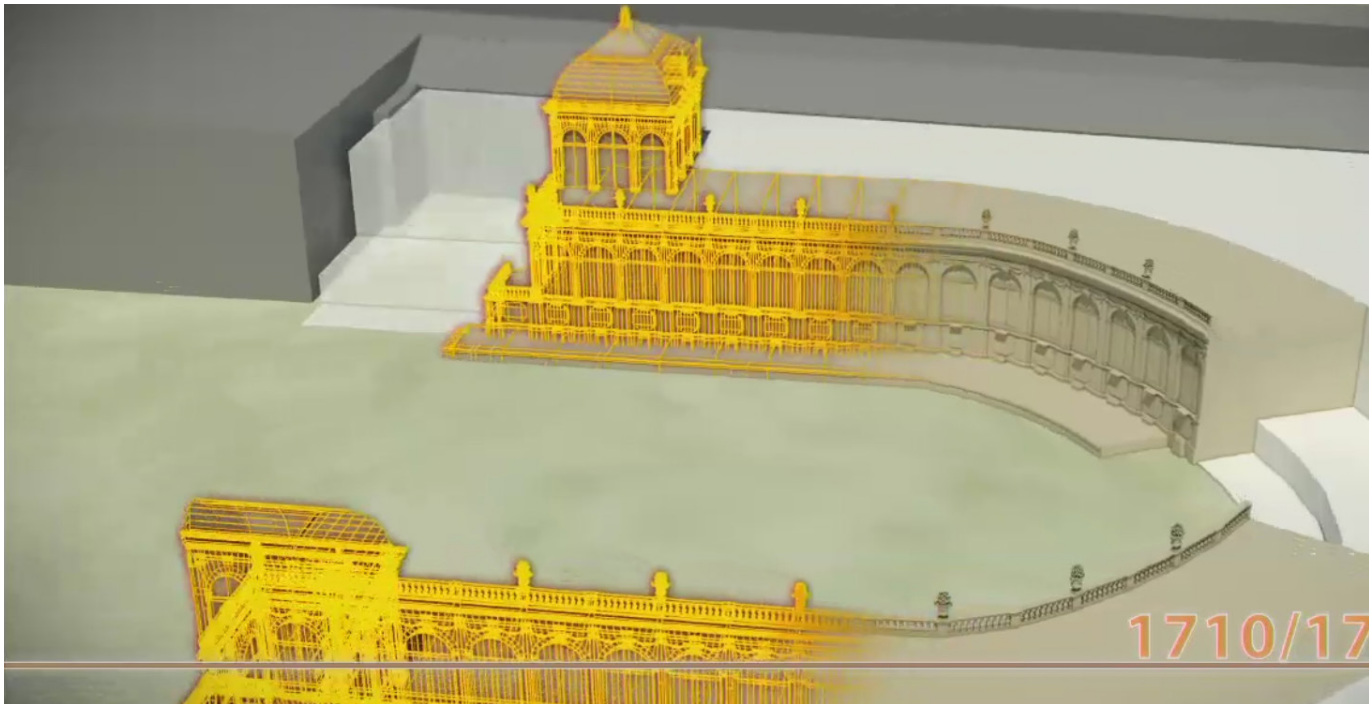
Zu 3

Vermittlung und Visualisierung: Didaktische Verwendung fanden die digitalen 3D-Modelle erstmalig in einem circa 10-minütigen Lehrfilm, welcher anlässlich der Ausstellung **Pöppelmann 3D: Bücher — Pläne — Raumwelten** im Jahr 2013 in der Sächsischen Landesbibliothek — Staats- und Universitätsbibliothek in Dresden gezeigt wurde. 07 Den Fokus auf den ersten Zwingerbaumeister Matthäus Daniel Pöppelmann legend, stellt der Film chronologisch die Entwicklung des Areals vom Planungsbeginn 1709 bis heute dar. 11 12 13 **Pöppelmann 3D** arbeitet mit Transformationshilfen: Dem Zuschauer wird beispielsweise eine zweidimensionale Bildquelle mit einem Grundriss präsentiert — also eine orthogonal projizierte Ansicht. In einer Trickanimation mutiert die Quelle zum dreidimensionalen Objekt, in dem sie in eine perspektivische Ansicht gekippt wird. Kongruent aus der Grundrisslinie entwickelt sich dann der planerisch gedachte Baukörper. 11 Dieses Prinzip ist von Stadtplänen mit stereometrisch gezeichneten Gebäuden bekannt. Mittels der Durchdringung von Körper und Zeichnung erfolgt vergleichend die visuelle Kontrolle der Formgleichheit mit dem Quellmaterial. Auf eine ähnliche tricktechnische Weise wird eine bauliche oder planerische Neuerung leicht begreifbar veranschaulicht, indem man diese durch sukzessives Überblenden von zwei Modellzuständen aus dem Vorherigen herauswachsen lässt. 12 Augenscheinlich lässt sich die Vermittlung erhöhen, wenn eine virtuelle Bewegung durch das 3D-Modell erfolgt, die speziell mit Untersichten bzw. Froschperspektiven arbeitet, denen das menschliche Maß zugrunde liegt. 13 Diese visualisierten Sightwalks wechseln mit Übersichten aus der Vogelperspektive. Der didaktische Wert besteht darin, dass dem Besucher die schwierige Arbeit abgenommen wird, sich aus dem zweidimensionalen Planmaterial eine dreidimensionale Kubatur vorzustellen, und er zudem ein wirklichkeitsnahes Gefühl für die physische Wirkung der nur gedachten Architekturen entwickeln kann.

■ 07
Siehe, obgleich besagter Lehrfilm darin nicht dokumentiert ist, Elisabeth Tiller, Maria Lieber (Hg.), Pöppelmann 3D. Bücher — Pläne — Raumwelten. Katalog zur Ausstellung im Buchmuseum der Sächsischen Landesbibliothek, Staats- und Universitätsbibliothek vom 17. Mai bis 1. September 2013, 2., durchgesehene Version (online-Publikation via Publikationsserver Qucosa® — Quality Content of Saxony), Dresden 2013, http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-118312.



□ 11
Filmstill zu Zeitschnitt 1 aus dem ausstellungsbegleitenden Videofilm »Pöppelmann 3D« von 2013, die Überblendung einer Grundrissquelle mit einem 3D-Modell zeigend. (SBG & HTW; Modelleure: Robert Albert, Romy Ebert und Rainer Uhlemann)



☐ 12
Filmstill zu Zeitschnitt 2 aus dem ausstellungsbegleitenden Videofilm »Pöppelmann 3D« von 2013, die Transformation eines Modellzustands in den nächsten mittels des Herauswachsen-Effekts zeigend. (SBG / HTW; Modelleure: Robert Albert, Philipp Hackbarth, Romy Ebert und Rainer Uhlemann)

☐ 13
Filmstill zu Zeitschnitt 5 aus dem ausstellungsbegleitenden Videofilm »Pöppelmann 3D« von 2013, den durch Nahaufnahme in Betrachterperspektive sich einstellenden sightwalk-Effekt zeigend. (SBG / HTW; Modelleure: Toni Seifert, Chris Leister, Romy Ebert und Rainer Uhlemann)

Aus diesen ersten Erfahrungen ist ein neuer Ansatz für die vormals geplante Ausstellung zur Genese des Dresdner Zwingers entwickelt worden. Diese sieht eine Multimedia-Präsentation vor, die mit unterschiedlichen Erlebnisformaten operiert. [14] [15] Im Kern geht es dabei um die Aufhebung der maßstäblichen Verzerrung zwischen Quellenmaterial und geplanter Baukörpergröße. So anschaulich die weiter oben beschriebenen Überblicksdarstellungen für die Ausdehnung von Architekturentwürfen zum Beispiel innerhalb eines bestehenden Stadtraumes sind, so wenig können sie dem Zuschauer eine Vorstellung von den physischen Dimensionen der Architektur vermitteln. Folglich ist die Idee eines immersiven 1:1-Erlebnisses entstanden. In letzter Konsequenz wird der Ausstellungsbesucher in einem VR-Raum die hypothetischen Architekturrekonstruktionen individuell gesteuert **durchleben** können. Der Besucher wird so in einer quellenbasiert inszenierten Architekturlandschaft vom Betrachter zum Zeugen. Das ist wahrnehmungspsychologisch höchst brisant, nicht nur, weil wir scheinbar begreifen können, was realiter begreifbar wäre, sondern weil die Zeugenschaft, die aus dem Dabeisein entsteht, das Wahrgenommene anders bewertet, nämlich nicht als eine eigene Konstruktion der Gedanken, sondern (vermeintlich, wohlgemerkt!) als eine Tatsache. Der Besucher sieht nicht mehr auf ein Modell, der Besucher steht in einem Modell (**Immersion**). [15] Zudem können die im VR-Raum gemachten Erfahrungen im physischen Realraum der den Zwinger umgebenden Stadt verifiziert werden. Diese Möglichkeit ist durch eine Smartphone-App angedacht, die den Besucher an die neuralgischen Punkte im Stadtraum führt. Mittels Augmented Reality (Kamerabild und Überblendung von digitalem Inhalt) werden die Rekonstruktionen als Erinnerungshilfe vor Ort eingespielt und der Besucher kann das virtuelle Erlebnis der städtebaulichen Konstellation aus der Ausstellung erneut erfahren.

☐ 14
Entwurfsgrafik zur sog. Sphäre 2 der geplanten multimedialen Zwinger-Ausstellung: Ausstellungsarchitektur für immersive 180°-Projektion. (SBG; Entwurf: m-box bewegtbild GmbH, Berlin)

□ 15
Entwurfsgrafik zur sog. Sphäre 4 der geplanten multimedialen Zwinger-Ausstellung: Projektionssphäre für immersive 270°-Projektion zu dem 1719 im Zwingerhof aufgeführten »Reiterballett der vier Elemente«. (SBG; Entwurf: m-box bewegtbild GmbH, Berlin)

Zu 4

Wissenschaftliche Aufbereitung: In wissenschaftlicher Hinsicht wird an einer semantischen Online-Datenbank gearbeitet, in welcher die speziell hierzu aufbereiteten digitalen 3D-Modelle das Interface zu den Modell und Original betreffenden Meta- und Paradaten bilden. Das Team Drematrix der HTW entwickelt hierzu unter dem Namen **DokuVis** den Prototyp einer solchen Datenbank, die zukünftig als Dokumentationssystem für digitale Rekonstruktionen helfen soll, 3D-Modellierungsprojekte bereits während der Arbeitsphase zu strukturieren, zu organisieren und dabei zugleich zu dokumentieren. (**Wacker & Bruschke → 282**) Großes Augenmerk wird dabei auf von allen Beteiligten gut nutzbare Werkzeuge gelegt. Intensive Analysen von durchgeführten Projekten haben ergeben, dass vor allem eine umständliche und komplizierte Bedienung, wie sie in bestehenden Teillösungen existiert, eine der wesentlichen Hemmschwellen für die Nutzung und Pflege der Dokumentationsarbeit sind. Hier setzt das Werkzeug DokuVis mit einer akribischen Analyse der Arbeitsprozesse 08 von verschiedenen Fachrichtungen an. Sie stellt dem jeweiligen Nutzer auf seine Bedürfnisse zugeschnittene Werkzeuge bereit, die sich aufwandsarm in den bestehenden Arbeitsablauf integrieren lassen beziehungsweise durch deutlich erkennbare Arbeitserleichterung die Projektdisziplin fördern.

■ **08**
Siehe Sander Münster, Interdisziplinäre Kooperation bei der Erstellung geschichtswissenschaftlicher 3D-Modelle, Wiesbaden 2016; Münster, Jahn, Wacker 2017, S. 306–310.

VI.3 Kooperationen

Zu Fragen der Dokumentation besteht außerdem seit August 2016 eine Kooperation der SBG mit dem drittmittelgeförderten Verbundprojekt **HistStadt4D — Urban History in 4 Dimensions — Research and Discover** des Medienzentrums der TU Dresden und den Instituten für Kunstgeschichte sowie Informatik (Arbeitsgruppe IX: Mensch-Computer-Interaktion) der Julius-Maximilians-Universität Würzburg. 09 Auch in diesem Projekt, in welchem es um multimodale Zugänge zu historischen Bildrepositorien zur Unterstützung stadt- und baugeschichtlicher Forschung und Vermittlung, entwickelt am Beispiel der Stadt Dresden, geht, steht eine digitale 3D-Modellierung, in diesem Fall ein Stadtmodell, als Interface einer Datenbank im Mittelpunkt. Via 4D-Browser und Augmented-Reality-Darstellung sollen historische und aktuelle Dokumentationsfotografien und die damit verbundenen Meta- und Paradaten zeitlich und räumlich im Stadtraum verortet und dadurch für die historische Forschung nutzbar gemacht werden. Es soll im Zuge der Kooperation geprüft werden, ob und inwieweit sich die zum Projektrahmen (1850 bis heute) zeitlich passenden virtuellen Zwingermodelle in die zu erstellende Stadtmodellierung integrieren lassen. 16

■ 09
Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Siehe Sander Münster, Florian Niebling, HistStadt4D – Multimodale Zugänge zu historischen Bildrepositorien zur Unterstützung stadt- und baugeschichtlicher Forschung und Vermittlung, in: Konferenzabstracts der Jahrestagung der Digital Humanities im deutschsprachigen Raum, Modellierung – Vernetzung – Visualisierung, Leipzig, 2016, http://www.dhd2016.de/boa.pdf.

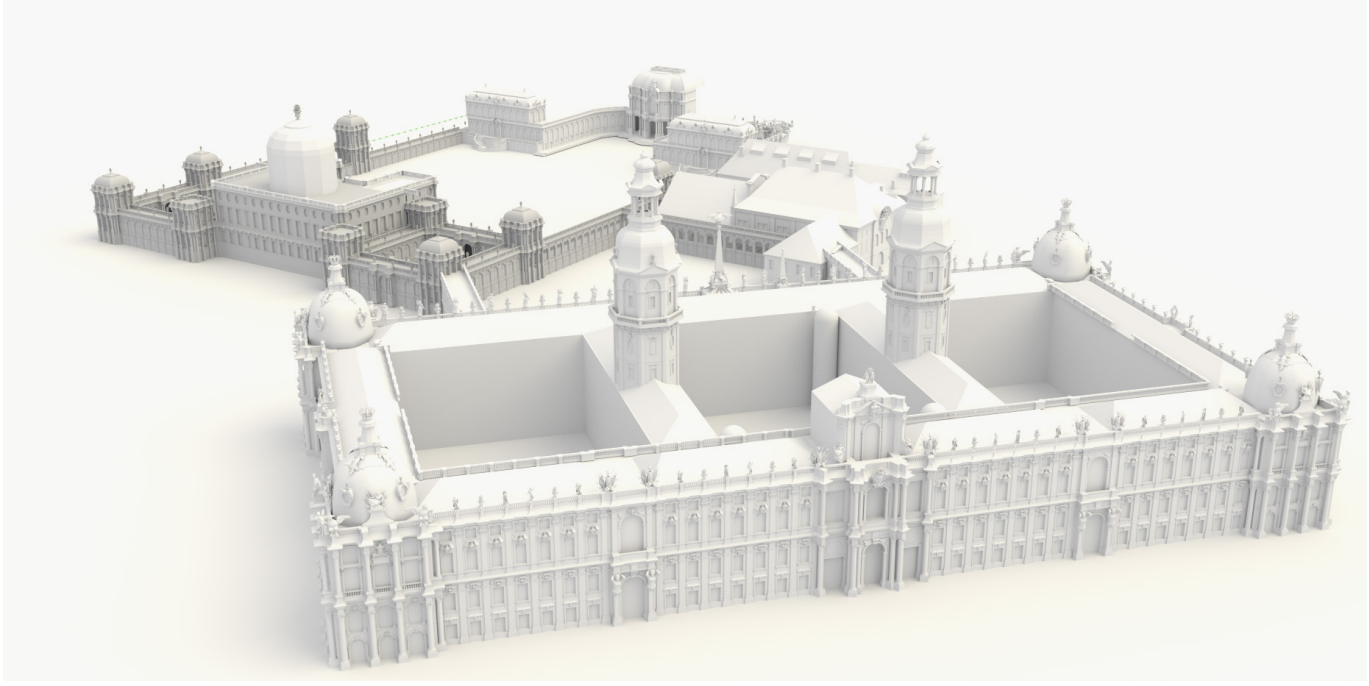
□ 16
Kooperationsprojekt HistStadt4D: Screenshot der Benutzeroberfläche des Datenbank-Prototypen mit Verortung von Fotografien des Zwingers anhand rekonstruiertem Kamerastandort, dies innerhalb eines Rohmodells des Gebäudes als Teil eines von der Stadt Dresden erstellten LOD2-Modells der Dresdner Innenstadt. (TU Dresden, Medienzentrum / Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Institut für Informatik)

Bereits seit Januar 2016 wird das 3D-Modellierungsprojekt der SBG zusätzlich von dem drittmittelgeförderten Forschungsprojekt **Matthäus Daniel Pöppelmann (1662–1736) — Die Schloss- und Zwingerplanungen für Dresden**, angesiedelt am Institut für Kunst- und Musikwissenschaft der TU Dresden, kooperativ begleitet und auf gleichzeitig mit dem Zwingerbau unternommene Neuplanungen des Residenzschlosses ausgeweitet — bildete doch der im Lauf der Zeit zum eigenwertigen Baudenkmal verselbständigte Zwinger ursprünglich den Gartenbereich des Residenzschlosses. 10 Vordergründige Arbeitsziele besagten Forschungsprojekts sind die Katalogisierung und chronologisch-planungslogische Sortierung des gesamten zu Residenzschloss und Zwinger aus der Ära Pöppelmann überlieferten historischen Planmaterials sowie eine Auswertung desselben nach aktuellen architekturhistorischen Kriterien. Digitale 3D-Modellierungen 09 spielen dabei als Erkenntnisinstrument eine wichtige Rolle. Dementsprechend wird der bislang aufgrund kuratorischer Zwänge auf den Zwinger fokussierte vorhandene Modellbestand der SBG um virtuelle 3D-Modelle nicht realisierter Schlossentwürfe sinnvoll ergänzt und auch für einen etwaigen didaktischen Einsatz zur Verfügung gestellt. 11 17

■ 10
Das durch die Fritz Thyssen Stiftung für Wissenschaftsförderung finanzierte Forschungsprojekt wird bearbeitet von Peter Heinrich Jahn unter der Leitung von Prof. Dr. Henrik Karge und unter Mithilfe von Juliane Pech. Der Erstgenannte betreut als Architekturhistoriker seit 2008 das den Zwinger betreffende 3D-Modellierungsprojekt der SBG und arbeitete zudem 2012/13 als Kurator an der oben im Text erwähnten Ausstellung »Pöppelmann 3D« mit.

■ 11
Realisiert von Rainer Uhlemann, Fa. lightframe fx, Dresden, einem ehemaligen Modelleur des 3D- Modellierungsprojekts »Zurück in die Zukunft« der SBG.

□ 17
3D-Modellierung einer zusammengehörenden Schloss- und Zwingerplanung Matthäus Daniel Pöppelmanns von ca. 1712/13 (noch partiell unfertiger Modellierstand Februar 2019), erstellt im Rahmen der mit der TU Dresden geschlossenen Projektkooperation. (TU Dresden, Institut für Kunst- und Musikwissenschaft; Modelleur: Rainer Uhlemann / lightframe fx)



Piotr Kuroczyński, Dietmar Popp, Oliver Hauck, Martin Scholz, Carsten Neumann, Torsten Veit, Jan Lutteroth, Arthur Sarnitz, Daniel Dworak, Maria Pietruszka

VII. Digitale 3D-Rekonstruktionen in virtuellen Forschungsumgebungen

→ Datenmodellierung, Digitale 3D-Rekonstruktion, Digitale Forschungswerkzeuge, Dokumentation, Virtuelle Forschungsumgebungen, Visualisierung

Das Projekt »Virtuelle Rekonstruktionen in transnationalen Forschungsumgebungen – Das Portal: Schlösser und Parkanlagen im ehemaligen Ostpreußen« untersucht den gesamten Prozess der digitalen 3D-Rekonstruktion verloren gegangener Architektur. Die Ergebnisse basieren auf der Rekonstruktion zweier zerstörter Barockschlösser, Schlodien (Gładysze / Polen) und Friedrichstein (Каменка / Russland), und bringen neue Erkenntnisse für die Quellenerschließung, Dokumentation, semantische Modellierung und webbasierte Visualisierung von 3D-Datensätzen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Entwicklung eines mensch- und maschinenlesbaren Datenmodells (Applikationsontologie), einer kollaborativen virtuellen Forschungsumgebung und einem Prototyp des »Virtuellen Museums«.

Das von der Leibniz-Gemeinschaft zwischen 2013 und 2016 geförderte Forschungsprojekt (**www.patrimonium.net**) verfolgte das Ziel die digitale 3D-Rekonstruktion als eine wissenschaftliche Forschungsmethode und ihre im Ergebnis vorliegenden digitalen 3D-Datensätze als nachhaltige Informationsträger zu untersuchen. 01

Angesicht der vielfältigen ungelösten Fragestellungen nach der Nachhaltigkeit, der Zugänglichkeit und Nachvollziehbarkeit der Projektergebnisse aus einer quellenbasierten digitalen 3D-Rekonstruktion vereinte das Projekt ein breit aufgesetztes interdisziplinäres Team aus Architekten, Kunsthistorikern, Historikern, Informatikern und Computergraphikern.

Von zentraler Bedeutung für das Projekt war die konzeptionelle Modellierung der projektspezifischen Sachverhalte. Die Analyse der Sachzusammenhänge und Prozesse einer digitalen 3D-Rekonstruktion sowie die Festlegung der Entitäten und Relationen in einem Datenmodell, stellt die Grundlage für die spätere digitale Erschließung der Forschungsdaten, die Nachhaltigkeit und Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse dar. 02

Im Laufe des Projekts wurde die erste Applikationsontologie für die mensch- und maschinenlesbare Wissensrepräsentation einer digitalen 3D-Rekonstruktion entwickelt und somit eine Pionierarbeit auf dem Gebiet der Wissensorganisation und -repräsentation geleistet. 03 Die **chml-ontology** ist CIDOC CRM (ISO 21127:2006) referenziert 04 und innerhalb einer den Anforderungen entsprechend angepassten **virtuellen Forschungsumgebung** (VFU) implementiert. Die VFU fußt auf der web-basierten kollaborativen **wissenschaftlichen Kommunikationsinfrastruktur** (WissKi) 05, die zum einen alle Prozesse digitaler 3D-Rekonstruktion, wie die Erfassung, Erschließung und Interpretation der Quellen sowie anschließende hypothetische Rekonstruktion und den Diskurs rund um die 3D-Modelle, fach- und grenzüberschreitend ermöglicht. Zum anderen werden alle erfassten Informationen als strukturierte Forschungsdaten in einem RDF-Triple-Store (semantische Graph-Datenbank) gespeichert. Die Anbindung an weitere relevante Linked-Open-Data-Ressourcen, wie kontrollierte Vokabulare und Normdaten, stellen die digitalen Forschungsdaten in einem größeren Kontext und reichern diese mit einer höheren Bedeutung an.

Das Projekt untersuchte neben der Datenstrukturierung und Modellierung die web-basierte Visualisierung der 3D-Modelle (basierend auf der WebGL-Technologie). Hierzu wurde ein 3D-Annotationswerkzeug vorgestellt, welches einen direkten Diskurs an den 3D-Datensätzen erlaubt. Die interaktiven Annotationen im 3D-Viewer wurden mit den semantischen Instanzen der Datenbank verknüpft.

■01
Projektseite unter https://www.herder-institut.de/go/Q-338d9c2.

■02
Piotr Kuroczyński, Oliver Hauck, Daniel Dworak, 3D models on triple paths – New pathways for documenting and visualising virtual reconstructions, in: Sander Münster, Mieke Pfarr-Harfst, Piotr Kuroczyński, Marinos Ioannides (Hg.), 3D Research Challenges in Cultural Heritage II – How to manage data and knowledge related to interpretative digital 3D reconstructions of Cultural Heritage, Heidelberg, Cham 2016, S. 149–172.

■03
Vergleiche hierzu die Einführung zum 4. Kapitel Wissensorganisation und -repräsentation (Kuroczyński → 330).

■04
Die CHML-Applikationsontologie (Version 1.1) liegt im RDF-Format auf Github vor, https://github.com/chml-3d/chml-ontology.

■05
http://wiss-ki.eu/.

Darüber hinaus beschäftigte sich das Projekt mit dem niederschwelligen Zugang zu den Ergebnissen einer digitalen 3D-Rekonstruktion. Der Prototyp des web-basierten **Virtuellen Museums** ermöglicht die Zusammenstellung einzelner 3D-Modelle zu einer Gesamtszene mittels der WebGL-Technologie, so dass interaktive Spaziergänge durch verschiedene Zeitschnitte der Barockschlösser ermöglicht werden konnten. 06 Das **Virtuelle Museum** erlaubt dem Besucher einen explorativen Zugang zur 3D-Visualisierung und ihr zugrundeliegenden Ausgangsinformation. Die direkte Verknüpfung der 3D-Modelle und ihrer visuellen Darstellung mit den strukturierten Forschungsdaten des gesamten Rekonstruktionsprozesses gewährleistet die Nachvollziehbarkeit und Nachhaltigkeit der Forschungsergebnisse.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass viele eingangs vorgestellten Fragestellungen im Laufe des Projektes erstmals beantwortet werden konnten, auch wenn die Lösungen im Einzelnen aufgrund der begrenzten Zeit- und Personalressourcen nicht zu einem markttauglichen Produkt für die breite objekt-orientierte Forschung umgesetzte werden konnte. So lässt sich sagen, dass die Benutzerfreundlichkeit der VFU hinsichtlich der grafischen Schnittstelle und Nutzererfahrung, neben der Datenmodellierung und 3D-Visualisierung, von zentraler Bedeutung ist.

Die Abschlusstagung zum Projekt wurde veranstaltet vom **Herder-Institut für historische Ostmitteleuropaforschung** und dem **Institut für Kunst- und Bildgeschichte der Humboldt-Universität zu Berlin**, in Kooperation mit den **Berliner Gesprächen zur Digitalen Kunstgeschichte** und der **Arbeitsgruppe Digitale 3D-Rekonstruktion** beim Verband der Digital Humanities im deutschsprachigen Raum e. V., an der Humboldt-Universität zu Berlin am 19. und 20. Juni 2017. Die offizielle Internetseite zur Abschlusstagung ist unter **http://www.3d-digital-heritage.info/** zu finden.

Im Folgenden werden die **Abstracts** aus der Abschlusstagung vorgestellt. Die Screenshots von den Video-Mitschnitten verweisen über einen Web-Link zur Dokumentation auf der Seite **http://www.kunstgeschichte.hu-berlin.de/2017/09/3dheritage-bgdk6-dokumentation/.**

■ **06**
Daniel Dworak, Piotr Kuroczyński: Virtual Reconstruction 3.0, New Approach of Web-based Visualisation and Documentation of Lost Cultural Heritage, in: Marinos Ioannides et al. (Hg.), Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection. EuroMed 2016. Lecture Notes in Computer Science, vol 10058. Springer, Cham 2016, S. 292–306.

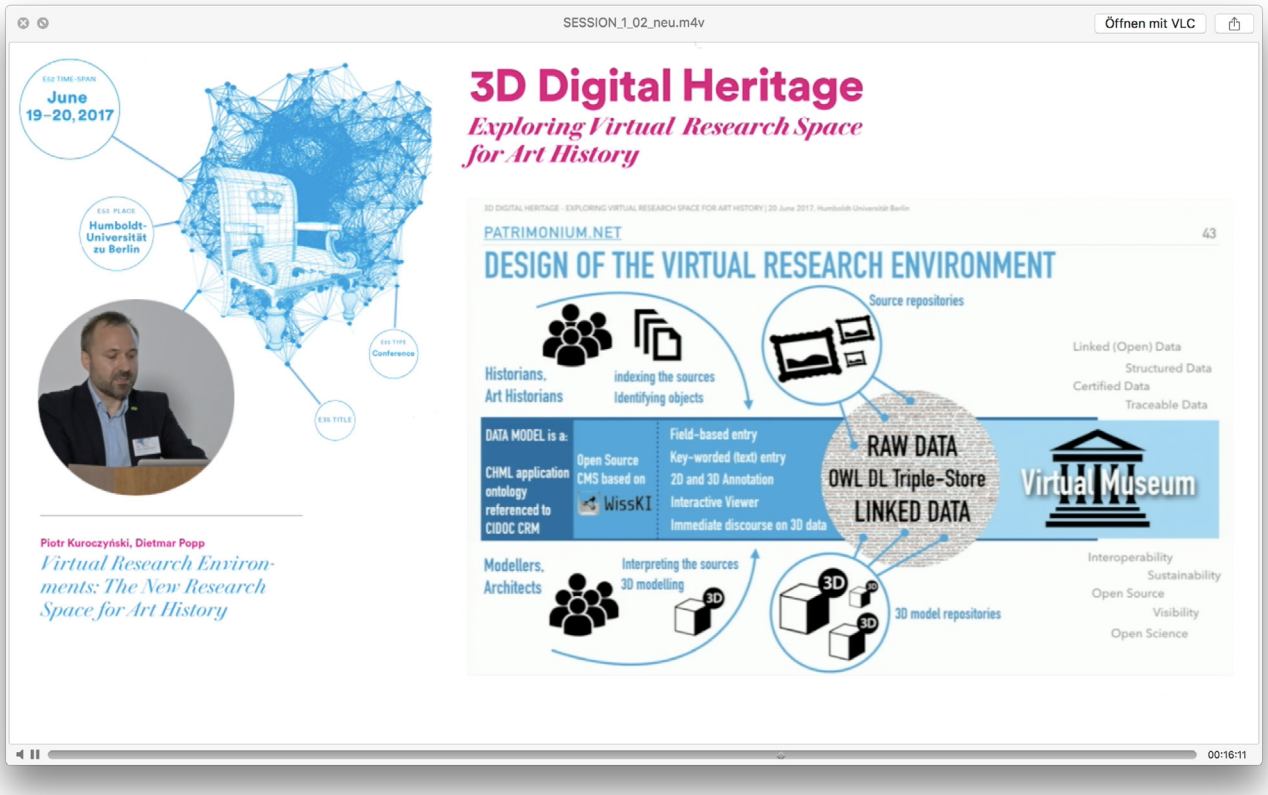
VII.1 Virtual Research Environments: The New Research Space for Art History

The amount of sourced-based digital 3D reconstructions and computer-based visualisations of cultural heritage have been increasing for almost three decades. Virtual reconstruction and 3D visualisation have opened up a new **glittering** research space for object-oriented disciplines such as archaeology, art history and architecture. Nevertheless those academics concerned with this emerging technology soon realized documentation standards were missing from many 3D projects, leading to the loss of important information or aggregated findings, along with the lost opportunity to consolidate the source knowledge and paradata that led to the creation of the digital 3D representation.

Guidelines on computer-based visualisation and 3D documentation (e. g. metadata) have been introduced in the last decade. The recent academic commitment to the design and application of Virtual Research Environments (VRE) for 3D research projects is promising. These VREs are under construction: they require further research and the establishment of a sustainable digital research infrastructure.

The three-year project **Virtual reconstructions in transnational research environments – the Web portal ›Palaces and Parks in former East Prussia‹** addresses key issues such as the lack of documentation standards, sustainability and accessibility of digital research data and the web-based scientific visualisation of the 3D content. The focus is on introducing sustainable digital 3D reconstruction, which is approved by scholars, complaint with recognised documentation standards, and follows Linked Data requirements.

The presentation introduces the methodological fundamentals, potential and challenges of digital 3D reconstruction, arguing that a scientific methodology and collaborative web-based research environment are crucial features for this kind of project. The groundwork for a human- and machine-readable **language of objects** and the implementation of these semantic patterns for spatial research purposes on destroyed and / or unrealised cultural heritage will also be discussed. Illustrated by practical examples and experience derived from the above research project, the presentation explains the requirements of the Semantic Web (Linked Data), the role of controlled vocabularies, the architecture of the VRE and the impact of a customised integration of interactive 3D models within WebGL technology. The aim is to showcase the state of the art at this stage in the development of a digital research infrastructure.



☐ 01
Videoschnitt vom Vortrag von Piotr Kuroczyński und Dietmar Popp (Humboldt-Universität Berlin, 2016), **http://www.3d-digital-heritage.info/#ref_1073**

VII.2 Methodology, Data Models and Implementation in the ViReBa Virtual Research Environment

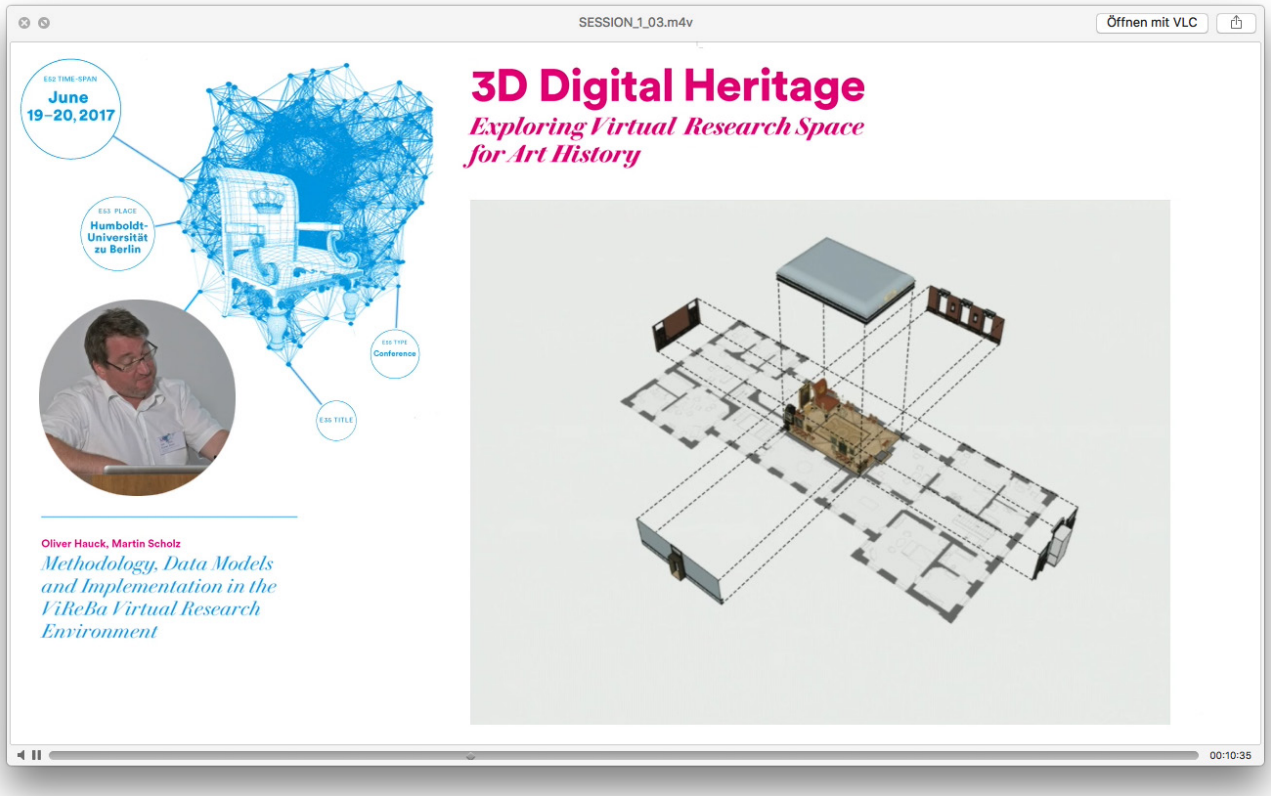
This talk takes a look behind the scenes of the Virtual Research Environment (VRE) patrimonium.net, which deals with the virtual 3D reconstruction of destroyed ancient baroque manor houses, buildings and gardens. It served as the working platform for the project **Digital 3D Reconstruction in Virtual Research Environments** that ran from 2013–2016.

A central research aspect was the development and application of documentation techniques for 3D models and the impact of this documentation on the 3D modelling process. Semantic modelling is not new to the field of architecture: Building Information Modelling (BIM) is a planning method commonly used by architects. The talk will show how BIM has been applied using common 3D modelling software in 3D reconstruction, which is the basic recommendation for using the models in the VRE, and in a virtual museum, with parts of the 3D model representing all the information behind them in the database.

The reconstruction model is enriched by metadata describing its complex creation history, with a focus on sources used for its creation, such as visual and audio sources or measurements, with the aim of making every decision taken by the reconstructing staff transparent and revisable. This information is combined and represented as a flexible knowledge graph.

At its core, the data model consists of an alignment of the Cultural Heritage Markup Language with the CIDOC CRM in the form of an OWL domain ontology, taking advantage of Linked Open Data and the Semantic Web.

Handling the complexity of the CIDOC CRM and the domain ontology on the one hand, and the graph like data model on the other, however, is not an easy task for researchers that are not especially trained. Thus, patrimonium.net makes use of the WissKI system (Wissenschaftliche Kommunikations-Infrastruktur), which mediates between the data model's peculiarities and the researchers' digital abilities. By defining ontology paths, complex information in the knowledge graph can be translated to well-known tabular metadata visualisations. The data graph is further enriched by automatic annotation extraction from free text. Finally, patrimonium.net features a 3D model annotation tool, where the annotation data is stored as triples according to the ontology.



☐ 02
Videoschnitt vom Vortrag
von Oliver Hauck und Martin Scholz
(Humboldt-Universität Berlin, 2016),
http://www.3d-digital-heritage.info/#ref_1074

VII.3 »Königsschlösser« in the Light of Digital Art History

The East Prussian manor houses and estates and their owners shaped the region in many ways. On the one hand, they were closely linked to the royal court as **royal palaces**; on the other, they were not only an architectural expression of the rise of their builders, but also an administrative and representative centre of extensive property complexes.

An essential basis for our work was the figurative, textual and material traditions from the archives and collections of the Dohna and Dönhoff families. In addition, the architectural history of the manor houses, their individual furnishings and art historical classification all required further research. The reconstruction and 3D modelling of our scientific work was also researched. At the end of the project, today's estates and the building histories were documented in photographs, and we continued to modify the 3D models.

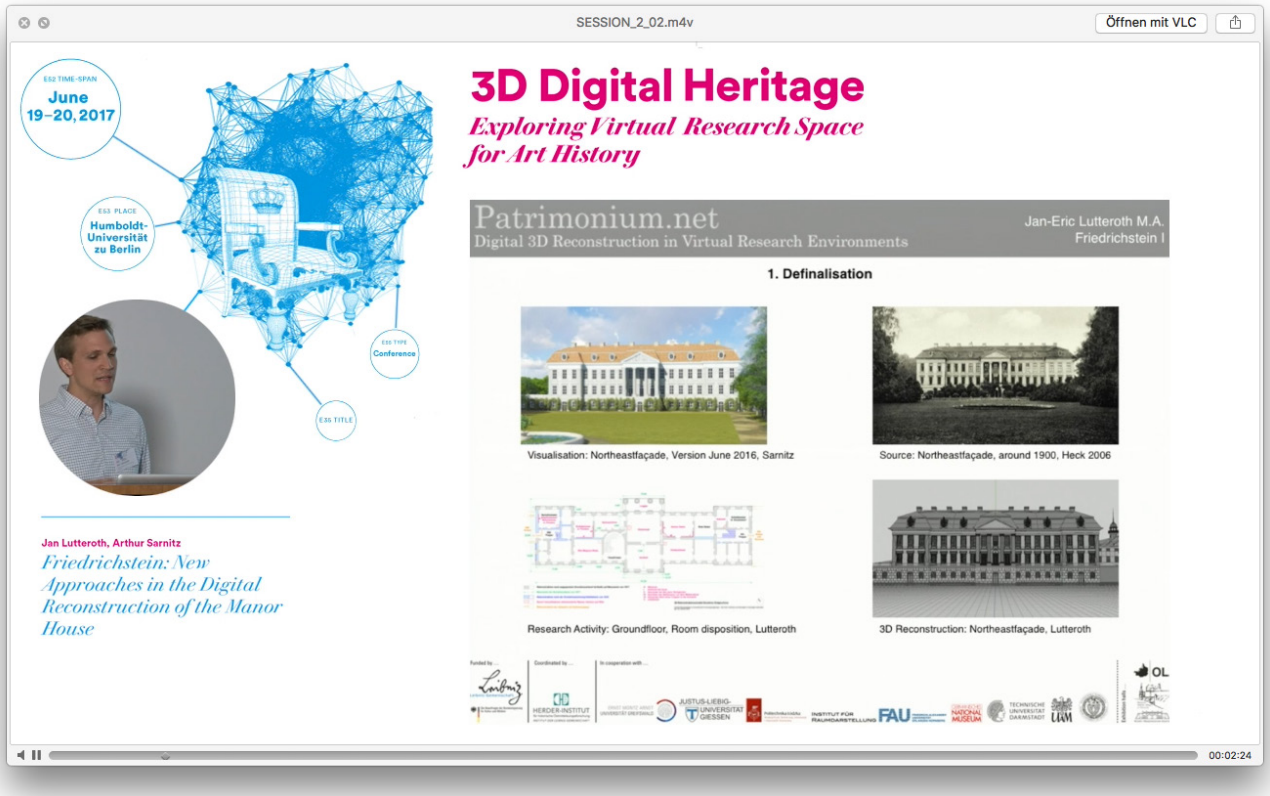
Two exemplary research results are presented here. Firstly, we share some reflections on the history of the building at Schlodien as part of its architectural history, based on a survey of the manor house ruins carried out in April 2016. The focus was on the baroque core construction, without the additions from the 19th century. Secondly, we discuss comparative examples concerning one of the most important pieces in the palace. The painting of Frederick I has been lost since 1945, but the importance of this work of art is evident from historical photographs. Creating a 3D reconstruction of such an opulent work of art raised some complications that had to be overcome. Thirdly, we consider the advantages and disadvantages of the digital tools used. On the one hand, this concerns the practicality and user-friendliness of the software solutions for research, and on the other, the complications resulting from interdisciplinarity and influencing parts of the daily workflow. Both are necessary sources of information to determine the value of this project and the developed tools for the future of art historical research.

☐ 03
Videoschnitt vom Vortrag
von Carsten Neumann und Torsten Veit
(Humboldt-Universität Berlin, 2016),
http://www.3d-digital-heritage.info/#ref_1075

VII.4 Friedrichstein: New Approaches in the Digital Reconstruction of the Manor House

This presentation exemplifies the workflow structure used for the digital 3D reconstruction of the Friedrichstein manor. It outlines the advantages of the underlying semantic database for collaborative division of tasks and modelling control within an international research team. Documenting a comprehensive workflow is an essential part of creating a scientific digital reconstruction model, as it allows for important data analysis and use after the project.
The Virtual Research Environment (VRE) introduced by the project guides the modeller through three key steps to create paradata (as demanded by the London Charter) that form the basis for conscientious after-use of the 3D model. Firstly, the VRE allows the researcher to integrate, compare and comment on all sources used in the modelling process. During this viewing step, a logical building structure needs to be developed in order to precisely reference the sources relating to parts of the building. This second step of dividing the building into its essential parts also determines the level of detail that will evenly be used in the model. Finally, the VRE allows the modeller to verbally and visually describe modelling decisions in combination with the previously generated sources and building structure, hence allowing any follow-up researcher to easily retrace the information leading to the digital reconstruction model. This web-based research environment has the benefits of **de-finalising** any visualisation rendered from the 3D model, displaying modelling decisions and their critique within a collaborative work structure. Perhaps more importantly, it enables further evaluation and interpretation of the generated 3D model and its paradata.

Arthur Sarnitz will report on SketchUp 3D software for analysing incoming data from VRE as 3D models, vector and raster drawings and maps.
The presented workflow can work with many file formats, natively or by using plugins and is precise enough for historical 3D reconstruction requirements based on various sources. It is well suited to 3D modelling and photorealistic texturing for later reuse in external software for architectural visualisation, such as Lumion3D. The presentation will focus on Lumion3D to combine all the available models in one huge scene and set up real-time shaders for sky, terrain, grass, foliage, real location sun study and animation.



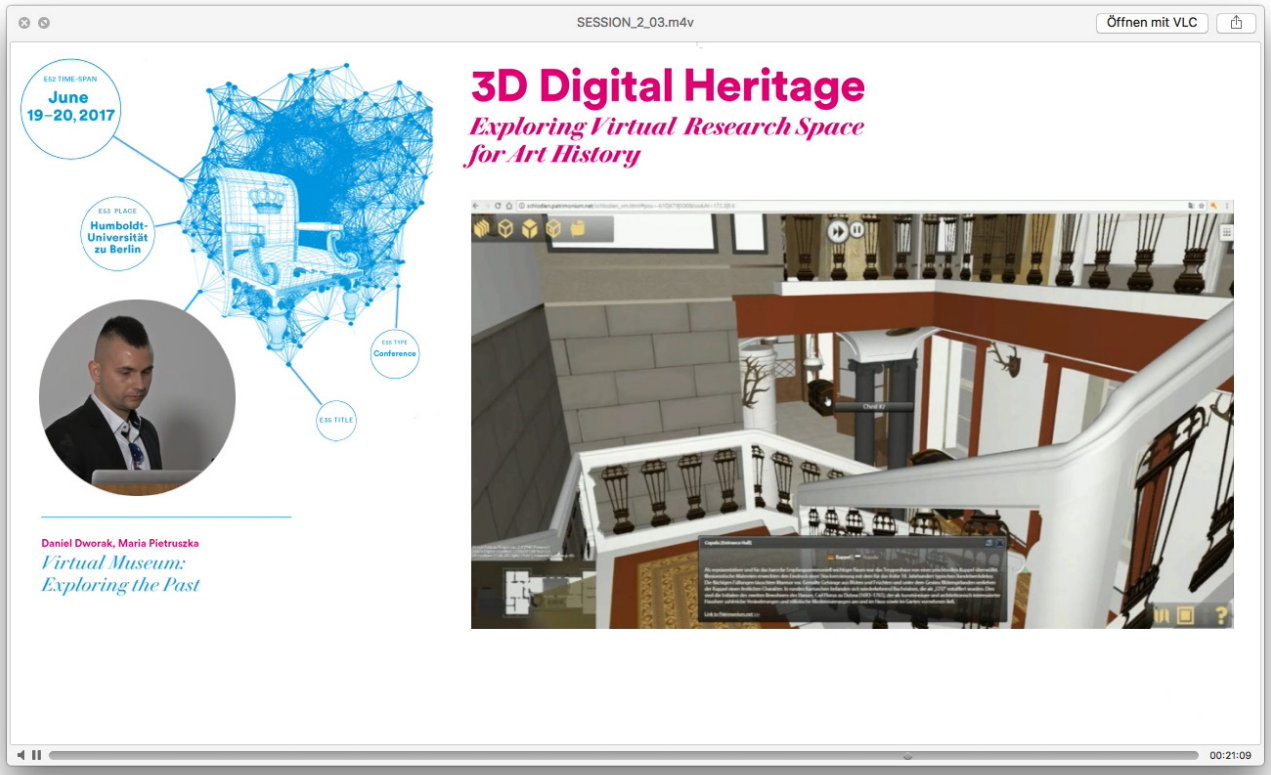
☐ 04
Videoschnitt vom Vortrag
von Jan Lutteroth und Arthur Sarnitz
(Humboldt-Universität Berlin, 2016)
http://www.3d-digital-heritage.info/#ref_1078

VII.5 Virtual Museum: Exploring the Past

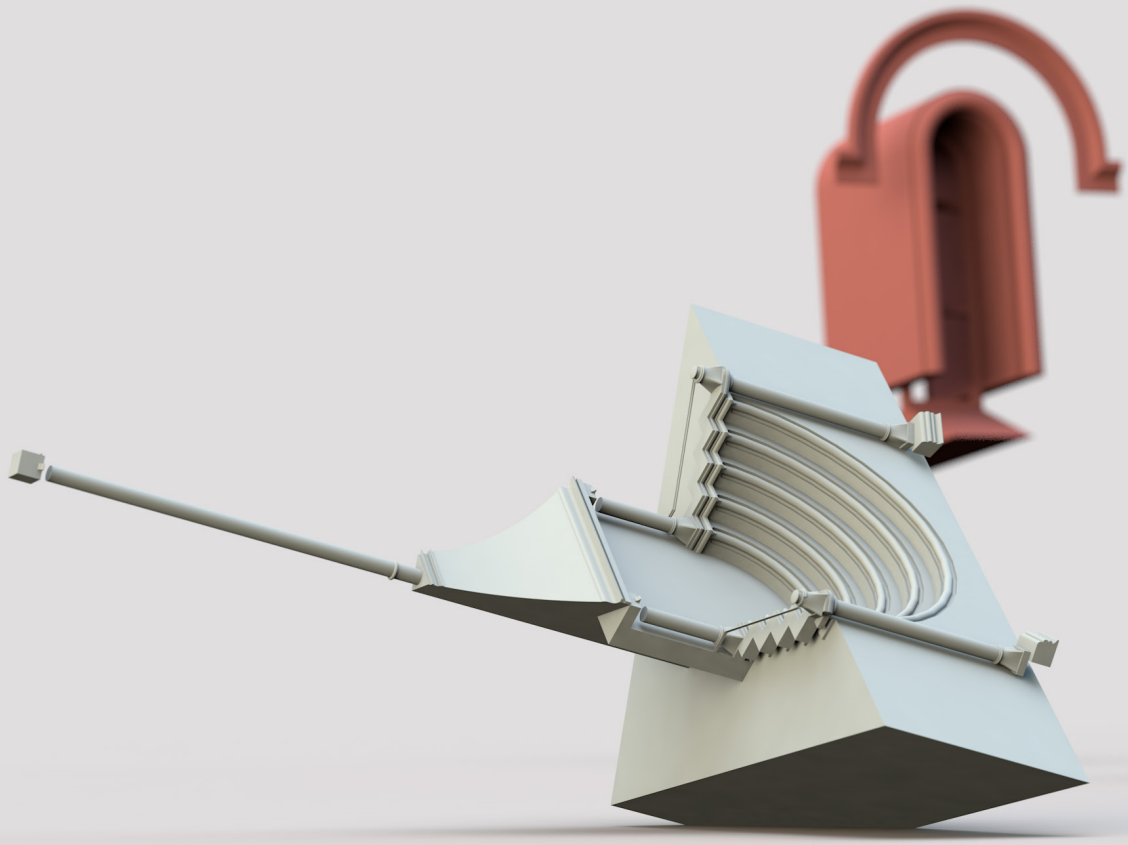
In 2013, Lodz University of Technology prepared basic requirements and assumptions for virtual reconstructions, because these are burdened with many restrictions and unsolved problems. WebGL technology was chosen from a range of options (such as Stage 3D, Away 3D, and X3D), as it is the most promising cross-platform, plugin-free, and sufficiently stable environment in development which can be used to create a layer between the user and virtual world (Model-View-Controller). Steps have been taken to solve or minimise existing problems with 3D Web technologies. There is no single, strictly performed and consistent workflow for visualising 3D content and proposed file formats. During Daniel Dworak's 6-month supervision in Frankfurt, it was confirmed that there are many different modelling techniques and software options that produce inaccurate data during the exporting / importing process. We found that many participants have different skills and use a variety of tools (such as software, file formats, or textures). Based on this experience, we composed a short document explaining how 3D models should be created, which is ready to be shared online.

Annotations of sources and 3D models were another important part of our task. We developed an interactive, platform-independent and Internet-accessible environment for preparing annotations, connections between them and actions, that is used by specialists in different fields (e. g. historians and modellers) to exchange their suggestions, doubts or sources of concern.

The Virtual Museum appeared to be **the collection** of many proposed, developed and examined techniques for 3D Web. Performance, interactivity, and sufficiently realistic and authentic experience were treated as key elements throughout the workflow. As a result of the author's idea of coding and decoding 3dPNG files even up to ten times, 3D data can be downloaded more quickly. The process of decoding this data has also been improved by using general processing on graphics processing units. Techniques from computer games like portaling, hotspots, model splitting and many more proved necessary. We also considered the user's experience, proposing a user-friendly interface with carefully selected elements and mechanisms for exploring the 3D space.



☐ 05
Videoschnitt vom Vortrag
von Daniel Dworak und Maria Pietruszka
(Humboldt-Universität Berlin, 2016),
http://www.3d-digital-heritage.info/#ref_1082



Schlagworte

123

3D modelling → 215, 448
3D models → 338
3D reconstruction → 187
3D semantic segmentation → 412, 434
3D survey → 476
3D virtual reconstruction → 412, 434
3D visualisations → 510
3D-Modelle → 079
3D-Modellierung → 227, 530
3D-Rekonstruktion → 039, 079, 099, 282
3D-Visualisierung → 392
68er Revolution → 215

A

Adolf Loos → 125
Andrea Palladio → 448
angle of view → 187
Annotationen → 392
Archäologie → 079
Archäologische Rekonstruktion → 227
archäologische Rekonstruktionsmethoden → 099
architecture → 187
Architektur → 079, 203, 296, 530
Architekturmodell → 137, 125
Architekturrekonstruktion → 059
augmented reality → 476, 498

B

Baugeschichte → 163
Begriffe → 039
Bildtraditon → 099
Bildvergleich → 392
BIM → 354, 372
boardwalk history → 498
buildings archaeology → 354

C

C. N. Ledoux → 434
CAAD → 125
Chicago Tribune Building → 125
Christopher Polhem → 510
CIDOC CRM → 282, 354
community mapping → 498
compositing → 215
Computeranimation → 099
Computergrafik → 079
Computervisualisierung → 163
conceptual modeling → 412
CRMba → 354
crowding → 215

D

Darstellungskonventionen → 099
Datenmodellierung → 137, 546
Datenstruktur → 314
Definitionen → 039
Didaktik → 530
digital design → 498
digital history → 338
Digital Humanities → 137
digital methods → 510
Digitale 3D-Rekonstruktion → 059, 264, 546
Digitale Forschungswerkzeuge → 546
Digitale Nachhaltigkeit → 392
Digitales 3D-Modell → 059
Dokumentation → 203
Dokumentation → 264, 282, 546

E

experience design → 498

G

Gebäudemodellierung → 314
Generative Modellierung → 296
Geometrische Datenverarbeitung → 296
Geschichtsvermittlung → 227
Gestaltungsmittel → 296
Gute Wissenschaftliche Praxis → 264

H

head mounted display → 059
heritage → 476
high-quality rendering → 448
historical reconstruction → 448
historische Architektur → 059
historische Entwicklung → 079
history → 498

I

IFC → 372
Illusionismus → 099
Immersion → 530
interactive design → 498

K

knowledge representation → 412, 434
Kommentare → 392
Kulturerbe → 059
Kulturerbe-Dokumentation → 137

L

Lebenszyklus → 314
Lichtsimulation → 163
local history → 498
locative media → 498
Londoner Charta → 282

M

media modalities → 510
memory → 498
methodology → 187
mobile technologies → 498
Modell des Modellseins → 125
Modelldokumentation → 314
Modellierung → 372
Modellierungswerkzeug → 314
Modellkritik → 125
Modelltheorie → 137
MonArch → 372

N

new media → 498

O

Online-Archiv → 059
Online-Tool → 264
ontological extensions → 354

P

Paradigmenwechsel → 215
perspective → 187
plane of projection → 187
Präsentation → 203
predictive rendering → 163
presentation → 187
Prime-Time-Dokumentationen → 215
production value → 215
Produktdesign → 296
Prozedurale Modellierung → 296

R

Raumillusion → 099
Rauschenbach → 187
real-time rendering → 448
Reenactment → 215
Reflection Transformation Imaging (RTI) → 392
Regionen in Bilddarstellungen → 392
Rekonstruktion → 203
Rekonstruktionsmodell → 314, 125
Reproduzierbarkeit digitaler Darstellungen → 392

S

Segmentierung → 372
semantic modeling → 448
semantische Datenverarbeitung → 296
shape grammar → 448
Standards → 264, 282
Strukturgraph → 372
Strukturhierarchie → 372

T

Theoretisches Modell → 137
Theory → 338
three-dimensional modelling → 498

V

View-Master-Dioramen → 099
viewpoint → 187
virtual architecture → 498
virtual Heritage → 338
virtual reality → 059, 099
virtual reconstruction → 476
Virtuelle Forschungsumgebung → 392
Virtuelle Forschungsumgebungen → 546
Virtuelle Realität (VR) → 530
Virtuelle Rekonstruktion → 215
Virtuelle Welten → 215
Visualisation → 187
Visualisierung → 203, 546

W

WebGL → 392
Wissenschaftstheorie → 137
Wissensmanagment → 137

Z

Zeitlichkeit → 125
Zitierfähigkeit im Digitalen → 392

Bibliografie

Alle Webseiten wurden am 04.07.2019 abgerufen.

123

22th Conference on Cultural Heritage and New Technologies, Round Table, **Data Model Beyond the Digital 3D Model**, Wien 2017, **http://www.chnt.at/data-model-beyond-the-digital-3d-model/**.

3D Systems, Inc. **StereoLithography Interface Specification**, Valencia 1989.

A

Jennifer L. Adams, Kevin B. Gunn, **Keeping Up With… Digital Humanities**, in: American Library Association, 5. April 2013.

Alonzo C. Addison, **Virtual Heritage: Technology in the Service of Culture**, Paper presented at the Proceedings of the 2001 conference on Virtual reality, archeology, and cultural heritage, Athens, Greece, 28 – 30 November 2001.

Lesley Adkins, Roy A. Adkins, **Archaeological Illustration**, Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

Janice Affleck, Thomas Kvan, **Reinterpreting Virtual Heritage**, in: CAADRIA 2005 Conference Proceedings, New Delhi (India), vol. 1, 2005, S. 169–178.

Giorgio Agugiaro, Fabio Remondino, Gabrio Girardi, Jennifer von Schwerin, Heather Richards-Rissetto, Raffaele De Amicis, **Queryarch3D: Querying and Visualising 3DModels of a Maya Archaeological Site in a Web-based Interface**, in: Geoinformatics FCE CTU Journal, 6, 2011, S. 10–17.

Jörg Albertz, **Information aus Bildern – 100 Jahre Entwicklung in Photogrammetrie und Fernerkundung,** in: VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation 85, (4) 1997, S. 251–259.

Steffen Albrecht, **Scholars' Adoption of E-Science Practices: (Preliminary) Results from a Qualitative Study of Network and Other Influencing Factors,** in: XXXIII. Sunbelt Social Networks Conference of the International Network for Social Network Analysis (INSNA), 21–26 May 2013, Hamburg 2013.

ALLPLAN, **Allplan Architecture**, **https://www.allplan.com/de**.

Torsten Althin, **Nya avdelningar Kongl. Modellkammaren, Fysikaliska experiment, Mekanisk ljudåtergivning**, in: Daedalus. Tekniska museets årsbok 1947, Stockholm 1947.

Rafael Alvarado, **The Digital Humanities Situation**, in: The Transducer, 5 (11) 2011.

Sabine Ammon, Inge Hinterwaldner (Hg.), **Bildlichkeit im Zeitalter der Modellierung. Operative Artefakte in Entwurfsprozessen der Architektur und des Ingenieurwesens**, Paderborn 2017.

Eike F. Anderson, Leigh McLoughlin, Fotis Liarokapis, Christopher Peters, Panagiotis Petridis, Sara de Freitas, **Developing Serious Games for Cultural Heritage: A State-of-the-art review**, in: Virtual Reality 14 (4) 2010, S. 255–275.

Ansi, **ASME Y14.26M – Initial Graphics Exchange Specification (IGES)** 1980.

Peter Apian-Bennewitz, **New Scanning Gonio-photometer for Extended BRTF Measurements**, in: SPIE Optical Engineering+ Applications, 77920O–77920O. International Society for Optics and Photonics, 2010.

Fabrizio I. Apollonio, **Classification Schemes for Visualization of Uncertainty in Digital Hypothetical Reconstruction**, in: S. Münster, M. Pfarr-Harfst, P. Kuroczyński, M. Ioannides (Hg.), 3D Research Challenges in Cultural Heritage II. How to Manage Data and Knowledge Related to Interpretative Digital 3D Reconstructions of Cultural Heritage, Heidelberg, Cham 2016, S. 173–197.

Fabrizio I. Apollonio, **Conceptual Modelling and Cognitive Process in 3D Virtual Reconstruction**, in: Conference on Cultural Heritage and New Technologies, 8–10.11.2017, Vienna 2017.

Fabrizio I. Apollonio, Simone Baldissini, Paolo Clini, Marco Gaiani, Caterina Palestini, Camillo Trevisan, **The PALLADIOlibrary Geo-models: an Open 3D Archive to Manage and Visualize Information-communication Resources about Palladio**, in: XXIV Int. CIPA Symposium, Strasbourg. ISPRS Archives, XL-5/W2, 2013, S. 49–54.

Fabrizio I. Apollonio, Cristiana Corsi, Marco Gaiani, Simone Baldissini, **An Integrated 3D Geodatabase for Palladio's Work**, in: The International Journal of Architectural Computing, 8, 2010, S. 107–129.

Fabrizio I. Apollonio, Marco Gaiani, Guido Beltramini, Giacomo Fabbi, **Villa Contarini a Piazzola sul Brenta: studi per un'ipotesi di attribuzione palladiana servendosi di modelli tridimensionali**, in: Disegnare idee immagini, 42, 2011.

Fabrizio I. Apollonio, Marco Gaiani, Benedetto Benedetti, **3D Reality-based Artefact Models for the Management of Archaeological Sites Using 3D Gis: A Framework Starting from the Case Study of the Pompeii Archaeological Area**, in: Journal of Archaeological Science, 39, 2012, S. 1271–1287.

Fabrizio I. Apollonio, Marco Gaiani, Cristiana Corsi, **A Semantic and Parametric Method for 3D Models Used in 3D Cognitive-information System**, in: Future cities, 28th eCAADe 2010 Conference, Zurich 2010, S. 717–726.

Fabrizio Ivan Apollonio, Marco Gaiani, Zheng Sun, **3D Modeling and Data Enrichment in Digital Reconstruction of Architectural Heritage. International Archives of the Photogrammetry**, in: Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-5-W2–43, 2013, S. 43–48.

Fabrizio I. Apollonio, Marco Gaiani, Zheng Sun, **Characterization of Uncertainty and Approximation in Digital Reconstruction of CH Artifacts**, in: Le vie dei Mercanti. XI Forum Internazionale di Studi, Napoli 2013(b), S. 860–869.

Fabrizio I. Apollonio, Elisabetta C. Giovannini, **A Paradata Documentation Methodology for the Uncertainty Visualization in Digital Reconstruction of CH Artifacts**, in: SCIRES-IT, 5 (1), 2015, S. 1–24.

Fabrizio I. Apollonio, Federico Fallavollita, Elisabetta Caterina Giovannini, **Porta Aurea in Ravenna: a Digital Hypothetical Reconstruction**, in: Virtual Archeology: Methods and benefits, Saint Petersburg 2015, S. 189–194.

Fabrizio I. Apollonio, Federico Fallavollita, Elisabetta C. Giovannini, Riccardo Foschi, Salvatore Corso, **The Reconstruction of Drawn Architecture**, in: Studies in Digital Heritage, 1 (2), 2017, S. 1:380–1:395

Yusuf Arayici, John Counsell, Lamine Mahdjoubi, Gehan Ahmed Nagy, Soheir Hawas, Khaled Dweidar (Hg.), **Heritage Building Information Modelling**, Routledge, 2017.

Arbeitsgruppe Digitale 3D-Rekonstruktion, **http://www.digitale-rekonstruktion.info/**.

Christopher J. Arnold, Jeremy W. Huggett, **Excavations at Mathrafal**, Powys, 1989, in: Montgomeryshire collections, Bd. 83, 1995, S. 59–74.

Christopher J. Arnold, Jeremy W. Huggett, Paul Reilly, C. Springham, **Mathrafal: a Case Study in the Application of Computer Graphics**, in: Sebastian Rahtz (Hg.), Computer Applications and Quantitive Methods in Archaeology 1989. CAA89 (BAR International Series 548) 1989, S. 147–155.

David Arnold, **3D-COFORM – D.1.5 – PROJECT FINAL REPORT**, 2013.

David Arnold, Guntram Geser, **EPOCH Research Agenda – Final Report**, Brighton 2008.

Art & Architecture Thesaurus, AAT, **http://www.getty.edu/vow/AATFullDisplay?find=-built+work&logic=AND&note=&english=N&prev_page=1&subjectid=300265418**.

Öcan Atalay, **Ephesos**, Antalya 2009.

Austrian Standards, **Digitale Bauwerksdokumentation – Teil 1: CAD-Datenstrukturen und Building Information Modeling (BIM) – Level 2** [ÖNORM A 6241–1], Wien 2015.

Austrian Standards, **Digitale Bauwerksdokumentation – Teil 2: Building Information Modeling (BIM) – Level 3-iBIM** [ÖNORM A 6241–2], Wien 2015.

Austrian Standards, **Industry Foundation Classes (IFC) für den Datenaustausch in der Bauwirtschaft und im Anlagenmanagement** [ISO Norm 16739:2013], Wien 2017.

Autodesk, **Revit**, **https://www.autodesk.de/products/revit-family/overview**.

Salman Azhar, Michael Hein, Blake Sketo, **Building Information Modeling (BIM): Benefits, Risks and Challenges**, in: 44th ASC Annual Conference, 2008.

B

Geeske Bakker, Frans Meulenberg, Jan De Rode, **Truth and Credibility as a Double Ambition: Reconstruction of the Built Past, Experiences and Dilemmas**, in: Journal of Visualization and Computer Animation, 14 (3) 2003, S. 159–167.

Taylor D. Baldwin, Arne R. Flaten, **Adapting the Agile Process to Digital Reconstructions of the Temple of Apollo at Delphi**, in: M. Zhou (Hg.), Revive the Past. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA). Proceedings of the 39th International Conference, Amsterdam 2012, S. 30–37.

F. Banfi, L. Barazzetti, M. Previtali, F. Roncoroni, **Historic BIM: A New Repository for Structural Health Monitoring**, Copernicus Publications 2017.

Juan A. Barceló, **Virtual Museums. When Heritage does not exist**, in: K. T. Biró (Hg.), A Közgyütemények és a Tudomány Konferencia – Conference on Public Collections and Science, Budapest, 1. – 2. Juli 1999, 2002, o. s., **http://www.ace.hu/tudvil/indexe.html**.

Christian Bartenbach, Walter Witting, **Handbuch der Lichtgestaltung: Lichttechnische und wahrnehmungsphsychologische Grundlagen**, Wien 2009.

Susan Batley, **Classification in Theory and Practice**, Oxford 2005.

Bruce G. Baumgart, **Winged Edge Polyhedron Representation**, Stanford 1972.

Arvid Bæckström, **Kongl. Modellkammaren**, in: Daedalus. Tekniska museets årsbok 1959, Stockholm 1959.

Franz X. Bea, Elisabeth Göbel, **Organisation. Theorie und Gestaltung**, Stuttgart 2010.

Richard C. Beacham, **Defining our Terms in Heritage Visualization**, in: Anna Bentkowska-Kafel, Hugh Denard, Drew Baker (Hg.), Paradata and Transparency in Virtual Heritage, Farnham 2012, S. 712.

Richard Beacham, Hugh Denard, Franco Niccolucci, **An Introduction to the London Charter**, in: M. Ioannides (Hg.), Papers from the Joint Event CIPA/VAST/EG/EuroMed Event, 2006, S. 263–269.

Evans B. Beaudoin, **Finding Visual Information: A Study of Image Resources Used by Archaeologists, Architects, Art Historians, and Artists**, in: Art Documentation, 30 (2) 2011, S. 24–36.

Joan E. Beaudoin, **An Investigation of Image Users across Professions: A Framework of Their Image Needs, Retrieval and Use**, Drexel University 2009.

Helmut Becker, Margarete van Ess, Jörg Fassbinder, **Uruk: Urbane Strukturen im Magnet- und Satellitenbild**, In: Nicola Crüsemann Margarete van Ess, Markus Hilgert, Beate Salje (Hg.), Uruk – 5000 Jahre Megacity, Petersberg 2013, S. 355–361.

Beland, **Digital Humanities Trend Repo**rt, **https://www.library.uni.edu/rodcast/201604/digital-humanities-trend-rport**.

Guido Beltramini, Andrea Palladio, **Plan and Elevation of a Villa for Two Brothers (Villa Contrarini at Piazzola?)**, in: Charles Hind, Irena Murray (Hg.), Palladio and His Legacy, A Transatlantic Journey, Marsilio 2010, S. 75–76.

Guido Beltramini, **I modelli per villa Pisani a Bagnolo (Vicenza)**, in: Paesaggio urbano 4, 1998, S. 31–32.

Guido Beltramini, **The Multimedia CD-ROMs of the CISAP: A Resource for the Study of Architectural History and for the Scientific Examination and Promotion of the Works of Palladio,** in: VSMM 2002 proceedings, Seoul 2002, S. 791–799.

Guido Beltramini, Howard Burns (Hg.), **Andrea Palladio e la villa veneta da Petrarca a Carlo Scarpa**, Venezia 2005.

Guido Beltramini, Howard Burns (Hg.), **Palladio**, Venezia 2008.

Guido Beltramini, Marco Gaiani (Hg.), **Una metodologia per l'acquisizione e la restituzione dei giacimenti documentali dell'architettura. I materiali per lo studio di Andrea Palladio**, Milano 2003.

Guido Beltramini, Marco Gaiani (Hg.), **Palladio Lab – architetture palladiane indagate con tecnologie digitali**, Vicenza 2012.

H. Belzner, **Photogrammetrie und Fernerkundung in der Bundesrepublik Deutschland 1976 – 1980**, in: 14. Kongress der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie, Hamburg 1980, S. 274–305.

V.M.L.-M. Bendicho, **The Principles of the Seville Charter in XXIII CIPA Symposium – Proceedings**, in: Proceedings of XXIII CIPA Symposium, Prague, Czech Republic, 12–16 September 2011.

Anna Bentkowska-Kafel, Hugh Denard, Drew Baker, **Paradata and Transparency in Virtual Heritage**, Burlington 2012.

Anna Bentkowska-Kafel, Lindsay MacDonald, **Digital Techniques for Documenting and Preserving Cultural Heritage**, Kalamazoo 2017.

Berliner Skulpturennetzwerk, **http://de.wikipedia.org/wiki/Berliner_Skulpturennetzwerk**.

René Berndt, Christoph Schinko, Ulrich Krispel, Volker Settgast, Sven Havemann, Eva Eggeling, Dieter W. Fellner, **Ring's Anatomy – Parametric Design of Wedding Rings**, in: Proceedings International Conference on Creative Content Technologies 4, 2012, S. 72–78.

Tim Berners-Lee, **5-Sterne-Modell**, **http://5stardata.info/de/**.

Manfred Bernhardt, **CAD-Bearbeitung der Projekte**, in: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet »CAD in der Architektur« (Hg.), Bauhaus – Avantgarde der 20er Jahre. Architektur als Vision. CAD-Simulationen von

Entwürfen und nicht gebauten bzw. nicht mehr existierenden Projekten der beginnenden Moderne, Heidelberg 1994, S. 9–11.

Geoffrey Bilder, Jennifer Lin, Cameron Neylon, **Principles for Open Scholarly Infrastructures**, 2016 (2015), **https://figshare.com/articles/Principles_for_Open_Scholarly_Infrastructures_v1/1314859**.

Filip Ir. Biljecki, **The Concept of Level of Detail in 3D City Models,** Delft 2013 (Vol. 62).

Ralf Bill, **Grundlagen der Geo-Informationssysteme.** Band 1, Berlin 2011.

Roland Billen, Cyril Carré, Vincent Delfosse, Benjamin Hervy, Florent Laroche, D. Lefèvre, M. Servières, M. Van Ruymbeke, 3D historical models: the case studies of Liege and Nantes, COST Action TU801: Semantic Enrichment of 3D city models for sustainable urban development - Workshop, April 2012, Bologna, S. 19–26.

Don Bissell, **Was the IDIIOM the First Stand-alone CAD Platform?**, in: IEEE Annals of the History of Computing 20 (2) 1998, S. 14–19.

Alan Blackwell, Kerry Rodden, **Preface to this Electronic Edition**, in: Ivan Edward Sutherland, Sketchpad: A Man-machine Graphical Communication System (Diss. 1963, MIT, Massachusetts), Cambridge 2003, S. 3–6.

Francois Blais, **Review of 20 Years of Range Sensor Development**, in: Sabry F. El-Hakim, Armin Gruen, James S. Walton (Hg.), Electronic Imaging 2003, SPIE 2003.

Jean-Yves Blaise, Iwona Dudek, **Visual Tools Decipher Historic Artefacts Documentation,** in: Journal of Universal Computer Science, 7th International Conference on Knowledge Management, Salamanca 2007, S. 456–463.

Jean-Yves Blaise, Iwona Dudek, **What Comes Before a Digital Output? Eliciting and Documenting Cultural Heritage Research Processes**, in: International Journal of Culture and History, 3 (1) 2017, S. 86–97.

Ina Blümel, **Metadatenbasierte Kontextualisierung architektonischer 3D-Modelle**, Dissertation, HU Berlin 2013.

BMBF. **Bekanntmachung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung von Richtlinien zur Förderung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben aus dem Bereich der eHumanities, http://www.bmbf.de/foerderungen/21126.php**.

BMBF, Nestor (Hg.), **Memorandum zur Langzeitverfügbarkeit digitaler Informationen in Deutschland, http://www.zlb.de/aktivitaeten/bd_neu/heftinhalte2006/DigitaleBib010506.pdf**.

David J. Bodenhamer, John Corrigan, Trevor M. Harris, **Deep Maps and Spatial Narratives**, Bloomington 2015.

David J. Bodenhamer, John Corrigan, Trevor M. Harris (Hg.), **The Spatial Humanities. GIS and the Future of Humanities Scholarship**, Bloomington 2010.

Gottfried Boehm, **Das Bild als Modell**, in: Ders, Wie Bilder Sinn erzeugen. Die Macht des Zeigens, Berlin 2017, S. 114–140.

Jörg Bofinger, Stephan M. Heidenreich (Hg.), **Befund- Rekonstruktion-Touristische Nutzung. Keltische Denkmale als Standortfaktoren**, in: Archäologische Informationen aus Baden-Württemberg, Heft 72, Esslingen 2015.

Ferdinando Bologna, Die Anfänge der italienischen Malerei, Dresden 1962.

Peter R. Bono, Jose L. Encarnacao, F. R. A. Hopgood, Paul J. W. Hagen, **GKS – The First Graphics Standard**, in: IEEE Computer Graphics and Applications 2 (5) 1982, S. 9–23.

Lena Bonsiepen, Wolfgang Coy, **Blicke auf das Digitalisat in der Sammlungserschließung**, in: DHd- Digital Humanities im deutschsprachigen Raum, **http://dhd-wp.hab.de/?q=content/blicke-auf-das-digitalisat-der-sammlungserschlie%C3%9Fung**.

Stefano Borghini, Raffaele Carlani, **La restituzione virtuale dell'architettura antica come stru-**

mento di ricerca e comunicazione dei beni culturali: ricerca estetica e gestione delle fonti, in: Disegnarecon, 4 (8) 2011, S. 71–79.

André Borrmann, Markus König, Christian Koch, Jakob Beetz (Hg.), **Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis**, Springer Vieweg, 2015.

Helmut Börsch-Supan, Karl Wilhelm Jähnig, **Caspar David Friedrich, Gemälde, Druckgraphik und bildmäßige Zeichnungen**, München 1973.

Ahasver Brandt, **Werkzeug des Historikers,** Stuttgart 2012.

Horst Bredekamp, **Darwins Korallen. Frühe Evolutionsmodelle und die Tradition der Naturgeschichte**, Berlin 2005.

Horst Bredekamp, Der Bildakt. Frankfurter Adorno-Vorlesungen 2007, Berlin 2015.

Horst Bredekamp, Michelangelos Modellkritik, in: Bernd Evers (Hg.), Architekturmodelle der Renaissance. Die Harmonie des Bauens von Alberti bis Michelangelo, München, New York 1995, S. 116–123.

Gian Pietro Brogiolo, **Archeologia dell'edilizia storica**, Como 1988.

Gian Pietro Brogiolo, **Dall'archeologia dell'architettura all'archeologia della complessità**, in: Pyranae 1(38) 1997, S. 7–38.

Helmut Brückner, **Uruk – Aus Geoarchäologischer Sicht**. In: Nicola Crüsemann Margarete van Ess, Markus Hilgert, Beate Salje (Hg.), Uruk – 5000 Jahre Megacity, Petersberg 2013, S. 343–351.

Robert Bruegmann, **Als Welten aufeinanderprallten. Europäische und amerikanische Beiträge zum Wettbewerb der »Chicago Tribune« von 1922**, in: John Zukowsky (Hg.), Chicago Architektur 1872–1922. Die Entstehung der kosmopolitischen Architektur des 20. Jahrhunderts, Ausstellungskatalog, München 1987, S. 306–321.

Fabio Bruno, Giovanna De Sensi, Stefano Bruno, Maria-Laura Luchi, Stefania Mancuso, Maurizio Muzzupappa, **From 3D Reconstruction to Virtual Reality: A Complete Methodology for Digital Archaeological Exhibition**, in: Journal of Cultural Heritage, 11 (1) 2010, S. 42–49.

Jonas Bruschke, Markus Wacker, **Neuartige Werkzeuge für die Entwicklung und Dokumentation digitaler Rekonstruktionen**, in: TU Dresden Forschungsförderung und Transfer, TechnologieZentrumDresden GmbH, Industrie- und Handelskammer Dresden, GWT-TUD GmbH (Hg.), Dresdner Transferbrief, Dresden 2015, S. 9.

Jonas Bruschke, Markus Wacker, **Simplifying Documentation of Digital Reconstruction Processes**, in: Sander Münster, Mieke Pfarr-Harfst, Piotr Kuroczyński, Marinos Ioannides (Hg.), 3D Research Challenges in Cultural Heritage II: How to Manage Data and Knowledge Related to Interpretative Digital 3D Reconstructions of Cultural Heritage, Cham 2016, S. 256–271.

George Bruseker, Anaïs Guillem, Nicola Carboni, **Semantically Documenting Virtual Reconstruction: Building a Path to Knowledge Provenance**, in: ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-5/W3, 2015, S. 33–40.

Mauro Lo. Brutto, Paola Meli, **Computer Vision Tools for 3D Modelling in Archaeology**, in: Marinos Ioannides (Hg.), Progress in Cultural Heritage Preservation – EUROMED 2012, S. 1–6.

buildingSmart, **Industry Foundation Classes (IFC), http://www.buildingsmart-tech.org/specifications/ifc-overview**.

Howard Burns, **Andrea Palladio (1508–1580): la creazione di un'architettura sistematica e comunicabile**, in: Guido Beltramini, Pino Guidolotti (Hg.), Andrea Palladio: atlante delle architetture, Venezia 2000, S. 3–9.

Howard Burns, **Andrea Palladio 1508–1580: the Portico and the Farmyard**, London 1975.

Howard Burns, **The Lion's Claw: Palladio's Initial Project Sketches**, in: Daidalos, 5, 1982, S. 73–80.

Henning Burwitz, Frank Henze, Alexandra Riedel, **Alles 3D? – Über die Nutzung aktueller Aufnahmetechnik in der archäologischen Bauforschung**, in: Elisabeth I. Faulstich (Hg.), Dokumentation und Innovation bei der Erfassung von Kulturgütern II, Schriften des Bundesverbands freiberuflicher Kulturwissenschaftler, Band 5, Online-Publikation der BfK-Fachtagung 2012, Würzburg 2012.

Frank Büttner, **Giotto und die Ursprünge der neuzeitlichen Bildauffassung. Die Malerei und die Wissenschaft vom Sehen in Italien um 1300**, Darmstadt 2013.

C

Marco Callieri, Paolo Cignoni, Fabio Ganovelli, Gaetano Impoco, Claudio Montani, Paolo Pigni, Federico Ponchio, Roberto Scopigno, **Visualization and 3D Data Processing in David's Restoration**, in: IEEE Computer Graphics & Applications, 24 (2/W1) 2004, S. 16–21.

Nick Camerlenghi, Georg Schelbert, **Learning from Rome: Making Sense of Complex Builtscapes in the Digital Age**, in: JSAH 77.3. 2018, S. 256–266.

Fiona Cameron, **Beyond the Cult of the Replicant: Museums and Historical Digital Objects—Traditional Concerns, New Discourses**, in: Fiona Cameron, Sarah Kenderdine (Hg.), Theorizing Digital Cultural Heritage. A Critical Discourse, MIT Press, 2007, S. 49–75.

Fiona Cameron, Sarah Kenderdine, **Theorizing Digital Cultural Heritage: A Critical Discourse**, Mit Press, 2007.

Marco Canciani, Federica Chiappetta, Manuela Michelini, Elisabetta Pallottino, Mauro Saccone, Alice Scortecci, **A New GIS-based Map of Villa Adriana, Ancient Paths for a Multimedia Guide**, in: ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 40 (5) 2014, S. 129–136.

Marco Canciani, Elisa Conigliaro, Monica Del Grasso, Paola Papalini, Mauro Saccone, **3D Survey and Augmented Reality for Cultural Heritage. The Case Study of Aurelian Wall at Castra Praetoria in Rome**, in: ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 41 (B5) 2016, S. 931–937.

Marco Canciani, Corrado Falcolini, Marialetizia Buonfiglio, Stefania Pergola, **Virtual Anastylosis of the Arch of Titus at Circus Maximus in Rome**, in: International Journal of Heritage in the Digital Era, 3 2014, S. 393–412.

Marco Canciani, Corrado Falcolini, Lorenza D'Alessandro, Giorgio Capriotti, **Algoritmi rinascimentli: Il progetto di Image modeling in 3D per il restauro della scultura in terracotta del Sant'Andrea di Stiffe (Aq)**, in: XIV Congresso Nazionale IGIIC- Lo stato dell'Arte- Accademia Di Belle Arti di L'Aquila, L'Aquila 2016, S. 79–90.

Marco Canciani, Manuela Michelini, Mauro Saccone, Alice Scortecci, Michele Zampilli, **Le Mura Aureliane: dal rilievo 3D al GIS**, in: Le Mura Aureliane nella storia di Roma. 1. Da Aureliano ad Onorio. Convegno internazionale, 25 marzo 2015. Edizioni Roma TrE-Press, Roma 2017, S. 193–207.

Marco Canciani, Carlo Persiani, Mauro Saccone, Michele Zampilli, **Due casi di studio: Porta Latina e Castro Pretorio,** in: Le Mura Aureliane nella storia di Roma. 1. Da Aureliano ad Onorio. Convegno internazionale, 25 marzo 2015. Edizioni Roma TrE-Press, Roma 2017, S. 209–231.

Marco Canciani, Giovanna Spadafora, Laura Farroni, Matteo Flavio Mancini, Silvia Rinalduzzi, Mauro Saccone, **Methodology of Analysis and Virtual Recomposition: The Case of Retrosi, Amatrice,** in: Putting Tradition into Practice; Heritage, Place and Design. Proceedings of

5th INTBAU International Anual Event. Springer International publishing 2017, S. 75–83.

Andrea Carandini, **Storie della Terra. Manuale di scavo archeologico**, Einaudi, Torino 1991.

James Carey, **Communication as Culture: Essays on Media and Society,** London 1989.

Mario Carpo, **Architecture in the Age of Printing. Orality, Writing, Typography, and Printed Images in the History of Architectural Theory**, Cambridge 2001.

Marcello Carrozzino, Massimo Bergamasco, **Beyond Virtual Museums: Experiencing Immersive Virtual Reality in Real Museums**, in: Journal of Cultural Heritage, 11 (4) 2010, S. 452–458.

Steve Carson, Andries van Dam, Dick Puk, Lofton R. Henderson, **The History of Computer Graphics Standards Development**, in: ACM SIGGRAPH Computer Graphics 32 (1) 1998, S. 34–38.

Bryan W. Carter, **Digital Humanities: Current Perspective, Practices and Research**, Bingley 2013.

Daniel Castella (Hg.), **Aventicvm. Eine römische Hauptstadt**, Avenches 2015.

Maurizio Cattani, Andrea Fiorini, **Topologia: identificazione, significato e valenza nella ricerca archeologica**, in: Archeologia e Calcolatori 15, 2004, S. 317–340.

Eugene Ch'ng, Vincent Gaffney, Henry Chapman (Hg.), **Visual Heritage in the Digital Age**, London 2013.

Racha Chahrour, **Integration von CAD und Simulation auf Basis von Produktmodellen im Erdbau**, Kassel 2006.

Erik Champion, **Entertaining the Similarities and Distinctions between Serious Games and Virtual Heritage Projects**, in: Entertainment Computing 14 (2016), S. 67–74.

Erik Champion, **The Missing Scholarship Behind Virtual Heritage Infrastructures,** Paper presented at the Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage, Genoa, Italy, 2016.

Erik Champion, **Explorative Shadow Realms of Uncertain Histories**, in: Yehuda Kalay, Thomas Kvan and Janice Affleck (Hg.), New Heritage: New Media and Cultural Heritage, London, New York: Routledge, 2008, S. 185–206.

Erik Champion, **Evaluating Cultural Learning in Virtual Environments**, University of Melbourne, 2006.

Helen Chantal-Pike, **Asbury Park's Glory Days: The Story of an American Resort**, New Brunswick 2005.

Federica Chiappetta, **I percorsi antichi di Villa Adriana**, Roma 2008.

CHML-Applikationsontologie (Version 1.1.), https://github.com/chml-3d/chml-ontology.

Noam Chomsky, **Three Models for the Description of Language**, in: IRE Transactions on Information Theory 2, 1956, S. 113–124.

E. Christofori, J. Bierwagen, **Recording Cultural Heritage Using Terrestrial Laserscanning – Dealing with the System, the Huge Datasets They Create and Ways to Extract the Necessary Deliverables You Can Work with**, in: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 2013, S. 183–188.

CIDOC CRM. Current Official Version of the CIDOC Conceptual Reference Model, http://old.cidoc-crm.org/docs/cidoc_crm_version_6.2.2%20(WorkingDoc).pdf.

Jeffrey Clark, **The Fallacy of Reconstruction**, in: Maurizio Forte (Hg.), Cyber-Archaeology, Oxford: Archaeopress, 2010, S. 63–73.

Peter A. Clayton, Martin J. Price (Hg.), **Die Sieben Weltwunder**, Stuttgart 1990.

Paolo Clini, **Andrea Palladio. Per un catalogo critico dei rilievi. Storia e prospettive**, in: Palladio 1508–2008. Il simposio del cinquecentenario, Venezia 2008, S. 405–412.

Paolo Clini, Romina Nespeca, A. Bernetti, **All-in-one Laser Scanning Methods for Surveying, Representing and Sharing Information on Archaeology. Via Flaminia and the Furlo Tunnel Complex**, in: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W2, 2013 XXIV International CIPA Symposium, 2–6 September 2013, Strasbourg, France.

Anthony G. Cohn, Achille C. Varzi, **Connection Relations in Mereotopology**, in: H. Prade (Hg.), European Conference on Artificial Intelligence (ECAI), John Wiley & Sons, Ltd, 1998, S. 150–154, **http://www.columbia.edu/~av72/papers/Ecai_1998.pdf**.

Julia Coletta, **Rom in Rekonstruktionen, (mit eingeschlossener DVD »Ancient Rome. A Virtual Archeoguide«)**, Roma 2013.

Collosseum, Regisseur Tilman Remme, BBC History Documentaries, 2003.

Cologne Center for eHumanities, **Digitale Geisteswissenschaften**, Köln 2011.

Bernhard Comment**, Das Panorama**, Berlin 2000.

Tara J. Copplestone, **But That's Not Accurate: The Differing Perceptions of Accuracy in Cultural-Heritage Videogames between Creators, Consumers and Critics**, in: Rethinking History (2016), S. 1–24.

Janice Cornforth, Craig Davidson, **Picturing the Past**, in: Archaeological computing newsletter 19, 1989, S. 6–10.

George L. Cowgill, **Computer Applications in Archaeology**, in: the November 14–16, 1967, Fall Joint Computer Conference, 331, 1967.

Richard D. Coyne, Michael A. Rosenman, Anthony D. Radford, Bala M. Balachandran, John S. Gero, **Knowledge-Based Design Systems**, Reading 1990.

Creative Europe Program, **http://ec.europa.eu/programmes/creative-europe/index_en.htm**.

CRMarchaeo, **http://www.ics.forth.gr/isl/CRMext/CRMarchaeo/docs/CRMarchaeo_v1.4.pdf**.

CRMsci: The Scientific Observation Model, **http://www.ics.forth.gr/isl/CRMext/CRMsci/docs/CRMsci1.2.3.pdf**.

Nick Crofts, Martin Doerr, Tony Gill, Stephen Stead, Matthew Stiff, **Definition of the CIDOC Conceptual Reference Model**, ICOM/CIDOC CRM Special Interest Group, **http://www.cidoc-crm.org/sites/default/files/cidoc_crm_version_5.0.4.pdf**.

D

Leonardo B. Dal Maso**, Das Rom der Cäsaren**, Firenze 1993.

DARIAH – Europeana 4D Interface, **http://dev2.dariah.eu/e4d/**.

Lorraine Daston**, Introduction**, in: Lorraine Daston (Hg.), Biographies of Scientific Objects, Chicago 2000.

Lorraine Daston, Peter Galison, **Das Bild der Objektivität**, in: Peter Geimer (Hg.), Ordnungen der Sichtbarkeit: Fotografie in Wissenschaft, Kunst und Technologie, Frankfurt am Main 2002, S. 29–99.

Data and Service Center for the Humanities (DaSCH), **http://dh-center.ch/**.

Cathy N. Davidson, **Humanities 2.0: Promise, Perils, Predictions**, in: Publications of the Modern Language Association of America (PMLA), 123 (3) 2008, S. 707–717.

Martin Davies, **The Archaeology of Standing Structures**, in: Australian Journal of Historical Archaeology 5, 1987, S. 54–64.

Brian Davison, **Picturing the Past through the Eyes of Reconstruction Artists**, London 1997.

Giuliana De Francesco, Andrea D'Andrea, **Standards and Guidelines for Quality Digital Cultural Three-Dimensional Content Creation**, in: M. Ioannides (Hg.): Digital Heritage: Proceedings of the 14th International Conference on Virtual Systems and Multimedia. Project Papers, Budapest 2008, S. 229–233.

Livio De Luca, **Methods, Formalisms and Tools for the Semantic-based Surveying and Representation of Architectural Heritage**, in: Applied Geomatics, 6, 2014, S. 15–139.

Livio De Luca, Chawee Busarayat, Chiara Stefani, Noemie Renaudin, Michel Florenzano, Philippe Véron, **An Iconography-Based Modeling Approach for the Spatio-Temporal Analysis of Architectural Heritage**, in: Shape Modeling International Conference (SMI '10), Washington 2010, S. 78–89.

Livio De Luca, Chawee Busarayat, Chiara Stefani, Philippe Véron, Michel Florenzano, **A Semantic-based Platform for the Digital Analysis of the Architectural Heritage**, in: Computers & Graphics, 35 (2), 2011, S. 227–241.

Livio De Luca, Michel Florenzano, Philippe Véron, **A Generic Formalism for the Semantic Modelling and Representation of Architectural Elements**, in: Visual Computer, 23 (3), 2007, S. 181–205.

Jeroen De Reu, Gertjan Plets, Geert Verhoeven, Philippe De Smedt, Machteld Bats, Bart Cherretté, Wouter De Maeyer, et al., **Towards a Three-Dimensional Cost-Effective Registration of the Archaeological Heritage**, in: Journal of Archaeological Science 40, no. 2 (2012), S. 1108–1121.

Paul Debevec, **Making »The Parthenon«**, in: VAST05. The 6th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage, Eurographics Association, 2005.

Nicoló Dell'Unto, Anne-Marie Leander, Matteo Dellepiane, Marco Callieri, Daniele Ferdani, S. Lindgren, **Digital Reconstruction and Visualization in Archaeology: Case-Study Drawn from the Work of the Swedish Pompeii Project**, Paper presented at the Digital Heritage International Congress (Digital Heritage), 2013, Marseille, France, Oct. 28 2013-Nov. 1 2013.

Emanuel Demetrescu, **Archaeological Stratigraphy as a Formal Language for Virtual Reconstruction**, in: Theory and practice. Journal of Archaeological Science, 57, 2015, S. 42–55.

Hugh Denard (Hg.), **The London Charter – For the Computer-Based Visualisation of Cultural Heritage** (2009), **http://www.londoncharter.org/**.

Hugh Denard, **A new Introduction to The London Charter**, in: Anna Bentkowska-Kafel, Hugh Denard, Drew Baker (Hg.), Paradata and Transparency, S. 57–71.

Deutsche Forschungsgemeinschaft, **DFG-Praxisregeln Digitalisierung**, Bonn 2016.

Deutsche Forschungsgemeinschaft, Grundlagen guter wissenschaftlicher Praxis, Weinheim 2013.

Deutsche Forschungsgemeinschaft, Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis, Denkschrift Memorandum, Bonn 2013, S. 15.

Deutsches Archäologisches Institut (DAI), **MayaArch3D**, **http://www.mayaarch3d.org/language/en/sample-page/**.

Kate Devlin, Alan Chalmers, Duncan Brown, **Predictive Lighting and Perception in Archaeological Representations**, in: UNESCO World Heritage in the Digital Age, 30th Anniversary Digital Congress, 2002.

Digital Humanities im deutschsprachigen Raum e. V., **Arthistory's Next Topmodel? Der Trend zur Ontologie**, Leipzig 2016, **http://www.dhd2016.de/abstracts/sektionen-003.html**.

Heinrich Dilly, **Kunstgeschichte als Institution. Studien zur Geschichte einer Disziplin**, Frankfurt a. Main 1979.

DIN Deutsches Institut für Normung e. V., **DIN 69901–5 Projektmanagement – Projektmanagementsysteme – Teil 5. Begriffe**, Berlin 2009.

Martin Doerr, **The CIDOC CRM – An Ontological Approach to Semantic Interoperability of Metadata,** in: AI Magazine, 24 (3) 2003, S. 75–92.

Martin Doerr, Gerald Hiebel, CRMgeo, **Linking the CIDOC CRM to GeoSPARQL Through a Spatiotemporal Refinement**, Technical Report: ICS-FORTH/TR-435, 2013, **http://www.ics.forth.gr/isl/CRMext/CRMgeo/docs/TR435-CRMgeo.pdf**.

Martin Doerr, Maria Theodoridou, **CRMdig: A Generic Digital Provenance Model for Scientific Observation**, in: 3rd USENIX Workshop on the Theory and Practice of Provenance, TaPP'11, Heraklion 2011.

Yasmin Doosry, **Von oben gesehen. Die Vogelperspektive**, Nürnberg 2014.

Conor Dore, Maurice Murphy, **Integration of Historic Building Information Modeling and 3D GIS for Recording and Managing Cultural Heritage Sites**, in: VSMM Conference Virtual Systems in the Information Society, 2012, S. 369–376.

Julie Dorsey, Holly Rushmeier, François Sillion, **Digital Modeling of Material Appearance**, San Fransicso 2008.

Anastasios Doulamis, Nikolaos Doulamis, Charalabos Ioannidis, Christina Chrysouli, Nikos Grammalidis, Kosmas Dimitropoulos, et al., **5D Modelling: An Efficient Approach for Creating Spatiotemporal Predictive 3D Maps of Large-scale Cultural Resources**, in: ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II–5 (W3) 2015, S. 61–68.

Pierre Drap, Julien Seinturier, Jean Christophe Chambelland, Gilles Gaillard, Hugo Pires, Guido Vannini, Michele Mucciotti, Elisa Pruno, **Going to Shawbak (Jordan) and Getting the Data Back: Toward a 3D Gis Dedicated to Medieval Archeology**, in: Proceedings of the 3rd ISPRS – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 38 (5) 2009, S. 320–328.

Rainer Drewello, Burkhard Freitag, Christoph Schlieder, **Neues Werkzeug für alte Gemäuer**, in: DFG Forschung Magazin, 3, 2010, S. 10–14.

Johanna Drucker, **Is There a »Digital« Art History?**, in: Visual Resources: An International Journal of Documentation 29 (1–2) 2013, S. 5–13, **http://dx.doi.org/10.1080/01973762.2013.761106**.

Iwona Dudek, Jean-Yves Blaise, **Using Abstraction Levels in the Visual Exploitation of a Knowledge Acquisition Process**, in: i-KNOW '05 Proceedings of the 5th International Conference on Knowledge Management and Knowledge Technologies, Graz 2005, S. 543–552.

Iwona Dudek, Jean-Yves Blaise, **Visualizing Alternative Scenarios of Evolution in Heritage Architecture**, in: Stefanie N. Lindstaedt, Michael Granitzer (Hg.), i-KNOW '11 – 11th International Conference on Knowledge Management and Knowledge Technologies, ACM International Conference Proceeding Series ACM, New York 2011, Article No. 45.

David Dunér, **Daedalus of the North: Swedenborg's Mentor Christopher Polhem**, in: The New Philosophy, CXIII (3&4) 2010, S. 1077–1098.

David Dunér, **Tankemaskinen. Polhems huvudvärk och andra studier i tänkandets historia**, Nora 2012.

DURAARK – Durable Architectural Knowledge, **http://duraark.eu/**.

Arne Dür, David Geisler-Moroder, **Validation of Radiance against CIE171:2006 and Improved Adaptive Subdivision of Circular Light Sources.** **http://radiance-online.lbl.gov/community/workshops/2008-fribourg/Content/Geisler-Moroder/RW2008_DGM_AD.pdf**.

Daniel Dworak, Piotr Kuroczyński: **Virtual Reconstruction 3.0, New Approach of Web-based Visualisation and Documentation of Lost Cultural Heritage**, in: Marinos Ioannides et al. (Hg.), Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection. EuroMed 2016. Lecture Notes in Computer Science, vol 10058. Springer, Cham 2016, S. 292–306.

Kimberly Dylla, Bernard Frischer, Pascal Mueller, Andreas Ulmer, Simon Haegler, **Rome Reborn 2.0: A Case Study of Virtual City Reconstruction Using Procedural Modeling Techniques. Making History Interactive**, in: 37th Proceedings of the CAA Conference, Williamsburg Virginia (Usa) 2009, S. 62–66.

E

Chuck Eastman, Paul Teicholz, Rafael Sacks, Kathleen Liston, **BIM Handbook – A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, and Contractors**, John Wiley & Sons, Inc., 2008.

Götz Echtenacher, **Wissenschaftliche Erkenntnisse durch manuelles Konstruieren von 3D-Modellen**, in: Katja Heine, Klaus Rheidt, Frank Henze, Alexandra Riedel (Hg.), Von Handaufmaß bis High Tech III, Darmstadt 2011, S. 49–57.

Maria Economou, Laia Pujol, **Educational Tool or Expensive Toy? Evaluating Vr Evaluation and Its Relevance for Virtual Heritage**, in: New Heritage: New Media and Cultural Heritage, London, Routledge (2008), S. 242–60.

Jennifer Edmond, Vicky Garnett, **Apis and Researchers: The Emperor's New Clothes?**, in: International Journal of Digital Curation 10, no. 1 (2015), S. 287–97.

Manfred Eggert, **Prähistorische Archäologie**, Tübingen 2001.

Ein Bild sagt mehr als tausend Worte, **https://de.wikipedia.org/wiki/Ein_Bild_sagt_mehr_als_tausend_Worte**.

Werner Ekschmitt, **Die Sieben Weltwunder. Ihre Erbauung, Zerstörung und Wiederentdeckung**, Mainz 1984.

José Luis Encarnação, Wolfgang Straßer, Reinhard Klein, Graphische Datenverarbeitung, München 1996.

Margarete van Ess, **Uruk – Die Forschungsgeschichte,** in: Nicola Crüsemann Margarete van Ess, Markus Hilgert, Beate Salje (Hg.), Uruk – 5000 Jahre Megacity, Petersberg 2013, S. 95–101.

Europäisches Komitee für Normung (Hg.), **EN ISO 9241-Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten**, **http://www.interactive-quality.de/site/DE/int/pdf/ISO_9241-10.pdf**.

European Commission (Hg.), **European Commission's Report on Digitisation, Online Accessibility and Digital Preservation of Cultural Material,** 2014, **https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/european-commissions-report-digitisation-online-accessibility-and-digital-preservation-cultural**.

European Commission, **Survey and Outcomes of Cultural Heritage Research Projects Supported in the Context of EU Environmental Research Programmes. From 5th to 7th Framework Programme**, Brussels 2011.

Robert H. Ewald, Richard Fryer, **Final Report of the GSPC State-of-the-art Subcommittee**, in: ACM SIGGRAPH Computer Graphics 12 (1–2) 1978, S. 14–169.

Eric Evans, **Domain-Driven Design. Tackling Complexity in the Heart of Software**, Boston 2003.

Bernd Evers (Hg.), **Architekturmodelle der Renaissance. Die Harmonie des Bauens von Alberti bis Michelangelo**, München, New York 1995.

F

Kristine K. Fallon, **Early Computer Graphics Developments in the Architecture, Engineering and Construction Industry**, in: IEEE Annals of the History of Computing 20 (2) 1998, S. 20–29.

Diane Favro, **In the Eyes of the Beholder. Virtual Reality Re-creations and Qcademia**, in: L. Haselberger, J. Humphrey, D. Abernathy (Hg.), Imaging ancient Rome: Documentation, visualization, imagination: Proceedings of the 3rd Williams Symposium on Classical Architecture, Rome, 20.– 23. 5. 2004, Portsmouth 2006, S. 321–334.

Achille Felicetti, Matteo Lorenzini, **Metadata and Tools for Integration and Preservation of Cultural Heritage 3D Information**, in: Proceedings of XXIII CIPA Symposium, Prague, Czech Republic, 12–16 September 2011, S. 118–124.

Luigi Ficacci, **Giovanni Battista Piranesi**, Köln, London, Los Angeles 2006.

Uwe Finkbeiner, **Uruk: Kampagne 35–37. 1982–1984. Die archäologische Oberflächenuntersuchung (Survey)**, Mainz 1991.

Johann Bernhard Fischer von Erlach, **Entwurf einer historischen Architektur**, Dortmund 1978.

James D. Foley, Andries van Dam, **Fundamentals of Interactive Computer Graphics. Repr. with Corrections**, Reading Mass 1984.

James D. Foley, Andries van Dam, Steven K. Feiner, **Computer Graphics: Principles and Practice,** Reading [u. a.] 1995.

Alessandro E. Foni, George Papagiannakis, Nadia Magnenat-Thalmann, **A Taxonomy of Visualization Strategies for Cultural Heritage Applications**, in: Journal on Computing and Cultural Heritage, 3 (1) 2010, S. 1–21.

Wolfgang Förstner, Bernhard P. Wrobel, **Photogrammetric Computer Vision: Statistics, Geometry, Orientation, and Reconstruction**, in: Geometry and Computing 11, Cham 2016.

Maurizio Forte, **La villa di Livia, un percorso di ricerca di archeologia virtuale,** Roma 2007.

Maurizio Forte, Sofia Pescarin, Eva Pietroni, Claudio Rufa, **Multiuser Interaction in an Archeological Landscape: The Flaminia Project**, in: Proceedings of »From Space to Place«, Rome 2006, S. 189–196.

Maurizio Forte, Alberto Siliotti (Hg.), **Virtual Archaeology. Re-creating Ancient Worlds**, New York 1997.

Evelyn Fox Keller**, Models of and Models for. Theory and Practice in Contemporary Biology**, in: Philosophy of Science 67 (Proceedings), 2000, S. S72–S86.

Alfonso de Franciscis, **Führer mit Rekonstruktionsversuchen. Pompei-Herculaneum und die Villa Iovis in Capri einst und jetzt**, Roma 1964.

Tom Frankland, **A CG Artist's Impression: Depicting Virtual Reconstructions Using Non-Photorealistic Rendering**, in: Angeliki Chrysanthi, Patricia Murrieta Flores (Hg.), Thinking Beyond the Tool, Archaeological Computing and the Interpretative Process, Oxford 2010, S. 24–39.

Marcus Frings (Hg.), **Der Modelle Tugend, CAD und die neuen Räume der Kunstgeschichte**, Weimar 2001, **http://www.marcus-frings.de/text-modelle.htm**.

Theodor M. Fries (Hg.), **Johann Beckmanns schwedische Reise in den Jahren 1765–1766: Tagebuch**, Upsala 1911.

Bernard Frischer, **Introduction. From Digital Illustration to Digital Heuristics**, in: Bernard

Frischer, Anastasia Dakouri-Hild (Hg.), Beyond Illustration: 2D and 3D Digital Technologies as Tools for Discovery in Archaeology, Oxford 2008, S. I–XXIV.

Bernard Frischer, **Mission and Recent Projects of the UCLA Cultural Virtual Reality Laboratory**, in: Tiré-à-part des Actes du colloque. Virtual Retrospect 2003, 6.–7. November 2003 in Biarritz (France), Bordeaux 2004 (Archéovision, Bd. 1), S. 65–74.

Bernard Frischer, Dean Abernathy, Fulvio C. Giuliani, Russell T. Scott, Hauke Ziemssen, **A New Digital Model of the Roman Forum**, in: Lothar Haselberger (Hg.), Imaging Ancient Rome. Documentation, Visualization, Imagination. (Proceedings of the Third Williams Symposium on Classical Architecture, 20.–23. Mai 2004 in Rom), Portsmouth 2006, S. 163–182.

Bernard Frischer, Diane Favro, Paolo Liverani, Sible De Blaauw, Dean Abernathy, **Virtual Reality and Ancient Rome: The UCLA Cultural VR Lab's Santa Maria Maggiore Project**, in: Juan A. Barceló, Maurizio Forte, D. H. Sanders (Hg.), Virtual Reality in Archaeology, Oxford 2000 (British Archaeological Reports, International Serie), S. 155–162.

Sabine Frommel, **Les maquettes d'architecture**, Paris 2015.

Sabine Frommel (Hg.), **Les maquettes d'architecture. fonction et évolution d'un instrument de conception et de réalisation**, Paris 2015.

G

Marco Gaiani, **Modelli di Palladio – modelli palladiani**, in: Palladio 1508–2008. Il simposio del cinquecentenario, Venezia 2008, S. 396–400.

Marco Gaiani, Fabrizio I. Apollonio, Paolo Clini, Ramona Quattrini, **A Mono-instrumental Approach to High-quality 3D Reality-based Semantic Models Application on the PALLADIO Library**, in: 2015 Digital Heritage International Congress, Piscataway 2015, S. 29–36.

Gaius Plinius Secundus, **Die Naturgeschichte des Caius Plinius Secundus**, Lenelotte Möller, Manuel Vogel (Hg.), übersetzt und mit Anmerkungen versehen von G. C. Wittstein, Leipzig 1881, Wiesbaden 2007.

Rüdiger Ganslandt, Harald Hofmann, **Handbuch der Lichtplanung**, Braunschweig, Wiesbaden 1992.

Simone Garagnani, Anna Maria Manferdini, **Parametric Accuracy: Building Information Modeling Process Applied to the Cultural Heritage Preservation**, in: 3DArch2013, 2013, S. 87–92.

Vicky Garnett, Jennifer Edmond, **Building an Api Is Not Enough! Investigating Reuse of Cultural Heritage Data**, in: Impact of Social Science, blog of the London School of Economics. Online: LSE, 2014.

Scott Gebhardt, Eliezer Payzer, Leo Salemann, **Polygons, Point-clouds, and Voxels, a Comparison of High-fidelity Terrain Representations**, in: Simulation Interoperability Workshop and Special Workshop on Reuse of Environmental Data for Simulation—Processes, Standards, and Lessons Learned.

Peter Geimer, Michael Hagner, **Vergangenheit im Bild. Einleitende Bemerkungen**, in: Peter Geimer, Michael Hagner (Hg.), Nachleben und Rekonstruktion. Vergangenheit im Bild, München 2012, S. 9–19.

Metin Genç, Ereigniszeit und Eigenzeit. Zur literarischen Ästhetik operativer Zeitlichkeit, Bielefeld 2016.

Ropertos Georgiou, Sorin Hermon, **A London Charter's Visualization: The Ancient Hellenistic-roman Theatre in Paphos**, in: Proceedings of International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage-Short and Project Papers, VAST'11, 2011, S. 53–56.

Philip Gerlee, **Torbjörn Lundh, Scientific Models. Red Atoms, White Lies and Black Boxes in a Yellow Book**, Cham 2016.

Garry Gibbons, **Visualisation in Archaeology Project. Final Report**, o. Ort 2012.

Michael Gibbons, **The New Production of Knowledge. The Dynamics of Science and Research in Contemporary Societies**, London 1994.

Frederick W. Gibbs, **Digital Humanities Definitions by Type**, in: Digital Humanities Definitions by Type, **https://moodle.ucl.ac.uk/course/view.php?id=11859&section=3**.

Sigfried Giedion, **Space, Time and Architecture. The Growth of a New Tradition**, Cambridge 1941.

James J. Gibson, **The Ecological Approach to Visual Perception**, Boston 1979.

James J. Gibson, **The Perception of Visual Surfaces,** American Journal of Psychology, 63, 1950b, S. 367–384.

James J. Gibson, **The Perception of the Visual World**, Cambridge 1950.

James Jerome Gibson, **The Senses Considered as Perceptual Systems**, Boston 1966.

James J. Gibson**, The Theory of Affordances**, in: Robert Shaw, John Bransford (Hg.), Perceiving, Acting and Knowing, New York 1977, S. 67–82.

Mark Gillings, **The Real, the Virtually Real, and the Hyperreal: The Role of VR in Archaeology**. In: Sam Smiles, Stephanie Moser (Hg.), Envisioning the Past. Archaeology and the Image, Oxford 2005, S. 223–39.

Mashhuda Glencross, Gregory J. Ward, Caroline Jay, Jun Liu, Francho Melendez, Roger Hubbold, **A Perceptually Validated Model for Surface Depth Hallucination**, in: ACM SIGGRAPH conference proceedings, Los Angeles 2008, S. 27:59:1–59:8.

Matthew K. Gold, **Debates in the Digital Humanities**, Minneapolis 2012.

Jean-Claude Golvin**, Drawing Reconstruction Images of Ancient Site**. In: Jack Green, E. Teeter, J. A. Larson (Hg.), Picturing the Past. Imaging and Imagining the Ancient Middle East, Chicago 2012, S. 77–82.

Cesar Gonzalez-Perez, Patricia Martín-Rodilla, Rebeca Blanco-Rotea, **Expressing Temporal and Subjective Information about Archaeological Entities**, in: 41st Annual Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA 2013), 2013, S. 326–335.

Harald Grabner, Torsten Ullrich, Dieter W. Fellner, **Content-based Retrieval of 3D Models Using Generative Modeling Techniques**, in: Proceedings of EUROGRAPHICS Workshop on Graphics and Cultural Heritage (Short Papers / Posters) 12, 2014, S. 9–12.

Stefan Gradmann, **Signal, Information, Zeichen. Zu den Bedingungen des Verstehens in semantischen Netzen**, in: LIBREAS. Library Ideas 14, 2009, **http://libreas.eu/ausgabe14/006gra.htm**.

Graphs, Maps, Trees: Abstract Models for Litary History, London, New York 2007.

Oliver Grau, Die Sehnsucht, im Bild zu sein. Zur Kunstgeschichte der virtuellen Realität, Berlin 1999.

Jack Green, **Introduction**. In: Jack Green, E. Teeter, J. A. Larson (Hg.), Picturing the Past. Imaging and Imagining the Ancient Middle East (Chicago, 2012), S. 13–23.

Donald P. Greenberg, **More Accurate Simulations at Faster Rates**, in: IEEE Computer Graphics and Applications 11.1 (1991), S. 23–29.

Marc Greengrass, Lorna Hughes, **The Virtual Representation of the Past, Digital Research in the Arts and Humanities**, Burlington 2008.

Kelly Greenop, Justin R. Barton. **Scan, Save, and Archive: How to Protect Our Digital Cultural Heritage**, in: The conversation (2014). Published electronically 12 February. **https://theconversation.com/scan-save-and-archive-how-to-protect-our-digital-cultural-heritage-22160**.

Robert Gregor, Andreas Lamprecht, Ivan Sipiran, Tobias Schreck, Benjamin Bustos, **Empirical Evaluation of Dissimilarity Measures for 3D Object Retrieval with Application to Multi-feature Retrieval**, in: Proceedings 13th International Workshop on Content-Based Multimedia Indexing (CBMI 15), 2015.

Robert Gregor, Ivan Sipiran, Georgios Papaioannou, Tobias Schreck, Anthousis Andreadis, Pavlos Mavridis, **Towards Automated 3D Reconstruction of Defective Cultural Heritage Objects**, in: Proceedings of the EUROGRAPHICS Workshop on Graphics and Cultural Heritage 12, 2014, S. 135–144.

Marc Grellert, **Immaterielle Zeugnisse – Synagogen in Deutschland: Potentiale digitaler Technologien für das Erinnern zerstörter Architektur (**Dissertation), Bielefeld 2007.

Marc Grellert, **Rapid Prototyping in the Context of Cultural Heritage and Museum Displays. Buildings, Cities, Landscapes, Illuminated Models**, in: S. Münster, M. Pfarr-Harfst, P. Kuroczyński & M. Ioannides (Hg.), 3D Research Challenges in Cultural Heritage II, Cham 2016.

Marc Grellert, Franziska Haas, **Between Science and Illusion. Virtual reconstructions in Darmstadt University – The Dresden Castle**, in: S. Hoppe, S. Breitling, S. Fitzner (Hg.), Virtual Palaces II: Lost Palaces and Their Afterlife. Virtual Reconstruction Between Science and Media. Proceedings of the European Science Foundation Research Networking Programme PALATIUM meeting at Munich, 13.- 15. 4. 2012, in print.

Marc Grellert, Franziska Haas, **Sharpness Versus Uncertainty in »Complete Models«. Virtual Reconstructions of the Dresden Castle in 1678**, in: Stephan Hoppe und Stefan Breitling (Hg.), Virtual Palaces, Part II, Lost Palaces and their Afterlife, München 2016, S. 119–148.

Marc Grellert, Mieke Pfarr-Harfst, **25 Years of Virtual Reconstructions Project Report of De-partment Information and Communication Technology in Architecture at Technische Universität Darmstadt**, in: Proceedings of the 18th International Conference on Cultural Heritage and New Technologies 2013 – CHNT 18, 2013, Wien 2014, S. 1–13.

Scott Grissom, Myles F. McNally, Thomas Naps, **Algorithm Visualization in CS Education: Comparing Levels of Student Engagement**, in: Proceedings of the ACM Symposium on Software Visualization, 2003, S. 87–94.

Lars Grobe, Oliver Hauck, Andreas Noback, **Das Licht in der Hagia Sophia – Eine Computersimulation**, in: Falko Daim, Jörg Drauschke (Hg.), Byzanz – Das Römerreich im Mittelalter, Volume 2,1 Schauplätze, Mainz 2010, S. 97–111.

Antonella Guidazzoli, Maria Chiara Liguori, Mauro Felicori, Sofia Pescarin, **Creating New Links among Places through Virtual Cultural Heritage Applications and Their Multiple Re-Use**, in: Mediterranean Archaeology and Archaeometry 14, no. 4 (2014), S. 17–24.

Giancarlo Guizzardi, **The Problem of Transitivity of Part-whole Relations in Conceptual Modeling Revised**, CAiSE, Amsterdam 2009.

Hubertus Günther, **Das Studium der antiken Architektur in den Zeichnungen der Hochrenaissance**, Veröffentlichungen der Bibliotheca Hertziana, Max-Planck-Institut in Rom, Tübingen 1988.

Hubertus Günther, **Kritische Computer-Visualisierung in der kunsthistorischen Lehre**, in: M. Frings (Hg.) Der Modelle Tugend. CAD und die neuen Räume der Kunstgeschichte, Weimar, 2001, S. 111–122, **http://archiv.ub.uni-heidelberg.de/artdok/1277/1/Guenther_Kritische_Computer_Visualisierung_in_der_kunsthistorischen_Lehre_2001.pdf**.

H

Toshiya Hachisuka, Shinji Ogaki, Henrik Wann Jensen, **Progressive Photon Mapping**, in: ACM SIGGRAPH Asia 2008 Papers, ACM 2008, S. 130:1–130:8.

Sebastian Hageneuer, **The Influence of Early Architectural Reconstruction Drawings in Near Eastern Archaeology**, in: Proceedings of the 9rh International Congress on the Archaeology of the Ancient Near East (Wiesbaden: Harrossowitz, 2016), Volume 1, S. 359–70.

Sebastian Hageneuer, **The Visualisation of Uruk – First Impressions of the First Metropolis in the World**, in: Proceedings of the 18th International Conference on Cultural Heritage and New Technologies 2013 (Vienna: Museen der Stadt Wien – Stadtarchäologie, 2014), **http://www.chnt.at/proceedings-chnt-18/**.

Claudia Hagenguth, **Die Hohkönigsburg im Elsass. Die Pläne Bodo Ebhardts zum Wiederaufbau**, in: KulturGut 17 (2008), S. 4–7.

Juho Hamari, Jonna Koivisto, **Why Do People Use Gamification Services?**, in: International Journal of Information Management, 35 (4) 2015, S. 419–431.

Jassim Happa, Tom Bashford-Rogers, Alexander Wilkie, Alessandro Artusi, Kurt Debattista, Alan Chalmers, **Cultural Heritage Predictive Rendering**, in: Computer Graphics Forum, 31, 2012, S. 1823–1836.

Jassim Happa, Mark Mudge, Kurt Debattista, Alessandro Artusi, Alexandrino Gonçalves, Alan Chalmers, **Illuminating the past: state of the art**, in: Virtual reality 14 (3) 2010, S. 155–182.

Edward Harris, **Principles of Archaeological Stratigraphy**, Academic Press, London 1989.

Francis Haskell**, Die Geschichte und ihre Bilder. Die Kunst und die Deutung der Vergangenheit**, München 1995.

Oliver Hauck, **The Use of Images as Resources and Output Result in a Computer-based Light Simulation of Justinian's Hagia Sophia in Istanbul**, in: Agnieszka Seidel-Grzesińska, Ksenia Stanicka-Brzezicka (Hg.), Obraz i metoda, Cyfrowe spotkania z zabytkami 4, Breslau 2014, S. 201–211.

Oliver Hauck, Piotr Kuroczyński, **Cultural Heritage Markup Language – How to Record and Preserve 3D Assests of Digital Reconstruction**, in: Proceedings of the 20th International Conference on Cultural Heritage and New Technologies (CHNT 20, 2015), Wien 2016.

Oliver Hauck, Andreas Noback, Lars Grobe, **Computing the Holy Wisdom,** in: Georg Bock, Willi Jäger, Michael Winckler (Hg.), Contributions in Mathematical and Computational Sciences 3. Scientific Computing and Cultural Heritage. Contributions in Computational Humanities, Berlin, Heidelberg 2013, Chapter 22, S. 205–216.

Jürgen Hauschildt, Sören Salomo, **Innovationsmanagement**, München 2007.

Sven Havemann, **Intricacies and Potentials of Gathering Paradata in the 3d Modelling Workflow**, in: A. Bentkowska-Kafel, H. Denard and D. Baker (Hg.), Parada and Transparency in Virtual Heritage, London UK: Ashgate, 2012, S. 145–160.

Sven Havemann, Olaf Wagener, **Castles and Their Landscape – A Case Study Towards Parametric Historic Reconstruction**, in: S. Hoppe, S. Breitling, S. Fitzner (Hg.), Virtual Palaces II: Lost Palaces and Their Afterlife. Virtual Reconstruction Between Science and Media. Proceedings of the European Science Foundation Research Networking Programme PALATIUM meeting at Munich, 13.- 15. 4. 2012, im Druck.

Ralph Heiliger, **Die Vermessung von Architektur: Von Pareto, Parmenides und dem schönsten Weihnachtsbaum**, Lohmar 2016.

Anne Helmreich, **Reimagining the Medieval Mediterranean**, in: the iris, Getty Research Institute Blog, 2015, **http://blogs.getty.edu/iris/reimagining-the-medieval-mediterranean/**.

Arndt Hennemeyer, **Zur Lichtwirkung am Zeustempel Olympia**, in: P. I. Schneider; U. Wulf-Rheidt, Licht-Konzepte in der vormodernen Architektur, Diskussionen zur Archäologi-

schen Bauforschung, Schriftenreihe des Architekturreferates des Deutschen Archäologischen Instituts, Bd. 10, Regensburg 2011, S. 101–110.

Herder-Institut, **Virtual Reconstructions in Transnational Research Environments – The Portal: Palaces and Parks in the Former East Prussia**, **http://www.herder-institut.de/index.php?id=585**.

Ivan Herman, Paul T. Hagen, G. Reynolds, George S. Carson, J. Davy, D. Duce, W. Hewitt, Klaus Kansy, B. Lurvey, Horst Stenzel, **PREMO: an ISO Standard for Presentation Environment for Multimedia Objects**, ACM 1994.

Sorin Hermon, **Reasoning in 3D: A Critical Appraisal of the Role of 3D Modelling and Virtual Reconstructions in Archaeology**, In: B. Frischer, A. Dakouri-Hild (Hg.), Beyond Illustration: 2D and 3D Digital Technologies as Tools for Discovery in Archaeology, BAR International Series 1805 (Oxford: Archaeopress, 2008), S. 36–45.

Sorin Hermon, Joanna Nikodem, **3D Modelling as a Scientific Research Tool in Archaeology**, in: Axel Posluschny, Karsten Lambers, Irmela Herzog (Hg.), Layers of Perception. Proceedings of the 35th International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA), Berlin, Germany, April 2–6, 2007, 2008.

Sorin Hermon, Go Sugimoto, Hubert Mara, **The London Charter and its Applicability**, in: Future Technologies to Empower Heritage Professionals, VAST 2007, Geneva 2007, S. 11–14.

Hero Alexandrinus, **Heronis Alexandrini opera quae supersunt omnia**, Vol. 4, Heronis definitiones cum variis collectionibus, Heronis quae feruntur geometrica, Nachdruck, Stuttgart 1976.

Denise Hersey, Sarah Calhoun, Gwyneth Crowley, Jana Krentz, Melissa Grafe, **Understanding the Research Practices of Humanities Doctoral Students at Yale University**, Yale 2015.

Wil Hershberger, **Taming those Annoying Highlights: Cross-Polarization Flash Macro Photography**, **https://web.archive.org/web/20061104203652/http://www.naturescapes.net/042004/wh0404.htm**.

Inge Hinterwaldner, **Das systemische Bild. Ikonizität im Rahmen computerbasierter Echtzeitsimulationen**, München 2010.

Inge Hinterwaldner, Prolog: **Modellhaftigkeit und Bildlichkeit in Entwurfsartefakten**, in: Sabine Ammon, Inge Hinterwaldner (Hg.), Bildlichkeit im Zeitalter der Modellierung. Operative Artefakte in Entwurfsprozessen der Architektur und des Ingenieurwesens, München 2017, S. 13–30.

Susan Hockey, **The History of Humanities Computing**, in: Susan Schreibman, Ray Siemens, John Unsworth (Hg.), A Companion to Digital Humanities, Oxford 2004.

John Hodgson, **Archaeological Reconstruction: Illustrating the Past**, IFA Paper 5 (Reading: Institute of Field Archaeologists, 2002).

Georg Hohmann, **Die Anwendung von Ontologien zur Wissensrepräsentation und -kommunikation im Bereich des kulturellen Erbes**, in: S. Schomburg (Hg.), Digitale Wissenschaft – Stand und Entwickung digital vernetzter Forschung in Deutschland, Köln 2011, S. 33–40.

Stephan Hoppe, **Die Fußnoten des Modells**, in: M. Frings (Hg.) Der Modelle Tugend. CAD und die neuen Räume der Kunstgeschichte, Weimar 2001, S. 87–102.

Stephan Hoppe, Stefan Breitling (Hg.), **Virtual Palaces, Part II Lost Palaces and their Afterlife Virtual Reconstruction between Science and Media**. Open Access Version, **https://www.academia.edu/23190695/Hoppe_Breitling_eds._2016_Virtual_Palaces_Part_II_Lost_Palaces_and_their_Afterlife_Virtual_Reconstruction_between_Science_and_Media._Open_Access_Version**; Virtual Palaces, Part II. Lost Palaces and their Afterlife.

Virtual Reconstruction between Science and Media.

Haibin Huang, Evangelos Kalogerakis, Benjamin Marlin, **Analysis and Synthesis of 3D Shape Families via Deep-learned Generative Models of Surfaces**, in: Computer Graphics Forum 34, 2015, S. 25–38.

Jeremy Huggett, **Programming AutoCAD for the Archaeologist,** in: Archaeological computing newsletter 25, 1991, S. 18–24.

Jeremy Huggett, **Promise and Paradox: Accessing Open Data in Archaeology**, Paper presented at the Digital Humanities Congress 2012, Sheffield, United Kingdom, 6–8 September 2012.

Yuk Hui, **On the Existence of Digital Objects**, Minneapolis 2016.

Kai Huotari, Juho Hamari**, A Definition for Gamification: Anchoring Gamification in the Service Marketing Literature**, in: Electronic Markets, 27 (1) 2016, S. 21–31.

Dirk Hünerhoff, U. Grusemann, Andreas Höpe, **New Robot-based Gonioreflectometer for Measuring Spectral Diffuse Reflection**, in: Metrologia 43 (2) 2006, S. 11.

I

IANUS – Forschungsdatenzentrum Archäologie & Altertumswissenschaften, **http://www.dainst.org/de/project/ianus-forschungsdatenzentrum-arch%C3%A4ologie-altertumswissenschaften?ft=all**.

IfcOpenShell, **ifcBlender: An Ifc Importer for Blender, http://ifcopenshell.org/ifcblender.html**.

Mehlika Inanici, **Lighting Analysis of Hagia Sophia**, in: Direktorium des Hagia Sophia Museums (Hg.), Jahrbuch des Hagia Sophia Museums, Publikationen des Hagia Sophia Museums, Istanbul 2014, S. 166–202.

International Forum of Virtual Archaeology, **The Seville Principles, http://www.arqueologia-virtual.com/carta/**.

International Organization for Standardization, **Industry Foundation Classes (IFC) for Data Sharing in the Construction and Facility Management Industries, https://www.iso.org/standard/51622.html**.

Inschriften im Bezugssystem des Raumes, http://www.spatialhumanities.de/ibr/startseite.html.

Institute for Digital Research and Education, **VSim, https://idre.ucla.edu/research/active-research/vsim**.

Fotis Ioannides, Malte Rehbein, Hubertus Kohle (Hg.), **Digital Humanities. Eine Einführung**, Stuttgart 2017.

ISO 10303. **Industrial Automation Systems and Integration – Product Data Representation and Exchange**. 1994.

ISO, **Information and Documentation – A Reference Ontology for the Interchange of Cultural Heritage Information**, ISO 21127:2014.

ISO/IEC 14772. **Virtual Reality Modelling Language (VRML)**. 1994.

ISO/IEC 19775 -77. **X3D**. 2005.

ISO/IEC 7942. **Graphical Kernel System (GKS)**. 1985.

ISO/IEC 9592. **Programmer's Hierarchical Interactive Graphics System (PHIGS)**, 1989.

ISO/IEC 9592–4. **Programmer's Hierarchical Interactive Graphics System (PHIGS): Plus Lumière und Surfaces (PLUS)**, 1991.

J

Willi Jäger, Werner Müller, Norbert Quien, **Gotische Ziergewölbe aus dem Computer**, in: forschung. Das Magazin der Deutschen Forschungsgemeinschaft. spezial 2004, 2004, S. 48–51.

Peter Heinrich Jahn, Markus Wacker, Dirk Welich, **Back to the Future. Visualizing the Planning and Building of the Dresden Zwinger from the 18th until the 19th Century**, Stephan

Hoppe, Breitling, Stefan (Hg.), Virtual Palaces, Part II Lost Palaces and their Afterlife Virtual Reconstruction between Science and Media, S. 267 – 303, **https://www.academia.edu/23190695/Hoppe_Breitling_eds._2016_Virtual_Palaces_Part_II_Lost_Palaces_and_their_Afterlife_Virtual_Reconstruction_between_Science_and_Media._Open_Access_Version**.

Peter Heinrich Jahn, Dirk Welich, **Zurück in die Zukunft – Die Visualisierung planungs- und baugeschichtlicher Aspekte des Dresdner Zwingers**, in: Staatliche Schlösser, Burgen und Gärten Sachsen Jahrbuch, 16, 2009, S. 51–72.

Simon James, **Drawing Inferences. Visual Reconstruction in Theory and Practice**, in: Brian Leigh Molyneaux (Hg.), Cultural Life of Images. Visual Representation in Archaeology, Oxfordshire 1997, S. 22–48.

Fotis Jannidis, Hubertus Kohle, Malte Rehbein (Hg.), **Digital Humanities. Eine Einführung**, Heidelberg, New York 2017.

Henrik Wann Jensen, Niels Jørgen Christensen, **Photon Maps in Bidirectional Monte Carlo Ray Tracing of Complex Objects**, in: Computers & Graphics 19 (2) 1995, S. 215–224.

jMonkeyEngine, **http://jmonkeyengine.org/**.

William A. Johnson, Christopher Polhem, **The Father of Swedish Technology**, Hartford 1963.

Ed Johnston, **Augmented Asbury Park – AR Geo Channel**, **https://youtu.be/xJP48is1A-WA**.

Micheal T. Jones, **Google's Geospatial Organizing Principle**, in: Computer Graphics and Applications, 27, 2007, S. 8–13.

Robert L. Judd, **ACM SIGGRAPH 89 Panel Proceedings**. New York 1989.

K

Frédéric Kaplan, **Lancement de la »Venice Time Machine«**, Blog Frédéric Kaplan, **https://fkaplan.wordpress.com/2013/03/14/lancement-de-la-venice-time-machine/**.

Dmitry Karelin, Serjey Klimenko, Julia Klimenko, **The Methods and Approaches of the Visualization of 3D Reconstructions**, in: Proceedings of the 20th International Conference on Cultural Heritage and New Technologies 2015, Vienna: **http://www.chnt.at/wp-content/uploads/eBook_CHNT20_Karelin_etal_2015.pdf**.

Athanasis Karoulis, Stella Sylaiou, Martin White, **Usability Evaluation of a Virtual Museum Interface**, in: Informatica 17, no. 3 (2006), S. 363–80.

Emil Kaufmann, **Von Ledoux bis Le Corbusier, Ursprung und Entwicklung der Autonomen Architecktur**, Vienna 1933.

Emil Kaufmann, **Three Revolutionary Architects, Boullée, Ledoux, and Lequeu**, Philadelphia 1952.

C. Maria Keet, **Part-Whole Relations in Object-Role Models**, in: On the Move to Meaningful Internet Systems: OTM Workshops, Montpellier 2006, S. 1118–1127.

C. Maria Keet, Alessandro Artale, **Representing and Reasoning over a Taxonomy of Part-whole Relations**, in: Applied Ontology – Ontological Foundations of Conceptual Modelling, 3 (1–2) 2008, S. 91–110.

C. Maria Keet, KRDB Research Centre Technical Report: **Introduction to Part-whole Relations: Mereology, Conceptual Modelling and Mathematical Aspects**, Bolzano 2006, **http://www.inf.unibz.it/krdb/pub/**.

Richard Kelly, **Light as an Integral Part of Architecture,** in: College Art Journal 12 (1) 1952, S. 24–30.

Max Kemman, Martijn Kleppe, Stef Scagliola, **Just Google It. Digital Research Practices of Humanities Scholars**, in: Proceedings of the Digital Humanities Congress 2012.

Wolfgang Kemp, **Kunstgeschichte und Interdisziplinarität**, in: Kunsthistorische Arbeitsblätter, 7 (8) 2000, S. 43–48.

Karen M. Kensek, **Survey of Methods for Showing Missing Data, Multiple Alternatives, and Uncertainty in Reconstructions**. In: CSA Newsletter, 19 (3) 2007.

Karen M. Kensek, Lynn Swartz Dodd, Nicholas Cipolla, **Fantastic Reconstructions or Reconstructions of the Fantastic? Tracking and Presenting Ambiguity, Alternatives, and Documentation in Virtual Worlds**, in: Automation in Construction, 13, 2004, S. 175–186.

Karen M. Kensek, Lynn Swartz Dodd, Nicholas Cipolla, **Fantastic Reconstructions or Reconstructions of the Fantastic? Tracking and Presenting Ambiguity, Alternatives, and Documentation in Virtual Worlds**, Paper presented at the ACADIA 2002: Thresholds between Physical and Virtual Conference, Pomona, California, 2002.

Karen M. Kensek, Doug Noble, **Building Information Modeling: BIM in Current and Future Practice**, Hoboken, New Jersey 2014.

Harold Kerzner, **Project Management. A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling**, New York 2003.

KHRONOS Webseite, **https://www.khronos.org/webgl/**.

Elisabeth Kieven, Georg Schelbert, **Architekturzeichnungen, Architektur und digitale Repräsentationen – das Projekt LINEAMENTA**, in: Kai Kappel, Ursula Müller (Hg.), Architecture on Display, 2014 (4), **http://edoc.hu-berlin.de/kunsttexte/2014-4/kieven-elisabeth-10/PDF/kieven.pdf**.

King´s College London, **The Oplontis Visualization Project**, **http://www.oplontisproject.org/index.php/people/the-oplontis-visualization-project/**.

Anastasia Kioussi, Kyriakos Labropoulos, Maria Karoglou, A. Moropoulou, Roko Zarnic, **Recommendations and Strategies for the Establishment of a Guideline for Monument Documentation Harmonized with the existing European Standards and Codes**, in: Proceedings of XXIII CIPA Symposium, Prague, Czech Republic, 12–16 September 2011, S. 178–184.

Matthew G. Kirschenbaum, **What is Digital Humanities and What's it Doing in English Departments?**, in: ADE Bulletin, (150) 2010, S. 55–61.

Julie Thompson Klein, **A Conceptual Vocabulary of Interdisciplinary Science**, in: P. Weingart, N. Stehr (Hg.), Practising Interdisciplinarity, Toronto 2000, S. 3–24.

Martin Knecht, **State of the Art Report on Ambient Occlusion**, TR, Wien 2007.

Terry Knight, **Possible Palladian Villas by George Hersey and Richard Freedman**, Review, in: Journal of Architectural Education, 44, 1994, S. 258–260.

Hubertus Kohle, **Digitale Bildwissenschaft**, Glückstadt 2013, **http://archiv.ub.uni-heidelberg.de/artdok/volltexte/2013/2185**.

Hubertus Kohle, **Digitale Rekonstruktion**, in: Fotis Ioannides, Malte Rehbein, Hubertus Kohle (Hg.), Digital Humanities. Eine Einführung, Stuttgart 2017, S. 315–327.

Hubertus Kohle, Katja Kwastek (Hg.), **Digitale und digitalisierte Kunstgeschichte. Perspektiven einer Geisteswissenschaft im Zeitalter der Virtualität**, in: zeitenblicke 2 (1) 2003, **http://www.zeitenblicke.de/2003/01/index.html**.

Johannes Kohler, Tobias Noll, Gerd Reis, and Didier Stricker, **A Full-spherical Device for Simultaneous Geometry and Reflectance Acquisition**, in: 2013 IEEE Workshop on Applications of Computer Vision (WACV), 2013, S. 355–362.

Thomas H. Kolbe, **Representing and Exchanging 3D City Models with CityGML**, in: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, 2009, S. 15–31.

Manfred Koob, **Die Bauhaus-Ausstellung**, in: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet »CAD in der Architektur« (Hg.), Bauhaus – Avantgarde der 20er Jahre. Architektur als Vision. CAD-Simulationen von Entwürfen und nicht gebauten bzw. nicht mehr existierenden Projekten der beginnenden Moderne, Heidelberg 1994, S. 152.

Manfred Koob, **Die dreidimensionale Rekonstruktion und Simulation von Cluny III**, in: Horst Cramer, Manfred Koob (Hg.), Cluny. Architektur als Vision, Heidelberg 1993, S. 58–86.

Manfred Koob, **Weiche Werkzeuge – Neue Gedächtnisse**, in: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet »CAD in der Architektur« (Hg.), Bauhaus – Avantgarde der 20er Jahre. Architektur als Vision. CAD-Simulationen von Entwürfen und nicht gebauten bzw. nicht mehr existierenden Projekten der beginnenden Moderne, Heidelberg 1994, S. 12–18.

Igor Kopytoff, **The Cultural Biography of Things: Commoditization as Process**, in: Arjun Appadurai (Hg.), The Social Life of Things. Commodities in Cultural Perspective, Cambridge 1986, S. 64–92.

Celia Krause, Ruth Reiche, **Ein Bild sagt mehr als tausend Pixel? Digitale Forschungsansätze in den Bild- und Objektwissenschaften**, Glücksstadt 2015.

Clemens Krause, **Villa Jovis. Die Residenz des Tiberius auf Capri**, Mainz 2003.

Lars Krecklau, Leif Kobbelt, **Procedural Modeling of Interconnected Structures**, in: Computer Graphics Forum 30, 2011, S. 335–344.

Lars Krecklau, Darko Pavic, Leif Kobbelt, **Generalized Use of Non-Terminal Symbols for Procedural Modeling**, in: Computer Graphics Forum 29, 2010, S. 2291–2303.

Armin Krishnan, **What are Academic Disciplines. Some Observations on the Disciplinarity vs. Interdisciplinarity Debate**, Southhampton 2009.

Ulrich Krispel, Henrik Evers, Martin Tamke, Torsten Ullrich, **An Automatic Hypothesis of Electrical Lines from Range Scans and Photographs**, in: Proceedings 16th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering 7, 2016, S. 815–822.

Cindy Kröber, Sander Münster, **An App for the Cathedral in Freiberg – An Interdisciplinary Project Seminar**, in: 11th Cognition and Exploratory Learning in Digital Age 2014 (CELDA). submitted paper.

Thomas S. Kuhn, **Die Entstehung des Neuen**, Frankfurt a. Main 1978.

Piotr Kuroczyński, **3D-Computer-Rekonstruktion der Baugeschichte Breslaus. Ein Erfahrungsbericht**, in: Jahrbuch des Wissenschaftlichen Zentrums der Polnischen Akademie der Wissenschaften in Wien, Band 3, W.Z.d.P.A.d. Wissenschaften, Wien 2012, S. 201–213.

Piotr Kuroczyński, **Digital Reconstruction and Virtual Research Environments – A matter of documentation standards**, in: Access and Understanding – Networking in the Digital Era. Proceedings of the annual conference of CIDOC, 6.-11.9.2014, Dresden 2014, **http://www.cidoc2014.de/images/sampledata/cidoc/papers/L-1_Kuroczynski_paper.pdf.**

Piotr Kuroczyński, Peter Bell und Lisa Dieckmann (Hg.), **Computing Art Reader: Einführung in die digitale Kunstgeschichte**, Heidelberg: arthistoricum.net, 2018 (Computing in Art and Architecture, Band 1), **https://doi.org/10.11588/arthistoricum.413**.

Piotr Kuroczyński, **Neuer Forschungsraum für die Kunstgeschichte: Virtuelle Forschungsumgebungen für digitale 3D-Rekonstruktionen**, in: Piotr Kuroczyński, Peter Bell, Lisa Dieckmann (Hg.), Computing Art Reader: Einführung in die digitale Kunstgeschichte, arthistoricum.net-ART-Books, Heidelberg: arthistoricum.net, 2018 (Computing in Art and Architecture, Band 1), S. 160–181.

Piotr Kuroczyński, **Pecha Kucha »Virtuelle Rekonstruktion – Allgemeine Standards,**

Methodik und Dokumentation« (Panel), in: Panel bei der 1. Jahrestagung der Digital Humanities im deutschsprachigen Raum (DHd 2014), Passau 2014.

Piotr Kuroczyński, Oliver Hauck, Daniel Dworak, **3D Models on Triple Paths – New Pathways for Documenting and Visualizing Virtual Reconstructions**, in: Sander Münster, Mieke Pfarr-Harfst, Piotr Kuroczyński, Marinos Ioannides (Hg.), 3D Research Challenges in Cultural Heritage II: How to Manage Data and Knowledge Related to Interpretative Digital 3D Reconstructions of Cultural Heritage, Cham 2016, S. 149–172.

Piotr Kuroczyński, Oliver Hauck, Daniel Dworak, **Virtual Museum of Destroyed Cultural Heritage – 3D Documentation, Reconstruction and Visualisation in the Semantic Web**, in: Proceedings of the 2nd International Conference on Virtual Archaeology, The State Hermitage, St. Petersburg 2015, S. 54–61.

Karl-Eugen Kurrer, **Werner Müller. Ein Nachruf**, in: ARCH+, Nr. 175, 2005, S. 11.

L

William M. C. Lam, **Perception and Lighting as Formgivers for Architecture,** New York 1992.

Bernhard Langer**, Computerdarstellung. Vom Programm zum digitalen Ökosystem**, in: Wolfgang Sonne (Hg.), Die Medien der Architektur, Berlin u. a. 2011, S. 157–168.

Gregory W. Larson, Holly Rushmeier, Christine Piatko, **A Visibility Matching Tone Reproduction Operator for High Dynamic Range Scenes,** in: IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 3 (4) 1997, S. 291–306.

Rosa Lasaponara, Rosa Coluzzi, Nicola Masini, **Flights into the Past: Full-waveform Airborne Laser Scanning Data for Archaeological Investigation**, in: Journal of Archaeological Science, Vol. 38 2011, S. 2061–2070.

Bruno Latour, **Die Hoffnung der Pandora. Untersuchungen zur Wirklichkeit der Wissenschaft**, Frankfurt a. Main 2000.

Eric Laufer, **Die Wiederentstehung Pergamons als virtuelles Stadtmodell**, in: A. Scholl, V. Kästner, R. Grüssinger (Hg.), Pergamon. Panorama der antiken Metropole, Petersberg 2011, S. 82–86.

Eric Laufer, Dominik Lengyel, Felix Pirson, Verena Stappmanns, Catherine Toulouse, **Die Wiederentstehung Pergamons als virtuelles Stadtmodell**, in: Andreas Scholl, Volker Kästner, Ralf Grüssinger (Hg.), Antikensammlung Staatliche Museen Berlin. Pergamon. Panorama der antiken Metropole, Petersberg 2011, S. 82–86.

Fritz Laupichler, **MIDAS, HIDA, DISKUS – was ist das?**, in: AKMB-news 4 (2–3) 1998, S. 18–24.

Averill M. Law, W. David Kelton, **Simulation Modeling and Analysis,** (3. ed.), New York [u. a.] 2000.

Claude-Nicholas Ledoux, **L'architecture considérée sous le rapport de l'art, des mœurs et de la législation**, tome I, Paris 1804.

Claude-Nicholas Ledoux, **Architecture de C. N. Ledoux. Premier volume contenant des plans, élévations, coupes**, Paris 1847.

Lehrstuhl für Informatik mit Schwerpunkt Informationsmanagement, Universität Passau. **MonArch Projekt**, **http://www.monarch.uni-passau.de/**.

Dominik Lengyel, Catherine Toulouse, **Darstellung von unscharfem Wissen in der Rekonstruktion historischer Bauten**, in: Katja Heine (Hg.), Von Handaufmaß bis High Tech III. 3D in der historischen Bauforschung, Darmstadt 2011, S. 182–186.

Dominik Lengyel, Catherine Toulouse, **Die Bauphasen des Kölner Domes und seiner Vorgängerbauten: Gestaltung zwischen Architektur und Diagrammatik**, in: Dietrich Boschung, Julian Jachman (Hg.), Diagrammatik der Architektur, Tagungsband Internationales Kolleg Morphomata der Universität zu Köln, Paderborn 2013, S. 182–186.

Dominik Lengyel, Catherine Toulouse, **Die Gestaltung der Vision Naga – Designing Naga's Vision,** in: Karla Kröper, Sylvia Schoske, Dietrich Wildung (Hg.), Königsstadt Naga – Naga, Royal City. Grabungen in der Wüste des Sudan – Excavations in the Desert of the Sudan, München 2011, S. 163–175.

Dominik Lengyel, Catherine Toulouse, **Ein Stadtmodell von Pergamon – Unschärfe als Methode für Darstellung und Rekonstruktion antiker Architektur**, in: Lars Petersen, Ralf von den Hoff (Hg.), Skulpturen in Pergamon – Gymnasion, Heiligtum, Palast, Freiburg 2011, S. 22–26.

Dominik Lengyel, Catherine Toulouse, **Visualisation of Uncertainty in Archaeological Reconstructions**, in: Stephan Hoppe, Stefan Breitling (Hg.), Virtual Palaces, Part II: Lost Palaces and Their Afterlife, Munich: Palatium, 2016, S. 103–17.

Andres Lepik, **Das Architekturmodell in Italien**, Worms 1994.

Judith Ley, Marc Wietheger, **Pfalzenforschung in Aachen, http://arch.rwth-aachen.de/cms/Architektur/Forschung/Verbundforschung/Cultural-Heritage/~cbjv/Pfalzenforschung-in-Aachen/**.

Franz Liebl, **Simulation: problemorientierte Einführung**, München [u. a.], Oldenbourg 1995.

Walter A. Liedtke (Hg.), **Vermeer and the Delft School**, New York, London 2001.

W. Fredrick Limp, Angelia Payne, Samuel Winters, Adam Barnes, Jackson Cothren, **Approaching 3D Digital Heritage Data from a Multi-Technology, Lifecycle Perspective**, Paper presented at the Proceedings of the 38th Annual International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA), Granada, Spain, 2010.

Matthew Lincoln, **Predicting the Past: Digital Art History, Modeling, and Machine Learning**, IRIS, **blogs.getty.edu/iris/predicting-the-past-digital-art-history-modeling-and-machine-learning/**.

Mikael Lindgren, **Christopher Polhems testamente**, Stockholm 2011.

Sten Lindroth, **Christopher Polhem och Stora Kopparberget**, Uppsala 1951.

Zhu Ling, Shi Ruoming, Zhou Keqin, **Rule-based 3D Modeling for Chinese Traditional Architecture,** in: F. Remondino, S. El-Hakim (Hg.), 3D-ARCH 2007, Zürich 2007.

Markus Lipp, Peter Wonka, Michael Wimmer, **Interactive Visual Editing of Grammars for Procedural Architecture**, ACM Transactions on Graphics 27 (3) 2008, S. 1–10.

Zack Lischer-Katz, **Studying the Materiality of Media Archives in the Age of Digitization: Forensics, Infrastructures and Ecologies**, in: First Monday 22 (1–2) 2017.

Hubert Locher, **Kunstgeschichte als historische Theorie der Kunst 1750–1950**, München 2001.

Hubert Locher, Kunstbegriff und Kunstgeschichte – Schlosser, Gombrich, Warburg, in: Wojciech Bałus (Hg.), Die Etablierung des Faches Kunstgeschichte in Deutschland, Polen und Mitteleuropa, Warszawa 2010, S. 391–410.

Thomas Lochman, Thomas Späth, Adrian Stähli (Hg.), Antike im Kino. Auf dem Weg zu einer Kulturgeschichte des Antikenfilms, Basel 2008.

The London Charter Interest Group, **The London Charter, http://www.londoncharter.org/fileadmin/templates/main/docs/london_charter_2_1_en.pdf**.

Matthew P. Long, Roger C. Schonfeld, **Supporting the Changing Research Practices of Art Historians**, in: Ithaka S+R 2014.

H. C. Longuet-Higgins, **A Computer Algorithm for Reconstructing a Scene from Two Projections**, in: Nature 293 (5828) 1981, S. 133–135.

Victor M. Lopez-Menchero Bendicho, **The Principles of the Seville Charter,** XXIII CIPA Symposium – Proceedings.

Wolfgang Lotz, **Architecture in Italy, 1500–1600**, London 1995.

Tolina Loulanski, **Revising the Concept for Cultural Heritage: The Argument for a Functional Approach**, in: International Journal of Cultural Property 13, no. 2 (2006), S. 207–33.

Richard Lowe, Wolfgang Schnotz, **Animation Principles in Multimedia Learning**, in: Richard Meyer, (Hg.), The Cambridge Handbook of Multimedia Learning, New York 2013, S. 513–546.

David Ludwig, Cornelia Weber, Oliver Zausig (Hg.), **Das materielle Modell. Objektgeschiten aus der wissenschaftlichen Praxis**, Paderborn 2014.

David Luebke, **Level of Detail for 3D Graphics**, San Francisco 2003.

Patricia Lulof, Loes Opgenhaffen, Maarten H. Sepers, **The Art of Reconstruction. Documenting the Process of 3D Modeling: Some Preliminary Results**, in: Proceedings of the 2013 Digital Heritage International Congress, Marseille 2013, S. 333–336.

Rolf A. Lundin, Anders Söderholm, **A Theory of the Temporary Organization**, in: Scandinavian Journal of Management, 11 (4) 1995, S. 437–455.

Deborah Lupton, **»Feeling Better Connected«: Academics' Use of Social Media**, Canberra 2014.

M

Bernd Mahr, **Cargo. Zum Verhältnis von Bild und Modell**, in: Ingeborg Reichle, Steffen Siegel, Achim Spelten (Hg.), Visuelle Modelle, München 2008, S. 17–40.

Bernd Mahr, Das Wissen im Modell, Berlin 2004.

Bernd Mahr, Ein Modell des Modellseins – Ein Beitrag zur Aufklärung des Modellbegriffs, in: Ulrich Dirks, Eberhard Knobloch (Hg.), Modelle, Berlin 2008, S. 187–218.

Bernd Mahr, Modelle und ihre Befragbarkeit. Grundlagen einer allgemeinen Modelltheorie, in: Erwägen Wissen Ethik, Heft 26 (3) 2015, S. 329–342.

Bernd Mahr, Reinhard Wendler, **Bilder zeigen Modelle – Modelle zeigen Bilder**, in: Gottfried Böhm, Sebastian Egenhofer, Christian Spies (Hg.), Zeigen. Die Rhetorik des Sichtbaren (eikones), München 2010, S. 183–206

Tomàs Maldonado, **Reale e virtuale**, Milano 1992.

Zaccaria Mari, Anna Maria Reggiani, Roberto Righi, **Il Grande Vestibolo di Villa Adriana**, in: Villa Adriana. Paesaggio antico e ambiente moderno: elementi di novità e ricerche in corso, Roma 2002, S. 16–29.

Bob Martens, Herbert Peter, **The Destroyed Synagogues of Vienna: Virtual City Walks**. Vienna 2011.

Bob Martens, Herbert Peter, **Developing Systematics Regarding Virtual Reconstruction of Synagogues**, in: ACADIA 2002 Conference Proceedings, Pomona 2002, S. 349–356.

Bob Martens, Herbert Peter, **Virtual Reconstruction of Synagogues: Systematic Maintenance of Modeling Data**, in: eCAADe 2002 Conference Proceedings, Warsaw (Poland) 2002, S. 512–517.

Bob Martens, Martijn Stellingwerff, **Creating Physical Models Using Virtual Reconstructions: Mixed CAM-techniques for a Viennese Synagogue Scale-model**, in: SiGraDi 2005 Conference Proceedings, Lima (Peru) 2005, S. 108–113.

Bob Martens, Wolf-Michael Tschuppik, **Displaying Spatially Complex Constellations. An Endoscopic Exploration Implementing the CUBIC-VR Technique**, in: Proceedings of the 6th European Architectural Endoscopy Associ-

ation Conference, Bratislava (Slovakia) 2004, S. 101–107.

Nicolas Martin-Beaumont, Nicolas Nony, Benoit Deshayes, Marc Pierrot-Deseilligny, Livio De Luca, **Photographer-friendly Workflows for Image-based Modelling of Heritage Artefacts**, in: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL–5 (2) 2013, S. 421–424.

Angela Matyssek, **Kunstgeschichte als fotografische Praxis. Richard Hamann und Foto Marburg**, Berlin 2009 (Humboldt-Schriften zur Kunst- und Bildgeschichte, 7).

Lindsay W. MacDonald, **Visualising an Egyptian Artefact in 3D: Comparing RTI with Laser Scanning**, in: Proceedings of the 2011 International Conference on Electronic Visualisation and the Arts, The Chartered Institute for IT, in the Series: Electronic Workshops in Computing (eWiC), 2011, S. 155–162.

William L. MacDonald, John Pinto, **Villa Adriana. La ricostruzione e il mito da Adriano a Louis Kahn**, Milano 1997.

Willard McCarty, **Modeling. A Study in Words and Meanings**, in: Susan Schreibman, Ray Siemens, John Unsworth (Hg.), A Companion to Digital Humanities, Oxford 2004, **http://www.digitalhumanities.org/companion/**.

Kenton McHenry, Peter Bajcsy, **An Overview of 3D Data Content, File Formats and Viewers**, in: National Center for Supercomputing Applications 1205, 2008.

Judith McKenzie, **The Architecture of Alexandria and Egypt 300 BC – AD 700**, London 2010.

Marshall McLuhan, **The Gutenberg Galaxy**, London 1962.

Maura Medri, **Manuale di rilievo archeologico, Laterza**, Bari 2003.

Johan Meerman, Reise durch den Norden und Nordosten von Europa: In den Jahren 1797 bis 1800, Wien 1811.

Heike Messemer, **The Beginnings of Digital Visualization of Historical Architecture in the Academic Field**, in: Stephan Hoppe, Stefan Breitling (Hg.), Virtual Palaces, Part II. Lost Palaces and their Afterlife. Virtual Reconstruction between Science and Media, München 2016 (PALATIUM e-Publications, Bd. 3), S. 21–54.

Maria G. Micale, **European Images of the Ancient Near East at the Beginnings of the Twentieth Century**, in: Nathan Schlanger, Jarl Nordbladh (Hg.), Archives, Ancestors, Practices: Archaeology in the Light of Its History, New York, Oxford 2008, S. 191–203.

Maria G. Micale, **Designing Architecture, Building Identities. The Discovery and Use of Mesopotamian Features in Modern Architecture between Orientalism and the Definition of Contemporary Identities**, in: Proceedings of the 6th International Congress on the Archaeology of the Ancient Near East, Wiesbaden 2010, S. 93–112.

Paul Miller, Julian Richards, **The Good, the Bad, and the Downright Misleading: Archaeological Adoption of Computer Visualization**, in: BAR INTERNATIONAL SERIES 600, 1995, S. 19.

Henry A. Millon (Hg.), **The Triumph of the Baroque. Architecture in Europe 1600–1750**, Milan 1999.

Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, »Ortofoto a colori (part. Villa Adriana)«, 2006, **http://www.pcn.minambiente.it/GN/**.

Miranda i Sverige och Norge 1787: General Francisco de Mirandas dagbok från hans resa september-december 1787, Stockholm 1950.

William J. Mitchell, **Computer-aided Architectural Design**, New York 1977.

William J. Mitchell, **Three Paradigms for Computer-aided Design**, in: Automation in Construction, 3, 1994, S. 239–245.

William J. Mitchell, Larry Sass, **From Drawing Collections to Virtual Museums Representing, Preserving, and Studying Architecture in the Digital Era**, in: Palladio 1508–2008. Il simposio del cinquecentenario, Venezia 2008, S. 401–404.

Brian Leigh Molyneaux (Hg.), **The Cultural Life of Images. Visual Representation in Archaeology**, London: Routledge, 1997.

Daniela Mondini, Vladimir Ivanovici (Hg.), **Manipulating Light in Pre-modern Times. Architectural, Artistic and Philosophical Aspects.** Mendrisio 2014.

Jacquelyn F. Morie, **CGI Training for the Entertainment Film Industry**, in: IEEE Computer Graphics and Applications 98, Januar/Februar 1998, S. 30–37.

Richard Morriss, **The Archaeology of Buildings**, Stroud 2004.

Michael E. Mortenson, **Geometric Modeling**, John Wiley & Sons 1985.

Luca Mozzati, **Pompeji. Virtuelle Rekonstruktionen von Orten und Monumenten**, Milano 2013.

Pascal Müller, Peter Wonka, Simon Haegler, Andreas Ulmer, Luc Van Gool, **Procedural Modeling of Buildings**, in: Proceedings of ACM Siggraph 25 (3) 2006, S. 614–623.

Werner Müller, **Computersimulation spätgotischer Gewölbe. Ein Diskussionsbeitrag zum Thema »CAD als Ende der Baukunst«**, in: Geschichte des Konstruierens IV. Konzepte SFB 230, Heft 33, 1990, S. 144–153.

Werner Müller, Norbert Quien, **Computergraphik und Video nach Algorithmen spätgotischer Steinmetzkunst**, in: Thomas W. Gaehtgens (Hg.), Künstlerischer Austausch. Artistic Exchange. Akten des XXVIII. Internationalen Kongresses für Kunstgeschichte, Berlin, 15.–20. Juli 1992, Bd. 3, Berlin 1993, S. 271–282.

Werner Müller, Norbert Quien, **Hammer, Meißel und Computer – Spätgotik im rechten Maß**, Ausstellung im Landesmuseum für Technik und Arbeit in Mannheim, Mannheim 1999.

Werner Müller, Norbert Quien, **Spätgotik virtuell. Für und Wider die Simulation historischer Architektur**, Weimar 1999.

Werner Müller, Norbert Quien, **Virtuelle Steinmetzkunst der österreichischen und böhmisch-sächsischen Spätgotik: die Gewölbeentwürfe des Codex Miniatus 3 der Österreichischen Nationalbibliothek in Wien**, Petersberg 2005 (Studien zur internationalen Architektur- und Kunstgeschichte, Bd. 37).

Werner Müller, Norbert Quien, **Von deutscher Sondergotik. Architekturphotographie – Computergraphik – Deutung**, Baden-Baden 1997 (SAECVLA SPIRITALIA, Bd. 33).

Sander Münster (Hg.), **Aktuelle Herausforderungen im Kontext digitaler Rekonstruktion. Beitrag der Arbeitsgruppe Digitale Rekonstruktion des Digital Humanities im deutschsprachigen Raum e. V. zum Agendaprozess »Zukunft sichern und gestalten« des BMBF.** Dresden 2014, **http://digitale-rekonstruktion.info/wp-content/uploads/2015/01/140831_Herausforderungen_Digitaler_Rekonstruktion.pdf**.

Sander Münster, **Entstehungs- und Verwendungskontexte von 3D-CAD-Modellen in den Geschichtswissenschaften**, in: Klaus Meißner u. Martin Engelien (Hg.), Virtual Enterprises Communities & Social Networks, GeNeMe 11. Gemeinschaften in Neuen Medien, TU Dresden, 07.-08. September 2011, Dresden 2011, S. 99–108.

Sander Münster, **Images of the Past. Using Digital 3D Reconstruction Methods for Digital Humanities Research and Education, https://www.researchgate.net/publication/310292686_Images_of_the_past_Using_digital_3D_reconstruction_methods_for_digital_humanities_research_and_education**.

Sander Münster, **Interdisziplinäre Kooperation bei der Erstellung geschichtswissenschaftlicher 3D-Modelle**, Dissertation. Dresden 2014.

Sander Münster, **Militärgeschichte aus der digitalen Retorte – Computergenerierte 3D-Visualisierung als Filmtechnik**, in: Alexander Kästner, Josef Mazerath (Hg.), Mehr als Krieg und Leidenschaft. Die filmische Darstellung von Militär und Gesellschaft der Frühen Neuzeit, Militär und Gesellschaft in der frühen Neuzeit, Potsdam 2011, S. 457–486.

Sander Münster, **Research and Education on Digital 3D Reconstruction and Visualization in Visual Humanities**, in: John C. Spender, Giovanni Schiuma, Jörg R. Nönnig (Hg.), Proceedings of the 11th International Forum on Knowledge Asset Dynamics (IFKAD 2016) Dresden 2016, S. 95–123.

Sander Münster, **A Survey on Topics, Researchers and Cultures in the Field of Digital Heritage**, in: ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (XXV International CIPA Symposium), 2017, S. 157–162.

Sander Münster, **Workflows and the Role of Images for a Virtual 3D Reconstruction of No Longer Extant Historic Objects**, in: ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-5/W2, XXIV International CIPA Symposium, 2013, S. 197–202.

Sander Münster, Wolfgang Hegel, Cindy Kröber, **A Model Classification for Digital 3D Reconstruction in the Context of Humanities Research**, in: Sander Münster, Mieke Pfarr-Harfst, Piotr Kuroczyński, Marinos Ioannides (Hg.), 3D Research Challenges in Cultural Heritage II. How to Manage Data and Knowledge Related to Interpretative Digital 3D Reconstructions of Cultural Heritage, Heidelberg, Cham 2016, S. 3–31.

Sander Münster, Peter-Heinrich Jahn, Markus Wacker, **Von Plan- und Bildquellen zum virtuellen Gebäudemodell. Zur Bedeutung der Bildlichkeit für die digitale 3D-Rekonstruktion historischer Architektur**, in: Sabine Ammon, Inge Hinterwaldner (Hg.), Bildlichkeit im Zeitalter der Modellierung. Operative Artefakte in Entwurfsprozessen der Architektur und des Ingenieurwesens, München 2017, S. 55–286.

Sander Münster, Thomas Köhler, **3D Modeling as Tool for the Reconstruction and Visualization of »Lost« Buildings in Humanities. A Literature-based Survey of Recent Projects**, in: Stephan Hoppe, Stefan Breitling, Sebastian Fitzner, (Hg.) Virtual Palaces II: Lost Palaces and Their Afterlife. Virtual Reconstruction Between Science and Media. Proceedings of the European Science Foundation Research Networking Programme PALATIUM meeting at Munich, 13.- 15. 4. 2012, in print.

Sander Münster, Thomas Köhler, **3D Reconstruction of Cutural Heritage Artefacts**, in: Stephan Hoppe, Stefan Breitling (Hg.), Virtual Palaces, Part Ii: Lost Palaces and Their Afterlife, Munich: Palatium, 2016, S. 87–102.

Sander Münster, Piotr Kuroczyński, Mieke Pfarr-Harfst, Marc Grellert, Dominik Lengyel, **Future Research Challenges for a Computer-Based Interpretative 3D Reconstruction of Cultural Heritage – A German Community's View**, in: ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-5/W3, 2015, S. 207–213.

Sander Münster, Florian Niebling, **HistStadt4D – Multimodale Zugänge zu historischen Bildrepositorien zur Unterstützung stadt- und baugeschichtlicher Forschung und Vermittlung**, in: Digital Humanities im deutschsprachigen Raum (DHd) 2016: Modellierung – Vernetzung – Visualisierung. Die Digital Humanities als fächerübergreifendes Forschungsparadigma – Konferenzabstracts, Duisburg 2016, S. 202–206, **http://dhd2016.de/boa.pdf**.

Sander Münster, Mieke Pfarr-Harfst, Piotr Kuroczynski, Marinos Ioannides (Hg.), **3D Research Challenges in Cultural Heritage. How to manage Data and knowledge related**

to Interpretative Digital 3D Reconstructions of Cultural Heritage (Vol. 2), Heidelberg 2016.

Sander Münster, Nikolas Prechtel, **Beyond Software. Design Implications for Virtual Libraries and Platforms from Practical Findings**, in: Marinos Ioannides (Hg.), Euromed 2014, submitted paper.

Maurice Murphy, **Historic Building Information Modelling (hBIM) For Recording and Documenting Classical Architecture in Dublin 1700 to 1830**, Diss. 2012, Trinity College Dublin, **https://www.academia.edu/8237173/Historic_Building_Information_Modelling_HBIM_PhD**.

Maurice Murphy, Eugene McGovern, Sara Pavia, **Historic Building Information Modelling (HBIM)**, in: Structural Survey, Vol. 27/4, 2009, S. 311–327.

N

Paul von Naredi-Rainer, Cornelia Limpricht, **Salomos Tempel und das Abendland. Monumentale Folgen historischer Irrtümer**, Köln 1994.

Peter Nausner, **Projektmanagement. Die Entwicklung und Produktion des Neuen in Form von Projekten**, Wien 2006.

Winfried Nerdinger (Hg.), Geschichte der Rekonstruktion – Rekonstruktion der Geschichte, München 2010.

Pier L. Nervi, **Weltgeschichte der Architektur, Storia universale dell'architettura**, Mailand 1971.

Franco Niccolucci, **Setting Standards for 3D Visualization of Cultural Heritage**, in: Anna Bentkowska-Kafel, Hugh. Denard, Drew Baker (Hg.), Europe and Beyond, in Paradata and Transparency in Virtual Heritage, Burlington 2012, S. 23–36.

Franco Niccolucci, Andrea D'Andrea, **An Ontology for 3D Cultural Objects**, in: Marinos Ioannides, David Arnold, Franco Niccolocci, Katerina Mania (Hg.), Proceedings of the 7th International Conference on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage, Nicosia 2006, S. 203–210.

Franco Niccolucci, Sorin Hermon, **A Fuzzy Logic Approach to Reliability in Archaeological Virtual Reconstruction**, in: Franco Niccolocci, Sorin Hermon (Hg.), Beyond the Artifact. Digital Interpretation of the Past. Proceedings of CAA2004, Prato 13–17 April 2004, Budapest 2010, S. 28–35.

Franco Niccolucci, Julian Richards, **ARIADNE Advanced Research Infrastructure for Archaeological Dataset Networking in Europe**, in: International Journal of Human-Computer Studies Art 7(1–2), 7088 (2013), S. 70–88.

Fred E. Nicodemus, Joseph C. Richmond, Jack J Hsia, Irving W. Ginsberg, Thomas Limperis, **Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance.** Washington 1977.

Joseph D. Nigro, W. F. Limp, Kenneth K. Kvamme, Darryl J. d. Ruiter, Lee R. Berger, **The Creation and Potential Applications of a 3-dimensional GIS for the Early Hominin Site of Swartkrans, South Africa**, in: Göran Burenhult (Hg.), Archaeological informatics – pushing the envelope, Oxford 2002.

Andreas Noback, **Mosaics – Dealing with precious material,** 11th International Radiance Workshop, Copenhagen 2012, **https://www.radiance-online.org/community/workshops/2012-copenhagen**.

Andreas Noback, Lars O. Grobe, Stephen Wittkopf, **Accordance of Light Scattering from Design and De-Facto Variants of a Daylight Redirecting Component**, in: Buildings 3 (30) 2016.

Andreas Noback, Stephen Wittkopf, **Complex Material Models in Radiance.** 13thRadiance Workshop, London 2014, **https://www.radiance-online.org/community/workshops/2014-london**.

Barbara-Jo Novitski (Hg.), **Rendering Real and Imagined Buildings. The Art of Computer Modeling from the Palace of Kublai Khan to Le Corbusier's Villas**, Gloucester, Massachusetts 1998.

Astrid Nunn, **Kulttopographie und Kultabläufe in mesopotamischen Tempeln: drei Beispiele**, in: Reinhhard G. Kratz, Hermann Spieckermann (Hg.), Götterbilder, Gottesbilder, Weltbilder. Polytheismus und Monotheismus in der Welt der Antike Band 1, Tübingen 2006, S. 167–195.

O

Sebastian Ochmann, Richard Vock, Raoul Wessel, Reinhard Klein, **Automatic Reconstruction of Parametric Building Models from Indoor Point Clouds**, in: Computers & Graphics 54, 2016, S. 94–103.

Jens Ohlig, Georg Schelbert, **Datenpartnerschaften mit Wikidata: Projekt Durchblick**, Wikimedia Blog, **https://blog.wikimedia.de/2017/08/21/datenpartnerschaften-mit-wikidata-projekt-durchblick/**.

Harald Olbrich (Hg.), **Lexikon der Kunst. Architektur, Bildende Kunst, Angewandte Kunst, Industrieformgestaltung, Kunsttheorie,** Bd. V, Mosb-Q, Leipzig 1993, S. 520–524.

OpenInfRA – Ein webbasiertes Informationssystem zur Dokumentation und Publikation archäologischer Forschungsprojekte, **http://www.tu-cottbus.de/projekte/de/openinfra/**.

Open Geospatial Consortium Inc., **OpenGIS Implementation Specification for Geographic information**, **http://www.opengeospatial.org/standards/sfs**.

Ernst Opgenoorth, **Einführung in das Studium der neueren Geschichte**, Paderborn 1997.

Thomas Ott, Frank Swiacny, **Time-integrative GIS. Management and Analysis of Spatio-temporal Data**, Berlin, Heidelberg, New York 2001.

Mine Özkar, Sotirios Kotsopoulos, **Introduction to Shape Grammars**, in: International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques ACM Siggraph (course notes) 36, 2008, S. 1–175.

P

Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz, J. Feldhusen, Karl-Heinrich Grote, **Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung**, Berlin 2007.

Andrea Palladio, **I quattro libri dell'architettura**, Venezia 1570.

Svend A. Pallis, **The Babylonian Akîtu Festival**, Copenhagen 1926.

Georgios Papaioannou, Tobias Schreck, Anthousis Andreadis, Pavlos Mavridis, Ivan Sipiran, Konstantinos Vardis, **From Reassembly to Object Completion – A Complete Systems Pipeline**, in: Journal on Computing and Cultural Heritage 10 (2) 2016, S. 8ff.

Konstantinos Papadopoulos, Efi Kefalaki, **At the Computer's Edge the Value of Virtual Constructions to the Interpretation of Cultural Heritage**, in: Archeomatica 4, no. December (2012–04–16 2010), S. 46–51.

Roberto Parenti, **Archeologia dell'architettura**, in: Dizionario di Archeologia. Temi, concetti e metodi, 2009, S. 39–43.

Paveprime Ltd., **CRMinf: The Argumentation Model – An Extension of CIDOC-CRM to Support Argumentation**, 2014.

Wolfgang Pehnt, **Die bewohnte Säule. Brauch und Mißbrauch einer Form,** in: Wolfgang Pehnt, Die Erfindung der Geschichte. Aufsätze und Gespräche zur Architektur unseres Jahrhunderts, München 1989, S. 30–36.

Richard Perez, Robert Seals, Joseph Michalsky, **All-weather Model for Sky Luminance Distribution – Preliminary Configuration and Validation**, in: Solar energy 50 (3) 1993, S. 235–245.

Marta Perlinska, **Palette of possibilities**. PhD Thesis. Lund University, Department of Archaeology and Ancient History 2014.

Nicolas Pethes, Jens Ruchatz (Hg.), **Gedächtnis und Erinnerung**, Hamburg 2001.

Mieke Pfarr, **Dokumentationssystem für Digitale Rekonstruktionen am Beispiel der Grabanlage Zhaoling, Provinz Shaanxi, China** (Dissertation), Darmstadt 2009.

Mieke Pfarr-Harfst, **Digital 3D Reconstructed Models in Museum Context – Is There Any Authenticity?,** in: Römisch Germanisches Museum Mainz (Hg.), Museen – Orte des Authentischen, Tagungsband, Mainz 2016, S. 240–247.

Mieke Pfarr-Harfst, **Documentation System for Digital Reconstructions. Reference to the Mausoleum of the Tang-Dynastie at Zhaoling, in Shaanxi Province, China**, in: 16th International Conference on »Cultural Heritage and New Technologies« Vienna, 2011, Wien 2011, S. 648–658.

Mieke Pfarr-Harfst, **A New Documentation System in the Context of Cultural Heritage**, in: Arianna Traviglia (Hg.), Across Space and Time. Proceedings of the 41th International Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology (CAA) Perth, 25–28 March 2013, Amsterdam 2015.

Mieke Pfarr-Harfst, **Typical workflows, documentation approaches and principles of 3D digital reconstruction of cultural heritage**, in: Sander Münster, Mieke Pfarr-Harfst, Piotr Kuroczyński, Marinos Ioannides (Hg.), 3D Research Challenges in Cultural Heritage II. How to Manage Data and Knowledge Related to Interpretative Digital 3D Reconstructions of Cultural Heritage, Heidelberg, Cham 2016, S. 32–46.

Mieke Pfarr-Harfst, Marc Grellert, **The Reconstruction – Argumentation Method. Proposal for a Minimum Standard of Documentation in the Context of Virtual Reconstructions**, in: Marinos Ioannides, Eleanor Fink, Antonia Moropoulou, Monika Hagedorn-Saupe, Antonella Fresa, Gunnar Liestøl, Vlatka Rajcic, Pierre Grussenmeyer (Hg.), Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection, 6th International Conference, EuroMed 2016, Nicosia, Cyprus, October 31 – November 5, 2016, Proceedings, Heidelberg 2016, S. 39–49.

Ulrich Pfisterer, **Big Bang Art History**, in: Merkur 71, Mai 2017, S. 95–101.

Claus Pias, Bilder – Bücher: Digitalisierte und digitale Kunstgeschichte. Einige Anmerkungen zu Jürgen Zimmer und Hubertus Kohle, in: AKMB news, 4,1998, S. 3–7, **https://www.uni-due.de/~bj0063/texte/akmb.html**.

Stuart Piggott, **Antiquity Depicted: Aspects of Archaeological Illustration**, London: Thames and Hudson, 1978.

Michael Piotrowski, **Digital Humanities, Computational Linguistics, and Natural Language Processing**, Uppsala, 4. März 2016, DOI **http://doi.org/10.5281/zenodo.1245169**, **http://stp.lingfil.uu.se/~nivre/docs/michael_piotrowski_2016.pdf**.

Dwight T. Pitcaithley, **Preface**, in: John H. Jameson Jr. (Hg.), The Reconstructed Past. Reconstructions in the Public Interpretation of Archaeology and History, Lanham 2004.

Jan Plass, Ruth Schwartz, **Multimedia Learning with Simluations and Microworlds**, in: Richard Meyer, (Hg.), The Cambridge Handbook of Multimedia Learning, New York 2013, S. 729–761.

Daniel Pletinckx, **An EPOCH Common Infrastructure Tool for Interpretation Management**, in: EPOCH 3.3 report, 2008.

Daniel Plentickx, **How to Make Sustainable Visualizations of the Past. An EPOCH Common Infrastructure Tool for Interpretation Management**, in: Anna Bentkowska-Kafel, Hugh Denard, Drew Baker (Hg.), Paradata and Transparency in Virtual Heritage, Farnham 2012, S. 203–244.

Catrin Powell, Stephen D. Laycock, Andy M. Day, S. Bailey, J. Rodziewicz, J. Gregory, T.

Williamson, **Historacle: Consolidation and Dissemination of Heritage Information**, Paper presented at the Virtual Systems and Multimedia (VSMM), 2012 18th International Conference on, 2–5 Sept. 2012.

Jeniffer A. Polack, **Perception of Images Using non Planar Perspective**, PhD dissertation, University of South Florida, Tampa 1997.

Christopher Polhem, **Afskrift af Chr. Polhammars bref 1696 till Bergs Collegium ang. hans utländska resa och förslag till inrättandet af ett mekaniskt laboratorium**, National Library of Sweden—Polhem, Christopher X 265:1

Pompei, Regisseur Peter Nicholson, BBC History Documentaries, 2003.

Kristin Potter, Paul Rosen, Chris Johnson, **From Quantification to Visualization: A Taxonomy of Uncertainty Visualization Approaches**, in: Andrew M. Dienstfrey, Ronald F. Boisvert (Hg.), 10th Working Conference on Uncertainty Quantification in Scientific Computing (WoCoUQ), August 2011, Boulder, CO, United States, Heidelberg, Cham 2012, S. 226–249.

Jörg Potthast, **»Sollen wir mal ein Hochhaus bauen?«: das Architekturbüro als Labor der Stadt**, in: Schriftenreihe der Forschungsgruppe »Metropolenforschung« des Forschungsschwerpunkts Technik – Arbeit – Umwelt am Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung, Berlin 1998, Nr. FS II 98–502.

Stephanie Pratt, **The American Time Machine: Indians and the Visualization of Ancient Europe**, in: Sam Smiles, Stephanie Moser (Hg.), Envisioning the Past. Archaeology and the Image, Oxford: Blackwell Publishing Ltd., 2005, S. 51–71.

Todd Presner, David Shepard, Yoh Kawano, **HyperCities – Thick Mapping in the Digital Humanities**, Cambridge 2014.

Paul Privateer, **Romancing the Human: The Ideology of Envisioned Human Origins**, in: Sam Smiles, Stephanie Moser (Hg.), Envisioning the Past. Archaeology and the Image, Oxford: Blackwell Publishing Ltd., 2005, S. 13–28.

Daniela Pscheida, Claudia Minet, Sabrina Herbst, Steff en Albrecht, Thomas Köhler, **Use of Social Media and Online-based Tools in Academia. Results of the Science 2.0–Survey 2014**, Dresden 2014.

Laia Pujol, Maria Roussou, Stavrina Poulou, Olivier Balet, Maria Vayanou, Yannis Ioannidis, **Personalizing Interactive Digital Storytelling in Archaeological Museums: The Chess Project**, Paper presented at the 40th annual conference of computer applications and quantitative methods in archaeology. Amsterdam University Press, 2012.

Q

Paul Quintrand, Jacques Autran, Michel Florenzano, Marius Fregier, Jacques Zoller, **La CAO en architecture**, Paris 1985.

Quo Vadis, Regisseur Günther Klein, ZDF 1999.

R

Martin Raspe, Georg Schelbert, **ZUCCARO – Ein Informationssystem für die historischen Wissenschaften**, in: IT – Information Technology, 4, 2009, S. 207–215.

Wiebke Ratzeburg, **Mediendiskussion im 19. Jahrhundert. Wie die Kunstgeschichte ihre wissenschaftliche Grundlage in der Fotografie fand**, in: Kritische Berichte, 30 (1) 2002, S. 22–40.

Boris Rauschenbach, **Geometrija kartiny i zritel'noe vosprijatie [Geometry of Picture and Visual Perception]**, Saint Petersburg 2002.

Boris Rauschenbach, **Perceptual Perspective and Cézanne's Landscapes**, in: Leonardo XV, Winter 1982, S. 28–33.

Boris Rauschenbach, **Sistemy perspektivy v izobrazitel'nom iskusstve: obshhaja teorija perspektivy [Systems of Perspective Images in Art: General Theory of Perspective]**, Moscow 1986.

Kent A. Reed, **Product Modeling of Buildings for Data Exchange Standards: From IGES to PDES/STEP and Beyond**, in: Conceptual modelling of buildings, CIB W 74, 1988.

Reenactment, **https://de.wikipedia.org/wiki/Reenactment**.

Reflective societies: cultural heritage and european identities, **http://ec.europa.eu/research/participants/portal/desktop/en/opportunities/h2020/calls/h2020-reflective-7-2014.html**.

Ingeborg Reichle, Steffen Siegel, Achim Spelten, **Die Wirklichkeit visueller Modelle**, in: Ingeborg Reichle, Steffen Siegel, Achim Spelten (Hg.), Visuelle Modelle, München 2008, S. 9–16.

Paul Reilly (Hg.), **Archaeology and the Information Age: A Global Perspective, derived from the Second World Archaeological Congress, held in Barquisimeto, Venezuela, Sept. 1990.** One world archaeology 21, London 1992.

Paul Reilly, **Three-dimensional Modelling and Primary Archaeological Data**, in: Paul Reilly, Sebastian Rahtz (Hg.), Archaeology and the Information Age. A Global Perspective, London [u. a.] 1992, S. 147–173.

Paul Reilly, **Towards a Virtual Archaeology**, in: Sebastian Rahtz u. K. Lockyear (Hg.), CAA90. Computer Applications and Quantitive Methods in Archaeology, Oxford 1991, S. 132–139.

Paul Reilly and Sebastian Rahtz (Hg.), **Archaeology and the Information Age: A Global Perspective**, London 1992.

Erik Reinhard, Wolfgang Heidrich, Paul Debevec, Sumanta Pattanaik, Greg Ward, Karol Myszkowski, **High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display, and Image-based Lighting,** Burlington 2010.

Christoph F. Reinhart, Marilyne Andersen, **Development and Validation of a Radiance Model for a Translucent Panel**, in: Energy and Buildings 38 (7) 2006, S. 890–904.

Fabio Remondino, **From Point Cloud to Surface: The Modeling and Visualization Problem**, in: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences: International Workshop on Visualization and Animation of Reality-based 3D Models, 24–28 February 2003, Tarasp-Vulpera, Switzerland XXXIV-5/W10 2003.

Fabio Remondino, Sabry El-Hakim, Stefano Girardi, Alessandro Rizzi, Stefano Benedetti, Lorenzo Gonzo, **3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures – The 3D-ARCH Project**, Zürich 2009.

Peiran Ren, Jiaping Wang, John Snyder, Xin Tong, Baining Guo, **Pocket Reflectometry**, in: ACM SIGGRAPH 2011 Papers, 2011, S. 45:1–45:10.

Colin Renfrew, Paul Bahn, **Archaeology. The Key Concepts**, New York 2005.

Ralf Reulke, Thomas Döring, **Computer Vision im Kontext von Photographie und Photogrammetrie,** in: Wolfgang Reisig, Johann-Christoph Freytag (Hg.), Informatik: Aktuelle Themen im historischen Kontext, Berlin, Heidelberg 2006, S. 315–28.

RfII – Rat für Informationsinfrastrukturen, Leistung aus Vielfalt. Empfehlungen zu Strukturen, Prozessen und Finanzierung des Forschungsdatenmanagements in Deutschland, Göttingen 2016, **http://www.rfii.de/de/category/dokumente/**.

Julian D. Richards, **Recent Trends in Computer Applications in Archaeology**, in: Journal of Archaeological Research 6 (4) 1998, S. 331–382.

Mike Richison, **Documentation of The Living Carousel**, Asbury Park, NJ, **https://vimeo.com/44201645**.

Ian A. Richmond, **The Relation of the Pretorian Camp to the Aurelian's Wall of Rome**, in: Papers of the British School at Rome, 10 1927, S. 12–22.

Anita Rieche, **Von Rom nach Las Vegas. Rekonstruktionen antiker und römischer Architektur 1800 bis heute**, Berlin 2012.

Alexandra Riedel, Frank Henze, Andreas Marbs, **Paradigmenwechsel in der historischen Bauforschung? Ansätze für eine effektive Nutzung von 3D-Informationen**, in: Katja Heine (Hg.), Von Handaufmaß bis High Tech III – 3D in der historischen Bauforschung, Darmstadt 2011, S. 131–141.

Hayko Riemenschneider, Ulrich Krispel, Wolfgang Thaller, Michael Donoser, Sven Havemann, Dieter W. Fellner, Horst Bischof, **Irregular Lattices for Complex Shape Grammar Facade Parsing**, in: Proceedings of the 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2012, S. 1640–1647.

Lawrence G. Roberts, **Machine Perception of Three-dimensional Soups**, Dissertation Massachusetts 1963.

Paola Ronzino, **CIDOC CRMba A CRM Extension for Buildings Archaeology Information Modelling**, (Unpublished doctoral thesis). The Cyprus Institute, Nicosia, Cyprus 2015.

Paola Ronzino, **Harmonizing the CRMba and CRMarchaeo Models**, in: International Journal on Digital Libraries, Special Issue on Extending, Mapping and Focusing the CIDOC CRM 2016, **https://link.springer.com/article/10.1007/s00799-016-0193-3**.

Paola Ronzino, Nicola Amico, Franco Niccolucci, **Assessment and Comparison of Metadata Schemas for Architectural Heritage**, in: Proceedings of XXIII CIPA Symposium, Prague, Czech Republic, 12–16 September 2011.

Paola Ronzino, Franco Niccolucci, Andrea D'Andrea, **Built Heritage Metadate Schemas and the Integration of Architectural Datasets Using CIDOC-CRM**, in: M. Boriani, R. Gabaglio, D. Gulotta (Hg.), Online Proceedings of the Conference BUILT HERITAGE 2013 Monitoring Conservation and Management, Milano 2013, S. 883–889.

Paola Ronzino, Franco Niccolucci, Achille Felicetti, Martin Doerr, **CRMBA a CRM Extension for the Documentation of Standing Buildings**, in: International Journal on Digital Libraries, 17 (1), 2016, S. 71–78.

Raphael Rosenberg, **Blicke messen. Vorschläge für eine empirische Bildwissenschaft**, in: Jahrbuch der Bayerischen Akademie der Schönen Künste 27.2013, 2014, S. 71–86.

Raphael Rosenberg, **Bridging Art History, Computer Science and Cognitive Science: A Call for Interdisciplinary Collaboration**, in: Zeitschrift für Kunstgeschichte, 79 (3) 2016, S. 305–314.

Lukas Rosenthaler, **Entwicklung einer Web 2.0-Applikation zur Präsentation und Erforschung der Basler Frühdrucke**, in: Karin Krause. Barbara Schellewald (Hg.), Bild und Text im Mittelalter, Köln 2011.

Johannes Rößler, **Kunstgeschichte als Realpolitik**, in: Wojciech Bałus (Hg.), Die Etablierung des Faches Kunstgeschichte in Deutschland, Polen und Mitteleuropa, Warszawa 2010, S. 61–85.

Jeff Rothenberg, **Ensuring the Longevity of Digital Information**, **https://www.clir.org/pubs/archives/ensuring.pdf/**.

Maria Roussou, **Can Interactivity in Virtual Environments Enable Conceptual Learning**, Paper presented at the 7th Virtual Reality International Conference (VRIC), First International VR-Learning Seminar, Laval, France, 2005.

Colin Rowe, **The Mathematics of the Ideal Villa**, in: Architectural Review, 603, 1947, S. 101–104.

Radu B. Rusu, Steve Cousins, **3D is Here: Point Cloud Library (PCL)**, in: 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, 2011, S. 1–4.

Michael Rykl, **Virtual Reconstructions and Building Archaeology in Bohemia. A Digital Model of the 14th-Century House U zvonu (»Zur Glocke« / »At the Sign of the Bell«) in**

Prague, in: Stephan Hoppe, Stefan Breitling (Hg.), Virtual Palaces, Part II. Lost Palaces and their Afterlife. Virtual Reconstruction between Science and Media, München 2016, S. 55–85.

S

Patrick Sahle, **Auf dem Weg zu einem Kern- und Referenzcurriculum der Digital Humanities**, Göttingen 2013.

Walther Sallaberger, **Der kultische Kalender der Ur III–Zeit**, Berlin, New York 1993 (Untersuchungen zur Assyriologie und Vorderasiatischen Archäologie 7).

Eugenia Salza Prina Ricotti, **Villa Adriana. Il sogno di un imperatore**, Roma 2001.

Eugenia Salza Prina Ricotti, **Villa Adriana nei suoi limiti e nella sua funzionalità,** in: Pontificia Accademia di Archeologia, Rendiconti, 14, 1982, S. 25–55.

Donald H. Sanders, **A Brief History of Virtual Heritage,** in: Jack Green, Emily Teeter, John A. Larson (Hg.), Picturing the Past. Imaging and Imagining the Ancient Middle East, Chicago 2012, S. 95–103.

Lawrence Sass, **A Palladian Construction Grammar – Design Reasoning with Shape Grammars and Rapid Prototyping**, in: Environment and Planning B: Planning and Design, 34, 2007, S. 87–106.

Lawrence Sass, **Reconstructing Palladio s Villas: A Computational Analysis of Palladio's Villa Design and Construction Process**, in: ACADIA Proceedings, SUNY Buffalo 2001, S. 212–226.

Lawrence Sass, **Reconstructing Palladio's Villas: An Analysis of Palladio's Villa Design and Construction Process**, PhD diss., MIT, 2001.

Thomas Sauerbier, **Theorie und Praxis von Simulationssystemen: eine Einführung für Ingenieure und Informatiker; mit Programmbeispielen und Projekten aus der Technik**, Braunschweig 1999.

Michalis Savelonas, Ioannis Pratikakis, Konstantinos Sfikas, **Partial 3D Object Retrieval Combining Local Shape Descriptors with Global Fisher Vectors**, in: Eurographics Workshop on 3D Object Retrieval 8, 2015, S. 23–30.

Georg Schelbert, **Das Modellierungsparadigma. Digitale Repräsentation und Rekonstruktion in den objektbezogenen historischen Kulturwissenschaften**, in: Anne Baillot, Markus Schnöpf, Claudia Müller-Birn (Hg.), Berliner Beiträge zu Digital Humanities (im Druck).

Georg Schelbert, **Digital Art History – Digitale Kunstgeschichte, Überlegungen zum aktuellen Stand**, in: Peter Bell, Lisa Dieckmann, Piotr Kuroczynski (Hg.), Computing Art Reader, Heidelberg, 2018.

Georg Schelbert, **Rezension von: Hubertus Kohle, Digitale Bildwissenschaft**, Glückstadt 2013, in: H-Arthist 7 (5) 2014, **http://arthist.net/reviews/5332**.

Georg Schelbert, Stephan Hoppe, **In Modellen denken. Einleitung zum Workshop: Das historische Objekt im digitalen Modell – Aktuelle Konzepte, Strategien, Standards, Tagungsband zur EVA 2012 Berlin, Elektronische Medien & Kunst, Kultur, Historie.**, in: Andreas Bienert (Hg.), Gesellschaft zur Förderung Angewandter Informatik, Berlin 2012, 13–14, **https://www.academia.edu/7614039/Schelbert_Georg_Hoppe_Stephan_In_Modellen_denken_2012**.

Raimar J. Scherer, Sven-Eric Schapke (Hg.), **Informationssysteme im Bauwesen**, 2 Bde., Heidelberg, New York 2014.

Christoph Schinko, Martin Strobl, Torsten Ullrich, Dieter W. Fellner, **Modeling Procedural Knowledge – A Generative Modeler for Cultural Heritage**, in: Proceedings of EUROMED 2010 – Lecture Notes on Computer Science 6436, 2010, S. 153–165.

Christoph Schinko, Martin Strobl, Torsten Ullrich, Dieter W. Fellner, **Scripting Technology for Generative Modeling**, in: International

Journal on Advances in Software 4, 2011, S. 308–326.

Christoph Schinko, Torsten Ullrich, Dieter W. Fellner, **Minimally Invasive Interpreter Construction – How to Reuse a Compiler to Build an Interpreter**, in: Proceedings of the International Conference on Computational Logics, Algebras, Programming, Tools, and Benchmarking (Computation Tools) 3, 2012, S. 38–44.

Christoph Schinko, Thomas Vosgien, Thorsten Prante, Tobias Schreck, Torsten Ullrich, **Search and Retrieval in CAD Databases – A User-centric State-of-the-Art Overview**, in: Proceedings of the International Joint Conference on Computer Vision and Computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAPP), 12, 2017, S. 306–313.

Boris Schlörb, Christian Volkmann, **Le Corbusier. Palast des Sowjet**, in: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet »CAD in der Architektur« (Hg.), Bauhaus –Avantgarde der 20er Jahre. Architektur als Vision. CAD-Simulationen von Entwürfen und nicht gebauten bzw. nicht mehr existierenden Projekten der beginnenden Moderne, Heidelberg 1994, S. 128–131.

Hartwig Schmidt, **Archäologische Denkmäler in Deutschland – rekonstruiert und wieder aufgebaut**, Stuttgart 2000.

Alain Schnapp, **Die Entdeckung der Vergangenheit**, Stuttgart 2011.

Peter Schneider, Ulrike Wulf-Rheidt, **Licht – Konzepte in der vormodernen Architektur**, Regensburg 2010, (Diskussionen zur Archäologischen Bauforschung, Bd. 10).

Malte Schophaus, Hans-Liudger Dienel, Christoph-Friedrich von Braun, **Von Brücken und Einbahnstraßen. Aufgaben für das Kooperationsmanagement interdisziplinärer Forschung** (Discussion paper Nr. 08/03), Berlin 2003.

Susan Schreibman, Ray Siemens, John Unsworth, **A Companion to Digital Humanities**, Oxford 2004.

Jens Schröter, **3D. Zur Theorie, Geschichte und Medienästhetik des technisch-transplanen Bildes**, Paderborn, München 2009.

Manfred Schuller, **Building Archaeology**, Icomos, Munich 2002.

Patrik Schumacher, **Parametricism: A New Global Style for Architecture and Urban Design**, in: Architectural Design – Digital Cities 79 (4), 2009, S. 14–23.

Heidrun Schumann, Wolfgang Müller, **Visualisierung**, Berlin 2000.

Gary Schwartz, Marten Jan Bok, Pieter Sanredam. The Painter and His Time, The Hague 1990.

Christopher Schwartz, Michael Weinmann, Roland Ruiters and Reinhard Klein, **Integrated High-Quality Acquisition of Geometry and Appearance for Cultural Heritage**, in: Proceedings of The 12th International Symposium on Virtual Reality, Archeology and Cultural Heritage VAST 2011, Eurographics Association, Prato 2011, S. 25–32.

Christopher Schwartz, Ralf Sarlette, Michael Weinmann, Reinhard Klein, **DOME II: A Parallelized BTF Acquisition System**, in: Proceedings of Eurographics Workshop on Material Appearance Modeling: Issues and Acquisition, Zaragoza 2013, S. 25–31.

Tobias Schweizer, Lukas Rosenthaler, **SALSAH – eine virtuelle Forschungsumgebung für die Geisteswissenschaften**, in: Andreas Bienert, Frank Weckend, James Hemsley, Vito Cappellini (Hg.), EVA 2011, Konferenzband, Berlin 2011, S. 147–153.

Alberto Sdegno, **Digital Palladio**, Venezia 2005.

Harold A. Sedgwick, **Visual Space Perception**. In: E. Bruce Goldstein (Hg.), **Blackwell Handbook of Perception**, Oxford, S. 128–167.

Mark Segal, Kurt Akeley, **The OpenGL Graphics System: A Specification**, Silicon Graphics 1994.

Ralf-Peter Seippel, **Architektur und Interpretation. Methoden und Ansätze der Kunstgeschichte in ihrer Bedeutung für die Architekturinterpretation**, Essen 1989.

Mary Ann Sell, **Wolfgang Sell, Charley van Pelt**, View-Master Memories, o. O. 2007.

Sebastiano Serlio, **Tutte l'opere d'architettura di Sebastiano Serlio Bolognese**, Venezia 1584.

Volker Settgast, Torsten Ullrich, Dieter W. Fellner, **Information Technology for Cultural Heritage**, in: IEEE Potentials 26 (4) 2007, S. 38–43.

Sfumato in: Harald Olbrich (Hg.), Lexikon der Kunst. Architektur, Bildende Kunst, Angewandte Kunst, Industrieformgestaltung, Kunsttheorie. Bd. VI: R-Stad., Leipzig 1994, S. 628.

Philip Shilane, Patrick Min, Michael Kazhdan, Thomas Funkhouser, **The Princeton Shape Benchmark**, in: Shape Modeling International 8, 2004, S. 1–12.

Paul Sinclair, M. Kokonya, J-A Rakatoarisoa, M. Meneses, **The Impact of the Information Technology on the Archaeology of Southern and Eastern Africa: The First Decades,** in: Paul Reilly, Sebastian Rahtz (Hg.), Archaeology and the Information Age: A Global Perspective, London 1992, S. 29–40.

Peter Sloterdijk, **Lichtung und Beleuchtung: Anmerkungen zur Metaphysik, Mystik und Politik des Lichts**, in: Willfried Baatz (Hg.), Gestaltung mit Licht, Ravensburg 1994, S. 14–38.

Albert C. Smith, **Architectural Model as Machine. A New View of Models from Antiquity to the Present Day**, Amsterdam 2004.

Alvy R. Smith, **Digital Paint Systems: An Anecdotal and Historical Overview**, in: IEEE Annals of the History of Computing, 2001, S. 4–30.

Barry Smith, **Mereotopology, A Theory of Parts and Boundaries**, in: Data & Knowledge Engineering, 20, 1996, S. 287–303.

John M. Snyder, James T. Kajiya, **Generative Modeling: A Symbolic System for Geometric Modeling**, in: Proceedings of 1992 ACM Siggraph 1, 1992, S. 369–378.

Sociedad Española De Arqueología Virtual, **The Seville Charter**, **http://www.arqueologia-virtual.com/carta/**.

Katherine Solomonson, **The Chicago Tribune Tower Competition. Skyscraper Design and Cultural Change in the 1920s,** Chicago, London 2011.

Staatliche Altertümerverwaltung Ostia (Hg.), **Illustrierter Führer durch Ostia Antica**, Roma 1981.

Staatliche Museen Kassel (Hg.), **Antike Bauten. Korkmodelle von Antonio Chichi 1777–1782**, Kassel o. J. (Katalog der Staatlichen Museen Kassel Nr. 26).

Herbert Stachowiak, **Allgemeine Modelltheorie**, Wien 1973.

Herbert Stachowiak**, Gedanken zu einer allgemeinen Theorie der Modelle**, in: Studium Generale, 18 (7) 1965, S. 432–463.

Wolf Stadler, Peter Wiench (Hg.), **Lexikon der Kunst. Malerei, Architektur, Bildhauerkunst, Bd. 9**, Oes-Reim, Erlangen 1994, S. 123–126.

Deirdre Corcoran Stam, **How Art Historians Look for Information**, in: Art Documentation: Journal of the Art Libraries Society of North America, 16 (2) 1997, S. 27–30.

Nicholas Stanley-Price, **The Reconstruction of Ruins: Principles and Practice**, in: Alison Richmond, Alison Bracker (Hg.), Conservation: Principles, Dilemmas and Uncomfortable Truths, Oxford: Elsevier, 2009, S. 32–46.

Stephen Stead, Martin Doerr, **CRMinf: the Argumentation Model – An Extension of CIDOC-CRM to Support Argumentation**, **http://www.cidoc-crm.org/crminf/sites/default/files/CRM%20Inference%20extension%20CRM-INF%200.6.pdf**.

James Steele, **Architektur und Computer. Planung und Konstruktion im digitalen Zeitalter**, München 2001.

Ronald Stenvert, **Constructing the Past: Computer-Assisted Architectural-Historical Research. The Application of Image-processing Using the Computer and Computer-Aided Design for the Study of the Urban Environment, Illustrated by the Use of Treatises in Seventeenth-century Architecture**, Diss. o.O. 1991.

Alexander Stenzer, Claudia Woller, Burkhard Freitag, **MonArch: Digital Archives for Cultural Heritage,** in: 13th International Conference on Information Integration and Web-based Applications and Services, Ho Chi Minh City, Vietnam 2011, S. 144–151.

Peter F. Stephan, **Denken am Modell – Gestaltung im Kontext bildender Wissenschaft**, in: Bernhard E. Bürdek (Hg.), Der digitale Wahn, Frankfurt a. Main 2001, S. 109–129.

George Stiny, **Introduction to Shape and Shape Grammars**, in: Environment and Planning B: Planning and Design, 7, 1980, S. 343–351.

George Stiny, James Gips, **An Evaluation of Palladian Plans**, in: Environment and Planning B: Planning and Design, 5, 1978, S. 199–206.

George Stiny, James Gips, **Shape Grammars and the Generative Specification of Painting and Sculpture**, in: Best Computer Papers of 1971 1, 1971, S. 125–135.

George Stiny, William J. Mitchell, **The Palladian Grammar**, in: Environment and Planning B: Planning and Design, 5, 1978, S. 5–18.

George Stiny, William J. Mitchell, **Counting Palladian Plans**, in: Environment and Planning B: Planning and Design, 5, 1978, S. 189–198.

Peter Stone, Philipe Planel, **The Constructed Past. Experimental Archaeology, Education and the Public**, Routledge 1999.

Robert J. Stone, Takeo Ojika, **Virtual Heritage: What Next?**, in: Multimedia, IEEE 7, no. 2 (2000), S. 73–74.

Martin Strobl, Christoph Schinko, Torsten Ullrich, Dieter W. Fellner, **Euclides – A JavaScript to PostScript Translator**, in: Proceedings of the International Conference on Computational Logics, Algebras, Programming, Tools, and Benchmarking (Computation Tools) 1, 2010, S. 14–21.

Thomas Strothotte, Maic Masuch, Tobias Isenberg, **Visualizing Knowledge about Virtual Reconstructions of Ancient Architecture**, in: Proceedings of Computer Graphics International 1999, S. 36–43.

Jessi Stumpfel, Chris Tchou, Andrew Jones, Tim Hawkins, Andreas Wenger, Paul Debevec, **Direct HDR Capture of the Sun and Sky**, in: AFRIGRAPH '04 Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Graphics, Virtual Reality, Visualisation and Interaction in Africa, New York 2004, S. 145–149.

Ivan Subotic, Lukas Rosenthaler, Heiko Schuldt, **A Benchmark for RDF-based Metadata Management in Distributed Long-Term Digital Preservation**, in: ICDEW 2012 Proceedings of the 2012 IEEE 28th International Conference on Data Engineering Workshops, 2012, S. 11–16.

Ariane van Suchtelen, Gero Seelig (Hg.), **Carel Fabritius 1622–1654. Das Werk**, Zwolle 2004.

Robert Suckale, **Stilgeschichte**,in: Kunsthistorische Arbeitsblätter, 11 2001, S. 17–26.

Chris A. Sula, S. E. Hackney, Phillip Cunningham**, A Survey of Digital Humanities Programs**, 2017.

A. Sürül, H. Özen, M. Tutkun, **ICOMOS Digital Database of the Cultural Heritage of Trabzon**, in: XIXth International Szmposium CIPA 2003,

New Perspectives To Save Cultural Heritage, 2003, S. 29–34.

Ivan E. Sutherland, **Sketchpad, A Man-machine Graphical Communication System** (Diss. 1963, MIT, Massachusetts), Cambridge 2003.

Ivan E. Sutherland, **Sketchpad, A Man-machine Graphical Communication System**, in: Transactions of the Society for Computer Simulation 2, (5) 1964, S. R3–R20.

Patrik Svensson, **Humanities Computing as Digital Humanities**, in: Digital Humanities Quarterly, 3 (3) 2009, S. 159–186.

Patrik Svensson, **The Landscape of Digital Humanities**, in: Digital Humanities Quarterly, 4 (1) 2010.

Synagogen in Deutschland. Eine virtuelle Rekonstruktion, Ausstellung in der Kunst- und Ausstellungshalle der Bundesrepublik Deutschland, Bonn, 17. Mai–16. Juli 2000, Darmstadt [u. a] 2004.

T

Beng-Kiang Tan, Hafizur Rahaman, **Virtual Heritage: Reality and Criticism**, in: CAAD Futures Conference Proceedings, Montreal (Canada), 2009, S. 143–156.

Johan W. H. Tangelder, Remco C. Veltkamp, **A Survey of Content Based 3D Shape Retrieval Methods**, in: Multimedia Tools and Applications 39 (3) 2008, S. 441–471.

Melissa Terras, **Disciplined: Using Curriculum Studies to Define Humanities Computing,** in: Literary and Linguistic Computing, 21 (2) 2006, S. 229–246.

Melissa Terras, Julianne Nyhan, Edward Vanhoutte, **Defining Digital Humanities. A Reader**, Ashgate 2013.

Manfred Thaller, **Geschichte der Digital Humanities**, in: Fotis Ioannides, Malte Rehbein, Hubertus Kohle (Hg.), Digital Humanities. Eine Einführung, Stuttgart 2017, S. 315–327.

Wolfgang Thaller, Ulrich Krispel, Sven Havemann, Dieter W. Fellner, **Implicit Nested Repetition in Dataflow for Procedural Modeling**, in: Proceedings of the International Conference on Computational Logics, Algebras, Programming, Tools, and Benchmarking (Computation Tools) 3, 2012, S. 45–50.

Wolfgang Thaller, Ulrich Krispel, Sven Havemann, Ivan Redi, Andrea Redi, Dieter W. Fellner, **Developing Parametric Building Models – the GANDIS Use Case**, in: Proceedings of the 4th ISPRS International Workshop 3D-ARCH, 2011, S. 163–170.

Wolfgang Thaller, Ulrich Krispel, René Zmugg, Sven Havemann, Dieter W. Fellner, **Shape Grammars on Convex Polyhedra**, in: Computers & Graphics 37 (6) 2013, S. 707–717.

Hermann Thiersch, **Pharos. Antike, Islam und Occzident. Ein Beitrag zur Architekturgeschichte**, Berlin, Leipzig 1909.

Harold Thwaites, **Digital Heritage: What Happens When We Digitize Everything?,** in: E. Ch'ng, V. Gaffney, H. Chapman (Hg.), Visual Heritage in the Digital Age, London: Springer, 2013, S. 327–348.

Elisabeth Tiller, Maria Lieber (Hg.), **Pöppelmann 3D. Bücher – Pläne – Raumwelten. Katalog zur Ausstellung im Buchmuseum der Sächsischen Landesbibliothek**, Staats- und Universitätsbibliothek vom 17. Mai bis 1. September 2013, 2., Dresden 2013, **http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-118312**.

Daniel Tsai, **The Palladio Web Museum – a Heterogeneous Database of Architecture and History**, in: CAAD Futures 1997, S. 655–662.

Hazel Tucker, Elizabeth Carnegie, **World Heritage and the Contradictions of »Universal Value«**, in: Annals of Tourism Research, 2014.

William J. Turkel, **Hacking History, from Analogue to Digital and Back Again**, in: Rethinking History 15 (2) 2011, S. 287–296.

William J. Turkel, Devon Elliott, **Making and Playing with Models: Using Rapid Prototyping to Explore the History and Technology of Stage Magic**, in: Kevin B. Kee (Hg.), Pastplay: Teaching and Learning History with Technology, Ann Arbor 2014, S. 175–197.

Alex Tzonis, Luc Oorschot, **Frames, Plans, Representation Conceptdictaat Inleiding Programmatische en Functionele Analyse**, PhD diss., Delft Techn. University, 1987.

U

Sandra Uebbing, **Der Koloss von Rhodos – Mehr als nur ein Sandalenfilm**, Begleitheft zur DVD der e-m-s new media AG, Der Koloss von Rhodos, Sergio Leone's il Colosso di Rodi. 2006.

Shimon Ullman, **The Interpretation of Structure from Motion**, in: Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences 203 (1153) 1979, S. 405–426.

Torsten Ullrich, Dieter W. Fellner, **Generative Object Definition and Semantic Recognition**, in: Proceedings of the Eurographics Workshop on 3D Object Retrieval 4, 2011, S. 1–8.

Torsten Ullrich, Christoph Schinko, Thomas Schiffer, Dieter W. Fellner, **Procedural Descriptions for Analyzing Digitized Artifacts**, in: Applied Geomatics 5 (3) 2013, S. 185–192.

Torsten Ullrich, Volker Settgast, René Berndt, **Semantic Enrichment for 3D Documents: Techniques and Open Problems**, in: Proceedings of the International Conference on Electronic Publishing 14, 2010, S. 374–384.

Torsten Ullrich, Volker Settgast, Dieter W. Fellner, **Abstand: Distance Visualization for Geometric Analysis**, in: Proceedings of the Conference on Virtual Systems and MultiMedia Dedicated to Digital Heritage (VSMM) 14, 2008, S. 334–340.

UNESCO, **Charta zur Bewahrung des Digitalen Kulturerbes, verabschiedet von der 32. UNESCO-Generalkonferenz am 17. Oktober 2003 in Paris**, 2003.

John Unsworth, **Scholarly Primitives: What Methods Do Humanities Researchers Have in Common, and How Might Our Tools Reflect This?**, in: Proceedings of the Symposium on Humanities Computing: Formal Methods, Experimental Practice, London 2000.

Lars Urspruch, Torsten Butz, **Walter Gropius. Palast des Sowjet**, in: Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet »CAD in der Architektur« (Hg.), Bauhaus – Avantgarde der 20er Jahre. Architektur als Vision. CAD-Simulationen von Entwürfen und nicht gebauten bzw. nicht mehr existierenden Projekten der beginnenden Moderne, Heidelberg 1994, S. 132–139.

V

Achille C. Varzi, **Basic Problems of Mereotopology**, in: Nicola Guarino (Hg.), Formal Ontology in Information Systems, Amsterdam 1998, S. 29–38, **http://www.ontology.buffalo.edu/smith/courses03/tb/Fois_1998.pdf**.

Achille C. Varzi, **Parts, Wholes, and Part-Whole Relations: The Prospects of Mereotopology**, in: Data & Knowledge Engineering, 20, 1996, pp. 259–286.

VDI, **Building Information Modeling – VDI-Richtlinien zur Zielerreichung**, Düsseldorf 2017.

Eric Veach, Leonidas J. Guibas, **Metropolis Light Transport**, in: Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1997, S. 65–76.

Marilena Vecco, **A definition of cultural heritage: From the tangible to the intangible**, in: Journal of Cultural Heritage, 11 (3), 2010, S. 321–324.

Giorgio Verdiani, **Reading the Project and ›Reverse Design‹: An Architectural Approach to Digital Reconstruction**, in: Proceedings of the 20th International Conference on Cultural Heritage and New Technologies 2015 (Vienna: Museen der Stadt Wien – Stadtarchäologie,

2015), **http://www.chnt.at/proceedings-chnt-20/**.

Maria D. Vico Lopez, **La »Restauración Virtual« según la interpretación arquitectonico constructiva: metodologia y aplicación al caso de la Villa de Livia**, PhD thesis. Universitat Politecnica de Catalunya 2012.

Virtuelle Rekonstruktionen in transnationalen Forschungsumgebungen – Das Portal: Schlösser und Parkanlagen im ehemaligen Ostpreußen, **https://www.herder-institut.de/go/Q-338d9c2**.

Valeria Vitale, **Transparent, Multivocal, Cross-disciplinary: The Use of Linked Open Data and a Community-developed RDF Ontology to Document and Enrich 3D Visualisation for Cultural Heritage**, in: Gabriel Bodard, Matteo Romanello (Hg.), Digital Classics Outside the Echo-Chamber: Teaching, Knowledge Exchange & Public Engagement, London 2016, S. 147–168.

Gerd-Helge Vogel, **Mobility: The Fourth Dimension in the Fine Arts and Architecture**, in: Contemporary Aesthetics. Special Volume I, **http://www.contempaesthitcs.org/newvolume/pages/article.php2articlleID=3**.

Vorstand des Verbandes Digital Humanities im deutschsprachigen Raum. **Digital Humanities** 2020, **http://www.dhd2014.uni-passau.de/fileadmin/dokumente/projekte/digitalhumanities/DH2020-2014-2-Lang.pdf**.

Vortrag von Carsten Neumann und Torsten Veit (Humboldt-Universität Berlin, 2016), **http://www.3d-digital-heritage.info/#ref_1075**.

Vortrag von Daniel Dworak und Maria Pietruszka (Humboldt-Universität Berlin, 2016), **http://www.3d-digital-heritage.info/#ref_1082**.

Vortrag von Jan Lutteroth und Arthur Sarnitz (Humboldt-Universität Berlin, 2016), **http://www.3d-digital-heritage.info/#ref_1078**.

Vortrag von Oliver Hauck und Martin Scholz (Humboldt-Universität Berlin, 2016), **http://www.3d-digital-heritage.info/#ref_1074**.

Vortrag von Piotr Kuroczyński und Dietmar Popp (Humboldt-Universität Berlin, 2016), **http://www.3d-digital-heritage.info/#ref_1073**.

VRay for 3DS Max Manual. Camera Examples, **https://www.vray.com/vray_for_3ds_max/manual/vray_for_3ds_max_camera_examples.shtml**.

W

W3C Working Group, **SKOS Simple Knowledge Organization System Primer**, **https://www.w3.org/TR/skos-primer/**.

Josephine Wapakabulo, Ray Dawson, Steve Probets, Tim King, **A Step Towards the Adoption of Data-exchange Standards: A UK Defence Community Case Study**, in: The 4th Conference on Standardization and Innovation in Information Technology, 2005, S. 242–53.

Gregorz J. Ward, **Computing and Applying Variable-resolution Data for Bidirectional Scattering Distribution Functions.** Technical Rport. United States Department of Energy 2011.

Gregory J. Ward, **Measuring and Modeling Anisotropic Reflection**, in: ACM SIGGRAPH Computer Graphics 26 (2) 1992, S. 265–272.

Gregorz J. Ward, Mashhuda Glencross, **A Case Study Evaluation: Perceptually Accurate Textured Surface Models**, in: Proceedings of the 6th Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization, 2009, S. 109–115.

Marx W. Wartofsky, **Models. Representation and the Scientific Understanding**, Dordrecht, Boston, London 1979.

Donald J. Waters, **An Overview of the Digital Humanities,** in: Research Library Issues, (284) 2013, S. 3–22.

Wavefront OBJ File Format Summary, **http://www.fileformat.info/format/wavefrontobj/egff.htm**.

Carl Weichardt, **Das Schloss des Tiberius und seine Römerbauten auf Capri**, Leipzig 1900.

Dave Weisberg, **The Engineering Design Revolution CAD History: The People, Companies and Computer Systems That Changed Forever the Practice of Engineering, www.cadhistory.net**.

Dirk Welich, **Der Zwinger. Dresdens berühmter Festbau**, Leipzig 2002.

Reinhard Wendler, **Das Modell zwischen Kunst und Wissenschaft**, Paderborn, München 2013.

Reinhard Wendler, **Modellbegriffe als Akteure**, in: Erwägen Wissen Ethik, Jg. 26 (3) 2015, S. 417–419.

Etienne Wenger, **Communities of Practice: Learning, Meaning, and Identity,** Cambridge 1998.

Harold B. Westlund, Gary W. Meyer, **Applying Appearance Standards to Light Reflection Models**, in: Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 2001, S. 501–510.

Albert Wiedemann, Matthias Hemmleb, Jörg Albertz, **Reconstruction of Historical Buildings Based on Images from the Meydenbauer Archives**, in: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam 2000, S. 887–893.

Jan Wienold, Jens Christoffersen, **Evaluation Methods and Development of a New Glare Prediction Model for Daylight Environments with the Use of CCD Cameras**, in: Energy and Buildings 38 (7) 2006, S. 743–757.

John Wilton-Ely, **Architectural Model,** in: The Dictionary of Art, Bd. 2, London 1996, S. 335–338.

John D. Wilcock, **A General Survey of Computer Applications in Archaeology**, in: John D. Wilcock (Hg.), Computer Applications in Archaeology 1. Science and Archaeology, Nr. 9, 1973, S. 17–21.

Peter Wilson, **A short history of CAD data transfer standards**, in: IEEE Computer Graphics and Applications 7 (6) 1987, S. 64–67.

WissKI, **http://wiss-ki.eu/**.

Rudolf Wittkover, **Architectural Principles in the Age of Humanism**, London 1949.

Joyce Wittur, **Computer-generated 3D-visualisations in Archaeology: Between Added Value and Deception**, Oxford 2013 (BAR International Series 2463).

Peter Wonka, Michael Wimmer, François Sillion, William Ribarsky, **Instant Architecture**, in: International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, ACM SIGGRAPH 2003 22(3), 2003, S. 669–677.

Jason Wood, **Buildings Archaeology, Applications in Practice**, Oxford 2004.

Jason Wood, Gill Chapman, **Three-dimensional Computer Visualization of Historic Buildings with Particular Reference to Reconstruction Modelling**, in: Paul Reilly, Sebastian Rahtz (Hg.), Archaeology and the Information Age: A Global Perspective, London 1992. S. 123–46.

John Woodwark, **Reconstructing History with Computer Graphics**, in: IEEE Computer Graphics and Applications 11 (1) 1991, S. 18–20.

Moritz Wullen, Günther Schauerte (Hg.), **Babylon. Mythos und Wahrheit**, München 2008.

Y

Ran Yu, Ujwal Gadiraju, Besnik Fetahu, Stefan Dietze, **Adaptive Focused Crawling of Linked Data**, in: 16th International Conference on Web Information Systems, Springer International Publishing, 2015, S. 554–569.

Z

Vojtěch Zamarovský, **Den Sieben Weltwundern auf der Spur**, Leipzig 1981.

Eva Zányi, Carla Schroer, Mark Mudge, Alan Chalmers, **Lighting and byzantine glass tesserae,** in: Proceedings of the 2007 EVA London conference, 2007.

René Zmugg, Ulrich Krispel, Wolfgang Thaller, Sven Havemann, Martin Pszeida, Dieter W. Fellner, **A New Approach for Interactive Procedural Modelling in Cultural Heritage**, in: Proceedings of the 40th Conference of Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, 2012, S. 190–204.

Diane M. Zorich, **Transitioning to a Digital World. Art History, Its Research Centers, and Digital Scholarship**, Mason University 2012.

John Zukowsky (Hg.), **Chicago Architektur 1872–1922. Die Entstehung der kosmopolitischen Architektur des 20. Jahrhunderts**, Ausstellungskatalog, München 1987.

Die **Arbeitsgruppe Digitale 3D-Rekonstruktion** im Verband der **Digital Humanities im deutschsprachigen Raum (DHd)** versteht sich als wissenschaftliches Netzwerk, das den Einsatz der digitalen 3D-Rekonstruktion in der objektorientierten Forschung vor allem zur Geschichte der Architektur vorantreiben will. Die Arbeitsgruppe bringt internationale und interdisziplinäre Akteure zusammen, um in Bezug auf dieses neue Medium und wissenschaftliche Werkzeug Grundsatzfragen der Terminologie, der Methodik, der Dokumentation und der Publikation von 3D-Computermodellen zu diskutieren.

Der Modelle Tugend 2.0 → Digitale 3D-Rekonstruktion als virtueller Raum der architekturhistorischen Forschung fasst die digitale 3D-Rekonstruktion als Bestandteil einer interdisziplinären objektbezogenen Forschung auf. Handbuchartig werden übergreifende Methoden an der Schnittstelle zwischen Archäologie, Kunst- und Architekturgeschichte einerseits sowie Computergrafik und Kulturinformatik andererseits präsentiert und diskutiert. Zentrales Anliegen des Buches ist es, die Bandbreite des aktuellen wissenschaftlichen Diskurses zu digitalen 3D-Rekonstruktionen abzubilden und dabei bisherige Traditionen und Entwicklungslinien, den aktuellen Forschungs- und Praxisstand als auch künftige Herausforderungen und Desiderate darzustellen. Studierende, Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler wie auch interessierte Laien erhalten einen fundierten Überblick zum Themenfeld der digitalen 3D-Rekonstruktion im Feld der Architekturgeschichte. Der Fachcommunity bietet das Werk eine umfassende aktuelle Verortung und damit die Grundlage für die Identifizierung von zukünftigen Handlungsfeldern und Anregungen zu weiterführenden Diskursen.

Band 2

Computing in Art and Architecture

Herausgegeben von Piotr Kuroczyński, Peter Bell, Lisa Dieckmann, Stephan Hoppe und Sander Münster

Die Buchreihe **Computing in Art and Architecture** beschäftigt sich mit dem Einsatz und den Potenzialen digitaler Forschungswerkzeuge sowie den Herausforderungen einer digital orientierten Methodik in den objektbezogenen Fächern der Archäologie, Architektur- und Kunstgeschichte. Sie ist eine gemeinsame Initiative des **Arbeitskreises Digitale Kunstgeschichte** und der **Arbeitsgruppe Digitale 3D-Rekonstruktion** im Verband **Digital Humanities im deutschsprachigen Raum (DHd)**.

ISBN 978-3-947449-69-9