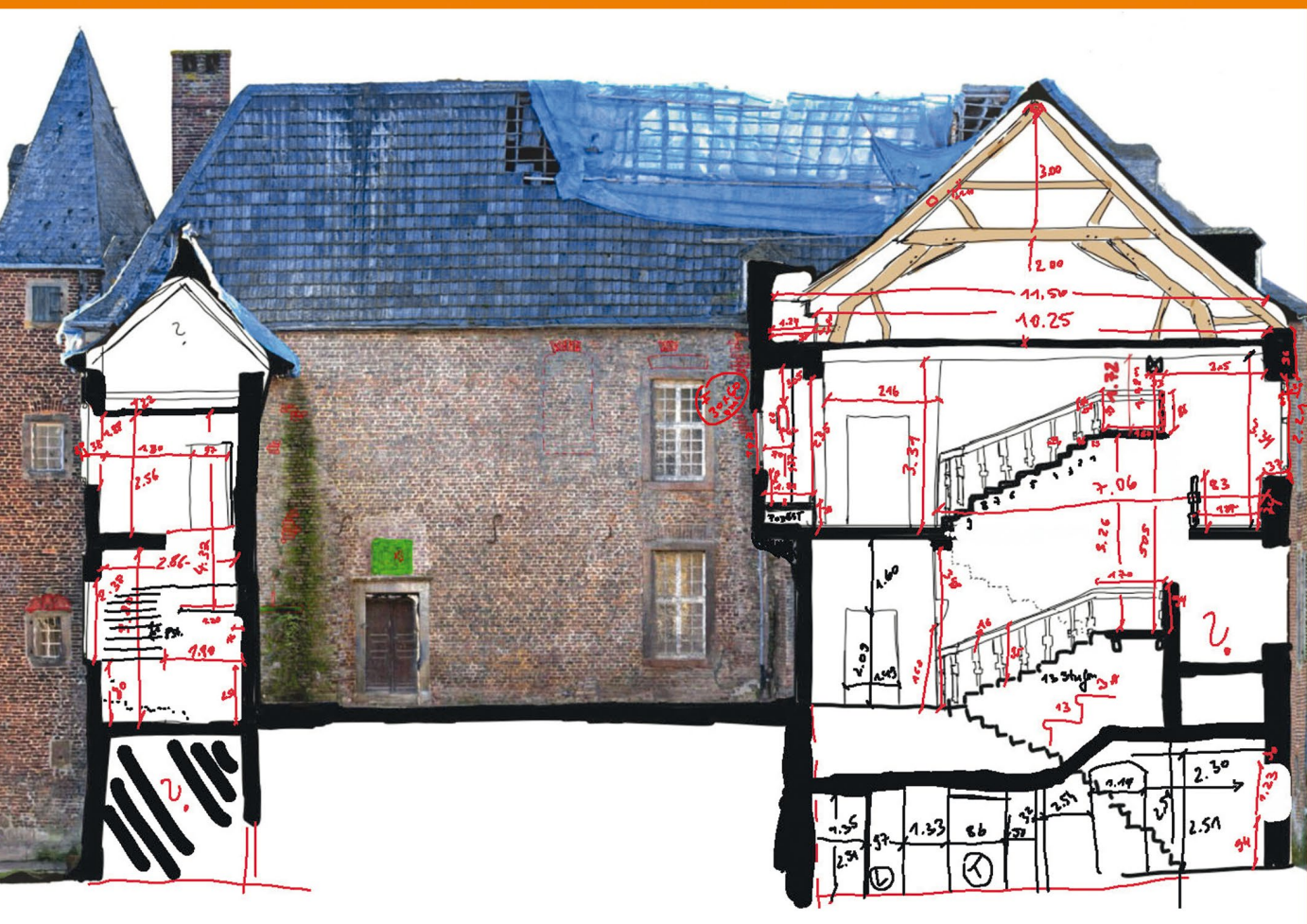


Erhalten historischer Bauwerke e. V. (Hg.)

BAUWERKS AUFNAHME

Bewahren durch Erkunden



Erhalten historischer Bauwerke e. V. (Hg.)

BAUWERKS AUFNAHME

Bewahren durch Erkunden

Schriftenreihe zur Denkmalpflege | Band 7

Fraunhofer IRB Verlag

Schriftenreihe zur Denkmalpflege

Herausgegeben von Erhalten historischer Bauwerke e. V.

Band 7

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISBN (E-Book): 978-3-7388-1049-3

DOI: 10.60628/9783738810493

Umschlaggestaltung: Manuela Gantner | Punkt, STRICH.

Foto: Hans Meyer und Anna Graff, LVR-ADR, Pulheim

Lektorat: Birke Gerold | inWorten

Layout und Satz: Manuela Gantner | Punkt, STRICH.

Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

© Fraunhofer IRB Verlag, 2025

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon +49 711 970-2500

Telefax +49 711 970-2508

irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

VORWORT

Die Tagung „Bauwerksaufnahme – Bewahren durch Erkunden“, die am 4. und 5. Dezember 2025 in Karlsruhe stattfand, widmete sich einem zentralen Thema innerhalb des Bauens im Bestand, besonders mit Blick auf Kulturdenkmäler: dem präzisen Erkunden, Dokumentieren und Verstehen historischer Bauwerke als essenzielle Grundlage für ihren Erhalt. Unter Bauwerksaufnahme wird hier weit mehr als die technische Erfassung von Maßen und Strukturen verstanden. Sie ist vor allem die Voraussetzung für einen verantwortungsvollen Umgang mit unserem baukulturellen Erbe – ein Akt des forschenden Sehens und zugleich ein Beitrag zum kulturellen Gedächtnis.

Angesichts der dynamischen Entwicklung digitaler Methoden eröffnen sich heute neue Möglichkeiten der Erfassung und Analyse. 3D-Laserscans, fotogrammetrische Verfahren, digitale Modelle und Building Information Modeling (BIM) erweitern das Instrumentarium des Planens im Bestand erheblich. Zugleich stellen sie die Fachwelt vor neue Herausforderungen: Wie sind digitale Daten zu interpretieren und in den Erhaltungs- und Planungsprozess zu integrieren? Welche Informationen sind für die denkmalpflegerische Bewertung und für nachhaltige Bauentscheidungen tatsächlich relevant? Wie lässt sich bei aller Technisierung der aufmerksame, handwerklich geschulte Blick für das einzelne Bauwerk bewahren? Und wie können die Ergebnisse verständlich vermittelt und langfristig aufbewahrt werden?

Diese Fragen bildeten den Rahmen der Tagung, die vom Verein Erhalten historischer Bauwerke e. V. initiiert, organisiert und in erheblichem Umfang aus Eigenmitteln getragen wurde. Der Verein und seine Mitglieder haben durch ehrenamtliches Engagement, fachliche Expertise, Spenden und Mitgliedsbeiträge maßgeblich dazu beigetragen, die Durchführung der Veranstaltung und die vorliegende Open-Access-Publikation zu realisieren. Dieses ehrenamtliche Engagement ist Ausdruck der tiefen Verbundenheit der Beteiligten mit dem Anliegen des Bewahrens, Forschens und Weiterentwickelns unserer gebauten Umwelt. Das Landesamt für Denkmalpflege Esslingen im Regierungspräsidium (RP) Stuttgart hat mit wertvoller fachlicher Begleitung entscheidend zum Erfolg der Veranstaltung beigetragen. Fachliche Impulse zur Tagung kamen auch vom Fraunhofer IRB, das zudem die technische Umsetzung des Tagungsbands als frei zugängliche Publikation begleitet hat.

Unser besonderer Dank gilt allen Referent:innen für ihre fundierten und inspirierenden Vorträge, den Autor:innen dieser Veröffentlichung für die sorgfältige Aufbereitung ihrer Ergebnisse, den Teilnehmer:innen für ihr Interesse und den lebhaften Austausch sowie allen Organisator:innen, deren Einsatz und Umsicht die Durchführung der Tagung ermöglicht haben.

Mit dieser Open-Access-Publikation möchten wir die Ergebnisse der Tagung nicht nur bewahren, sondern einem breiten Fachpublikum zugänglich machen. So können sie den fachlichen Diskurs vertiefen und Impulse für zukünftige Projekte, Forschungen und Kooperationen in den Bereichen Bauwerksaufnahme, Denkmalpflege und Bauen im Bestand geben.

Wir wünschen den Leser:innen eine anregende Lektüre, neue Einsichten und Inspiration für die eigene Arbeit am und mit dem historischen Bauwerk.

Karlsruhe, im Dezember 2025

Dr. Gabriele Patitz für den Verein Erhalten historischer Bauwerke

Dr. Claudia Mohn für das Landesamt für Denkmalpflege Esslingen im RP Stuttgart

INHALT

Andreas Bewer	BEWAHREN DURCH ERKUNDEN Ein strategisches Leistungsbild für den Bauwerkserhalt	7
Anna Graff	DIE DIGITALE ERFASSUNG AM BAUDENKMAL Vom Feldrahmen zum Tablet	21
Jürgen Giese	ORIGINAL UND DIGITALER ZWILLING Multiple Datenquellen für das analytische Bauaufmaß	35
Andreas Bruschke	DIE BAUAUFNAHME Ein Pflichtenheft für die Erfassung historischer Bausubstanzen	51
Eric Ewert, Ralf W. Arndt und Steffen Marx	HERITAGE BIM Digitale Modelle in der Baudenkmalpflege	63
Timo Vössing und Clemens Brünenberg	DIGITALES BEWAHREN MIT HBIM Ein Open-Source-Versuch	73
Sebastian Krück	DAS ASSET-INFORMATIONSMODELL IM BESTAND Gestaltung des Workflows	87
Annina De Carli-Lanfranconi	DAS RAUMBUCH Ein Arbeitsinstrument für die Bauforschung	97
Michaela Kuhn und Alexander Stenzer	VON DER DATENBANK ZUM RAUMBUCH Digitale Werkzeuge für die Bauwerksdokumentation	109
David Wendland	HISTORISCHE BAUWERKE MIT KOMPLEXER FORM Mit Reverse Engineering und digitalen Werkzeugen auf den Spuren der frühen Bauhütten	119

Andrea Lilienthal und Torsten Bark		
FACHWERKGEBÄUDE		
Monitoring des hygrothermischen Verhaltens		139
Anna Luib		
INFRAROT-THERMOGRAPHIE		
Zerstörungsfreie Untersuchungsmethode für die Bauforschung		155
Mark Böttges		
DAS DEUTSCHE MUSEUM IN MÜNCHEN		
Belastungsversuche an Leichtbetonrippendecken		169
Gabriele Patitz und Markus Hübner		
BAURADAR UND ULTRASCHALL		
Minimalinvasive Methoden der Strukturerkundung		185
Matthias Frese, Judith Herrmann, Lennart Meid, Eva Baldauf und Sabine Kuban		
RÜCKGEBAUTES UND HISTORISCHES NADELSCHNITTHOLZ		
Schwingungsanalysen zur Bewertung der Tragfähigkeit		199
Cornelia Marinowitz		
RESTAURATORISCHE UNTERSUCHUNGEN		
Die Bedeutung eines Schweinchen-Graffitis für die Bauforschung		215
Helene Winker		
BEFUNDUNTERSUCHUNGEN ALS GRUNDLAGE		
FÜR KALKSPATZENMÖRTEL		
Praxisbeispiele aus der Denkmalpflege		229
Dorothea Roos und Christoph Duppel		
DAS BAUHAUSGEBÄUDE IN DESSAU		
Ein Denkmal der Moderne erforschen und erkunden		245
Nikolaus Koch und Christoph Duppel		
BETONBAUWERKE DER HOCHMODERNE		
Baufaufnahme und Erforschung		261
Cleo Reihl, Ludwig Wenzel und Matthias Jagfeld		
DIE HISTORISCHEN PORTALE		
DES HAUPTBAHNHOFES FRANKFURT		
Untersuchungen für ein Instandsetzungskonzept		281
Verzeichnis der Autor:innen		296

Andreas Bewer

BEWAHREN DURCH ERKUNDEN

Ein strategisches Leistungsbild für den Bauwerkserhalt

DOI: 10.60628/9783738810493-7

Die Erkundung eines Bauwerks ist zentral für seinen Erhalt: Sie ermöglicht es, den Bestand zu erfassen, den Handlungsbedarf zu erkennen und angemessene Bewahrungs- und Nutzungsmaßnahmen zu entwickeln. Dies erfordert eine strategische Planung und individuelle Untersuchungen. Die hierfür nötigen Schritte werden jedoch von den Leistungsstufen der HOAI (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure) beim Bauen im Bestand nur unvollständig abgedeckt. Ziel des Beitrags ist daher die Formulierung eines ergänzenden Leistungsbilds für die Bestandserkundung, mit einem abschließenden Blick auf die Chancen durch den digitalen Wandel. Die vorgeschlagene strukturierte und zeitgemäße Vorgehensweise ermöglicht ein nachhaltiges Bewahren denkmalgeschützter Bausubstanz.

1 Einleitung

Architekt:innen und Ingenieur:innen sind zu Recht stolz auf ein vollendetes Bauwerk, doch praktisch errichtet wurde es von Handwerker:innen. Eine ähnliche Ambivalenz wie im Neubau zeigt sich beim Erhalt historischer Bauwerke: Erkundungen allein schützen ein Denkmal nicht vor dem Verfall. Vielmehr bedarf es einer Kombination aus Planung und Praxis, verbunden mit einer denkmalgerechten Nutzung.

Die Erkundung historisch bedeutsamer Bauwerke dient dazu, die Objekte zu erfassen, den Handlungsbedarf zu erkennen und entsprechende Erhaltungsmaßnahmen zu planen. Sie erfordert folglich nicht nur das Sammeln von Daten, sondern auch methodische Kompetenz und strategisches Vorgehen. Ein eindrückliches Beispiel bietet die Restaurierung der Kathedrale Notre-Dame in Paris nach ihrem Brand im Jahr 2019. Die Wiederherstellung dieser eindrucksvollen gotischen Kirche wurde von General Jean-Louis Georgelin koordiniert, also von einer fachfremden Person. Was auf den ersten Blick überraschend erscheint, erklärt sich dadurch, dass Georgelins Aufgabe nicht der Wiederaufbau selbst war, sondern die systematische Erfassung der Schäden und die strategische Planung der nächsten Schritte.

Dieser Beitrag erläutert die Grundlagen, Methoden und Herausforderungen der denkmalpflegerischen Bestandserkundung. Zunächst wird eine bewährte Problemlösungsstrategie – die SPALTEN-Methode – vorgestellt und auf den Bauwerkserhalt übertragen. Daran anschließend werden Zweck, Ziele und Ablauf der Erkundung beschrieben, einschließlich organisatorischer Rahmenbedingungen und digitaler Weiterentwicklung. Eine solche strukturierte und zukunftsorientierte Vorgehensweise ermöglicht die nachhaltige Bewahrung historisch bedeutsamer Bausubstanz.

2 Problemlösungsstrategie

Als Problemlösungsstrategie bei der Entwicklung von Industrieprodukten wurde am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) die sogenannte SPALTEN-Methodik entwickelt [1], die auch in eine entsprechende Richtlinie des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) aufgenommen wurde [2]. Die sieben Buchstaben stehen für je einen Schritt: Zuerst wird die **S**ituation analysiert und ihr **P**roblem formuliert, wofür verschiedene **a**lternative Lösungen aufgezeigt werden; dann wird die beste **L**ösung ausgewählt, in ihrer **T**ragweite analysiert und **e**ingeführt; und schließlich wird der Prozess **n**achbereitet.

Zur Steuerung seiner eigenen Arbeit hat der Verfasser des Beitrags die SPALTEN-Methodik auf das Bauen im Bestand übertragen (Tabelle 1). Dies bildet eine wesentliche Grundlage, im Sinne einer großmaßstäblichen Roadmap, für die weiteren Ausführungen.

Tab. 1 Die SPALTEN-Problemlösungsstrategie und ihre Übertragung auf den Bauwerkserhalt

Problemlösungsphase	Denkprozess	Ziel	Aufgabe
Situationsanalyse	Sehen	Handlungsbedarf	Erkunden
Problemeingrenzung	Urteilen	Handlungsmöglichkeiten	
Alternative Lösungen	Planen	Belassen, reparieren, ergänzen, verstärken, ersetzen	Bauen
Lösungsauswahl		Erhaltung	
Tragweitenanalyse		Auswirkungen und Konsequenzen aufzeigen	
Entscheiden und umsetzen	Handeln	Erhaltung	Dokumentation
Nachbereiten und lernen	Reflektieren	Erfahrung = Erlebnis + Reflexion	

3 Erkundungszweck und -ziele

Die Erhaltungsmaßnahmen für historisch bedeutsame Bauwerke müssen zwei zentrale Faktoren miteinbeziehen: das kulturelle Erbe des Bauwerks (Denkmalerhalt) und die Bauwerksfunktionen (Funktionserhalt). Für die Planung der Maßnahmen ergeben sich daher drei übergeordnete Fragestellungen:

- 1) Was macht das kulturelle Erbe aus und wie ist sein Zustand?
- 2) Was sind die Bauwerksfunktionen, wie werden sie derzeit erfüllt und wie ist der Zustand der Funktionserfüllung?
- 3) Welcher Handlungsbedarf besteht, um das kulturelle Erbe und seine Bauwerksfunktionen zu erhalten, und welche Möglichkeiten gibt es hierfür?

Der Zweck der Denkmalerkundung besteht also in der Feststellung des Handlungsbedarfs und, davon ausgehend, in der Erarbeitung und Auswahl entsprechender Handlungsmöglichkeiten. Dieser Prozess muss fachlich begründet und nachvollziehbar sein, was objektive Kriterien erfordert. Drei zentrale Kriterien sind dabei die Zweckmäßigkeit, Wirtschaftlichkeit und Ästhetik.

Zweckmäßigkeit: Dass Erhaltungsmaßnahmen ihren Zweck erfüllen sollten, wirkt selbstevident – wird aber, auch deshalb, teils vernachlässigt. Dies kann zu unnötigen, unwirksamen oder sogar schädlichen Maßnahmen führen. Eine zweckmäßige Planung hingegen erfordert Sachkunde, Systematik und Fleiß.

Wirtschaftlichkeit: Dieses Kriterium ist beim Bauen im Bestand besonders wichtig, vor allem bei der Sanierung historisch bedeutsamer Bauwerke. Die meisten der Objekte sind Eigentum öffentlicher Haushalte, die an ökonomisch plausible Maßnahmen gebunden sind. Die Wirtschaftlichkeit lässt sich grundsätzlich entweder am Ziel oder am Budget festmachen: Beim Minimumprinzip (Sparsamkeitsprinzip) ist ein

festgelegtes Ergebnis mit möglichst geringem Aufwand zu erreichen, während beim Maximalprinzip mit einem festgelegten Aufwand ein möglichst großes Ergebnis zu bewirken ist. Eine Kombination der beiden Prinzipien – also ein maximales Ergebnis bei minimalem Aufwand – ist praktisch unmöglich: Wirtschaftliches Handeln erfordert generell eine Festlegung von Ziel oder Aufwand.

Ästhetik: Die ästhetische Wirkung ist nicht objektiv messbar und insofern schwer zu berücksichtigen. Ein verantwortungsvoller Umgang mit diesem Kriterium ist für den Erhalt bedeutsamer historischer Bauwerke allerdings essenziell, da es sich hierbei um sichtbare Zeitzeugnisse handelt.

Zweckmäßigkeit, Wirtschaftlichkeit und Ästhetik sind somit drei zentrale Kriterien, um ein Denkmal und seine Funktionen angemessen zu erhalten. Diese Kriterien sind mit fünf grundlegenden Handlungszielen verzahnt: Es geht darum, die erforderlichen Maßnahmen zu identifizieren, alle nicht benötigten auszuschließen und den größtmöglichen Substanzerhalt durch kleinstmögliche Eingriffe zu erreichen – sowie dabei immer auch die Dauerhaftigkeit des Bauwerks im Blick zu haben. All diese Faktoren zusammen ermöglichen einen zielführenden, zweckmäßigen und insofern erfolgreichen Denkmalerhalt, wie in Abbildung 1 zusammengefasst.

4 Erkundungswerkzeuge: Die Sonderuntersuchungen

Erhaltungsmaßnahmen sind anhand der beschriebenen Fragen zu entwickeln. Um diese Fragen zu beantworten, bedarf es einer Untersuchung des Bauwerks. Somit ergeben sich zwei konsekutive, aber verzahnte Ebenen: Auf der Erkundungsebene werden Untersuchungsfragen formuliert, die anschließend auf der Untersuchungsebene abgearbeitet werden. Auch wenn Erkundung und Untersuchung oft von derselben Person durchgeführt werden, ist es hilfreich, zwischen den beiden Ebenen zu unterscheiden. Das vermeidet z. B., dass während der Erkundung vorschnelle Schlüsse gezogen werden, während es gewährleistet, dass für die Untersuchungen klare Fragestellungen formuliert werden.

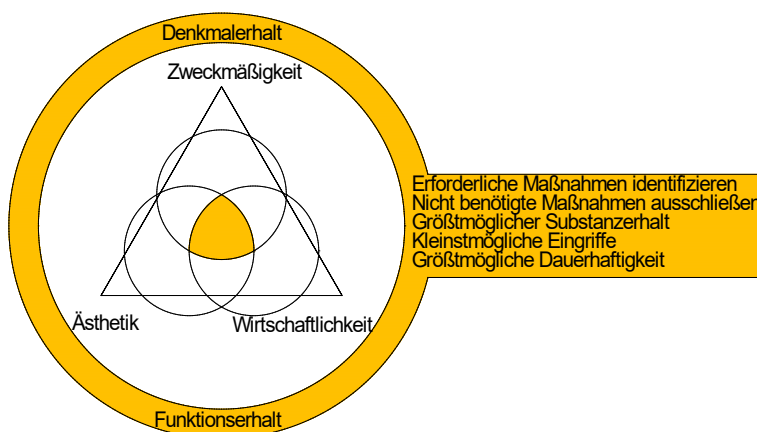


Abb. 1
Faktoren eines erfolgreichen Denkmalerhalts

Im Zuge der Formulierung der Untersuchungsfragen wird auch über die jeweils passenden Untersuchungen entschieden: ihre Art, ihr Umfang und ihr Einsatzzeitpunkt. Die folgende Liste führt nahezu vollständig alle möglichen Untersuchungen auf, welche die jeweils spezifischen Elemente eines Bauwerks erfassen, analysieren und bewerten können [3 bis 13]:

- Archivrecherchen: Bestandsunterlagen zusammentragen, strukturieren, auswerten und digitalisieren;
- Recherche der Baugeschichte in Nutzung und Konstruktion;
- geometrische und konstruktive Bestandsaufnahme;
- Erstellung von Bestandsplänen aus CAD-Modellen des Bestands (2D, 3D, BIM) unter Verwendung aller verfügbaren Quellen;
- örtliche Messungen (Radar, Schwingungen, Klima, Schadstoffe);
- Identifizierung, Erfassung und Kartierung der Schäden;
- restauratorische Untersuchungen;
- Laboruntersuchungen (Schadstoffe, Pilze, mineralische Substanzen, Salze, Säuren, Holz, Stahl);
- Untersuchung auf tierische Schädlinge;
- Analyse von Baugrund und Gründung;
- Erfassung und Beurteilung der Tragwerke;
- Überprüfung der vorhandenen Bausubstanz auf Ausführbarkeit der Bauaufgabe;
- Erfassung und Beurteilung der technischen Gebäudeausrüstung;
- Erfassung von Versorgungsleitungen;
- Erfassung und Zustandsbeurteilung von Entwässerungsleitungen;
- Erfassung und Beurteilung des Brandschutzes;
- bauphysikalische Untersuchungen zum Wärme- und Feuchtetransport;
- Untersuchung der Schallemission, Schallimmission und Raumakustik;
- Ortung und Beseitigung von Kampfmitteln;

5 Erkundungsablauf

Die Bauwerkserkundung nähert sich iterativ an den bislang nicht oder nur teilweise erforschten Bestand an und ist daher stufenweise zu planen [12]. Für die Planung von Neubauten steht ein durchdachtes und differenziertes Regelwerk zur Verfügung, nämlich die neun Leistungsphasen (LPH) der Honorarordnung für Architekt:innen und Ingenieur:innen (HOAI) [13]. Für das Bauen im Bestand sind die ersten zwei Phasen jedoch unvollständig oder gar nicht erst anwendbar. LPH 1 (Grundlagenermittlung) und LPH 2 (Vorplanung) gehen von einem geklärten Bedarf aus, wohingegen der Bestand vor Beginn von Erhaltungsmaßnahmen generell nicht ausreichend bekannt ist. Er ist erst zu erkunden, weshalb vorausgehende Leistungsstufen – oder eher Erkundungsstufen – zu formulieren sind. Dabei lassen sich drei grundsätzliche Stufen ausmachen, von der Aufgabenklärung über die Situationsanalyse und Problemeingrenzung bis hin zur Erhaltungsplanung. Jede Stufe umfasst mehrere Schritte.

5.1 Erkundungsstufe 1: Aufgabenklärung

Die erste Leistungsstufe für den Bauwerkserhalt ist eine orientierende Vorerkundung. Ziel ist es zu klären, ob eine weitere Erforschung des Bauwerks nötig ist und gegebenenfalls die Grundlage dafür zu schaffen. Es wird an dieser Stelle noch kein bautechnisches Maßnahmenpaket definiert, sondern erst einmal nur ein Verfahren, um die nötigen Maßnahmen zu ermitteln [1].

Die Vorerkundung setzt sich aus mehreren Schritten zusammen:

1. Inaugenscheinnahmen des Bauwerks mit Feststellung der Schäden und Mängel (erkennbar oder nicht ausschließbar), Einflussfaktoren (bekannt oder unbekannt) und signifikanter Besonderheiten
2. Erfassung der mündlich mitgeteilten Daten
3. Erfassung, Strukturierung, Auswertung und Digitalisierung der Bestandsunterlagen
4. Gefährdungsbeurteilung mit Entscheidung für oder gegen Sofortmaßnahmen und ggf. Planung der Sofortmaßnahmen
5. Zustandsbeurteilung mit Entscheidung für oder gegen weitere Untersuchungen
6. Exit-Beurteilung mit Entscheidung für oder gegen eine Projektfortführung [12]
7. Objekt- und Bauteilbeschreibung
8. Formulierung der Fragestellungen
9. Ausarbeitung eines Untersuchungs- und Bewertungsprogramms inkl. Kosten, zur Konkretisierung des Leistungsbilds in Erkundungsstufe 2 [14]
10. Ermittlung des Nutzungsbedarfs der Eigentümer:innen

5.2 Erkundungsstufe 2: Situationsanalyse und Problemeingrenzung

Die zweite Leistungsstufe in der Erkundung ist die Erforschung des Bestands. So kann dessen Zustand erschlossen und die Problemstellung eingegrenzt werden, was wiederum der Bedarfsplanung dient [15–16]. Wie die erste Stufe ist auch die zweite hauptsächlich beobachtend, jedoch diesmal nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ. Vereinfacht gesagt geht es darum, die Dinge so zu sehen, wie sie sind, und das Gesehene präzise festzuhalten. Menschen neigen dazu, erst das Allgemeine und Bekannte wahrzunehmen, wodurch ihr Wissen generell unvollständig und ihr Urteil fehlerhaft ist. Die Bestandserkundung erfordert daher ein Augenmerk für das Individuelle und Detaillierte sowie ein sorgsames Urteilen – auch, oder gerade, wenn das Objekt nicht oder nur begrenzt bekannt ist. Es ist eine gewisse Demut gegenüber dem Bauwerk nötig. Eine solche sorgfältige und aufmerksame Herangehensweise erlaubt es, das Denkmal mit seinen Funktionen und Merkmalen treffend zu identifizieren, zu analysieren und zu beurteilen.

Stufe 2 umfasst folgende Schritte:

1. Berichtswesen für Objektbeschreibung und Untersuchungsergebnisse aufbauen
2. Sonderuntersuchungen veranlassen, durchführen, betreuen, mitwirken, koordinieren, moderieren, dokumentieren
3. Bestandspläne anfertigen
4. Denkmaleigenschaften und Bauwerksfunktionen identifizieren und mit Nutzungszielen abstimmen
5. Handlungsbedarf erkennen, beschreiben und quantifizieren (Situationsanalyse)
6. Handlungsmöglichkeiten benennen und quantifizieren (Problemeingrenzung)
7. Finanzierungsbedarf abschätzen (Kostenrahmen)
8. Erhaltungsfähigkeit und Erhaltungswürdigkeit erörtern
9. Exit-Beurteilung (ja/nein) [12]
10. Erhaltungsziele und Erhaltungsaufgaben erörtern, abwägen und konkretisieren
11. Genehmigungsfähigkeit klären (Baurecht und Denkmalschutz)
12. Erhaltungsstrategie mit Planungs- und Überwachungszielen formulieren

Ein wesentlicher Bestandteil der Erkundungsstufe 2 ist eine Zielfindungsphase, denn angemessene Entscheidungen erfordern klare Ziele [17]. Im Idealfall werden die Ziele stufenweise und für alle Beteiligten zunehmend verbindlich vereinbart. Das kann mit kommunikativer Anstrengung verbunden sein, verringert aber eventuelle Zielkollisionen. Der Prozess der Entscheidungsfindung wird in Kapitel 6.2 genauer erläutert.

5.3 Erkundungsstufe 3: Erhaltungsplanung

Nach den ersten beiden Erkundungsstufen für den Bauwerkserhalt sind die Bedarfsplanung [15–16] und die Zielfindung [17] abgeschlossen. Dies erlaubt in der Regel den Übergang zu einem klassischen Planungsablauf entsprechend der HOAI [13], bei Bedarf in Verbindung mit einem formal erforderlichen Vergabeverfahren nach der Vergabeordnung für freiberufliche Leistungen (VOF) [18] oder der Unterschwellenvergabeordnung (UVgO) [19].

Je nach Aufgabenstellung wurde vielleicht bereits in den ersten zwei Erkundungsstufen der Stand der ersten beiden HOAI-Leistungsphasen (Grundlagenermittlung und Vorentwurf) erreicht. In diesem Fall beginnt die Erhaltungsplanung mit der LPH 3 (Entwurfsplanung). Bei der Erhaltungsplanung historischer Bauwerke erfordert die Kostenberechnung in LPH 3 häufig bereits detaillierte Überlegungen zur Ausführungsplanung (LPH 5), da sie stark von den baulichen Gegebenheiten und vorgesehenen Instandsetzungsmaßnahmen abhängt. Daher empfiehlt es sich, die Kostenplanung nicht an einer abstrakten Gliederung nach Bauteilen zu orientieren, sondern

an den konkreten Maßnahmen der Ausführung. Grundlage hierfür ist Kapitel 5.3 der DIN 276, das die Kosten im Bauwesen entsprechend aufschlüsselt [14].

Bei der Erhaltungsplanung besteht immer Bedarf an besonderen Leistungen [3–6] [13], der sich in der Regel aus den ersten zwei Erkundungsstufen ergibt. Eine dieser Leistungen ist die Fortführung der Untersuchungen, also die Beibehaltung des Erkundungsprinzips, denn trotz aller Sorgfalt kann während der beiden ersten Stufen etwas übersehen worden oder ein Irrtum entstanden sein. Qualität und Quantität der Erkundung – sowie ein Nutzungskonzept, das auf den Bestand Rücksicht nimmt – bilden die Grundlage für eine erfolgreiche Erhaltungsplanung. Die Vorgehensweise hierfür kann sich an der SPALTEN-Problemlösungsstrategie zum Bauwerkserhalt (siehe Kapitel 3) orientieren.

6 Organisatorische Bedingungen für die Erkundung

Erkundungsergebnisse sind nicht automatisch wirksam. Möglicherweise werden sie von den Beteiligten fehlerhaft interpretiert, schlicht übersehen oder sogar vorsätzlich missachtet. Die Wirksamkeit von Erkundungen hängt also nicht nur von ihrer inhaltlichen Prägnanz ab: Sie ist vor allem auch von ihrer Organisation abhängig – in Bezug auf die Beteiligten, ihre Entscheidungsfindung und die Untersuchungen selbst.

6.1 Organisation der Projektbeteiligten

Eine wesentliche Voraussetzung für wirksame Bauwerkserkundungen ist die Organisation der Projektbeteiligten. Klassische Bauprojekte haben, vereinfacht ausgedrückt, drei Beteiligte mit je einer Hauptaufgabe: Die Bauherr:innen entscheiden, die Planer:innen beraten fachlich und die ausführenden Firmen implementieren. Das impliziert eine Hierarchie, an deren Spitze die Bauherr:innen stehen. Diese pyramidenförmige Hierarchie findet sich auch in den Regelwerken der HOAI [13] und den Vergabebestimmungen (VOB-A [20], VOB-B [21], VOL [22], VOF [18], UVgO [19]).

An der Erhaltung historischer Bauwerke sind jedoch zudem die Denkmalpflege und die Bevölkerung beteiligt. So unterschiedlich diese beiden Gruppen auch in ihrer Beteiligung und ihren Zielen sein mögen: Ihre Akzeptanz der geplanten Maßnahmen bedingt deren Erfolg. Dennoch werden die beiden Gruppen von Bauherr:innen, Planer:innen und ausführenden Firmen im Entscheidungsprozess nicht immer ausreichend berücksichtigt. Häufig ist die Bestrebung eher, wie gewohnt zu arbeiten und selbstständig zu entscheiden. Unter Umständen besteht auch schlicht Unsicherheit mit Blick auf das Aufgeben der üblichen Hierarchie. Doch gerade die Sanierung historischer Bauwerke erfordert eine Miteinbeziehung aller Beteiligten und damit eine „heterarchische“ Organisation. Die Aufgabenstellung ist generell ein effektives Kriterium für die Organisation von Projektbeteiligten: Bei einer klaren Aufgabe eignen

sich hierarchische Strukturen (Pyramidenmodell), bei einer unklaren Aufgabe – zumindest bis zur Klärung – eher heterarchische Strukturen (Rosettenmodell), wie in Abbildung 2 veranschaulicht.

6.2 Organisation der Entscheidungsfindung

Neben der Organisation der Projektbeteiligten selbst beeinflusst auch die Strukturierung ihrer Entscheidungsfindung den Erfolg von Erkundungen. Die menschliche Zielfindung folgt oft zwei Tendenzen, welche auf ein Gefühl der Unsicherheit hindeuten und dadurch den Prozess beeinträchtigen: Entscheidungsvermeidung und Entscheidungsvorwegnahme. Bei der **Entscheidungsvermeidung** werden lange möglichst viele Optionen offengehalten. Es impliziert Angst vor falschen Entscheidungen, oft begründet mit den (vermeintlich oder tatsächlich) unklaren Kosten der Optionen. Bei der **Entscheidungsvorwegnahme** hingegen werden schon früh möglichst viele Optionen ausgeschlossen. Es impliziert den Wunsch nach Sicherheit, häufig unter Verweis auf die (vermeintlich oder tatsächlich) hohen Kosten der Optionen. Es suggeriert auch eine mangelnde Bereitschaft für neue oder andere Sichtweisen, Herangehensweisen und Verfahren hin.

Weder die Vermeidung noch die Vorwegnahme von Entscheidungen ist zielführend. Dies zeigt, wie wichtig fachlich begründete und gut dokumentierte Entscheidungsvorschläge zur rechten Zeit sind. Das liegt in erster Linie bei den Planer:innen, die dabei auf zwei zentrale Methoden zurückgreifen können: Entscheidungsverdichtung und Entscheidungseinordnung. Unter **Entscheidungsverdichtung** wird in diesem Beitrag die schrittweise steigende Zunahme der Verbindlichkeit im Entscheidungsprozess verstanden, in stetem Austausch mit allen Beteiligten. Dies stärkt das Vertrauen der Beteiligten und begünstigt einen allgemein akzeptierten Entscheidungsprozess.

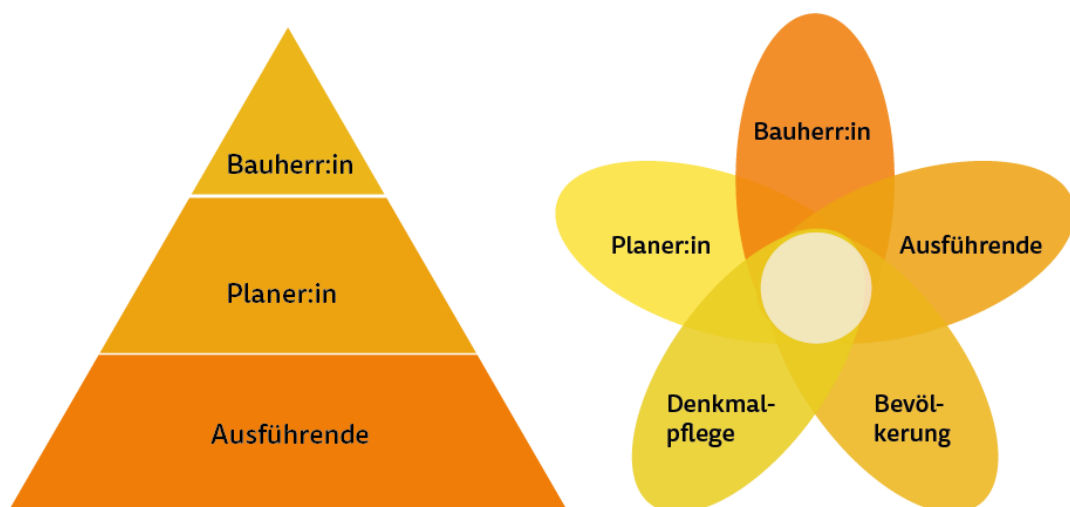


Abb. 2 Gegenüberstellung zweier Organisationsmodelle für die am Bauwerkserhalt Beteiligten – links das traditionelle hierarchische Pyramidenmodell, rechts ein heterarchisches Rosettenmodell

Die zweite Hilfe im Planungsablauf ist die **Entscheidungseinordnung**, was die Stafelung von Entscheidungen entsprechend ihrer Relevanz meint. Grundsatzentscheidungen (z.B. zur Notwendigkeit einer Maßnahme) müssen generell früh herbeigeführt werden, wohingegen Detailentscheidungen (z.B. die Leistungsbeschreibung einer Maßnahme) später getroffen werden können.

Die Gewichtung von Entscheidungen variiert je nach Planungsphase. Sie folgt im Projektverlauf fünf hauptsächlichen Prinzipien: Exklusions-, Sukzessions-, Parameter-, Verifizierungs- und Diligensprinzip. Jedes Prinzip hat eine individuelle Funktion und Grundlage, wie in Tabelle 2 detailliert.

Tab. 2 Fünf wichtige Entscheidungsprinzipien mit ihren jeweiligen Zielen und Grundlagen, zugeordnet zu den HOAI-Leistungsphasen

LPH	Entscheidungsprinzip	Entscheidungsfunktion	Entscheidungsgrundlage
1 Bedarfsplanung und LPH 1, 2	Exklusionsprinzip	Ausschließen	Bedarf und Möglichkeiten
2 LPH 3	Sukzessionsprinzip	Vergleichen und gewichten	Alternativen
3 LPH 4, 5	Parameterprinzip	Optimieren	Varianten
4 LPH 5	Verifizierungsprinzip	Nachweisen	Überprüfungen
5 LPH 6, 7, 8	Diligensprinzip	Sorgfältig verwirklichen	Sollvorgaben bei Ausschreibung, Vergabe, Ausführung und Abrechnung

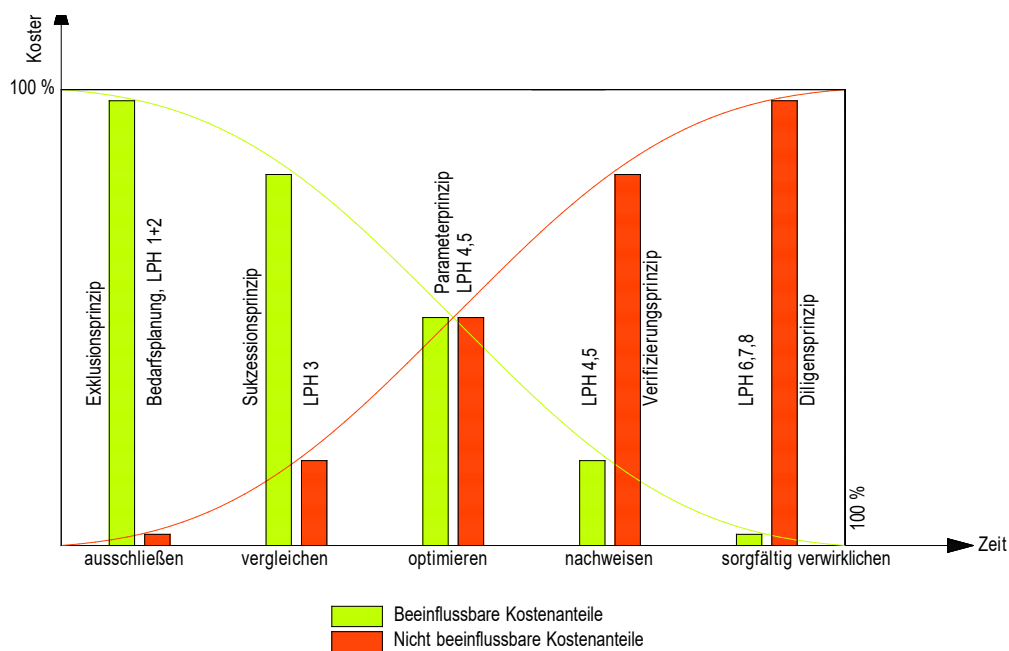


Abb. 3 Zusammenhang zwischen den fünf Entscheidungsprinzipien und den beeinflussbaren (grün) sowie nicht beeinflussbaren (rot) Projektkosten im Zeitverlauf

Ein besonders zentrales Entscheidungsprinzip ist das der Exklusion, also der fachlich fundierte Ausschluss unnötiger oder unmöglicher Optionen. Dies ist das zentrale Ziel der Erkundung – und hat den größten Einfluss auf die Kosten des Erhaltungsprojekts, wie Abbildung 3 zeigt.

Da sich die Planung von Erhaltungsmaßnahmen primär am Bedarf und damit immer an der Notwendigkeit orientiert, folgt die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung dem in Kapitel 3 erläuterten Minimumprinzip (Sparsamkeitsprinzip). Die Entscheidungsfindung ist dabei im Grunde einfach: Wenn ein Bedarf an bestimmten Maßnahmen besteht, sind diese zu finanzieren. Wenn jedoch keine Finanzmittel zur Verfügung stehen, bleibt nichts anderes übrig, als den Status quo hinzunehmen. Solche Entscheidungen sind allerdings eher politischer Natur und nicht fachlich begründbar.

6.3 Organisation der Untersuchungen

Eine dritte Bedingung für wirksame Bauwerkserkundungen ist die Organisation der Untersuchungen bzw. ihrer Ausführenden. Die verschiedenen Untersuchungen sind organisatorisch und inhaltlich voneinander abhängig, wobei die Abhängigkeiten mit der Anzahl beteiligter Disziplinen nichtlinear zunehmen. Erkundungsprojekte benötigen daher ein effektives Management. Durch die HOAI ist ein multidisziplinär und hierarchisch strukturiertes Management etabliert, doch alternativ sind interdisziplinäre und heterarchische Modelle möglich (Abbildung 4).

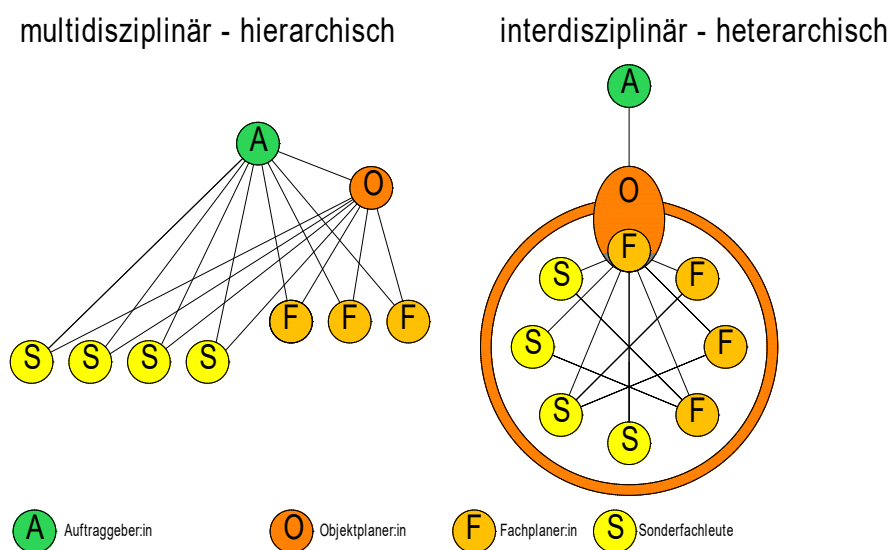


Abb. 4 Gegenüberstellung zweier Organisationsmodelle für Bauwerksuntersuchungen – links multidisziplinär und hierarchisch, rechts interdisziplinär und heterarchisch

Im multidisziplinären Modell sind die Fachplaner:innen und Sonderfachleute vertraglich den Bauherr:innen als auftraggebende Instanz unterstellt. Koordiniert werden die Untersuchungen der Fachplaner:innen und Sonderfachleute jedoch von Objektplaner:innen, welche die Teilergebnisse bündeln und in die Gesamtplanung integrieren. Fachplaner:innen und Sonderfachleute sind nicht zu einem methodischen Abgleich verpflichtet. Stattdessen sind alle primär für ihren eigenen Fachbereich – und eigenen Erfolg – verantwortlich.

Im interdisziplinären Modell hingegen hat eine Person die Hauptkoordination inne. Sie übernimmt entweder die alleinige vertragliche Verantwortung oder erstellt die Leistungsbeschreibungen für die beteiligten Fachleute. Daher sollte die Person auch in die Vergabe aller Untersuchungs- und Planungsleistungen eingebunden sein. Um den methodischen Abgleich im Team aktiv zu steuern, muss sie neben objektplanerischer Kompetenz zudem fachplanerische Expertise besitzen oder ein Sonderfachgebiet abdecken. Die Person stimmt die Teilergebnisse ab, wobei sie Lücken, Redundanzen, Widersprüche und mehrdeutige Aussagen erkennt und beseitigt. Auf dieser Basis fertigt sie ein integrierendes und festlegendes Gesamtergebnis an.

Verglichen mit dem hierarchischen Modell reduziert das heterarchische Modell den organisatorischen Aufwand, verringert Entscheidungsvorwegnahmen und erhöht die Ergebnisqualität. Erstens ist dieses System mit einem geringeren Aufwand verbunden, da es wesentlich weniger Schnittstellen enthält. Zweitens reduziert es die erwähnte menschliche Tendenz zur Entscheidungsvorwegnahme. Während hierarchisch weisungsbefugte Personen ihre Entscheidungen selbstständiger treffen und diese daher eventuell, antizipatorisch motiviert, vorwegnehmen, müssen sich Beteiligte in heterarchischen Strukturen abstimmen und folglich auch ihre Entscheidungen harmonisieren. Drittens kann das heterarchische Modell eine höhere Ergebnisqualität erreichen. Im hierarchischen System mag der fehlende Abstimmungsprozess zwischen den Einzelergebnissen zu Lücken, Überschneidungen, Widersprüchen und (zu) vielen Handlungsoptionen führen. Das Gesamtergebnis ist dann inkonsistent und schwer nachvollziehbar. In einer heterarchischen Organisation hingegen moderieren die Hauptkoordinator:innen einen Kommunikationsprozess, in dem die Teilergebnisse der verschiedenen Fachleute zusammengeführt und harmonisiert werden.

7 Digitalisierung der Erkundung

Wie beschrieben wird die Qualität einer Bauwerkserkundung von ihrer inhaltlichen Prägnanz ebenso wie von ihrer strukturellen Organisation bestimmt. Ein weiterer Erfolgsfaktor ist die Digitalisierung, welche die Baubranche allgemein – und damit auch die Erkundungs- und Erhaltungsmaßnahmen für historisch bedeutsame Bauwerke und generell das ganze Bauen im Bestand – zunehmend prägt.

Zentrale Chancen der Digitalisierung bestehen in der Erstellung eines digitalen „Zwilling“ des Bauwerks und in der systematischen Verwaltung großer Datenmengen. Dies ermöglicht den Aufbau einer bauwerksspezifischen, entpersonalisierten Wissens-tradition, auf die künftige Generationen beim Bauwerkserhalt zurückgreifen können. Künstliche Intelligenz (KI) wird das Ablegen, Abrufen, Verstehen und Bewerten all dieser Daten immer weiter erleichtern.

Vor diesem Hintergrund können in einem aktuellen Erhaltungszyklus kaum genug Informationen zum Bauwerk gesammelt werden, denn sie alle könnten dem nächsten Zyklus nutzen. Die Festlegung der Erkundungsziele und Untersuchungsmaßnahmen sollte daher nicht nur die gegenwärtige Bauaufgabe berücksichtigen, sondern auch den geschätzten mittel- und langfristigen Bedarf an Bauwerksinformationen für alle Instandhaltungsmaßnahmen [23]. Während im vordigitalen Zeitalter oft der Grundsatz „So wenig wie möglich, so viel wie nötig“ galt, scheint heute eher das Motto „So viel wie möglich, denn es könnte mal nötig werden“ angebracht.

Die digitalen Datenmengen besitzen jedoch nur dann einen zukünftigen Nutzen, wenn sie strukturiert und nachvollziehbar sind. Erforderlich ist also eine systematische Dokumentation des gegenwärtigen Erhaltungszyklus [24]. Dies umfasst nicht nur die Ablage von Bauplänen, sondern auch z.B. von Protokollen, Bautagebüchern, Ausschreibungen oder Rechnungen – selbst wenn es tausende Dokumente sind.

8 Zusammenfassung

Die Erkundung eines Bauwerks bildet die Grundlage für seine Bewahrung. Ziel ist dabei ein größtmöglicher und dauerhafter Erhalt von sowohl dem Denkmal als auch seinen Funktionen – bei minimalen Eingriffen. Hierfür gilt es, das Objekt zu erschließen, den Handlungsbedarf zu erkennen, geeignete Untersuchungsmaßnahmen zu planen und die Ergebnisse zu bewerten. Leitend sind dabei die Kriterien der Zweckmäßigkeit, Wirtschaftlichkeit und Ästhetik.

Als iterativer Prozess nähert sich die Erkundung stufenweise dem unbekannten Bestand an: von der Aufgabenklärung über die Situationsanalyse bis zur Erhaltungsplanung. Ihre Wirksamkeit hängt wesentlich von inhaltlicher Prägnanz und passenden Untersuchungsmethoden ab, aber ebenso von einer interdisziplinären, heterarchischen Zusammenarbeit und klaren Entscheidungsstrukturen.

Zugleich eröffnet die Digitalisierung neue Möglichkeiten für Erkundungs- und Erhaltungsmaßnahmen. Sie erlaubt den Aufbau einer strukturierten, entpersonalisierten Wissensbasis, auf die kommenden Generationen beim Bauwerkserhalt zurückgreifen können. Auch für die Zukunft gilt: Nur was bekannt ist, kann erhalten werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Albers, A. / Burkardt, N. / Meboldt, M. / Saak, M.: „SPALTEN Problem Solving Methodology in the Product Development.“ Institut für Produktentwicklung (IPEK), Karlsruher Institut für Technologie (KIT). DOI: 10.5445/IR/1000007075.
- [2] Verein Deutscher Ingenieure (VDI): *VDI 2221 – Entwicklung technischer Produkte und Systeme*. Berlin: Beuth Verlag, 2019.
- [3] Ausschuss der Verbände und Kammern der Ingenieure und Architekten für die Honorarordnung e. V. (AHO): *Besondere Leistungen bei der Objektplanung von Gebäuden und Innenräumen* (AHO-Heft Nr. 34). Köln: Reguvis Verlag, 2016.
- [4] AHO: *Besondere Leistungen bei der Tragwerksplanung* (AHO-Heft Nr. 3). 3. Auflage. Köln: Reguvis Verlag, 2014 / 6. Auflage. Köln: Reguvis Verlag, 2021.
- [5] AHO: *Besondere Leistungen bei der Planung von Anlagen der Technischen Ausrüstung* (AHO-Heft Nr. 6). 3. Auflage. Köln: Reguvis Verlag, 2014.
- [6] AHO: *Leistungen für den bauordnungsrechtlichen Brandschutz* (AHO-Heft Nr. 17). 4. Auflage. Köln: Reguvis Verlag, 2022.
- [7] Arbeitsgemeinschaft des Bau-, Wohnungs- und Siedlungswesens des Vereinigten Wirtschaftsgebiets (Argebau): *Hinweise zur Überprüfung der Standsicherheit von baulichen Anlagen durch den Eigentümer*. 2006. URL: <https://www.is-argebau.de/verzeichnis.aspx?id=991&o=991>, abgerufen am 27.10.2025.
- [8] VDI: *VDI 6200: Standsicherheit von Bauwerken – Regelmäßige Überprüfung*. Berlin: Beuth Verlag, 2010.
- [9] Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN): *DIN 1076:1999-11: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung*. Berlin: Beuth Verlag, 1999.
- [10] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: *Bauwerksprüfung nach DIN 1076. Dokumentation 2013*. Berlin: 2013.
- [11] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e. V.: *Bauen im Bestand. Merkblatt*. Berlin: 2008
- [12] Bielefeld, Bert / Wirths, Mathias: *Entwicklung und Durchführung von Bauprojekten im Bestand*. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010.
- [13] HOAI.de: *HOAI 2021 Volltext*. 2021. URL: <https://www.hoai.de/hoai/volltext/hoai-2021>, abgerufen am 27.10.2025.
- [14] DIN: *DIN 276:2018-12: Kosten im Bauwesen / DIN 276:2008-12: Kosten im Bauwesen*. Berlin: Beuth Verlag, 2008/2018.
- [15] DIN: *DIN 18205:2016-11: Bedarfsplanung im Bauwesen*. Berlin: Beuth Verlag, 2016.
- [16] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: *Richtlinien für die Durchführung von Bauaufgaben des Bundes (RBBau)*. 2024. URL: <https://www.fib-bund.de/inhalt/richtlinien/rbbau>, abgerufen am 27.10.2025.
- [17] Bürgerliches Gesetzbuch (BGB): § 650p(2).
- [18] VOF: *Verdingungsordnung für freiberufliche Leistungen*. 2006.
- [19] UVgO: *Unterschwellenvergabeordnung*. 2017.
- [20] VOB/A: *Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil A: Allgemeine Bestimmungen für die Vergabe von Bauleistungen*. 2016.
- [21] VOB/B: *Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen – Teil B: Allgemeine Vertragsbedingungen für die Ausführung von Bauleistungen*.
- [22] VOL: *Vergabe- und Vertragsordnung für Leistungen*. 2009.
- [23] DIN: *DIN 31051:2019-06: Grundlagen der Instandhaltung*. Berlin: Beuth Verlag, 2019.
- [24] Deutscher Betonverein: *Bauwerksbuch. Merkblatt*. Berlin: 2007.

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Alle Abbildungen und Tabellen stammen vom Verfasser des Beitrags.

Anna Graff

DIE DIGITALE ERFASSUNG AM BAUDENKMAL

Vom Feldrahmen zum Tablet

DOI: 10.60628/9783738810493-21

Seit 2022 beschreitet die Bauforschung des LVR-Amtes für Denkmalpflege im Rheinland bei der Erfassung historischer Bauwerke neue Wege: Fotos, Kartierungen und Notizen werden nicht mehr analog mit Bleistift, Millimeterpapier und Feldrahmen erstellt, sondern per Tablet. Diese digitale Schnellerfassung ermöglicht eine zügige Dokumentation von Gebäudestrukturen, Baubefunden und Schadensbildern. Zudem lassen sich die Befundfotos direkt mit Beschreibungen verknüpfen. Dank Notiz-App und Lidar-Scanner liefert das Tablet präzise 3D-Modelle sowie Kartierungsgrundlagen und optimiert so die Bauaufnahme. Der vorliegende Beitrag beleuchtet den Nutzen, aber auch die Grenzen dieser Methode für die historische Bauforschung.

1 Die Digitalisierung der Bauforschung im LVR-Amt für Denkmalpflege im Rheinland

Der Landschaftsverband Rheinland (LVR) ist ein Kommunalverband im westlichen Nordrhein-Westfalen, der sich um verschiedene soziale und kulturelle Aufgaben kümmert. Dazu gehört die Bewahrung der 52.000 eingetragenen Denkmäler der Region. Das LVR-Amt für Denkmalpflege im Rheinland (LVR-ADR) ist für die Beschreibung, Erforschung und kontinuierliche Betreuung dieses Bestands verantwortlich, ebenso wie für die öffentliche Vermittlung seines Wertes durch Publikationen, Vorträge und Seminare. Eines der Referate des Amtes ist die Bauforschung, das sich aus einem interdisziplinären Team von Vermessungsingenieur:innen, Architekt:innen und Kunsthistoriker:innen zusammensetzt. Das Referat fertigt Baudokumentationen an, berät aber auch Denkmalbehörden und -eigentümer:innen sowie externe Büros [1]. Die bauforscherische Untersuchung eines Denkmals liefert Informationen zu Alter, Material und Konstruktion, ebenso wie zu Veränderungen und Schäden. Dadurch präzisiert sie den Wert des Objekts, während sie außerdem im Vorfeld von Maßnahmen am Bauwerk Antworten auf damit verbundene Fragen liefern kann. Während der Maßnahme selbst wird die Baudokumentation meist fortgeschrieben, da wesentliche Befunduntersuchungen teils erst im Bauablauf möglich sind, etwa wenn Gerüste stehen oder Verkleidungen entfernt werden. Eine wichtige Aufgabe der Bauforschung besteht folglich darin, Standards für die Dokumentation festzulegen und effiziente Methoden im denkmalpflegerischen Alltag zu entwickeln, zu erproben und zu etablieren.

Als das Referat Bauforschung in den 1960er-Jahren gegründet wurde [2], bestand sein Instrumentarium aus Handaufmaßen, die mit Bleistift auf Millimeterpapier gezeichnet wurden, ergänzt um Fotografien und Untersuchungsberichte. Wenige Tage dauernde Kurzuntersuchungen wurden damals ebenso bewältigt wie zeitintensive Untersuchungskampagnen, meist an früh- bis hochmittelalterlichen Kirchen. Ab den 1990er-Jahren hielten digitale Arbeitsweisen Einzug in das Amt, das daraufhin um das Referat Fotogrammetrie ergänzt wurde. Das Handaufmaß wurde nun mit geodätischen, bildgebenden und digitalen Verfahren kombiniert. Von tachymetrischem Aufmaß über digitale Bildentzerrung und Fotogrammetrie bis hin zu terrestrischem 3D-Laserscanning und bildgebendem Structure from Motion (SfM) – all das sind heute gängige Vermessungsmethoden zur maßstäblichen Planerstellung. Die Anwendung und gegebenenfalls Kombination der Verfahren hängen von verschiedenen Faktoren ab, insbesondere den Gegebenheiten auf der Baustelle, den Objekteigenschaften und den denkmalpflegerischen Fragestellungen.

Besonders die oben erwähnte digitale 3D-Gebäudeerfassung mittels SfM wird im LVR-ADR seit 2015 intensiv genutzt [3]. Es stellt eine automatisierte Mehrbildfotogrammetrie dar, bei der identische Pixel in den Fotos zunächst zu einer Punktwolke und darauf aufbauend zu einem Oberflächenmodell zusammengebracht werden. Dank dieses Verfahrens lässt sich an nur einem Arbeitstag das 3D-Modell eines Baudenkmals erstellen – mit Einsatz einer Drohne, einer hochauflösenden Kamera und

einer entsprechenden Software. Der digitale Zwilling des Objekts entspricht in geometrischer Genauigkeit und materieller Detailschärfe dem Original und bietet vielfältige Auswertungsmöglichkeiten. So lassen sich aus dem 3D-Modell neben Orthofotos von Fassaden, Wänden oder Böden auch die klassischen 2D-Grundrisse und beliebige Schnitte generieren (Abbildung 1).

2 Die digitale Schnellerfassung

Seit 2022 nutzt das Referat Bauforschung des LVR-ADR die Möglichkeit der digitalen Schnellerfassung per Tablet am Baudenkmal. Bei dieser Methode werden Fotos, Kartierungen und Notizen zu einem Bauwerk direkt vor Ort mit dem Tablet aufgenommen. Der Ausdruck „digitale Schnellerfassung“ ist bislang kein offizieller Begriff, wird jedoch in dem Referat verwendet, um die damit verbundene Zeitersparnis in der Aufnahme von Objekten zu unterstreichen.

Das größte Potenzial der Dokumentation per Tablet ist die Geschwindigkeit, mit der sich maßstäbliche Skizzen erstellen lassen. Besonders bewährt hat sich die digitale Erfassung im Baustellenbetrieb, etwa wenn Putze entfernt werden und zuvor verborgene Baubefunde, Konstruktionen oder auch Schadensbilder zum Vorschein kommen. Während früher zahlreiche Arbeitsutensilien mitgeführt werden mussten, reicht heute meist das Tablet, ergänzt durch Lampen und einen Laserdistanzmesser. Ein weiterer wesentlicher Vorteil der digitalen Kartierung liegt in der unmittelbaren Verknüpfung

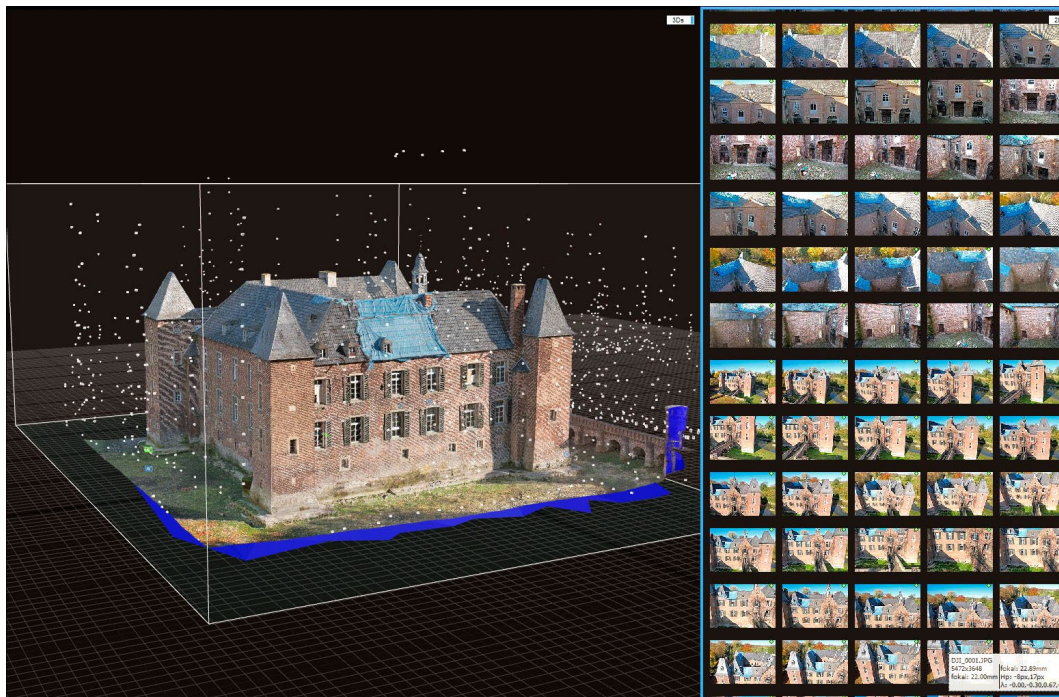


Abb. 1 Bauaufnahme mit SfM zur Vorbereitung der Instandsetzung eines historischen Gebäudes; Screenshot aus der Software „Reality Capture“ (Objekt: Haus Rath, Düren-Arnoldsweiler) (Hans Meyer, Pulheim)

von Aufmaßen mit Befundfotos und deren Beschreibungen. Weiterhin erlaubt diese Technik die unmittelbare Bereitstellung der Arbeitsergebnisse, die von der Baustelle aus gebündelt im PDF-Format weitergesendet werden können.

Die Tablet-Nutzung lässt sich auch mit der SfM-Methode kombinieren, etwa um Orthofotos eines Bauwerks vor Ort weiterzubearbeiten und zu ergänzen. Diese methodische Kombination ist vor allem für geschulte Bauforscher:innen ein Mehrwert, da sie so analytische Skizzen effizient anfertigen und konstruktive Details direkt einzeichnen können. Für die Ergänzung der SfM-Modelle wird der „digitale Stift“ verwendet, mit dem man auf dem Display schreiben und zeichnen kann (Abbildungen 2 und 3). Der Stift wird später genauer erläutert. Einen entscheidenden Impuls für die Verknüpfung von Tablet und SfM gab die Flutkatastrophe 2021 im Rheinland,

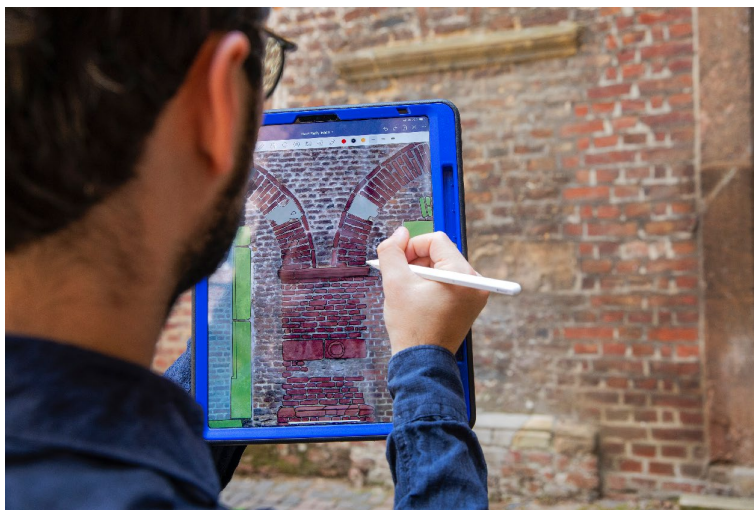


Abb. 2
Steingenaue Kartierung einer Arkatur auf dem Tablet mittels digitalem Stift; Grundlage ist ein SfM-Orthofoto (Objekt: Haus Rath, Dürren-Arnoldsweiler) (Vanessa Lange, Pulheim)



Abb. 3 Maßstäblicher Gebäudeschnitt (2D-Bildplan) mit Kartierungen, die auf dem Tablet mittels digitalem Stift ergänzt wurden (Objekt: Haus Rath, Düren-Arnoldsweiler) (Bildplan aus dem 3D-Modell: Hans Meyer, Pulheim)

bei der eine nachhaltige Erfassung und Dokumentation der Schäden unabdingbar war. Da viele Gebäude zuvor nicht erfasst worden waren, fehlten Plangrundlagen. SfM-Bildpläne und das Tablet ermöglichten es jedoch, innerhalb weniger Tage Fassaden, Bauhölzer, Dachstühle und Kellergrundrisse zu dokumentieren und die Ergebnisse an die Eigentümer:innen zu übergeben.

3 Werkzeuge

Die digitale Schnellerfassung ersetzt die bewährten Methoden der historischen Bauforschung nicht, sondern ergänzt sie. So werden mit dem Tablet beispielsweise Bauphasenpläne oder Befund- und Materialkartierungen in direktem Bezug zum Objekt erstellt. Darüber hinaus erleichtert das Gerät die Bauforschung vor allem durch zwei Tools, nämlich die Notiz-App und den Lidar-Scanner.

3.1 Notiz-App

Die Notiz-App – auch Notizbuch genannt – ist vielseitig einsetzbar: Sie gibt Zugriff auf Zeichentools und Dokumentvorlagen ebenso wie auf bereits vorhandene Unterlagen zum Objekt. Die Zeichenwerkzeuge erlauben die Erstellung von Grundriss- und Gefügeskizzen, wobei digitale Linien den klassischen Bleistift ersetzen (Abbildung 4).



Abb. 4 Durchzeichnung eines Fachwerkgefüges per Tablet-Stift in der Notiz-App (Objekt: Fachwerkhaus, Nörvenich-Irresheim) (Bildplan aus dem 3D-Modell: Hans Meyer, Pulheim)

Weiterhin kann man Dokumentenvorlagen in die App importieren, etwa für Raumbuchseiten, Planköpfe und Befundsignaturen. Die Vorlagen ermöglichen eine systematische Erfassung der Daten vor Ort und können an die jeweiligen Anforderungen und Produkte der Bauforschung angepasst werden. Besonders aussagekräftig werden die Ergebnisse durch ihre direkte Verortung im Plan – ob im Grundriss oder in einer Gesamtansicht der Wand oder Fassade – sowie durch die Beschriftung von Skizzen und Fotos. Durch ihre systematisierte Erfassung sind die Informationen später besser aufzufinden (zumal die Notiz-App eine Suchfunktion nach Text besitzt) und im Büro effizienter nachzubereiten.

Neben Zeichentools und Vorlagen bietet das Tablet die Möglichkeit, weiterführende Dokumente zum Objekt auf dem Gerät zu speichern und mit auf die Baustelle zu nehmen. Zu diesen Dokumenten gehören etwa Planunterlagen, Baudokumentationen und Gutachten, aber auch Recherchematerialien wie Fachliteratur und historische Abbildungen, ebenso wie E-Mails.

3.2 Lidar-Scanner

Hervorzuheben an der digitalen Erfassung ist auch der im Tablet integrierte Lidar-Scanner. Lidar steht für „Light Detection and Ranging“ – eine Fernerkundungstechnologie, die mittels Laserstrahlen in Echtzeit präzise Entfernungen und Bewegungen misst. Während das Radar Mikrowellen nutzt und das Sonar Schallwellen, arbeitet Lidar mit reflektierendem Licht, was schnellere und präzisere Messungen mit höherer Auflösung erlaubt. Trifft ein Laserstrahl auf ein Objekt, berechnet der Scanner anhand der Laufzeit des reflektierten Lichts die Entfernung zum Gerät.

Ausgehend von diesem Funktionsprinzip bietet der Lidar-Scanner des Tablets für die Bauforschung zahlreiche Möglichkeiten. Sofern keine geodätische Vermessung erforderlich ist, können Nutzer:innen damit direkt im Denkmal innerhalb von Minuten einen maßstäblichen und verformungsgenauen Grundriss erstellen, ebenso wie Schnitte und Ansichten (Abbildung 5). Weiterhin können sie den Scan in Echtzeit in



Abb. 5
Erfassen einer Treppe
mit der 3D-Scan-App
(Objekt: Fachwerkhaus
am Entenmarkt,
Bad Münstereifel)
(Silvia Wolf, Pulheim)

ein 3D-Modell mit Tiefeninformationen verwandeln (Abbildung 6). Die Zeitersparnis ist erheblich, die Darstellungstiefe der Scans flexibel und ihre Aussagekraft – besonders bei entsprechender Erfahrung der Anwender:innen – enorm. Anschließend kann mit dem digitalen Stift sogleich die Kartierung und Dokumentation der Modelle begonnen werden.

Wie bei jeder Technologie gibt es auch beim Lidar-Scanner Einschränkungen. Die Reichweite des Sensors ist auf etwa fünf Meter begrenzt; bei größeren Entfernungen treten Verzerrungen auf. Für Grundriss-Scans reicht diese Distanz meist aus, da Schnittlinie und Grundriss im Raum in nur einem Meter Höhe zu erstellen sind. Bei sehr dünnen Gegenständen – etwa Geländern, Streben und Gittern – oder reflektierenden Objekten ist das Punktraster zu grob und die Darstellung fehlerhaft. Weiterhin sind die erzeugten Scans zwar maßstäblich, aber nicht georeferenziert.

Bei der Anwendung vor Ort verarbeitet die Software die erfassten Daten zunächst zu einer dreidimensionalen Punktwolke und anschließend zu einer Art Netz aus vielen kleinen Dreiecken. Je öfter man mit der Tablet-Kamera das Objekt aus verschiedenen Perspektiven scannt, desto genauer erfasst sie dessen Oberfläche und verdichtet das Messnetz. Die Belichtung der gescannten Flächen macht ebenfalls einen Unterschied in der Auswertungsqualität: Man muss Räume nicht vollständig ausleuchten, doch wenn man sie beleuchtet, erhöht sich die Detailschärfe des Scans.

Direkt nach dem Scan eines Objekts kann man einen Grundriss exportieren und auf dem Tablet weiterbearbeiten (Abbildung 7). Für den Export stehen verschiedene Optionen zur Verfügung. Die Daten können als Drahtgittermodell oder als texturiertes 3D-Objekt exportiert werden, jeweils in verschiedenen Dateiformaten wie GLB, OBJ oder STL. Das GLB-Format (GL Transmission Format Binary file) ist heute, im



Abb. 6
Screenshot einer
Modellansicht in der
3D-Scan-App (Objekt:
Pfarrkirche, Straelen)

Jahr 2025, eines der meistgenutzten Formate für die Darstellung von 3D-Modellen im Web. Es ist plattformübergreifend und wird daher von vielen modernen Webbrowsern sowie Geräten – darunter PCs, Tablets und Smartphones – unterstützt. Darüber hinaus lassen sich auch die Vektorlinien im DXF-Dateiformat exportieren, um sie in CAD-Programmen weiterzubearbeiten.

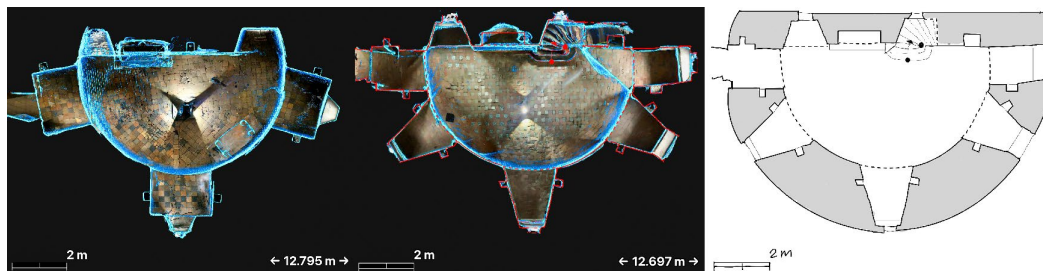
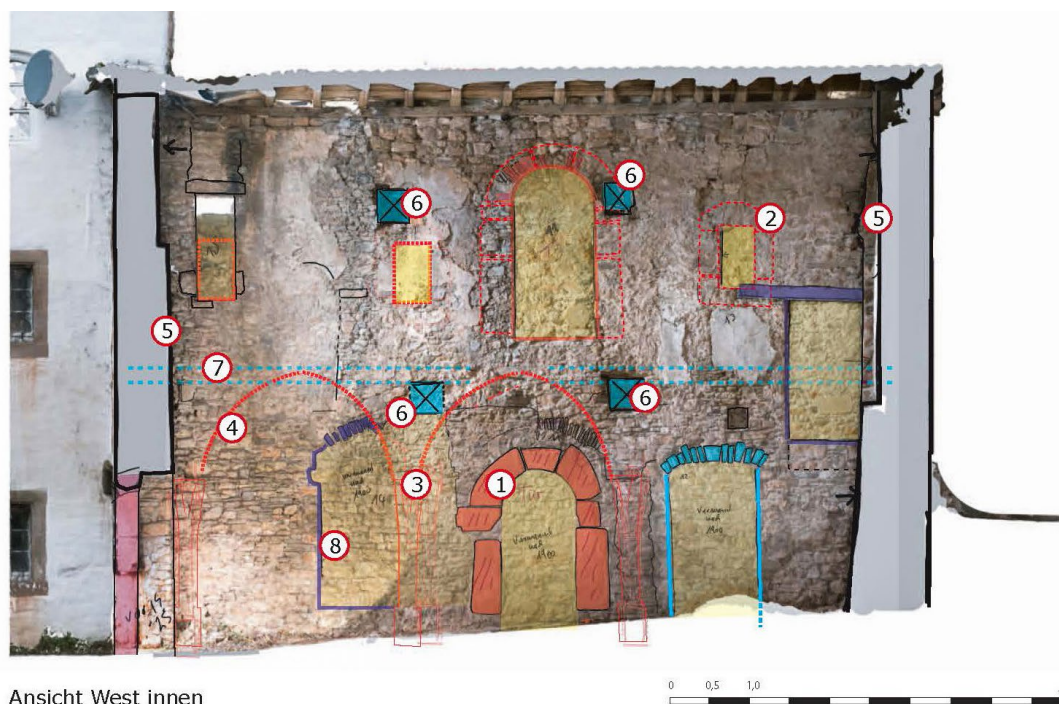


Abb. 7 Screenshot eines maßstäblichen Grundrisses aus der 3D-Scan-App (links). Nach der Durchzeichnung mit dem digitalen Stift in der Notiz-App ergibt sich eine geometrisch korrekte digitale Handskizze (rechts). (Objekt: Langer Turm, Aachen)



Ansicht West innen

- ① Rundbogenportale der Bauerweiterung bezeugen zweigeschossige Erschließung; Hausteingewände aus Sandstein liegen in Erdgeschossesebene innenseitig, in Obergeschossesebene außenseitig; die Öffnungen waren auf dem Bestandsplan um 1900 noch geöffnet, d.h. die Vermauerung erfolgte im Kontext der Ruinensicherung
- ② Baubefunde kleiner hochrechteckiger Hausteinfenster mit Dreieckssturz, teils außenseitig mit Gewände erhalten; Belichtungsfläche mit Mauerwerk geschlossen

- 13. Jh. romanischer Ursprungsbau, Burghaus mit mauerumwehrtem Hof
- 13.-14. Jh. Teilüberbauung des Hofes zweijochige gotische Gewölbekirche
- 1525 Neubau Südwesten, Teilerneuerung des Kernbaus
- zeitlich nicht fassbare Baumaßnahmen nach 1525- vor 1900
- Ruinensicherung, Not-/Pultdach, Vermauerung von Türen

Abb. 8 Befunderhebung und Bauphasenkartierung im Bildplan am Tablet direkt auf der Baustelle (Objekt: Burg Kallmuth, Mechernich) (Bildplan aus dem 3D-Modell: Hans Meyer, Pulheim; Zeichnung: Kristin Dohmen, Pulheim)

Der Export der Scans kann vor Ort am Denkmal erfolgen oder aber nachträglich im Büro. Dort bieten sich noch andere Möglichkeiten zur Weiterverarbeitung der Aufnahmen. So können Bauforscher:innen etwa im virtuellen Raum navigieren und sich sogar an Stellen begeben, die auf bloßen Einzelbildern eventuell nicht mehr genau verortbar sind. Außerdem lassen sich bestehende Schnitte variieren oder neue erstellen, z. B. an anderer Position oder mit geänderter Ausrichtung. Auf Grundlage der Scans sind schließlich auch virtuelle Besprechungen mit allen Projektbeteiligten möglich.

Bislang bewertet das Referat Bauforschung des LVR-ADR den Lidar-Scan als maßstäbliche Skizze, stellt ihn aber nicht auf die gleiche Stufe wie die tachymetrische oder laserbasierte Vermessung. Bei der Erfassung mit der Scan-App geht es eher um das direkte Agieren auf der Baustelle und die Nachvollziehbarkeit von Untersuchungen am Bauwerk (Abbildung 8). Zudem sind für größere Gebäudekomplexe und geschossübergreifende Bauaufnahmen nach wie vor geodätische Vermessungsverfahren nötig.

4 Anwendung im Objekt

Die digitale Schnellerfassung per Tablet hat sich in der vielfältigen Landschaft der Bau- und Kunstdenkmale im Rheinland bewährt. Sie wird gleichermaßen von Bauforscher:innen, Restaurator:innen und praktischen Denkmalpfleger:innen genutzt. Damit ist sie ein wichtiger Bestandteil der interdisziplinären Zusammenarbeit der verschiedenen Akteur:innen an einem Objekt. Auf individuelle Weise passen sie die Anwendung des Tablets an die jeweiligen Begebenheiten des Objekts an und bedienen sich dabei der zuvor beschriebenen Scan-, Foto- und Zeichentools.

Gerade für die Dokumentation von Dachstühlen und die Verortung von Bohrproben bei dendrochronologischen Untersuchungen erweist sich das Tablet als äußerst hilfreich, da schwer zugängliche Bereiche und Kleinstbefunde wie Abbundzeichen erschlossen und dokumentiert werden können. Grundrisse von Dachstühlen, Querschnitte und Ansichten von Gebinden können mittels Scan in den richtigen Proportionen und mit der korrekten Bauteilzuordnung erfasst werden. Die im vorigen Kapitel erwähnten Vorlagen auf dem Tablet unterstützen dabei sowohl die systematische Erfassung als auch die Zuordnung der erstellten Systemskizzen zu den Fotos (Abbildung 9).

Die Dateivorlagen in der Notiz-App helfen auch, die Raumbucherstellung – etwa von ländlichen oder städtischen Profanbauten – deutlich zeitsparender durchzuführen. Die raumweise Befunderhebung und die Verortung von Fotos zum Grundriss erfolgen direkt im Objekt und bedürfen bestenfalls keiner anschließenden Überarbeitung mehr im Büro. Abbildung 10 zeigt beispielhaft einen Auszug aus dem bauforscherischen Gutachten zu einem Wohnhaus. Links sieht man ein Orthofoto des Innenraums und darunter die Befundbeschreibung; rechts noch einmal die gleiche Aufnahme, in der jedoch per digitalem Stift am Tablet die Bauphasen markiert wurden, mit Erläuterungen darunter.

E.1



E.1: Dokumentation Knotenpunkte, Fotos:



Foto ① Knotenpunkt Kopfband, Blick nach Süden ② Fußpunkt im Mauerwerk eingebunden Blick nach Süden Westseite

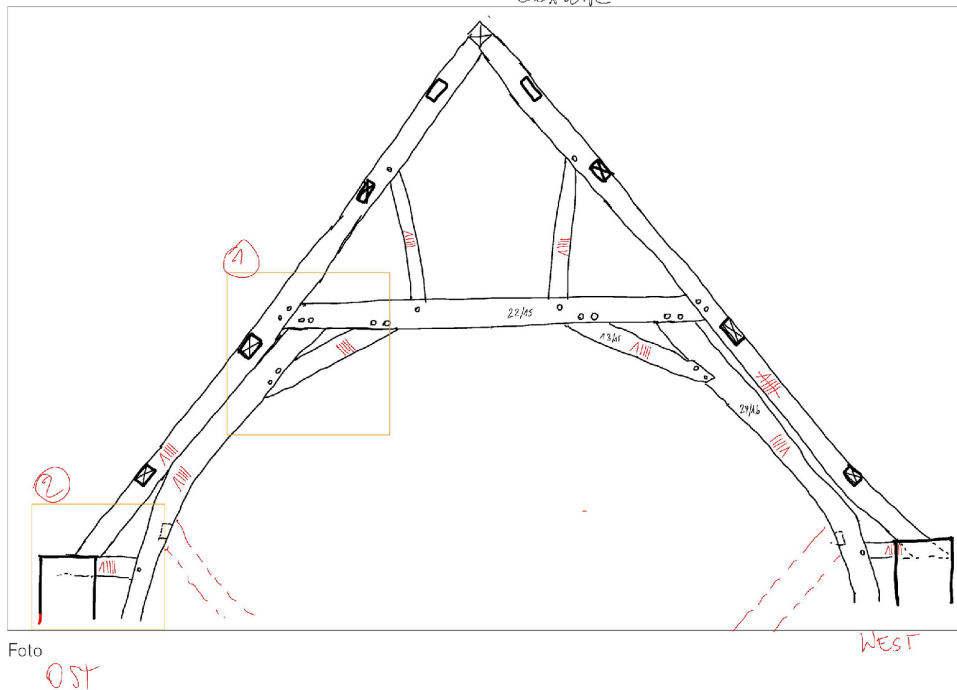


Abb. 9 Systematische Erfassung eines Dachwerks durch Dateivorlagen in der Notiz-App
(Objekt: Gut Paffenholz, Würselen)

Befundkatalog EG								
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 40%;"> <p>Kerken-Aldekerk Hochstraße 64</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;">Objekt-Nr.: 55459</td> <td style="width: 30%;">UDB Kerken</td> <td style="width: 40%;">Eintragung: 14.01.1991</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Bearbeitung: Anne Lambert LVR-ADR, Team Bauforschung</td> <td>Datum: 11.2020</td> </tr> </table> <p style="font-size: small;">LVR - Amt für Denkmalpflege im Rheinland Abt. Brauweiler, Ehrenfriedstr. 19, 50259 Pulheim</p> </div> <div style="width: 55%; text-align: right;">  </div> </div>			Objekt-Nr.: 55459	UDB Kerken	Eintragung: 14.01.1991	Bearbeitung: Anne Lambert LVR-ADR, Team Bauforschung		Datum: 11.2020
Objekt-Nr.: 55459	UDB Kerken	Eintragung: 14.01.1991						
Bearbeitung: Anne Lambert LVR-ADR, Team Bauforschung		Datum: 11.2020						
<div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div>								
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 48%;"> <p>Befunde</p> <ol style="list-style-type: none"> ① Gebinde Ursprungsbau (Ständerpaar mit geschossweise durchgezapfte Bundbalken und gezapften Kopfstreben) mit niedrigen Kniestock, die Bundbalken sind gesägt und waren bauzeitlich weiß gekalkt ② Erhöhung des vorderen Raums im Obergeschoss, im Zuge der Versteinerung der Straßenfassade im 19. Jahrhundert ③ Modernisierung des Raumprogramms im Zusammenhang mit der erneuerten Straßenfassade (19. Jh.); seitlicher Erschließungsflur im EG ④ Durch das modernisierte Raumprogramm im 19. Jahrhundert ergeben sich auch neue Erschließungstreppen in das Obergeschoss und das Kellergeschoss ⑤ Spuren am Bundbalken (Ausklunkungen) zeugen von einer Zwischenwand am ersten Gebinde vor der Modernisierung des Raumprogramms im 19. Jahrhundert </div> <div style="width: 48%;"> <p>Bauphasen</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Ursprungsbau, zweite Hälfte 17. Jahrhundert vier Gebinde mit geschossweise durchgezapfte Bundbalken, niedriger Kniestock; die Bundbalken sind jeweils mit zwei gezapften Kopfstreben versehen ■ Reparaturen und Erweiterungen zwischen dem 18. und 19. Jahrhundert Neue Ausfachung des Fachwerks mit einem Backsteinläuferverbund ■ Modernisierung im 19. Jahrhundert Modernisierung der Straßenfassade und Änderung des Hausgrundrisses: seitlich gelegenen Erschließungsflur, neue Treppe in das Obergeschoss und Verlegung der Kellererschließung ■ Modernisierung im 20. Jahrhundert Veränderung der Traufseite Ost: Kalkzementputz und raumseitige Vorsatzschale aus Bimsstein und Holzwole-Leichtbauplatten sowie neue Fenster </div> </div>								

Abb. 10 Auszug aus dem bauforscherischen Gutachten zu einem Wohnhaus (Objekt: Wohnhaus, Kerken-Aldekerk) (Anne Lambert, Pulheim)

Durch die mittels SfM erstellten Bildpläne von Fassaden, die man auf dem Tablet digital vorliegen hat, können Mauerwerksstrukturen wie Ziegelsteinverbände steingenu kartiert werden. Das Hineinzoomen in den Plan erleichtert die Kartierung, z. B. bei profilierten Dachgesimsen, die trotz ihrer schwer zugänglichen Lage in beliebigen Maßstäben erfasst werden können. Als Beispiel zeigt Abbildung 11 einen weiteren Auszug aus dem bauforscherischen Gutachten zu einem Wohnhaus. Links ist ein Orthofoto der Fassade zu sehen, das mithilfe des digitalen Stifts am Tablet steingenu kartiert wurde; rechts die Legende dazu.

Des Weiteren ermöglichen die Zeichentools auf dem Tablet die gefügekundliche Detailerfassung von Fachwerkbünd, Holznägeln und Abbundzeichen. Die Kartierung des Gefüges vor Ort erfolgt auf Grundlage maßstäblicher Bildpläne. Daraus lässt sich unmittelbar eine gefügekundliche Strichzeichnung erstellen, die somit ebenfalls maßstäblich ist. Durch Ein- oder Ausblenden der Bildpläne lassen sich verschiedene Ebenen darstellen, wie bereits in Abbildung 4 illustriert.

Für die Bauphasenkartierung hat sich die halbtransparente Markierung mit dem Zeichentool in den Plänen und Fotos bewährt, da somit direkt ein Farbschema erstellt und genutzt werden kann (Abbildungen 8, 10 und 11). Wie im vorigen Kapitel detailliert, lassen sich die auf der Baustelle per Tablet erstellten Kartierungen mit den Tools auf dem Gerät ergänzen oder mit Grafikprogrammen weiterbearbeiten.

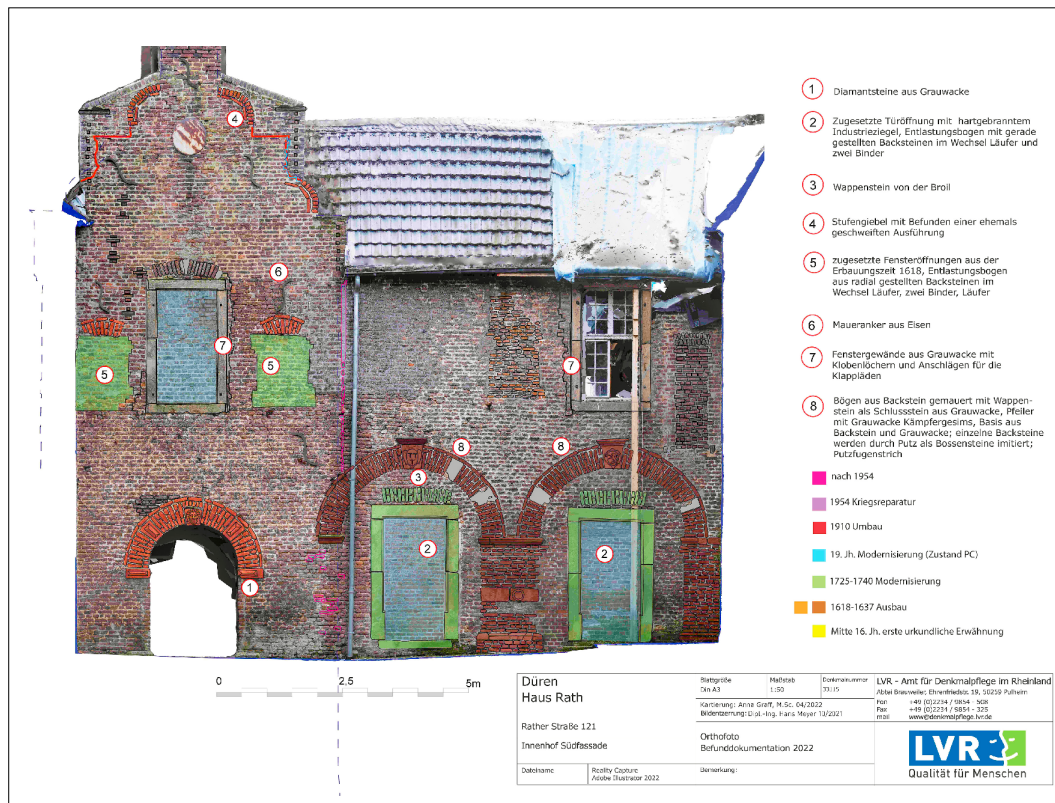


Abb. 11 Auszug aus dem bauforscherischen Gutachten zu einem Wohnhaus (Objekt: Haus Rath, Düren-Arnoldsweiler) (Bildplan aus dem 3D-Modell: Hans Meyer, Pulheim)

5 Fazit

Die historische Bauforschung im Kontext der Denkmalpflege ist eine detektivische Arbeit am Objekt, bei der neue Technologien wertvolle Hilfsmittel darstellen können. Die digitale Erfassung mit dem Tablet ersetzt nicht die Spurensuche am Bauwerk, die Analyse seiner Materialeigenschaften sowie die Interpretation und Vermittlung der Erkenntnisse. Doch sie macht die Befunderhebung deutlich effizienter und gezielter. Die Kombination mit verschiedenen Dokumentationsmethoden muss dabei individuell auf die Objektanforderungen und die denkmalpflegerischen Fragestellungen abgestimmt werden. Die rasante Entwicklung digitaler Scanner, deren Anwendung immer zugänglicher und leichter wird, dürfte das erprobte Verfahren in den nächsten Jahren weiter optimieren. Das Spektrum der digitalen Erfassung und ihrer Visualisierungsmöglichkeiten bietet einen bedeutenden Mehrwert, nicht nur in der Vermittlung spektakulärer Bauforschungserkenntnisse, sondern auch und insbesondere in der tagtäglichen Baustellenkommunikation.

Literaturverzeichnis

- [1] LVR-Amt für Denkmalpflege im Rheinland: „Dokumentation“. URL: https://denkmalpflege.lvr.de/de/aufgaben/dokumentation_1/dokumentation.html, abgerufen am 08.08.2025.
- [2] Kristin Dohmen: „Ziemlich beste Freunde – 60 Jahre Team Bauforschung und Vermessung“. In: LVR-Amt für Denkmalpflege im Rheinland (Hrsg.): *Denkmalpflege im Rheinland* (Themenschwerpunkt: 60 Jahre Bauforschung im Rheinland), 39 (2022), 3, S. 1–16.
- [3] Graff, Anna / Meyer, Hans: „Structure from Motion in der Denkmalpflege – Erfahrung und Ausblick“. In: LVR-Amt für Denkmalpflege im Rheinland (Hrsg.): *Denkmalpflege im Rheinland* (Themenschwerpunkt: 60 Jahre Bauforschung im Rheinland), 39 (2022), 3, S. 29–33.

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1 Hans Meyer, LVR-ADR, Pulheim, 2022
- Abb. 2 Vanessa Lange, LVR-ADR, Pulheim, 2022
- Abb. 3 Bildplan aus dem 3D-Modell: Hans Meyer, LVR-ADR, Pulheim, 2024; Zeichnung: Anna Graff, LVR-ADR, Pulheim, 2022
- Abb. 4 Bildplan aus dem 3D-Modell: Hans Meyer, LVR-ADR, Pulheim, 2024; Zeichnung: Anna Graff, LVR-ADR, Pulheim, 2024
- Abb. 5 Silvia Wolf, LVR-ADR, Pulheim, 2021
- Abb. 8 Bildplan aus dem 3D-Modell: Hans Meyer, LVR-ADR, Pulheim, 2022, Zeichnung: Kristin Dohmen, LVR-ADR, Pulheim, 2024
- Abb. 10 Anne Lambert, LVR-ADR, Pulheim, 2020
- Abb. 11 Bildplan aus dem 3D-Modell: Hans Meyer, LVR-ADR, Pulheim, 2022, Zeichnung: Anna Graff, LVR-ADR, Pulheim, 2023

Alle weiteren Abbildungen stammen von der Verfasserin des Beitrags.

Jürgen Giese

ORIGINAL UND DIGITALER ZWILLING

Multiple Datenquellen für das analytische Bauaufmaß

DOI: 10.60628/9783738810493-35

Für die Erstellung von Bauaufmaßen werden zunehmend weitestgehend automatisiert und dadurch kostengünstig erzeugte 3D-Punktwolken verwendet, die von Dienstleister:innen häufig als „digitale Zwillinge“ beworben werden. Diese Bezeichnung weckt die – in der Praxis oft nicht zu erfüllende – Erwartung, dass Punktwolken die gleichen Erkenntnismöglichkeiten wie die originale Bausubstanz bieten. Dem gegenüber stehen analytische Bauaufmaße, deren Qualitäten vor allem auf der intensiven Auseinandersetzung mit dem Original und der baufachlichen Expertise der Bearbeiter:innen beruhen. Der Beitrag beschreibt, wie analytische Aufmaße auch mit Einbindung von 3D-Punktwolken erzielt werden können, um die Aussagekraft und Wirtschaftlichkeit von Bauaufmaßen miteinander zu verbinden.

1 Wunsch und Wirklichkeit des digitalen Zwillings im Bauwesen

Ob auf Messen wie der Denkmalmesse in Leipzig und der Intergeo oder im Internet: Bauwerksdokumentationen werden zunehmend mit dem Begriff des „digitalen Zwillings“ (engl. „digital twinning“) beworben. Das Konzept verspricht eine leichte und effiziente Durchführung zahlreicher Planungs-, Bau-, Sanierungs-, Reparatur- und Wartungsmaßnahmen, auch bei komplexen Bauwerken. Allerdings sind die individuellen Vorstellungen der Konzeptinhalte sehr unterschiedlich und insofern diffus.

Konkreter als die Werbung definiert die wissenschaftliche Literatur den digitalen Zwillings: Konstituierend ist, dass er durch automatisierten und idealerweise bidirektionalen Datenaustausch mit seinem physischen Original verbunden ist. Es handelt sich demnach nicht allein um eine digitale und statische Kopie des Originals, sondern um ein dynamisches System, welches das Verhalten des Originals aufnimmt und analysiert – sowie im Gegenzug auch simuliert und beeinflusst [1–3].¹

Die Implementierung digitaler Zwillinge ist im Maschinen- und Anlagenbau bereits weit fortgeschritten, aufgrund der bei Planung und Betrieb scharf definierten und überwachbaren Materialeigenschaften sowie der standardisierten Prozesse zur Fertigung, Montage und Nutzung der Komponenten. Im Bauwesen ist die Implementierung deutlich schwieriger und daher noch in den Kinderschuhen. Besonders historische Gebäude sind in zahlreichen Eigenschaften weit entfernt von der klaren Definierbarkeit moderner Maschinen.

Im Bauwesen wird der Begriff des digitalen Zwillings deshalb auch gern für dreidimensionale Bauteilmodelle verwendet, die mittels Building Information Modeling (BIM) geschaffen wurden. Die Entitäten entsprechender Modelle sind durch semantische und topologische Annotierungen um Eigenschaften bereichert, etwa Dichte, Druck- und Zugfestigkeit, Wärmedurchgangskoeffizienten und Wartungszyklen. Allerdings fehlt hier die bidirektionale Interaktion zwischen Original und Digitalisat. Oft meinen die eingangs genannten Werbebotschaften aber nicht einmal ein vollständiges BIM, sondern allein dessen geometrische Komponente, also nur das 3D-Bauteilmodell.²

Kernaufgabe für jedes Bauteilmodell ist die Modellierung, was Auswahl und Generalisierung bedeutet. Die sich dabei eröffnenden Spielräume können durch das einfache Beispiel einer fiktiven, mit Backsteinen ausgefachten Fachwerkwand verdeutlicht werden: Genügt es, die Fachwerkwand als Scheibe zu modellieren, oder sollte besser jedes Holz, jede Holzverbindung und jede Ausfachung als getrennte Entität erzeugt

¹ Zu den Möglichkeiten der Einflussnahme auf das Original siehe etwa die Projekte des Centre for Digital Built Britain an der Universität Cambridge (<https://www.cdbb.cam.ac.uk>).

² Das Oberflächenmodell wird aufgrund der reduzierten Aussagemöglichkeiten nicht in diesem Beitrag besprochen. Zur Abgrenzung zum Bauteilmodell siehe etwa [5, S. 144 f.].

werden? Ist vielleicht sogar jeder Backstein der Ausfachungen einzeln zu modellieren? Und sind die Backsteine jeweils als Quader zu modellieren, als ob sie aus einer modernen Strangpresse kämen, oder in ihrer tatsächlichen Form als Handstrichziegel?

Bereits diese kleine Kaskade von Fragen zeigt, dass das dreidimensionale digitale Modellieren kaum technische Grenzen kennt, wodurch der (personalintensive) Aufwand dafür schnell ins Uferlose wächst. Das Gedankenspiel demonstriert aber auch, dass die Definition von „Bauteilgerechtigkeit“ Absprachen und Präzisierungen erfordert, von deren Ausmaß zu Projektbeginn häufig nur unscharfe Vorstellungen existieren.

Der Aufwand für die Erstellung bauteilgerechter 3D-Modelle ist somit hoch und vorab oft schlecht abschätzbar. Daher wird auch ein Aufmaßprodukt, das weit unter dem 3D-Modell steht, gern als solches beworben: die 3D-Punktwolke. Mithilfe statischen oder mobilen Laserscannings und durch 3D-Fotogrammetrie weitestgehend automatisiert erzeugt, ist ihre Herstellung schnell und wenig personalintensiv. Im Idealfall repräsentiert sie alle sichtbaren Oberflächen der aufgenommenen Architektur mit einer skalierbaren Punktdichte, wobei jeder Punkt über 3D-Koordinaten sowie – je nach Verfahren – auch über eine Farb- oder Helligkeitsinformation verfügt.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass viele als „3D-Modelle“ oder sogar „digitale Zwillinge“ bezeichnete Aufmaßprodukte in Wirklichkeit nur 3D-Punktwolken sind. Ausschließlich deren Leistungsfähigkeit wird daher im Folgenden betrachtet.

2 Analytische Baudokumentation durch 2D-Modellierung

Bauwerke besitzen – ebenso wie die von ihnen erstellten 3D-Punktwolken – Millionen unstrukturierter Datenpunkte. Durch Extraktion und Filterung werden daraus die für Planungs-, Erhaltungs- und Forschungszwecke relevanten Informationen abgeleitet, etwa Bauteilgeometrien, Materialitäten, Schäden oder Herstellungsspuren. Die Auswahl der relevanten Datenpunkte ist die entscheidende Leistung der Bearbeitenden. Das nach wie vor am weitesten verbreitete Verfahren, um diese Informationsgewinnung sowohl systematisch als auch mit einem noch sinnvollen Verhältnis zwischen Aufwand und Aussagekraft durchzuführen, ist die Anfertigung von 2D-Modellierungen, überwiegend in Form von Strichzeichnungen [4].

Die Erstellung von Strichzeichnungen ist ein Modellierungsprozess, der die aktive Auseinandersetzung mit den Daten des Originals oder der 3D-Punktwolke erfordert. Seine Bedeutung für die Erschließung und Erhaltung des kulturellen Erbes wurde bereits ausführlich beschrieben (vgl. etwa [5, S. 144 f., mit weiterführender Literatur]). Der Grad dieser analytischen Auseinandersetzung kann unterschiedlich ausfallen, weshalb eine Strichzeichnung keinesfalls automatisch eine analytische Strichzeichnung darstellt.

Einen schlaglichtartigen Eindruck der dem Medium Zeichnung innewohnenden Qualitätsunterschiede vermittelt ein Beispiel aus der antiken Bauforschung. Aufgenommen wurde der Grundriss eines aus dem 4. Jahrhundert v. Chr. stammenden Turms der Stadtmauer von Messene auf der Peloponnes (zum Projekt und zur Bauforschung an der Stadtmauer siehe [6]). Als Technik diente die Handzeichnung basierend auf tachymetrischen Messungen (zur Technik siehe etwa [7]). Das Mauerwerk des nur noch fragmentarisch erhaltenen Turms besteht aus großformatigen Werksteinblöcken, die trocken versetzt sind (Abbildung 1). Abbildung 2a zeigt das Ergebnis der ersten Aufnahme durch einen mit antiker Werksteinarchitektur noch wenig vertrauten Projektmitarbeiter. Das Augenmerk ist auf die zwei geschnitten dargestellten Werksteine zu legen, die in Abbildung 1 rot markiert sind. Beide Blöcke wurden durch Erdbeben aus ihrer ursprünglichen Lage verrückt und fallen aufgrund ihres ungewöhnlichen, aber zunächst nicht erklärbaren Steinschnitts auf.



Abb. 1
Messene, Stadtmauerturm Nr. 7 aus dem 4. Jahrhundert v. Chr.: Ansicht des Bestands von Osten. Die im Folgenden diskutierten Werksteine sind rot markiert.

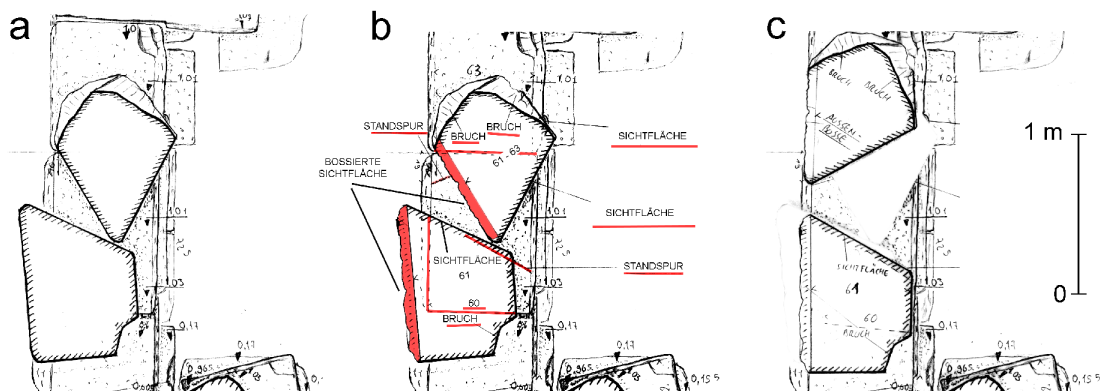


Abb. 2 Messene, Stadtmauerturm Nr. 7: Grundrissaufnahme in Bleistift auf Folie – a) vor bauforscherischer Überarbeitung, b) nach bauforscherischer Überarbeitung, c) Rekonstruktion der ursprünglichen Blockpositionen (Alejandro Campoverde, Jürgen Giese)

Durch Nachbefundung ließ sich die Zeichnung im Bereich der fraglichen Blöcke zu einer analytischen Zeichnung ausbauen. Abbildung 2b zeigt die vorgenommenen Ergänzungen und Veränderungen (rot eingefärbt): Hinzugekommen sind einige Anmerkungen, verdeckte Kanten, Maße, im Streiflicht erkennbare Standspuren und eine partiell veränderte Charakterisierung von bereits in Abbildung 2a vorhandenen Blockumrissen. Wie so oft in der Werksteinarchitektur lag der Schlüssel zum Verständnis in der funktionalen Identifizierung der Blockoberflächen – also in der Differenzierung von inneren und äußeren Sichtflächen sowie von Stoß-, Lager- und Bruchflächen, die sich durch ihre Steinbearbeitung unterscheiden. Dadurch war nachzuweisen, dass die Blöcke die Laibungen einer Schießscharte waren (Abbildung 2c). Dieser Nachweis wiederum bedeutet, dass auf der fraglichen Ebene des Turms ein für die Verteidigung verwendetes Nutzgeschoss existiert haben muss – und nicht etwa nur, wie es ebenfalls denkbar gewesen wäre, ein mit Erdreich gefülltes Sockelgeschoss.

Diese weitreichende Erkenntnis wäre ohne die Überarbeitung der Zeichnung nicht gelungen. Rein grafisch ist der Unterschied zwischen den Abbildungen 2a und 2b geringfügig, denn die Geometrie aller Blöcke wurde bereits in Abbildung 2a korrekt erfasst. Was aber fehlte, war das Durchschauen der Bauteilloge und -funktion. Die Ergänzungen und Änderungen stellen das Ergebnis dieses Denkprozesses grafisch dar und ermöglichen den entscheidenden Schritt zur analytischen Aufnahmezeichnung.

3 Vorteile der Einbindung von 3D-Punktwolken in Baudokumentationen

Aufgrund des mittlerweile hohen Annäherungsgrads von 3D-Punktwolken in Bezug auf das Original liegt es nahe, sie als Datenquelle für Baudokumentationen aller Art bis hin zu analytischen Aufmaßen zu verwenden. Der Zeitaufwand vor Ort ist gegenüber anderen Erfassungstechniken unbestritten stark reduziert. Dies ist im Sinne einer wirtschaftlichen und umweltbewussten Ressourcenschonung, etwa, wenn sich der Aufwand für Fahrten und Übernachtungen verringert. Weitere Argumente für möglichst kurze Arbeitszeiten vor Ort ergeben sich bei Arbeiten in bewohnten Gebäuden, genutzten Fabrikanlagen oder gesundheitsgefährdenden Umgebungen. Es stellt sich somit nicht die Frage, ob 3D-Punktwolken in Baudokumentationen eingebunden werden können, sondern wie.

4 Auswertestrategien für 3D-Punktwolken

Für die Extrahierung von 2D-Modellierungen aus 3D-Punktwolken sind drei Verfahren gängig. Da diese Methoden erst in Kombination zu wirtschaftlichen Arbeitsabläufen und zuverlässigen Ergebnissen führen, beherrschen Auswerteprogramme idealerweise alle drei.

4.1 Verfahren 1: Vektorisierung von Schnittlinien

Die Punktwolke wird in definierten Ebenen geschnitten und durch Vektorisieren innerhalb dieser sogenannten *slices* ausgewertet. Das Verfahren ist sehr gut geeignet, um die Schnittlinien von Bauteilen zu erfassen. Es erleichtert gerade bei Architekturprofilen das Erfassen der Profilloge, das heißt, das Zerlegen in geometrisch eindeutig definierte Elemente. Ein Beispiel liefert die 3D-Punktwolke des Fürstenportals am Bamberger Dom (Abbildung 3).

Die Schnittführung erfolgt bei diesem Verfahren streng mathematisch entlang von Ebenen, was aber gerade bei historischen Bauwerken häufig nicht sinnvoll ist. Im Gegenteil: Die Schnittebene dient bei einer analytischen Schnittzeichnung lediglich als Orientierung, von der aus inhaltlichen Gründen oft abgewichen wird. Die 3D-Punktwolke eines Dachwerks verdeutlicht die Problematik (Abbildung 4): Der Längsschnitt sollte die Firstlinie immer genau dort zeigen, wo die Sparrenpaare miteinander verbunden sind. Im Grundriss folgt die Firstlinie aber keiner Geraden, sondern einer undulierenden Linie. Die relevanten Firstpunkte liegen also in unterschiedlichen vertikalen Ebenen. Die Auswertung nur entlang der in Abbildung 4 eingezeichneten mathematischen Schnittebene würde keine sinnvollen Ergebnisse liefern und wäre damit fehlerhaft.

Neben Falschauswertungen droht bei mathematischen Schnittführungen das Übersehen wichtiger Elemente. Dies sei an einem Beispiel aus der bei Assuan in der ägyptischen Wüste gelegenen Klosterruine Dayr Anba Hadra erläutert. Der Klosterkomplex

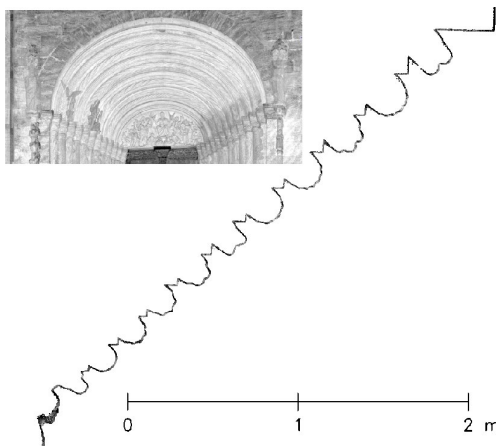


Abb. 3
Bamberg, Dom, Fürstenportal:
3D-Punktwolke – Vertikalschnitt
durch die Archivoltenprofilierung
(Nils Wetter; Jürgen Giese)

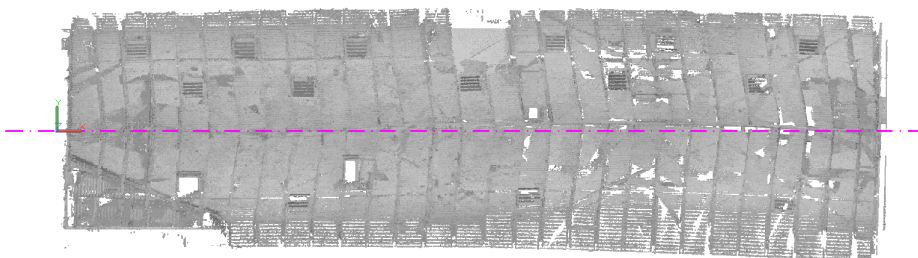


Abb. 4 Bamberg, Obere Karolinenstr. 4, Dachwerk: 3D-Punktwolke – Aufsicht mit ideal-typischer Schnittführung für einen Längsschnitt (Anna Kofer; Jürgen Giese)

beherbergt u. a. einen mehrgeschossigen Wohnbau für die Mönche. Abbildung 5a zeigt den horizontalen *slice* zweier Räume in dem Bau mit Eingängen und Wandnischen. Wenn die Schnittebene in Abbildung 5a nur 5 cm tiefer gelegt wird, erscheinen zusätzliche Nischen (Abbildung 5b), die für die später behandelte Auswertung (Abbildung 11) essenziell sind.

Die Auswertung von *slices* führt zum Erfolg, wenn ihr eine genaue Bauwerkserkundung vorausgeht, um von streng mathematischen Schnittführungen zu analytischen zu gelangen. Dies ist auch der Grund, warum eine aus einer 3D-Punktwolke rein automatisiert erzeugte 2D-Schnittzeichnung allenfalls bei sehr einfach strukturierten Gebäuden die Aussagekraft einer analytischen Schnittzeichnung erreichen kann und nicht ungeprüft übernommen werden sollte.

4.2 Verfahren 2: Vektorisierung von Orthofotos

Aus der Punktwolke werden Orthofotos generiert, die man als Vorlage direkt unter die Zeichnung legt. Dies ist das schnellste Verfahren zur Auswertung von in Ansicht oder Untersicht darzustellenden Bauwerksteilen, z.B. Fassaden, Wandoberflächen oder Deckenspiegeln (Abbildung 6). Das Vorgehen ist überall dort zuverlässig, wo sich die auszuwertenden Bauteilkanten im Foto deutlich abzeichnen.



Abb. 5
Ägypten, Kloster Dayr Anba Hadra,
Wohnbau der Mönche: horizontale
slices durch die 3D-Punktwolke im
Abstand von 5 cm

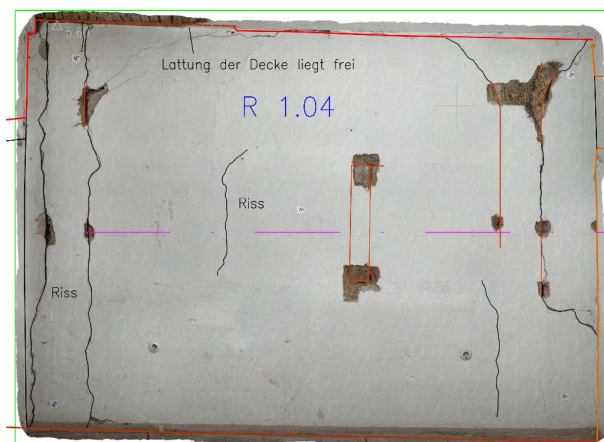


Abb. 6
Mühlhausen (Lkr. Erlangen-Höchstädt),
ehem. Synagoge: Orthofoto der
Ostwand von Raum 1.04 mit partieller
Vektorauswertung

4.3 Verfahren 3: Virtuelle Tachymetrie

Die schrittweise Erkundung der 3D-Punktwolke erfolgt durch Verschieben und Drehen des Betrachtungsstandpunkts sowie durch Herein- und Herauszoomen und Beschneiden. Auf zu modellierenden Bauteilen wird jeweils eine Messmarke aufgesetzt. Das Ergebnis der Koordinatenmessung wird an ein CAD-System übertragen, in dem parallel zur Punktwolkenerkundung die 2D-Modellierung entsteht. Wie Abbildung 7 zeigt, lassen sich die Firstpunkte des Dachwerks aus Abbildung 4 nun individuell anfahren und dadurch korrekt messen.

Zwischen den Einzelmessungen muss im virtuellen Raum oft mehrfach durch Drehen, Bewegen und Zoomen navigiert werden, wodurch die Messfrequenz deutlich niedriger ist als bei den zwei zuvor beschriebenen Verfahren, bei denen man nur auf zweidimensionalen Darstellungen auswertet. Diesem Nachteil steht der Vorteil gegenüber, dass die Vorgehensweise – im Gegensatz zu den anderen beiden – universell für alle Bauteilarten und Darstellungsformen einsetzbar ist. Darüber hinaus gibt sie die größte Sicherheit, Bauteile an tatsächlich aussagekräftigen Kanten anzumessen und keine relevanten Bauwerkseigenschaften zu übersehen, da sie den Abläufen der Bauwerkserkundung vor Ort am nächsten kommt. Aufgrund dieser Ähnlichkeit kann das Verfahren als „virtuelle Tachymetrie“ bezeichnet werden.

Selbst bei einer Kombination aller drei Verfahren wird die daraus abgeleitete 2D-Modellierung nur in Ausnahmefällen alle Informationen, die für Verständnis und Interpretation des Bauwerks nötig sind, enthalten und auch korrekt darstellen. In den Punktwolken lauern viele Gefahren für Fehlinterpretationen gut sichtbarer Befunde, ebenso wie für das Übersehen weniger gut sichtbarer, versteckter oder fragmentarischer Befunde. Die drei folgenden Beispiele demonstrieren, wie Punktwolken dennoch in den Prozess der analytischen 2D-Modellierung eingebunden werden können.

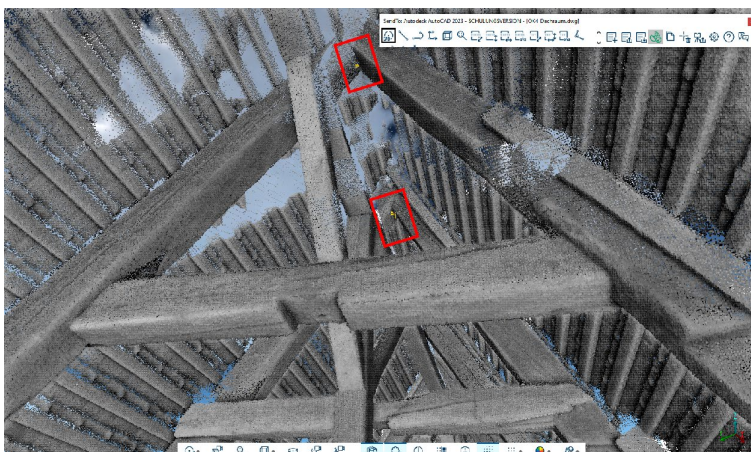


Abb. 7
Bamberg, Obere Karo-
linenstr. 4, Dachwerk:
3D-Punktwolke – Dar-
stellung für virtuelle
Tachymetrie im Pro-
gramm Faro As-Built
Modeler (Anna Kofer;
Jürgen Giese)

5 Einbindung von 3D-Punktwolken in analytische Baudokumentationen

Das erste Beispiel für eine solche Einbindung bildet das Aufmaß der ehemaligen Synagoge in Mühlhausen aus dem 18. Jahrhundert (Landkreis Erlangen-Höchststadt). In Abbildung 8 ist der Ausschnitt eines Querschnitts durch die Synagoge zu sehen. Zunächst wurde der gezeigte Raum 1.04 anhand eines Orthofotos gezeichnet (Abbildung 6) und das darüber liegende Dachwerk anhand einer 3D-Punktwolke. In dem Orthofoto waren außer den Schnittlinien einige partiell freiliegende Fachwerkhölzer erkennbar und korrekt anmessbar. Im Dachwerk waren die Konstruktionshölzer bis zu den Oberseiten der Ausbretterung in der 3D-Punktwolke klar sichtbar. In geradezu klassischer Weise war der Dachwerksfußpunkt jedoch größtenteils unter Schutt und der Ausbretterung verborgen (Abbildung 9). Bereits während der Auswertung wurden nicht nur derartige offensichtlich lückenhaften Bereiche gekennzeichnet, sondern auch unverständliche Bereiche, die wichtige Befunde hätten beinhalten können (Abbildung 8). Die Erkundung vor Ort entschlüsselte anschließend nicht nur die Konstruktion des Fußpunkts vollständig (Abbildung 10): Die Autopsie der Fachwerkwand in Raum 1.04 erbrachte außerdem, dass in dem Foto bereits erkennbare Kanten der Ständer sehr scharfkantig ohne Waldkante und somit auf Sicht gearbeitet sind. Damit wurde deutlich, dass in der heute verputzten Fachwerkwand eine ehemals offene Stützenstellung steckt. Sie verrät in diesem Fall den Standort der barocken Frauempore – ein wertvoller Hinweis für die anstehende Sanierung des Gebäudes.

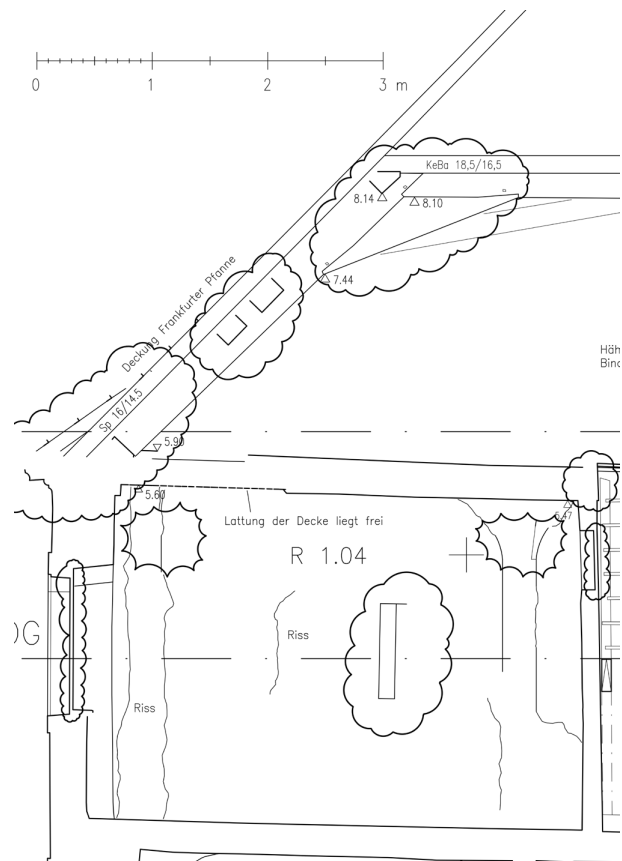


Abb. 8
Mühlhausen (Lkr. Erlangen-Höchststadt), ehemalige Synagoge:
Auswertung des Orthofotos in
Abbildung 7 und eines 3D-Scans des
Dachraums für einen Querschnitt

Das zweite Beispiel für eine Einbindung von 3D-Punktwolken in analytische Bau-dokumentationen führt zu dem bereits erwähnten Kloster Dayr Anba Hadra. Von dem dortigen Wohnbau der Mönche wurde in einer ersten Feldkampagne mittels SfM-Verfahren (Structure from Motion) eine 3D-Punktwolke erstellt. Diese wurde noch vor der ein Jahr später folgenden Kampagne zeichnerisch ausgewertet. Abbildung 11 zeigt davon einen Ausschnitt mit dem Grundriss dreier Räume, die projekt-intern „OT95“, „OT96“ und „OT97“ heißen. Die drei beschriebenen Auswerteverfahren erlaubten eine detaillierte 2D-Modellierung der Konturen der Räume, der Gewölbe und der Eingangssituationen, einschließlich aller Höhenangaben – mit Ausnahme einiger erfassungsbedingter Lücken. Anhand der 3D-Daten konnten auch ein paar bei



Abb. 9

Mühlhausen (Lkr. Erlangen-Höchstädt), ehemalige Synagoge: Blick auf den Fußpunkt des Bindergespärres

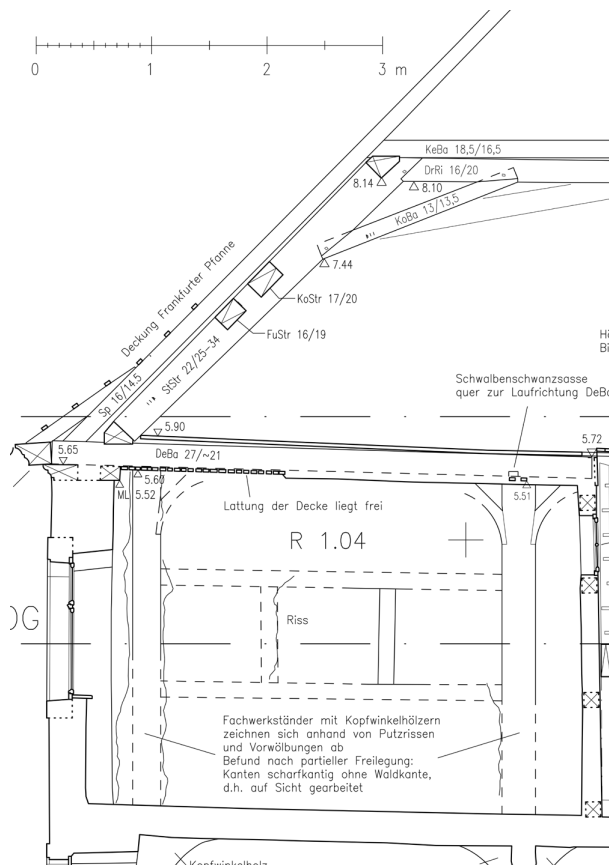


Abb. 10

Mühlhausen (Lkr. Erlangen-Höchstädt), ehemalige Synagoge: Querschnitt von Abbildung 8 nach bauforscherischer Überarbeitung vor Ort (Claudia Birke; Jürgen Giese)

Restaurierungsarbeiten im 20. Jahrhundert eingezogene Stahlkonstruktionen vollständig ausgewertet werden. Der Umfang der Auswertung wurde allerdings von vorneherein überall dort reduziert, wo Fehlinterpretationen der 3D-Punktwolke drohten.

Der durch die Weiterbearbeitung vor Ort erzielte Wissenszuwachs sei an einem Detail erläutert: dem in Abbildung 11 rot umrandeten Bereich. Er umfasst die Trennwand zwischen den Räumen OT96 und OT97, einen überwölbten Zugang zu Raum OT97 und einen zunächst nicht näher spezifizierbaren Mauerwerksausbruch in OT96 – genau dort, wo die Trennwand zu OT97 auf die Außenwand trifft. Abbildung 12 zeigt die Situation vor Ort. Die bauforscherische Begutachtung ergab, dass der Mauerwerksausbruch in Wirklichkeit eine intentionell aus dem Mauerwerk ausgesparte und verputzte Nische ist, die jedoch partiell durch den Eingang zu OT97 abgeschnitten wird (Abbildung 13). Die Trennmauer zwischen den beiden Räumen ist sekundär eingestellt und bildet gleichzeitig die Seitenwand der Nische gegen den Eingang hin. Dadurch ist erwiesen, dass der Eingang sekundär zu einem Zeitpunkt eingebrochen wurde, als die Trennwand zwischen den Räumen OT96 und OT97 eingestellt wurde, die vorher ein gemeinsamer Raum waren. Der neue Eingang schnitt eine Hälfte der Nische ab, sodass die neue Trennwand auch innerhalb der Nische weitergeführt werden musste.

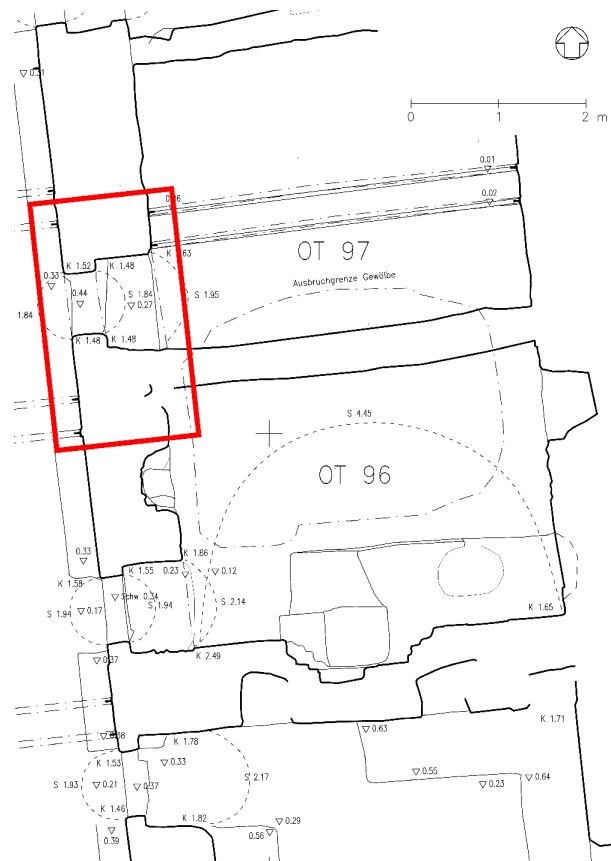




Abb. 12
Ägypten, Kloster Dayr Anba Hadra,
Wohnbau der Mönche, Raum OT96,
Westwand

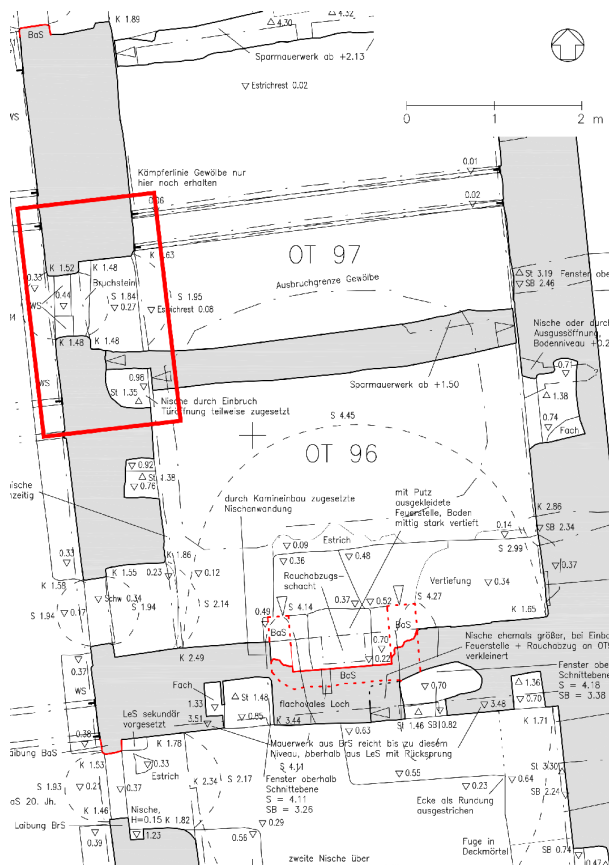


Abb. 13
Ägypten, Kloster Dayr Anba Hadra,
Wohnbau der Mönche: Grundriss
Ebene 1, Ausschnitt, Zustand nach bau-
forscherischer Überarbeitung vor Ort

Die Überarbeitung der Rohzeichnungen vor Ort (Abbildung 13) hat gezeigt, dass die Auswertung der 3D-Punktwolke überall dort zuverlässige und damit gültige Ergebnisse geliefert hat, wo Bauteile sowohl durch ihre Geometrie als auch durch ihre Materialität klar voneinander abgegrenzt sind. Anders formuliert: Sie bewährt sich dort, wo die Logik der Bauteile allein anhand der 3D-Punktwolke zuverlässig entschlüsselt werden kann. Ein Beispiel dafür sind die genannten Stahlkonstruktionen des 20. Jahrhunderts.

Der größte Teil der hier untersuchten Architektur besteht jedoch aus Bruchstein, Kalkmörtel, Lehmstein sowie Lehmputz und ist zudem in unterschiedlichen Erhaltungszuständen überliefert (Abbildung 12). Die Unterscheidung zwischen intentionellen Kanten und Oberflächen einerseits und zufällig durch Verwitterung sowie Zerstörung entstandenen Abbrüchen und Abwitterungen andererseits ist selbst vor Ort nicht einfach – ist aber entscheidend für die analytische Aussagekraft der Aufnahmezeichnungen.

Fragmentarisch erhaltene Bauteile finden sich nicht nur im archäologischen Kontext. In dem folgenden und letzten Beispiel eines Bürgerhauses in Neustadt an der Waldnaab wurde von dem Untergeschoss zunächst ein Querschnitt anhand einer 3D-Punktwolke erstellt (Abbildung 14a). Die Wolke ließ einige Fehlstellen im Mauerwerk unterhalb der Deckenbalkenebene erkennen. Da ihre Bedeutung aber nicht verständlich war, wurden sie nicht ausgewertet. Erst die Autopsie und Überarbeitung der Zeichnung vor Ort (Abbildung 14b) führte zu der Erkenntnis, dass die Fehlstellen auf ehemalige Balkenaufleger einer um 90 Grad gedrehten Deckenkonstruktion zurückgingen. Diese Befunde sind entscheidend für die Entschlüsselung der Baugeschichte des Hauses.



Abb. 14
Neustadt a. d. Waldnaab, Marktplatz 22:
a) Querschnitt durch das Untergeschoss nach Auswertung einer 3D-Punktwolke;
b) wie a), jedoch nach bauforscherischer Überarbeitung vor Ort (Anna Kofer; Arnold Kreisel)

In allen drei Beispielen wurde die Überarbeitung technisch mithilfe der Online-Tachymetrie durchgeführt (zu diesem Verfahren siehe [8, S. 125 f.]). Nur damit war es möglich, ergänzende Punkte an beliebiger Stelle zuverlässig aufzunehmen und die Rohauswertungen der Punktwolken nahtlos fortzuschreiben. Mit der Online-Tachymetrie hätten sich die analytischen Darstellungen in Abbildung 10, 13 und 14b auch ausschließlich vor Ort und ganz ohne 3D-Punktwolke erarbeiten lassen. Das kombinierte Verfahren erlaubte es demgegenüber, die Arbeit zu einem großen Teil im Büro und nur zu einem kleinen Teil vor Ort zu erbringen. Die Summe der Arbeitszeit für das Zeichnen jedoch wäre bei beiden Verfahren ungefähr gleich gewesen.

Alle Projektbeispiele zeigen, dass aus 3D-Punktwolken abgeleitete 2D-Modellierungen erst durch die Autopsie vor Ort Zuverlässigkeit erhalten und zu analytischen Dokumentationen werden. Bezogen auf die zu Beginn diskutierte Definition digitaler Zwillinge wird deutlich, dass mit dem kombinierten Verfahren erstellte analytische 2D-Modellierungen dem Ideal des Zwillings oft näherkommen als reine 3D-Punktwolken.

Diese Tatsache beginnen auch die Landesämter für Denkmalpflege zu berücksichtigen. In der jüngsten Ausgabe des *Leitfadens zur Dokumentation* des Landesamts für Denkmalpflege Baden-Württemberg (Dezember 2024) wird für Aufmäße der sogenannten Stufen II bis IV ein Ortsvergleich – das heißt die Autopsie – gefordert. Ab Stufe III ist diese Überprüfung zudem durch eine Fachkraft mit bauhistorischen Kenntnissen vorzunehmen.

6 Ausbildung in der analytischen Baudokumentation

Die letztgenannte Notwendigkeit führt zur abschließenden Frage, die aus universitärer Sicht bedeutungsvoll ist: Wie erwerben Studierende die Erfahrung, um aus 3D-Punktwolken 2D-Modellierungen abzuleiten, die sich vor Ort nicht als partiell unzutreffend herausstellen, sondern lediglich ergänzt werden müssen, um analytische Qualitäten zu gewinnen? Außer der Vermittlung des genannten bauhistorischen Sachverständes ist hier ein Rezept zentral, das sich in der historischen Bauforschung bewährt hat: das Schauen, Analysieren, Messen und Modellieren vor Ort. Die direkte Auseinandersetzung mit dem Objekt fördert sowohl Fähigkeiten zum Erkunden von Architektur als auch das Bewusstsein dafür, dass Bauwerke immer Unerwartetes und oft nur mit Mühe zu Entdeckendes bereithalten, sogar bei vermeintlich einfachen Konstruktionen. Die Tätigkeit im Objekt generiert die notwendige Erfahrung für die Auswahl der für das Modellieren relevanten Objektpunkte. Je mehr im Objekt modelliert wird, desto besser lässt sich abschätzen, bis zu welchem Grad 3D-Punktwolken noch zuverlässige Aussagen über Geometrie und inhaltliche Befundansprache zulassen und ab wann Fehlinterpretationen drohen.

Das ideale Werkzeug, um das Modellieren anhand gezielt ausgewählter Punkte bei gleichzeitiger Autopsie zu erlernen, ist die Online-Tachymetrie. Die damit

gesammelten Erfahrungen tragen maßgeblich dazu bei, auch bei der Fernerkundung in einer 3D-Punktwolke zuverlässige Ergebnisse zu erzielen und die Schnittstelle zur Überarbeitung vor Ort sinnvoll zu definieren. Damit wird die Tachymetrie zur Klammer in Dokumentationsprojekten auch dann, wenn darin umfangreich 3D-Punktwolken eingesetzt werden. Sie ist nicht nur das Mittel der Wahl für das Anlegen der Festpunktfelder, die für fortführbare Vermessungen unumgänglich sind: Bereits lange vorher ist sie unentbehrlich für die Ausbildung – und in der finalen, analytischen Überarbeitung vor Ort kann sie abermals eine willkommene Hilfe sein.

Literaturverzeichnis

- [1] Brilakis, Ioannis / Fischer, Hans / Pan, Yuandong / Borrmann, André / Mayer, Hermann-Georg / Rhein, Fabian / Vos, Catharina / Pettinato, Eva / Wagnern, Sigrid: *Built Environment Digital Twinning*. München: 2019.
- [2] Lu, Qiuchen / Xie, Xiang / Parlikad, Ajith Kumar / Schooling, Jennifer / Pitt, Michael: *Digital Twins in the Built Environment. Fundamentals, Principles and Applications*. London: ICE Publishing, 2022.
- [3] AlBalkhy, Wassim / Karmaoui, Dorra / Ducoulombier, Laure / Lafhaj, Zoubeir / Linner, Thomas: „Digital twins in the built environment. Definition, applications, and challenges“. In: *Automation in Construction*, 162 (2024). DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105368.
- [4] Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart (Hrsg.): *Leitfaden zur Dokumentation. Zeichnungen, Bildpläne, Fotografien*. Esslingen: 2024.
URL: https://www.denkmalpflege-bw.de/fileadmin/media/denkmalpflege-bw/publikationen_und_service/01_publicationen/06_infobroschueren/02_praktische_denkmalpflege/Leitfaden_zur_Dokumentation_Zeichnungen/Leitfaden-zur-Dokumentation.pdf, abgerufen am 11.11.2025.
- [5] Giese, Jürgen: „Im Dschungel der Aufmaßprodukte. Ergebnisformen der Bauvermessung gezielt auswählen, ausschreiben und nutzen“. In: Stefan Breitling, Jürgen Giese (Hrsg.): *Bauforschung in der Denkmalpflege. Qualitätsstandards und Wissensdistribution*. Bamberg: University of Bamberg Press, 2018, S. 143–161.
- [6] Giese, Jürgen: „Bautechnische Beobachtungen am nördlichen und nordwestlichen Mauerabschnitt in Messene“. In: Janet Lorentzen, Felix Pirson, Peter Schneider, Ulrike Wulf-Rheidt (Hrsg.): *Aktuelle Forschungen zur Konstruktion, Funktion und Semantik antiker Stadtbefestigungen*. Istanbul: Ege Yayınları, 2010, S. 85–96.
- [7] Mader, Gert Thomas: „Vergleich händischer und rechnergestützter Verfahren“. In: Ulrich Weferling, Katja Heine, Ulrike Wulf (Hrsg.): *Von Handaufmaß bis High Tech: Aufnahmeverfahren in der historischen Bauforschung*. Mainz: Philipp von Zabern, 2001, S. 108–110.
- [8] Giese, Jürgen: „Mit Laptop, Lot und Laserscanner? Lehrerfahrungen im Fach ‚Baudokumentation‘ an der Universität Bamberg.“ In: Katja Heine, Klaus Rheidt, Frank Henze, Alexandra Riedel (Hrsg.): *Von Handaufmaß bis High Tech III*. Mainz: Philipp von Zabern, 2011, S. 122–130.

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 2 Alejandro Campoverde (Mitarbeiter im Messene-Projekt); Jürgen Giese, 2006
 Abb. 3 Scan: Nils Wetter, Universität Bamberg, 2012; Bearbeitung: Jürgen Giese, 2025
 Abb. 4 Scan: Anna Kofer, Universität Bamberg, 2019; Bearbeitung: Jürgen Giese, 2025
 Abb. 7 Scan: Anna Kofer, Universität Bamberg, 2019; Bearbeitung: Jürgen Giese, 2025
 Abb. 10 Claudia Birke, Dokuplan, Erlangen; Jürgen Giese, 2021
 Abb. 11 Natascha Jordan, Universität Bamberg, 2024
 Abb. 14 Scan: Anna Kofer, Nöbauer Baubefund, Pommersfelden; Auswertung und Weiterbearbeitung: Arnold Kreisel, 2022

Alle weiteren Abbildungen stammen vom Verfasser des Beitrags (Abb. 1: 2006; Abb. 5: 2025; Abb. 6, 8, 9: 2021; Abb. 12: 2022; Abb. 13: 2024).

Andreas Bruschke

DIE BAUAUFNAHME

Ein Pflichtenheft für die Erfassung historischer Bausubstanzen

DOI: 10.60628/9783738810493-51

Die Konzeptionierung von Bauaufnahmen umfasst die systematische Planung und Sicherung der Qualitätsanforderungen, die sich aus den spezifischen Zielsetzungen und Objektbedingungen ergeben. Sie ist als Aufgabe im Sinne der DIN EN ISO 9001 [1] zu verstehen. Ein zentrales Element dieser Konzeption ist das gewählte Vermessungskonzept, das durch angemessene Mittel zuverlässige und hinreichende Informationen über das Denkmalobjekt gewinnen soll. An die Planung und Ausschreibung von Bauaufnahmen sind ganz unterschiedliche Anforderungen und Bedingungen geknüpft, denen Standardbeschreibungen nicht gerecht werden. Erforderlich sind daher adäquate fachliche Voraussetzungen ebenso wie ein gewisser Zeitaufwand. Die Konzeptionierung kann auch als eigenständige Planungsleistung vergeben werden.

1 Einleitung

„Für die Bestandsaufnahme eines historischen Gebäudes ist Planungsaufwand notwendig“, so der österreichische Architekt und Bauforscher Hermann Fuchsberger [2].

Unverzichtbar für Restaurierungs-, Sanierungs- und Umbaumaßnahmen ist eine vorausgehende vollständige sowie zuverlässige Untersuchung und Analyse des Bauobjekts – von der Konstruktion und den Materialien über Schäden bis hin zur Baugeschichte. Traditionelles Ziel von Bauaufnahmen ist sowohl die Bewahrung wertvoller historischer Substanz als auch die Einhaltung des für die Maßnahme eingeplanten Budgets. Nicht oder schlecht ausgeführte Bauaufnahmen resultieren allerdings häufig in fehlerhaften Konzepten, die überzogene Kosten und Schäden verursachen können. Diese Diskussion wird in Fachkreisen immer wieder geführt. So haben etwa fast alle Vorträge bei der Tagung „Bauforschung in der Denkmalpflege – Qualitätsstandards und Wissensdistribution“ 2015 in Bamberg entsprechende kritische Beispiele erwähnt [3].

Aufgrund der hohen technischen Anforderungen sowie der spezifischen Hard- und Softwarevoraussetzungen werden Bauaufnahmen heute von Büros mit unterschiedlichen Spezialisierungsgraden ausgeführt. Dementsprechend ist es entscheidend, die Inhalte der Aufnahme, ihren Umfang und die dafür benötigten Informationen genau zu definieren. Diese Definition wird heute teilweise noch immer mit Hinweis auf Günter Ecksteins bekannte Genauigkeitsstufen I bis IV vorgenommen [4–6]. Doch das Konzept stammt aus den 1980er-Jahren und war auch von Eckstein selbst nur als Anregung zur Ausarbeitung konkreter objektbezogener Anforderungen gedacht. Pauschal nach diesen Stufen formulierte Anforderungen lassen daher viele Fragen offen. In der Folge führen Bauaufnahmen zu völlig verschiedenen Ergebnissen, die möglicherweise nicht den gedachten Zweck erfüllen. Das Problem der Genauigkeitsstufen wurde bereits bei der 20. Natursteintagung 2014 in Stuttgart ausführlich diskutiert [7].

Der Austausch zwischen den an der Bauaufnahme Beteiligten wird aufgrund der zunehmenden Arbeitsteilung immer wichtiger. Die klare Verständigung über die unterschiedlichen Anforderungen ebenso wie die Kenntnis der Vorteile und Grenzen der eingesetzten Methoden sind entscheidend für die Qualität der Maßnahmen und damit letztlich auch für ihre Wirtschaftlichkeit. Angesichts all der verschiedenen Aufgaben von Bauaufnahmen und Dokumentationen ist es jedoch sehr schwierig, Qualitätsstandards und -normen zu schaffen, welche die Anforderungen und gewünschten Ergebnisse eindeutig festlegen. Mit der 2015 veröffentlichten ÖNORM 6250-2 [8] gab es hierfür einen neuen Ansatz.

Der Autor hat bereits in mehreren Beiträgen Vorschläge zur Qualitätssicherung geäußert [9–10]. In diesem Beitrag nun beschreibt er die systematische Erstellung eines Pflichtenhefts. Es orientiert sich an den „Austausch-Informationsanforderungen“

oder früher „Auftraggeber-Informationsanforderungen“ (AIA) im Bereich des Building Information Modeling (BIM), in denen Bauherr:innen ihre Vorgaben an die Auftragnehmer:innen definieren [11].

2 Zielsetzung

Ziel der Bauaufnahme ist die systematische Erfassung, Darstellung und Dokumentation eines Objekts. Dies ist ein komplexer Prozess mit zahlreichen Beteiligten aus ganz unterschiedlichen Fachbereichen. Der erste Schritt für die Konzeptionierung einer erfolgreichen Bauaufnahme – und damit bereits Bestandteil eines Pflichtenhefts – besteht deshalb in der umfassenden Informierung aller Mitwirkenden. Sie müssen die relevanten Projektinformationen nicht nur erhalten, sondern sich aktiv damit auseinandersetzen, um sie vollumfänglich zu verstehen. Diese Informationen beziehen sich sowohl auf das Objekt selbst als auch auf die damit verbundene geplante Maßnahme, etwa die gewünschte Genauigkeit sowie den vorgesehenen Kosten- und Zeitaufwand. Dadurch gewinnen die Personen ein eingehendes Verständnis für den eigentlichen Zweck und Kontext der Bauaufnahme. Dies ist notwendig, um das spezifische Vorgehen zu planen, wie weiter unten beschrieben. Es erlaubt den Beteiligten, sich zu vergewissern, dass sich alle unmittelbaren ebenso wie zukünftigen Aufgaben mit den verfügbaren Mitteln erfüllen lassen. Gleichzeitig bildet es eine Absicherung gegen das Risiko späterer Kostensteigerungen. Die Qualität einer Bauaufnahme definiert sich letztlich durch ihre Eignung für den jeweiligen Verwendungszweck.

Bauaufnahme und Bestandserfassung bilden die ersten Schritte denkmalpflegerischer Maßnahmen und gehen jeglicher Planung voraus. Daher müssen die Projektbeteiligten nicht nur informiert, sondern auch effektiv koordiniert werden. So detaillieren etwa David Andrews et al. in der Leitlinie *Measured and Drawn*, wie metrische Aufnahmen in enger Zusammenarbeit mit Historiker:innen, Konservator:innen und Archäolog:innen zu einer optimalen Dokumentation führen [12].

Der konkrete Aufgabenbereich für Bauaufnahmen ist sehr weit gespannt. Er reicht von der Dokumentation restauratorischer Befunde im Maßstab 1:5 und der präzisen fotogrammetrischen Vermessung gotischer Maßwerkteile für die passgenaue Fertigung von Ersatzstücken über die Erstellung von Basisplänen für Schadenskartierungen, Gebäudegrundrissen, Schnitten und Ansichten für die Ausführungsplanung im Maßstab 1:50 bis hin zu Übersichtsplänen für Gestaltungsentwürfe. Auch die erfassten Elemente variieren bedeutend. Gegenstand sind etwa Baukonstruktionen mit Details historischer Fachwerke und Mauerwerke, einschließlich der Erfassung steintechnischer Zusammenhänge, aber auch Beton- und Stahlbauten ebenso wie Ausstattungen und Architekturoberflächen.

Die zu erstellenden Dokumente – ob Grundrisse oder Schnitte, ob Ansichten und Abwicklungen – sind sowohl in ihren eigentlichen Darstellungsinhalten als auch in ihrer Informationsdichte gezielt zu konzeptionieren. Sie müssen Folgendes ermöglichen:

- Bewertung des Denkmalobjekts (als Ganzes und/oder in relevanten Details);
- Untersuchung der Bau- und Restaurierungsgeschichte;
- Beurteilung der Baukonstruktionen und des Tragwerks;
- Erkenntnis der räumlichen Zusammenhänge;
- weitere Verdichtung für Befunderhebungen und Kartierungen;
- Erstellung von Werk- und Ausführungsplanung;
- Unterstützung des Bauunterhalts oder der Wartungs- und Pflegemaßnahmen.

Allgemeines Ziel der Bauaufnahme ist es immer, die notwendigen Befunde in räumlichen Zusammenhängen maßlich und vollständig zu erfassen – und dann plausibel sowie anschaulich zu vermitteln. Aktuell steigt dabei die Nachfrage nach formgerechten Bauteilmodellen. Gleichzeitig werden die Anforderungen an die Bauaufnahme immer objektspezifischer und damit individueller, um den Besonderheiten des jeweiligen Denkmals gerecht zu werden. Diese Entwicklung wurde durch die Einführung des Building Information Modeling (BIM) verstärkt, das eine präzise und umfassende digitale Abbildung des Bauwerks erlaubt. Die Rahmenbedingungen dafür werden in den bereits erwähnten Austausch-Informationsanforderungen (AIA) festgelegt [13].

Entscheidend für den Erfolg einer Bauaufnahme ist die Definition eines objektspezifischen und zuverlässigen Vermessungskonzepts. Klassische Aufgaben der Vermessung sind die Erstellung von Längen- und Querschnittsmaßen, von Flächen- und Volumenangaben sowie von einem einheitlichen Abbildungsmaßstab. Ein solches Konzept spezifiziert in konkreter und differenzierter Weise:

- die Anforderungen an die aufzunehmenden Inhalte;
- die technischen Anforderungen an die Produkte;
- die adäquaten Vermessungstechnologien.

Die konkrete Bestimmung der für die Bauaufnahme zu erbringenden Informationen und Leistungen setzt Wissen in Bezug auf zwei Bereiche voraus: das Objekt selbst – seine räumlichen Gliederungen und Dimensionen, Ausstattungsmerkmale, Umgebungsbedingungen, Bauzeit sowie Baugeschichte – und das methodische Vorgehen. Im Folgenden werden Empfehlungen für die entsprechende Planung gegeben.

3 Inhaltliche Anforderungen

Je nach Zielsetzung der Bauaufnahme sind differenzierte Informations-, Aufnahme- und Darstellungsdichten zu definieren. Die zu erfassenden geometrischen und

beschreibenden Daten beinhalten u.a. die bauliche Umgebung und den Geländeanschluss, die Baukonstruktion (mit oder ohne Freilegungen), Baukanten und Öffnungen, Werksteine mit Fugen, Architekturformen, die Bauplastik, Ausstattungselemente und Oberflächen (ggf. mit Materialangaben, Schadensbildern usw.). Nicht immer sind all diese Daten erforderlich zu wissen, weshalb sich Listen ähnlich denen der ÖNORM bewährt haben [8]. Die zu dokumentierenden Informationen sind also genau zu definieren und mit der Fachplanung, Denkmalpflege, Bauforschung und Restaurierung abzustimmen.

Der gesamte Detaillierungs- und Ausarbeitungsgrad eines digitalen Modells wird als Level of Detail (LOD) bezeichnet bzw. häufig auch als Level of Geometry (LOG). Wie die Genauigkeitsstufen nach Eckstein [4] legen die Konzepte pauschale Abstufungen fest, z. B. von LOD 100 bis LOD 600, jedoch ohne diese wirklich zu erklären. Mit den Stufen wird versucht, den gewünschten Umfang der Vereinfachung bzw. Generalisierung festzulegen. Sie sind teils auch an Maßstäben orientiert, präzisieren aber nicht die Vorgehensweise für die Vereinfachung.

Eine formgerechte Darstellung des Objekts ist selbstverständlich. Der Verfasser dieses Beitrags versteht darunter nicht nur die Erfassung der Abweichungen von einer angenommenen Sollform (Schiefstellungen, Durchbiegungen, Ausbauchungen), sondern auch die richtige, nicht generalisierte Wiedergabe der Architekturformen, z. B. von Profilen. Die Kenntnis der Architekturformen ist zum Verständnis des Objekts notwendig. Dementsprechend ist bereits vor der Bauaufnahme zu klären, wie detailliert die Erfassung und Darstellung erfolgen sollen. So war etwa bei der Stadtpfarrkirche Steyr in Oberösterreich verlangt, die Architekturprofile ohne Generalisierung abzubilden (Abbildung 1). Bei der Erstellung von Punktwolken und Orthofotos ist dies

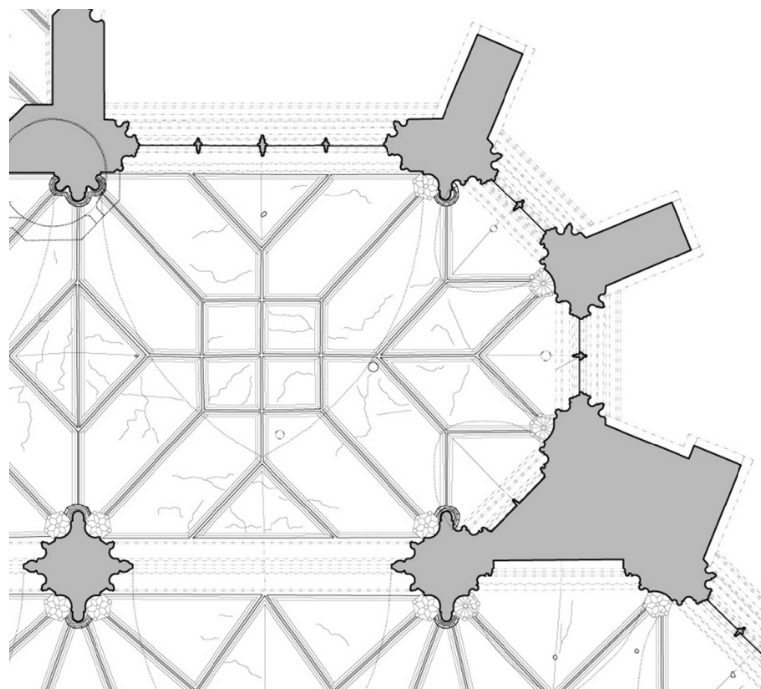


Abb. 1
Stadtpfarrkirche
Steyr in Österreich,
Ausschnitt aus dem
Emporengrundriss
mit Risskartierung des
Gewölbes (Maßstab 1:5)

durch die Definition der Objektauflösung möglich, so wie bei dem in Abbildung 2 gezeigten Orthofotodetail eines Zimmers in Schloss Neuschwanstein, Bayern.

Eine wirkliche Generalisierung bzw. Abstraktion besteht dann in der Anwendung von Symbolen, etwa für Türen, Fenster oder Elemente der Haustechnik. Dies bedarf ebenfalls einer konkreten Vereinbarung. Während die Symbole eine geometrische Generalisierung darstellen, können dazu im digitalen Modell beschreibende Informationen oder Attribute hinterlegt werden. Dieser ergänzende alphanumerische Detaillierungs- bzw. Ausarbeitungsgrad wird Level of Information (LOI) genannt. Um das Verständnis von sowohl den verwendeten Symbolen als auch den Zusatzinformationen zu gewährleisten, sind einheitliche Zeichnungskonventionen zu definieren.

4 Ordnungs- und Bezeichnungssysteme

Die Gliederung und Benennung der Gebäude und Bauteile ist vor Beginn der Bauaufnahme nach einschlägigen Regeln festzulegen. Das umfasst die Bezeichnung von Geschossen, Schnitten und Ansichten ebenso wie von Jochen und Pfeilersystemen, Raumnummern, Wänden und Öffnungen (Türen und Fenster, einschließlich Laibungsflächen). Falls sich dafür Bezeichnungen in älteren Unterlagen finden, sollten diese übernommen werden, um Verwechslungen zu vermeiden. In größeren Planbeständen erleichtern Navigationspläne und/oder Piktogramme die Übersicht.

Allgemeine Regeln helfen zwar bei der Benennung, doch oft ist die Situation nicht trivial und erfordert individuelle Entscheidungen. Bereits in der Projektvorbereitung ist somit entsprechender Aufwand einzuplanen. Das Bezeichnungssystem wird sich in



Abb. 2
Schloss Neuschwanstein, Arbeitszimmer, Ausschnitt aus einem Orthofoto (Auflösung 1 mm)

dem Planspiegel, den Navigationsplänen und den Dateibezeichnungen wiederfinden. Nachträgliche Änderungen sind daher sehr aufwendig.

5 Genauigkeit und Referenzsystem

Bei der Bauaufnahme eines Objekts reichen pauschale Vorgaben für die metrische Genauigkeit nicht aus. Die Genauigkeitsanforderungen sind relativ zur Bauteilgröße und stehen im Zusammenhang mit Maßtoleranzen – siehe DIN 18202 zu Toleranzen im Hochbau [14]. Zu beachten ist, dass sich der Toleranzbegriff des Bauwesens von dem Genauigkeitsbegriff der Vermessung unterscheidet. In letzterem Bereich werden Messergebnisse durch Signifikanzen, also nach Wahrscheinlichkeiten, beurteilt, die sich aus Mehrfachmessungen ergeben.

Vor Beginn der Bauaufnahme sind außerdem ein objektbezogenes Koordinatensystem zu definieren und der Höhenbezug zu einem Nullhorizont am Gebäude festzulegen. Zu beantworten ist dabei auch die Frage, ob es einen Bezug zu dem übergeordneten staatlichen Lage- und Höhenbezug geben muss. Spätere Änderungen dieser Festlegungen verursachen einen hohen Aufwand.

Die absolute Genauigkeit der Einmessung des Bauwerks – das heißt, die geometrische Qualität über das gesamte Bauwerk hinweg – wird mit einem geodätischen Referenznetz bestimmt. Dies lässt sich durch Ausgleichungsprotokolle nachweisen. Die relative Genauigkeit (Nachbarschaftsgenauigkeit) wird stichprobenartig kontrolliert, z. B. durch Kontrollmessungen von Querschnitts- oder Öffnungsmaßen.

6 Produkte der Bauaufnahme

Die klassischen 2D-Zeichnungen werden zunehmend durch fotobasierte, maßstabsgerechte Darstellungen wie Bildpläne, Orthofotos und Abwicklungen ergänzt oder sogar abgelöst. Selbst wenn zweidimensionale Pläne geliefert werden, erfolgt die Vermessung heute, technologisch gesehen, dreidimensional (mit Ausnahme des Handaufmaßes). 3D-Punktwolken sind das primäre Ergebnis aus Laserscans oder fotogrammetrischen Aufnahmen. Gegebenenfalls werden daraus 3D-Flächenmodelle entwickelt, z. B. texturierte Oberflächenmodelle. Die Punktwolken und Flächenmodelle wiederum sind Zwischenprodukte für entsprechende 2D-Auswertungen. Doch sie werden auch weitergegeben und stellen damit eigene Produkte dar, deren adäquate Nutzung die Vorgabe spezifischer Qualitätskriterien – und damit entsprechende Kontrollmöglichkeiten – erfordert.

Eine neue Klasse von Vermessungsprodukten sind verformungsgerechte 3D-Bauteilmodelle, exemplarisch dargestellt am Rathaus in Straubing, Bayern (Abbildung 3). Hier kommt es neben einheitlichen inhaltlichen Anforderungen an Darstellungsdichte, Detaillierungsgrad (LOD) und Informationsgrad (LOI) besonders auf die räumliche

Modellgliederung (Topologie) an. Hilfreich dafür sind Musterdateien, welche die Nutzer:innen vorgeben. Eine ausführliche Liste der Qualitätskriterien und Kontrollmöglichkeiten der 2D- und 3D-Produkte würde den Rahmen dieses Beitrags sprengen.

7 Methoden der Bauaufnahme: Technologische Rahmenbedingungen

Neben den im vorigen Kapitel beschriebenen geforderten Produkten muss das Vermessungskonzept auch die genauen Objektbedingungen berücksichtigen. Daher sind vorab u. a. folgende Fragen zu klären:

- Ist das Objekt vollständig zugänglich und begehbar oder sind Arbeitsschutzmaßnahmen (z. B. in Ruinen) und/oder Hilfsmittel nötig?
- Verhindern Bewuchs oder Mobiliar (oder auch Müll) die Sicht? Müssen das Objekt oder Bauteile freigeräumt werden?
- Müssen besuchsfreie Zeiten genutzt werden?
- Erfordert der Einsatz von Vermessungstechnik und Stativen besondere Maßnahmen zum Schutz von Kulturgut?

Die Messanordnung und Aufnahmedisposition sind so zu planen, dass die Erfassung sowohl vollständig ist als auch die gewünschte Detailauflösung besitzt. Das gilt für Messbilder und Laserscans ebenso wie für tachymetrische und händische Aufnahmen. Technologische Rahmenbedingungen müssen gleichfalls berücksichtigt werden. Die Bauaufnahme endet nicht dort, wo der Scanner nicht hindurchpasst oder wo Bauteile vom Gerätestandort aus nicht einsehbar sind. In diesen Fällen ist ein ergänzendes örtliches Aufmaß notwendig oder, im Falle hoher Bauteile, eine fotogrammetrische Erfassung. Regelmäßig ist eine Kombination mehrerer Methoden erforderlich.



Abb. 3
Rathaus Straubing,
verformungsgerechtes
3D-Bauteilmodell

Objekte nur indirekt zu erkunden, also aus rein digitalen Abbildern wie Punktwolken, führt leicht zu Fehlinterpretationen. Die Vermittlung von Bauwerken in aussagekräftigen Bauaufnahmeplänen bedarf daher nicht nur der Anwendung und eventuell Kombination bestimmter Vermessungsmethoden, sondern auch einer ausreichenden Erkundung des Objekts, die seine Konstruktionen, Architekturformen und Ausstattungsteile erhellt. Dafür sind zusätzliche Begehungen nötig. So erforderte etwa die Untersuchung der Relikte der Alten Saline auf der Pernerinsel in Hallein, Österreich (Abbildung 4), eine Erkundung im ‚Kriechmodus‘, um Details der Dachkonstruktionen zu erkennen oder originale Bauteile von nachträglichen Stützkonstruktionen zu unterscheiden.

8 Abnahme und Nachweisführung

Auch wenn Bauaufnahmezeichnungen plausibel erscheinen, sind sie nicht zwingend richtig und vollständig. Das Pflichtenheft schafft hier kontrollierbare Bedingungen für die Aufnahme. Auch für technologisch bedingte Zwischenschritte gibt es Überprüfungsmöglichkeiten. So müssen z. B. die Qualität von Punktwolken oder die Bildauflösung von Aufnahmen für Orthofotos den vereinbarten Kriterien entsprechen. Bei größeren Projekten kann eine Vorabbearbeitung von Musterflächen helfen, die notwendige Abstimmung zwischen den Projektbeteiligten herbeizuführen und gegebenenfalls rechtzeitig Korrekturen einzuleiten.

Erste Muster ebenso wie das Endergebnis werden einer Vor-Ort-Kontrolle unterzogen und förmlich abgenommen. Eine Bauaufnahme sollte immer *in situ* überprüft werden, da die Messgenauigkeit ohne Bezug zum Original nicht kontrollierbar ist. In kleinem Maßstab auf einem Monitor oder Ausdruck betrachtet, lassen sich Darstellungsungenauigkeiten oder gar Messfehler oft nicht genau erkennen.

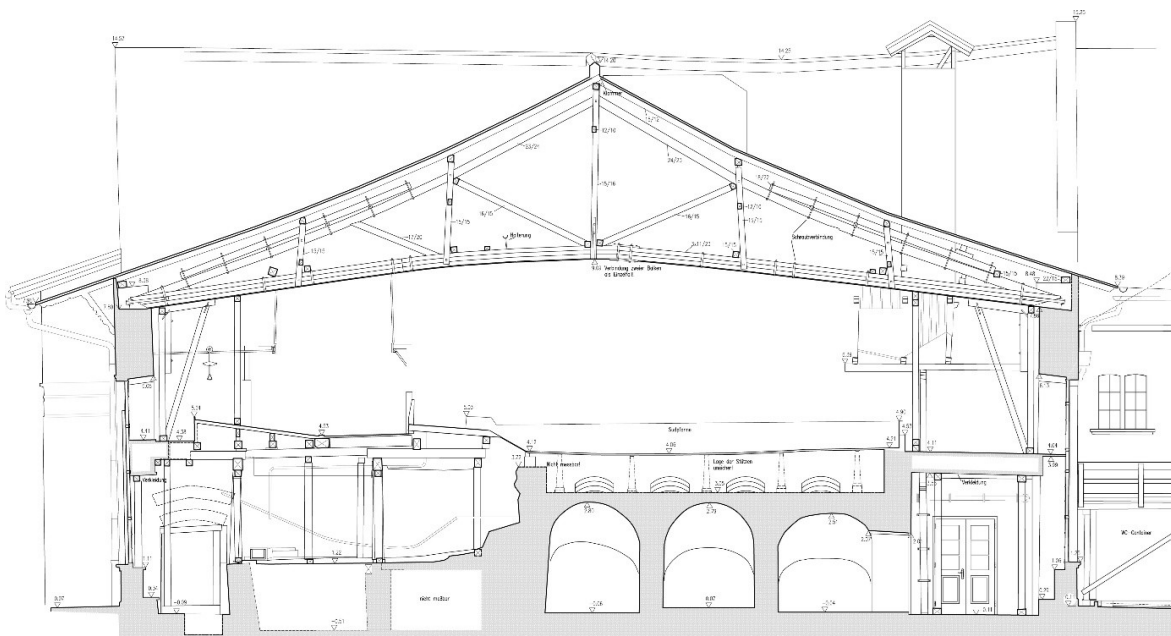


Abb. 4 Alte Saline auf der Pernerinsel, Hallein, Österreich

Die Qualitätskontrolle und Abnahme der Leistungen sollten entsprechend den vereinbarten Prüfkriterien erfolgen. Diese umfassen:

- Vollständigkeit der Inhalte;
- Richtigkeit der Darstellung;
- Einhaltung formaler Vorgaben (Darstellungs- und Namenskonventionen, Orientierungs- und Bezeichnungssysteme);
- Ortsvergleich mit stichprobenartiger Nachmessung;
- bei Orthofotos: Prüfung der fotografischen Qualität und Objektauflösung;
- bei Punktwolken: Prüfung des Punktabstands;
- bei Bauwerksmodellen: Prüfung der räumlichen Modellgliederung gemäß Projektstruktur.

Weiterhin ist es ideal, wenn die Ergebnisse der Bauaufnahme einen Hinweis auf die jeweilige Aufgabenstellung – und im besten Fall auch einen Prüfvermerk – enthalten. So ist nachvollziehbar, was ursprünglich verlangt wurde, zu welchem Zweck, und welche Inhalte weggelassen wurden. Ebenso wie sich die Qualität früherer Bestandspläne heute ohne Kenntnis der konkreten Aufgabe kaum zuverlässig beurteilen lässt, gilt dies auch für die zukünftige Nutzung moderner Bauaufnahmen.

9 Fazit

Die Planung und Ausführung von Bauaufnahmen ist eine interdisziplinäre Aufgabe. Der Austausch und die Kommunikation zwischen allen am Prozess Beteiligten gewinnen angesichts der zunehmenden Arbeitsteilung eine immer größere Bedeutung. Die klare Verständigung über die unterschiedlichen Anforderungen an die Bauaufnahme sowie die Kenntnis der Vorteile und Grenzen der eingesetzten Methoden bilden entscheidende Grundlagen für die Qualität der Maßnahmen – und damit letztlich auch für ihre Wirtschaftlichkeit. Mit den Anregungen in diesem Praxisbeitrag soll das Bewusstsein für das Thema gestärkt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN): *DIN EN ISO 9001:2015-11 Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen*. Berlin: Beuth Verlag, 2015.
- [2] Fuchsberger, Hermann: „Qualitätssicherung in der Bestandsaufnahme – das Beispiel Schöndorfer Platz in Hallein“. In: Bruschke, Andreas (Hrsg.): *Bauaufnahme in der Denkmalpflege*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2005, S. 192.
- [3] Breitling, Stefan / Giese, Jürgen (Hrsg.): *Bauforschung in der Denkmalpflege – Qualitätsstandards und Wissensdistribution*. Bamberg: University of Bamberg Press, 2018.
- [4] Eckstein, Günter: *Empfehlungen für Baudokumentationen* (Arbeitsheft 7). Landesdenkmalamt Baden-Württemberg (Hrsg.). Stuttgart: WBG Theiss, 1999.
- [5] Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN): *DIN 1356-6:2006-05 Technische Produktdokumentation – Bauzeichnungen – Teil 6: Bauaufnahmezeichnungen*. Berlin: Beuth Verlag, 2006.
- [6] Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat / Bundesministerium für Verteidigung: *Baufachliche Richtlinien Vermessung (BFR Verm)*. 4. Auflage. Berlin/Bonn, 2019.

- [7] Bruschke, Andreas: „Hoher Dom zu Fulda und Porta Nigra in Trier: Was können heutige Bauaufnahmefethoden leisten und sind die ‚Genauigkeitsstufen‘ noch zeitgemäß?“ In: *Tagungsband zur Fachtagung Natursteinsanierung Stuttgart 2014*. 2. Auflage. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2003.
- [8] Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN): *OENORMA 6250-2:2015-03-15 Aufnahme und Dokumentation von Bauwerken und Außenanlagen – Teil 2: Bestands- und Bauaufnahme von denkmalgeschützten Objekten*. Berlin: Beuth Verlag, 2015.
- [9] Bruschke, Andreas: „Denkmale erkunden, vermessen, verstehen – Ein Pflichtenheft für Bauaufnahmen“. In: *DenkMal! Zeitschrift für Denkmalpflege in Schleswig-Holstein*, 24 (2017), S. 41–49.
- [10] Bruschke, Andreas: „Vorschläge zur Qualitätssicherung von Bauaufnahmen am Beispiel der Porta Nigra in Trier“. In: *Tagungsband zur Fachtagung Natursteinsanierung Stuttgart 2018*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2018.
- [11] Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN): *DIN EN ISO 7817:2023-09 Bauwerksinformationsmodellierung – Informationsbedarfstiefe – Konzepte und Grundsätze (ISO/DIS 7817.2:2023)*. Berlin: Beuth Verlag, 2023.
- [12] Andrews, David / Bedford, Jon / Blake, Bill / Bryan, Paul / Cromwell, Tom / Lea, Richard: *Measured and Drawn: Techniques and practice for the metric survey of historic buildings*. 2. Auflage. Swindon: Public Heritage, 2010.
- [13] Bundesministerium der Verteidigung (BMVg) et al. (Hrsg.): *BIM-Handbuch – Arbeitshilfe Muster-AIA*. Bonn, Berlin: 2022.
- [14] Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN): *DIN 18202:2019-07 Toleranzen im Hochbau – Bauwerke*. Berlin: Beuth Verlag, 2019.

Abbildungsverzeichnis

Alle Abbildungen stammen von der Meßbildstelle Photogrammetrie und Architekturvermessung GmbH, Dresden (die Meßbildstelle existiert seit 2023 nicht mehr).

Eric Ewert, Ralf W. Arndt und Steffen Marx

HERITAGE BIM

Digitale Modelle in der Baudenkmalpflege

DOI: 10.60628/9783738810493-63

Seit über einem Jahrzehnt prägt Building Information Modeling (BIM) die Digitalisierung im Bauwesen – als virtuelle, verknüpfte Unterstützung für Planung und Bau. In der Denkmalpflege hingegen hat sich BIM bislang kaum etabliert, vor allem aufgrund der besonderen Anforderungen historischer Gebäude. Dazu zählen die heterogene Bausubstanz, die vielfältigen Erwartungen der Projektbeteiligten und die zeitlich rückwärtsgerichtete digitale Modellierung. Ein angepasstes Heritage BIM (HBIM) bietet hier eine Lösung, indem es unterschiedliche Formen der Bauaufnahme mit semantischer Objektmodellierung verbindet und so mehr Flexibilität bietet. Dieser Beitrag stellt den Ansatz vor und beleuchtet Voraussetzungen für eine erfolgreiche Anwendung.¹

¹ Der Beitrag basiert im Wesentlichen auf der Dissertationsschrift *Heritage-BIM – die Nutzung digitaler Modelle in der Baudenkmalpflege*, die Eric Ewert 2024 an der Fakultät Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden eingereicht hat.

1 Die Digitalisierung historischer Gebäude

Die digitale Transformation erfasst zunehmend die bauliche Planung und Praxis. In diesem Zusammenhang hat sich in vielen Ländern das BIM-Konzept als Standard etabliert, um Projekte effizienter zu planen, zu koordinieren und über den gesamten Lebenszyklus hinweg zu verwalten. Dabei werden Gebäudedaten in einem digitalen Modell zusammengeführt und in einer gemeinsamen Datenumgebung (Common Data Environment) verwaltet sowie genutzt. Verbreitete Plattformen hierfür sind z. B. „BIMPLUS“ der Firma Nemetschek oder „Trimble Connect“ von Trimble. Aus dem Modell können sämtliche Informationen zum fraglichen Objekt erhalten werden, von der Geometrie über Bauteileigenschaften bis hin zu Terminen und Kosten. Die Zentralisierung von Daten schafft zudem eine konsistente und abgestimmte Informationsbasis für Planungsentscheidungen.

Auch im Bereich von Bestandsbauten ist BIM sehr relevant, zumal in Deutschland mittlerweile ein Großteil der Bautätigkeit an bestehenden Gebäuden erfolgt [1]. Um die dort geltenden Rahmenbedingungen aufzugreifen, hat man begonnen, einen adaptierten BIM-Ansatz zu entwickeln, der sich auf die Bestandsplanung fokussiert und speziell auf die Dokumentation und Erhaltung denkmalgeschützter Bauwerke ausgerichtet ist. Der irische Forscher Maurice Murphy verwendete 2009 in einer Veröffentlichung erstmals die Bezeichnung „Historic Building Information Modeling“, kurz

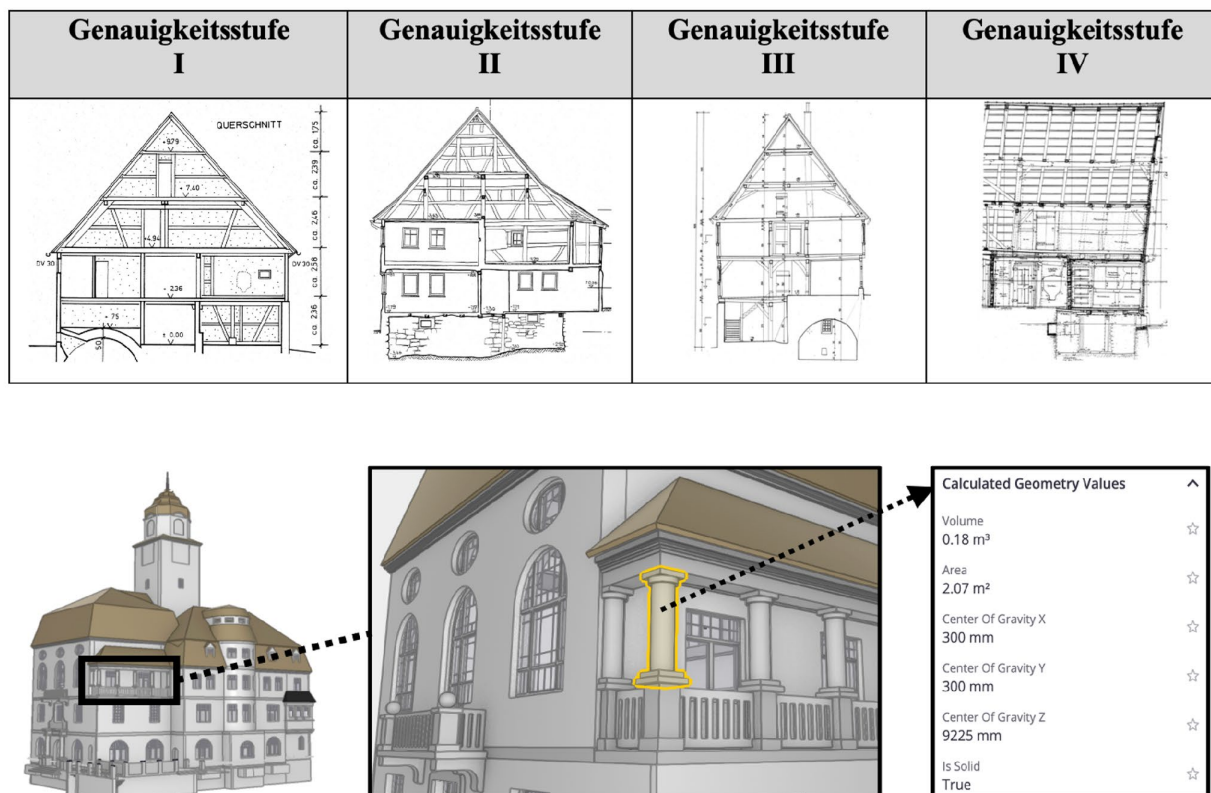


Abb. 1 Gegenüberstellung von Bestandsmodellen nach Eckstein (oben) [5] und einem Geometriemodell (unten) [6]

„HBIM“, wobei es ihm vorrangig um die semantische Gliederung unstrukturierter Bestandsdaten ging [2]. Heute spricht man generell von „Heritage BIM“ (auch „Historic BIM“). Besonders in Italien [3] und England [4] sind seitdem vermehrt Publikationen mit diesem Schlagwort erschienen. Im Wesentlichen versteht man unter HBIM eine digitale Datenbank mit optionalen geometrischen Ausprägungen, die Bauwerksdaten sammelt und verknüpft – von 3D-Laserscans über digitalisierte Archivalien und Fotos bis hin zu objektorientierten Geometriemodellen.

Während das herkömmliche BIM vor allem die Planung, Konstruktion und Ausführung neuer Gebäude unterstützt, zielt HBIM darauf ab, bestehende Bausubstanz digital abzubilden sowie die zugehörigen Datensätze zu sammeln und zu verknüpfen, um zum langfristigen Erhalt des Objekts beizutragen. Beide Ansätze basieren auf einem digitalen Bauwerksmodell, unterscheiden sich aber deutlich in ihren Vorgehensweisen und Schwerpunkten. Das betrifft insbesondere die Frage, wie die Projektbeteiligten die bestehenden praktischen Anforderungen durch neue digitale Technologien mindestens ebenso gut bedienen können wie bisher, sei es in der Datenhaltung oder der Darstellung von Bauaufmaßen. Diese Fragestellung wird am Beispiel der in der Baudenkmalpflege benötigten Detaillierungsgrade deutlich: Die in Grundriss, Schnitt und Ansicht beinhalteten Details – etwa durch Einordnung in Genauigkeitsstufen nach Günter Eckstein [5] – sind auch in digitalen Modellen abzubilden, um sie für die am Bau Beteiligten nutzbar zu machen. Damit einhergehende Änderungen im Modellierungsprozess sind hinsichtlich des Aufwands und der baupraktischen Verwendbarkeit zu bewerten (Abbildung 1).

2 Potenziale des Heritage BIM

Digitale Gebäudemodelle bieten ein Schlüsselinstrument zur integralen Projektabwicklung für alle Beteiligten – von Bauherr:innen über Denkmalbehörden und Fachplaner:innen bis hin zu restaurierenden Handwerksbetrieben. Auf Basis einer geteilten Datengrundlage können die Fachpersonen zusammenarbeiten und von ihren sich ergänzenden Perspektiven profitieren. Auch in der Baudenkmalpflege eröffnet der Einsatz von HBIM eine Reihe von Potenzialen, die weit über die Möglichkeiten herkömmlicher, an analoge Projektprozesse angelehnter Arbeitsweisen hinausgehen. Eine grafische Übersicht exemplarischer Mehrwerte ist in Abbildung 2 gegeben.

Allem voran ermöglicht ein zentralisiertes Objektmodell die Erfassung und Abbildung der Bestandsdaten. Zum einen unterstützt es die zentrale Dokumentation, Strukturierung und Verfügbarmachung von relevanten Informationen wie Geometrie, Materialität, Bauphasen, Schäden und Restaurierungsspuren ebenso wie von verlinkten Dokumenten. Zum anderen erlaubt es die visuelle Darstellung dieser Informationen in Form von Bauteilmodellierungen, und zwar in der Aggregationsstufe, die für die jeweilige Aufgabe benötigt wird.

Als Grundlage eines Objektmodells dient in der Regel ein Bauaufmaß zur geometrischen Erfassung. Letzteres wird inhaltlich erweitert durch weiterführende Untersuchungen wie Baustoffprüfungen oder eine Bauforschung oder durch Archivadokumente. Da vor größeren baulichen Maßnahmen oder Eingriffen ohnehin eine umfangreiche Bestandsaufnahme unabdingbar ist, lässt sich das für den Aufbau oder die Fortschreibung eines Objektmodells nutzen. Wenngleich das digitale Objektarchiv erst nachträglich entsteht, ist es unabhängig von analogen Ablagestrukturen und kann dauerhaft verfügbar sowie automatisiert durchsuchbar gemacht werden. Dies ist insofern hervorzuheben, als insbesondere Denkmalprojekte seit jeher unterschiedliche Disziplinen und Sichtweisen vereinen.

Eine konsistente und transparente Datenhaltung unterstützt auch Planungstätigkeiten nachhaltig. Das digitale Modell schafft eine gemeinsame Arbeits- und Kommunikationsgrundlage, dank der sich Entwürfe dreidimensional im Bestand visualisieren und abstimmen lassen. Das kollaborative Arbeiten beschleunigt Genehmigungs- und Prüfprozesse, während es gleichzeitig hilft, technische und gestalterische Konflikte zu verhindern oder frühzeitig aufzulösen. Gleiches gilt für die Kollisionsanalyse verschiedener Sanierungsszenarien, durch die z.B. Eingriffe im Bauwerk visuell simuliert, kommuniziert und analysiert werden können.

Geteilte Modellgrundlagen erlauben es außerdem den Fachplanungen, abgefragte Leistungsbilder aktiv zu unterstützen und effizienter zu bedienen. Beispielsweise



Abb. 2 Mögliche Mehrwerte von HBIM für den Planungsprozess [6]

kann die Tragwerksplanung auf Basis eines Punktwolkenmodells Verformungsbilder zur Erkennung von Setzungen und Schiefstellungen ableiten oder anhand von Orthofotos Materialkartierungen und Rissanalysen ausführen. Verwendung finden bauteilorientierte Modelle etwa bei Instandsetzungsplanungen und Mengenermittlungen.

Ein BIM-Modell dient im Idealfall nicht nur einer konkreten baulichen Aufgabe, sondern bildet ein Werkzeug für das langfristige Lebenszyklusmanagement des Objekts. Hierzu können relevante Daten zeitlich und räumlich im Modell verortet werden, sowohl in Bezug auf das Monitoring – z. B. zu Rissen, klimatischen Bedingungen und Nutzungsverhalten – als auch bezüglich einzelner Bau- und Sanierungsabschnitte. Dadurch entsteht ein dynamisches Bauwerksgedächtnis, das Veränderungen dokumentiert und während der Betriebsphase ebenfalls eine wichtige Ressource darstellt.

Neben seinem fachlichen Zweck ist BIM als Instrument der öffentlichen Informationsvermittlung und -partizipation nützlich. Dank der digitalen Objektdaten können etwa Museen oder Websites verschiedene Bauphasen anschaulich präsentieren oder virtuelle Rundgänge anbieten, auf Wunsch sogar interaktiv.

3 BIM und HBIM: Abgrenzung und Schwerpunkte

Um die Potenziale digitaler Modelle auch für Denkmalprojekte zu erschließen, ist die Arbeit damit an die entsprechenden prozessualen Rahmenbedingungen anzupassen. Wesentliche Unterschiede zwischen den beiden Methoden BIM und HBIM sind in Tabelle 1 gegenübergestellt.

Tab. 1 Abgrenzung zwischen BIM und HBIM

Abgrenzungskriterium	BIM	HBIM
Anwendungsbereich	Neubau, Planung, Ausführung	Bestandsplanung und -verwaltung
Modellbildung	Vorwärtsgerichtet, projektbegleitend	Rückwärtsgerichtet, nachträglich (Reverse Engineering)
Datenbasis (Single Source of Truth)	Modell	Bauwerk
Modellbedeutung	Entscheidungsgrundlage	Entscheidungsunterstützung
Datensätze	Überwiegend homogen	Überwiegend heterogen
Objektdefinition	Überwiegend bauteilorientiert	Überwiegend lokal orientiert
Nutzungsintention	Automatisierung, Effizienzsteigerung	Dokumentation, Datenvermittlung

Der konventionelle BIM-Ansatz resultierte im Wesentlichen aus der Arbeit mit Neubauten, um Projektprozesse und Datenhaltung zu optimieren. Das digitale Gebäudemodell entsteht parallel zur Planung: Architekt:innen und Ingenieur:innen nutzen standardisierte Bauteilbibliotheken, um ein Bauwerk am Computer zu entwerfen und

dann dem Modell sämtliche relevanten Informationen hinzuzufügen. Das Modell dient allen Beteiligten als gemeinsame, aktuelle und verlässliche Datenbasis (die sogenannte Single Source of Truth; wörtlich übersetzt „einzige Wahrheitsquelle“), die durch übergeordnete Normen und Regelwerke klar definiert ist.

Im Bestand hingegen findet die Modellbildung rückwärtsgewandt statt, beginnend mit der Erfassung des Realbauwerks. Dieser als Reverse Engineering („umgekehrte Konstruktion“) bezeichnete Ablauf unterscheidet sich grundlegend vom konventionellen BIM-Prozess bei Neubauten und bringt gänzlich andere Anforderungen mit sich. Zunächst werden detaillierte – wenngleich hinsichtlich des Datensatzes unstrukturierte – dreidimensionale Aufmaße der Objektoberflächen geschaffen, die ein erstes digitales Abbild der bestehenden Geometrie liefern. Hierfür kommen geeignete Methoden des Bauaufmaßes zum Einsatz, heute üblicherweise Tachymetrie, Laser-scanning und Mehrbildfotogrammetrie (z.B. Structure from Motion). Im nächsten Schritt werden die Daten segmentiert und in Bauteile wie Wände, Decken oder Säulen überführt. Dieser auch Scan-to-BIM genannte Prozess ist derzeit, Mitte der 2020er-Jahre, oft noch manuell auszuführen und zeitaufwändig. Die Herausforderung besteht darin, aus Millionen Messpunkten definierte Objekte mit sinnvollen Objektteilen zu rekonstruieren und ihnen die für die Projektaufgabe benötigten Attribute und Beziehungen zuzuweisen. Moderne Forschungsansätze unterstützen die semantische Segmentierung vermehrt durch maschinelles Lernen [7], doch bei der Modellierung historischer Gebäude bleibt die Anwendbarkeit dieser Technik fraglich. Für die oft individuellen, komplexen und unregelmäßigen Strukturen entsprechender Bauwerke gibt es keine parametrischen Bibliotheksobjekte, weshalb ihre Modellierung ungleich aufwendiger ist als die standardisierter Neubau-Elemente. Selbst bei manueller Modellbildung ist die Interpretation und Detailliertheit stets mit Blick auf die Aufgabe zu wählen. Zum Beispiel ist bei einer Fachwerkwand zu klären, ob diese als gesamtheitliches Wandelement, durch Wandsegmente oder durch Einzelstäbe mit Gefachen zu repräsentieren ist.

In der digitalen Denkmalerfassung werden aktuell alternative HBIM-Ansätze erprobt. So lässt sich eine Punktwolke auch durch Segmentierung und Verortung von Objektdaten über lokale Points of Interest („Interessenspunkte“) in ein Objektmodell umwandeln, ohne den Zusatzaufwand einer aktiven Modellabstraktion. Selbst der Verzicht auf eine dreidimensionale Abbildung – im Rahmen einer reinen Datenbank-anwendung – ist eine mögliche HBIM-Ausprägung.

Essenziell bei der Arbeit mit den Modellen ist ein Bewusstsein dafür, dass sie reduzierte Abbilder eines Realobjektes sind [8] und sich somit durch gewollte ebenso wie ungewollte Abstraktionen definieren. Im Neubau spielt dieser Umstand eine untergeordnete Rolle, da das Modell während des Entwurfsprozesses die detaillierteste Form des konzipierten Bauwerks darstellt und deshalb durchaus als zentrale Entscheidungsgrundlage – oder Single Source of Truth – genutzt werden kann. Im Bestand hingegen sind stets nur das Realbauwerk und verifizierte Archivalien als Primärquellen zu werten. Alle daraus abgeleiteten Modelle dienen lediglich der digitalen Repräsentation

und sind daher bloß als *entscheidungsunterstützend* zu verstehen. Sie haben ihren Nutzen in der Verbesserung von Entscheidungsprozessen, doch die finale Umsetzung und der Abgleich der Machbarkeit muss am eigentlichen Bauwerk erfolgen.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied zwischen BIM und HBIM stellt die Ausprägung der verwendeten Datensätze dar. So können im Neubau sämtliche Fachplanungen in ein homogenes Gesamtmodell zusammengeführt werden („Koordinationsmodell“), das üblicherweise im standardisierten IFC-Format (Industry Foundation Classes) vorliegt und hierdurch auch eine nahtlose Interaktion der Datenschnittstellen ermöglicht. Ein Denkmalprojekt hingegen charakterisiert sich durch eine größere Heterogenität bezüglich der Datensätze und der Anforderungen an die Projektbeteiligten, was seine Darstellung in einem universellen Einzelmodell erschwert. Diese Anforderungen reichen von der Dachaufsicht im Lageplan bis hin zur Putzbefundung am Einzelstein; von der objektorientierten, idealisierten Bauteildarstellung der Architekt:innen bis hin zur fotorealistischen Abbildung mit dem kleinstmöglichen Abstraktionsgrad für Bauforscher:innen. Das Zusammenführen in einem gemeinsamen Datenstandard erscheint schon allein aus technologischer Sicht nicht zielführend, da das Vereinheitlichen heterogener Objektdaten – etwa 3D-Geometrien, Punktwolken, Fotos, Textbeschreibungen und Messdaten – immer mit Informationsverlusten infolge von Abstraktion und Interpretation einhergeht.

In der Denkmalpflege müssen daher mehrere Teildatenbestände verwendet und verwaltet werden. In Ermangelung eines etablierten Werkzeugs zur Verknüpfung verschiedener Modellarten in einem Multimodell-Ansatz hat sich bisher die Arbeit mit voneinander unabhängigen Einzelmodellen durchgesetzt. Dies bedeutet einen gewissen Bruch mit dem Wunsch nach durchgängiger Datenkonsistenz, erscheint aber zugunsten einer funktionellen Herangehensweise vertretbar. Neben dem aufbereiteten 3D-Geometriemodell werden die ursprüngliche Punktwolke oder ein texturiertes 3D-Oberflächenmodell oft als Referenz beibehalten, da sie die vollständige, formgerechte Geometrie des Bauwerks abbilden. Informationen, die über die reine Geometrie hinausgehen (etwa historische Baupläne, Archivalien, restauratorische Befunde, Schadenskartierungen oder aktuelle Zustandsberichte), lassen sich in einer separaten Dokumentenstruktur führen und bei Bedarf mit den geometrischen Modellelementen verknüpfen. Alternativ können relevante Angaben, z.B. zu Umbauphasen oder vorangegangenen Eingriffen, als Metadaten an den Bauteilen hinterlegt werden. So lässt sich etwa die Baugeschichte über eine Attribuierung der Bauteile oder durch farbliche Markierungen im Modell sichtbar machen. Ebenso kann man Schadensbilder durch hinterlegte Fotografien oder die Einbindung von 3D-Scans der betroffenen Bereiche direkt am digitalen Modell dokumentieren. Auf diese Weise entsteht ein digitales Abbild des Baudenkmals, das sowohl Geometrie- als auch Kontextinformationen umfasst, jedoch auf mehrere Teilsysteme verteilt ist.

Um trotz fragmentierter Daten eine hohe Modellverlässlichkeit sicherzustellen, ist es entscheidend, die verschiedenen Quellen und Modelle sorgfältig zu dokumentieren und ihre jeweiligen Eigenschaften auszuweisen. Die Weiterverwendbarkeit des

Modells erhöht sich zusätzlich, wenn man dort bestimmte Informationen als Metadaten hinterlegt. Zum einen kann es sinnvoll sein, Toleranzmaße und vorgenommene Annahmen sowie Interpretationen abzuspeichern, da Bestandsdokumentationen aufgrund der verteilten Daten häufig unvollständig oder nicht validiert sind. Zum anderen können Erläuterungsberichte mit Stellungnahmen zur erreichten Qualität und den Randbedingungen der Aufgabenstellung erfasst werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Das klassische BIM im Neubau und das zeitlich jüngere Heritage BIM im Bestand basieren auf den gleichen Grundgedanken, weisen jedoch unterschiedliche Eigenschaften auf. Während BIM als einheitliche und verlässliche Single Source of Truth fungiert, ist HBIM durch eine stärkere Heterogenität der Datenquellen und iterative Prozesse geprägt. Von der Bestandsaufnahme über die schrittweise Anreicherung des digitalen Modells bis hin zur Planung von Eingriffen – es ist laufend zwischen digitalem Modell und realem Bauwerk zu vermitteln. Die Herausforderung besteht darin, trotz der verschiedenen Interpretations- und Abstraktionsebenen die Vertrauenswürdigkeit und Konsistenz des Modells sicherzustellen. Gelingt dies, wird HBIM zu einer wertvollen Entscheidungshilfe für alle Projektbeteiligten und bietet einen erheblichen Mehrwert für Dokumentation, Planung und Erhaltung historischer Bauten.

HBIM punktet vor allem durch die Verknüpfung niedrigaggregierter Bauaufnahme-Modelle mit semantisch angereicherten, aber stärker abstrahierten Objektmodellen. Dadurch können Entscheidungsprozesse am Objekt bedeutend optimiert werden. Auch deshalb gewinnt der Ansatz unter anderem im deutschsprachigen Raum seit einigen Jahren kontinuierlich an Relevanz und entwickelt sich von der Pionierphase hin zur breiteren Anwendung. Entwicklungsschwerpunkte liegen auf der Implementierung von Standards und der Vereinheitlichung von Bezeichnungssystemen. Eine gute Grundlage hierfür bietet das buildingSMART Data Dictionary (bSDD), ein internationales Online-Nachschlagewerk für Begriffe und Eigenschaften aus dem Bauwesen. Seine Erweiterung auf Aspekte des Denkmalschutzes bildete einen wichtigen ersten Schritt hin zu einer ganzheitlichen Anwendbarkeit von HBIM [9]. Weitere Faktoren, die noch vorhandene Hemmschwellen für eine konsistente Modellbildung reduzieren können, sind die Weiterentwicklung der technischen Werkzeuge für die Bestandserfassung und -modellierung sowie die Erhaltung und Langzeitverfügbarkeit von Gebäudedaten.

Solche Hemmschwellen weisen darauf hin, dass trotz der Potenziale von HBIM durchaus Hürden verbleiben. Die Initialkosten einer fundierten Modellbildung und die schwer quantifizierbaren langfristigen Effekte erschweren Bauherr:innen und möglichen Nutzer:innen die Investitionsentscheidung. Zudem bestehen in der Denkmalpflege weiterhin Vorbehalte gegenüber digitalen Methoden. Insbesondere wird befürchtet, dass entsprechende Modelle aufgrund ihrer Standardisierung nicht flexibel genug sind, um die Individualität historischer Objekte abzubilden. Auch aus diesen

Gründen sind neue Finanzierungsmodelle und Förderprogramme gefragt, ebenso wie die aktive Kommunikation erfolgreicher Praxisbeispiele und deren Mehrwerte.

Trotz offener Fragen zu Standards, Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit von Heritage BIM ist die Richtung klar: Die Zukunft der Denkmalpflege wird digital mitgestaltet. HBIM verbindet die klassischen Anforderungen mit modernen Planungstechnologien und bietet einen strukturierten Ansatz, um die Informationen zu historischer Bausubstanz digital zu erfassen, bedarfsgerecht zu nutzen und dauerhaft zu erhalten.

Literaturverzeichnis

- [1] Statista: „Struktur des Wohnungsbaus nach Neubau und Sanierung in Deutschland in den Jahren 2001 bis 2023“. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/202207/umfrage/struktur-des-wohnungsbaus-nach-art-der-bauleistung-in-deutschland>, abgerufen am 29.07.2025.
- [2] Murphy, Maurice / McGovern, Eugene / Pavia, Sara: „Historic Building Information Modelling – Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture“. In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 76 (Februar 2013), S. 89–102. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.11.006.
- [3] Conti, Alessandro / Fiorini, Lidia / Massaro, Rosanna / Santoni, Camilla / Tucci, Grazia: „HBIM for the preservation of a historic infrastructure: the Carlo III bridge of the Carolino Aqueduct“. In: *Applied Geomatics*, 14 (2022), Suppl. 1, S. 41–51. DOI: 10.1007/s12518-020-00335-2.
- [4] Historic England: *BIM for Heritage – Developing a Historic Building Information Model*. Swindon: Historic England, 2017.
- [5] Eckstein, Günter / Gromer, Johannes: *Empfehlungen für Bauaufnahmen – Genauigkeitsstufen, Planinhalte, Raumbuch, Kalkulationsrahmen*. Landesamt Baden-Württemberg (Hrsg.), 2. erweiterte Auflage. Stuttgart: o. V., 1990.
- [6] Ewert, Eric: *Heritage-BIM – die Nutzung digitaler Modelle in der Baudenkmalpflege*. Dissertation, Bauingenieurwesen. Dresden: Technische Universität Dresden, 2024.
- [7] Croce, Valeria / Caroti, Gabriella / De Luca, Livio / Jacquot, Kévin / Piemonte, Andrea / Véron, Philippe: „From the Semantic Point Cloud to Heritage-Building Information Modeling: A Semi-automatic Approach Exploiting Machine Learning“. In: *Remote Sensing*, 13 (2021), 461, S. 1–34. DOI: 10.3390/rs13030461.
- [8] Stachowiak, Herbert: *Allgemeine Modelltheorie*. Wien, New York: Springer-Verlag, 1973, S. 128–138.
- [9] Argasiński, Karol / Tomczak, Artur: „Utilising bSDD for BIM-based Heritage Asset preservation“. In: CIB W78 and buildingSMART International Summit (Hrsg.): *Proceedings of the CIB W78 Conference 2024*. Marrakesch: 2024. URL: https://itc.scix.net/pdfs/w78-2024-paper_63.pdf, abgerufen am 06.08.2025.

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1 Abbildung oben: [5]; Abbildung unten: [6]
 Abb. 2 [6]

Timo Vössing und Clemens Brünenberg

DIGITALES BEWAHREN MIT HBIM

Ein Open-Source-Versuch

DOI: 10.60628/9783738810493-73

Während sich Building Information Modeling (BIM) als Planungswerkzeug im Bauwesen etabliert hat, ist sein Pendant für historische Bauten – Heritage BIM (HBIM) – noch in der Findungsphase. Die Voraussetzungen für die Erstellung eines HBIM-Modells erscheinen klar: eine präzise Bauaufnahme und eine umfassende Bauforschung. Doch während die Bauwerksanalyse auf Messungen des Ist-Zustands basiert, lässt sich dieser Zustand im HBIM-Modell nur eingeschränkt abbilden. Es ist daher eher als digitales Bauwerksarchiv und vielschichtiges Kommunikationsmedium zu verstehen. In diesem Beitrag wird untersucht, inwiefern die Open-Source-Software Bonsai für den HBIM-Einsatz geeignet ist und welche Weiterentwicklungen nötig wären, um HBIM zu etablieren. Die Überlegungen werden anhand eines Fallbeispiels illustriert.

1 Digitale Werkzeuge in der Bauwerkserforschung

In den letzten Jahrzehnten haben sich die digitalen Werkzeuge in der Bauwerkserforschung beständig weiterentwickelt. Vor allem Methoden wie dreidimensionales Bauaufmaß, Laserscanning und 3D-Fotogrammetrie gehören mittlerweile zum Standardrepertoire, sowohl in der theoretischen Lehre an Hochschulen als auch in der Praxis. Umso mehr verwundert es, dass zahlreiche Routinen der anschließenden Analyse wieder in die Zweidimensionalität wechseln. Dies hat eine Vielzahl an Gründen, deren Behandlung nicht Ziel des vorliegenden Beitrags ist. Festzuhalten bleibt jedoch ein gewisser Mangel an guten und anwendbaren Weiterverarbeitungswerkzeugen im Dreidimensionalen. Dabei eröffnet gerade die Überführung des realen Bauwerks in ein Modell die Möglichkeit, das Wissen darüber zu sammeln und zu vernetzen. So wird der entscheidende Grundsatz der historischen Bauforschung bedient: das Bauwerk als wichtigste Informationsquelle heranzuziehen. Gleichzeitig können der digitalisierte Bauwerksbestand und sein modelliertes Abbild betrachtet, analysiert und erforscht werden. Dieser Beitrag stellt eine solche Vernetzung über die HBIM-Methodik dar, die am Beispiel des Mausoleums der Familie von Herff in Darmstadt veranschaulicht wird. Die Überlegungen dazu erfolgten im Rahmen der Masterthesis von Timo Vössing, unter Betreuung von unter anderem Prof. Dr.-Ing. Clemens Brünenberg [1].

2 Heritage Building Information Modeling

2.1 Was ist HBIM?

Die BIM-Methode ermöglicht die Erstellung digitaler 3D-Modelle, deren einzelne Elemente sich mit zusätzlichen Informationen anreichern lassen. Entwickelt wurde BIM für die Konstruktion von Neubauten, um die Daten der verschiedenen beteiligten Gewerke zu sammeln und vernetzt zu bearbeiten. Alle Projektbeteiligten können das Modell einsehen und modifizieren. So hilft das Werkzeug, die Kommunikation rund um die Errichtung eines Gebäudes zu optimieren und potenzielle Probleme noch vor der Ausführungsphase zu erkennen. Darüber hinaus dient es zur Wartung und Instandsetzung von Neubauten.

Der Nutzen von BIM auch für historische Gebäude liegt auf der Hand, weshalb seit einiger Zeit die Entwicklung von HBIM vorangetrieben wird. Sowohl die Forschung zu seinen Möglichkeiten als auch die Entwicklung selbst befinden sich noch im Anfangsstadium [2, S. 20]. Da jedoch in der bauhistorischen und denkmalpflegerischen Praxis weiterhin vor allem mithilfe zweidimensionaler Zeichnungen gearbeitet und kommuniziert wird, könnte HBIM hier auf mehreren Ebenen von Bedeutung sein [2, S. 21]: In ein und demselben Modell werden die Bestandsaufnahme, ihr abstrahiertes Modell und weiterführende Materialien zusammengefasst. Grundlage ist die Erstellung eines 3D-Modells ausgehend vom tatsächlichen baulichen Bestand, meist einer dreidimensionalen Bauaufnahme. Wie bei BIM im Neubau werden die Bauteile dabei bestenfalls

individuell modelliert, fehlende Bauteile rekonstruiert und das gesamte Modell bzw. einzelne Bauteile mit den erforderlichen Informationen versehen [3, S. 6694–6696].

Die Generierung eines HBIM-Modells umfasst eine Prozesskette aus vier Schritten (Abbildung 1):

1. Daten sammeln: Bauaufnahme mit digitalen Werkzeugen durchführen;
2. Daten filtern: Bauaufnahme auf relevante Informationen reduzieren;
3. Daten modellieren: jedes Bauteil mit einfachen Geometrien erstellen;
4. Daten prozessieren: Modell mit weiteren Informationen anreichern [4, S. 6].

Insbesondere durch den letzten Schritt, also die Anreicherung des Modells mit Informationen, unterscheidet sich HBIM von gängigen bauhistorischen Forschungsmethoden. Diese Informationen sind breit gefächert. Sie umfassen nicht nur basale Angaben wie Maße, Materialien und geografischen Kontext, sondern auch z. B. Baupläne, Schadenskartierungen, Fotos, historische Dokumente und Hinweise zu Konstruktionsmethoden oder Fachbegriffen [4, S. 7].

2.2 Was kann HBIM?

Die HBIM-Methode kann dazu dienen, eine Sanierung oder Restaurierung mit verschiedenen Beteiligten zu organisieren. Sie erleichtert die Weitergabe von Informationen, da diese direkt in das Modell eingetragen werden und somit das Modell – als Abbild des Baubestands – den Wissensspeicher darstellt. Im Idealfall erlaubt das eine effizientere Bearbeitung, während sowohl die Kosten als auch das Risiko von Missverständnissen und fehlenden Informationen sinken [3, S. 6692]. Ein weiterer Vorteil, der für den Nutzen der Methodik vielleicht sogar entscheidend ist, besteht darin, dass die Informationen in dem Modell genau an dem Bauteil hinterlegt werden können,

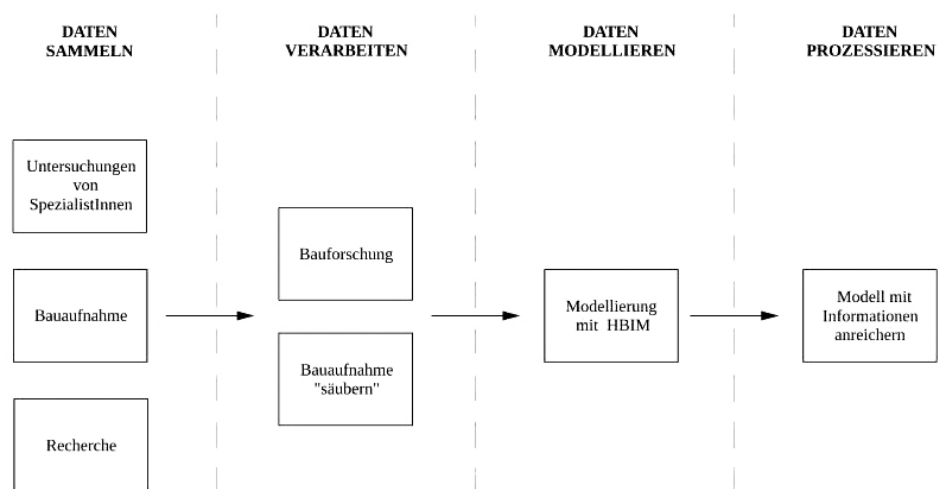


Abb. 1 Schematische Darstellung der Prozesskette zur Generierung eines HBIM-Modells

zu dem sie auch am realen Objekt gehören [2, S. 23]. Durch das Arbeiten mit HBIM wird das Auffinden und Verknüpfen von Informationen im Modell deutlich intuitiver. Gleichzeitig eröffnet es neue analytische Herangehensweisen an das Gebäude. Beispielsweise kann im Modell markiert werden, an welchen Stellen dasselbe Material oder dieselbe konstruktive Methode verwendet wurde, um dadurch Gestaltungs- oder Planungsmuster aufzudecken. HBIM ist somit mehr als nur ein Visualisierungswerkzeug, um einzelne Bauteile zu studieren: Es ermöglicht umfassende Schlussfolgerungen zu dem Gebäude.

Gerade in der Bauforschung können solche Vernetzungen innerhalb eines digitalen Modells helfen, Gebäude besser zu verstehen und z.B. ihre einzelnen Bauphasen zu identifizieren, ihre Forschungsgeschichte transparent darzustellen und letztendlich auch Entscheidungsprozesse am Modell zu dokumentieren. Dabei folgen die Planung und Durchführung von HBIM definierten Standards, wie sie beispielsweise auch bei der Erstellung von Bauaufnahmezeichnungen etabliert sind [5]. Je nach Anwendungsfall und Informationsdichte hat die EU BIM Task Group – ein auf europäischer Ebene agierendes Expert:innengremium – verschiedene Detailgrade festgelegt. Diese BIM-Standards wurden wie folgt für den Umgang mit baulichem Kulturerbe übersetzt [4, S. 4]:

- Level 0: Hierbei handelt es sich um reine CAD-Zeichnungen, die auf den vor Ort gesammelten Daten beruhen und auf Papier weitergegeben werden.
- Level 1: Die Daten im Feld – zumeist in 2,5D, d.h. mit x- und y-Koordinaten sowie Höhen – werden gemessen und ebenfalls in herkömmlichen CAD-Umgebungen weiterverarbeitet.
- Level 2: Eine umfassende digitale Aufnahme wird mittels 3D-Scanner oder -Fotogrammetrie in ein 3D-Modellierungsprogramm überführt. Auf dieser Basis wird ein Modell der Gebäude bzw. individueller Bauteile erstellt, deren einzelne Objekte wiederum über standardisierte Austauschformate wie IFC (Industry Foundation Class) in ein HBIM-Modell umgewandelt werden. IFC dient hierbei als Container sowohl für die Modellgeometrie als auch für alle angehängten Informationen.

Schon seit einigen Jahren arbeiten europäische Expert:innen der Denkmalpflege, Bauforschung und Archäologie daran, mit BIM-Software historische Gebäude abzubilden und zu erforschen. Indizien für das rege Interesse sind etwa die Konferenz „Heritage BIM in der Denkmalpflege – Innovative Strategien für Erhaltung und Monitoring“ in Mainz im März 2025 [6] und zwei entsprechende Doktorarbeiten der letzten beiden Jahre [7–8]. Darüber hinaus hat sich aus dem Forschungsdateninfrastruktur-Konsortium NFDI4Objects [9] eine interdisziplinäre HBIM-Arbeitsgruppe gebildet, der auch die Autoren dieses Beitrags angehören.

Ein viel diskutiertes Problem ist hier der – jenseits der oben aufgeführten allgemeinen Definitionen – fehlende Standard für HBIM [3, S. 669]. Bisher ist nicht festgelegt, welche Anforderungen die HBIM-Software und daraus entstehende Modelle erfüllen

müssen [3, S. 6691]. Frühe Versuche, mit BIM-Software historische Gebäude aufzunehmen, scheiterten, da die Modelle nicht detailliert genug gebaut werden konnten [3, S. 6694]. Letztendlich steht und fällt die Nützlichkeit eines Modells mit dem abbildbaren Detaillierungsgrad und der Anzahl beigefügter Informationen. Auch ist es aufwändig, historische Gebäude detailgetreu zu modellieren [3, S. 6696]: Durch Verformungen, verschiedene Bauphasen oder schlicht ihre Forschungsgeschichte sind sie meist komplexer als standardisierte BIM-Neubauten. Weiterhin sind BIM-Werkzeuge und -Bibliotheken in der Regel nicht auf historische Gebäude ausgelegt [3, S. 6705]. Beispielsweise existieren standardisierte Elemente für moderne Gebäudetechnik, doch wenn in einem Gebäude ein Loch modelliert wird, bei dem unklar ist, ob sich hier zuvor ein Fenster oder eine Tür befand, fehlt dafür oft noch die passende Definition.

Daher gibt es Bemühungen seitens der genannten HBIM-Arbeitsgruppe, Bibliotheken speziell für historische Gebäude aufzubauen. Vordringlich braucht es ein gemeinsames Vokabular, um auch die angestrebte Kommunikation zu verbessern [4, S. 6]. Eine Möglichkeit, besser auf die Bedürfnisse von HBIM einzugehen, liegt in der Nutzung und Weiterentwicklung von Bonsai – dem BIM-Modul der Open-Source-3D-Modelliersoftware Blender. Diese Software bietet z.B. gegenüber dem Branchenprimus Revit von Autodesk nicht nur den Vorteil, dass die Modellierwerkzeuge deutlich flexibler sind, sondern zudem, dass der Austausch zwischen den Werkzeugen und BIM bzw. HBIM auf dem erwähnten IFC-Standard basiert. Bonsai wurde auch im folgenden Fallbeispiel verwendet.

3 Fallbeispiel: Das Mausoleum der Familie von Herff

Als Praxisbeispiel zur Erprobung der zuvor beschriebenen HBIM-Grundprinzipien wurde das Mausoleum der Familie von Herff herangezogen. Die Bearbeitung des Falls und seine Umsetzung in HBIM erfolgten im Rahmen der Masterthesis von Timo Vössing.

3.1 Beschreibung des Mausoleums

Das zweigeschossige Mausoleum befindet sich auf dem 1828 angelegten Alten Friedhof in Darmstadt (Abbildung 2). Im Auftrag der Familie von Herff wurde es von dem Architekten Nicolas Josef van Taack-Trakranen (1898–1971) entworfen [10, S. 102]. Fertiggestellt wurde der Rundbau im Jahr 1929, wie durch eine Jahreszahl und das Signet des Architekten oberhalb der Eingangstür belegt wird. Das Mausoleum ist auf die Achsen der Friedhofswege ausgerichtet und von einem Kranz aus kleinen Höfen umgeben, in denen sich weitere Gräber befinden. Die Höfe sind miteinander verbunden, können aber durch Tore voneinander abgetrennt werden.

Der Eingang des Mausoleums befindet sich an der Nordwestfassade. Die Treppenanlage zum Eingang ist an einem der Hauptwege des Friedhofs ausgerichtet (Abbildung 2). Nach einer vierstufigen Freitreppe führt eine zweiarmige, eingefasste Treppe

zu dem Eingang des Obergeschosses (Abbildung 3), während eine schwere steinerne Tür den Eingang zur Gruft bildet.

Der Raum im Obergeschoss des Mausoleums wurde von dem deutschen Architekten Otto Fiederling im Jahr 1930 als „Gedächtnisraum“ bezeichnet [10, S. 102]. Er führt über drei weitere Türen auf einen äußeren Umgang, von dem aus ein Teil der umliegenden Höfen mit weiteren Gräbern zu sehen sind. Dies erzeugt eine beabsichtigte Abstufung in der Einsehbarkeit der Grabstätten, während gleichzeitig der Außenbereich zu einer Erweiterung des Gedächtnisraums wird.

Der Bau wird vertikal durch vier Risalite aus Muschelkalk gegliedert (Abbildung 3), die jeweils auf den Achsen der Friedhofsalleen angeordnet sind. In jedem dieser Risalite befindet sich eine der Türen, die zu dem Gedächtnisraum führen, und darüber Reliefs mit verschiedenen Motiven, die der Künstler Johannes Ilmari Auerbach (1899–1950) [11] vermutlich im Jahr 1928 angefertigt hat. Das Dach ziert eine hohe Attika aus grauem Werkstein. Darüber befindet sich das kupferne Stehfalzdach mit geringem Neigungswinkel.

Der Gedächtnisraum ist durch eine 2,5m breite Öffnung in der Zwischendecke mit der Gruft verbunden. Er wird durch eine über 4m hohe, steil ansteigende Kuppel abgeschlossen (Abbildungen 4 und 5). Passend zu den tiefen Werksteinleibungen der Türen sind Decke und Kuppel in Werksteinoptik gehalten, wobei es sich konstruktiv um ein Rabitzgewölbe handelt.

Ein großer Teil der Mauern und Wände des Mausoleums besteht aus rotgebranntem, verputztem Ziegelmauerwerk. Das im späten 19. Jahrhundert verwendete „Reichsformat“ mit den Maßen $25 \times 12 \times 6,5$ cm findet sich in nahezu allen Bauteilen des Gebäudes. Setz- und Stoßfugen haben eine Stärke von 1 bis 4 cm. Außerdem enthält der Setzmörtel einem restauratorischen Gutachten von 2024 zufolge Zement [12, S. 4]. Die Wände sind zwei bis zweieinhalb Steine stark und in unregelmäßigem Blockverband verlegt. Von außen sind sie mit einem hellen, feinkörnigen, gelb durchfärbten



Abb. 2
Das Mausoleum der
Familie von Herff auf
dem Alten Friedhof
in Darmstadt

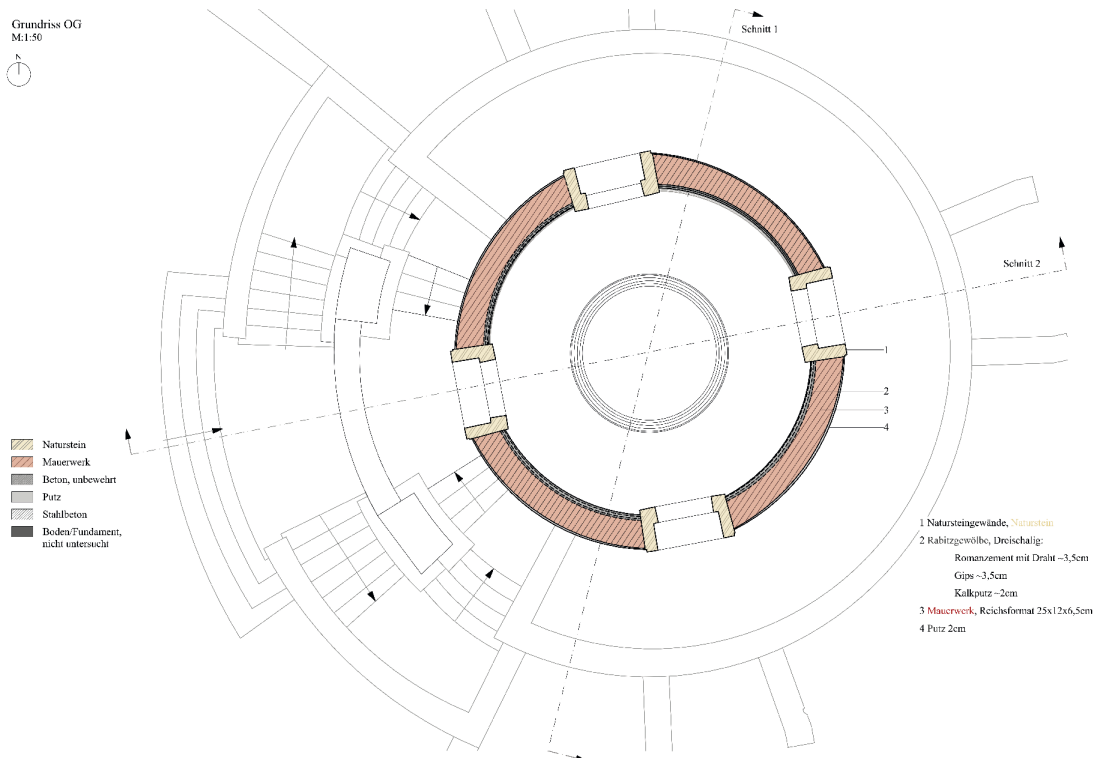


Abb. 3 Grundriss des Obergeschosses des Mausoleums von Herff. Das Gebäude ist aus Mauerwerk (rot) errichtet, mit einer Betonung der Türgewände aus Naturstein (ocker).

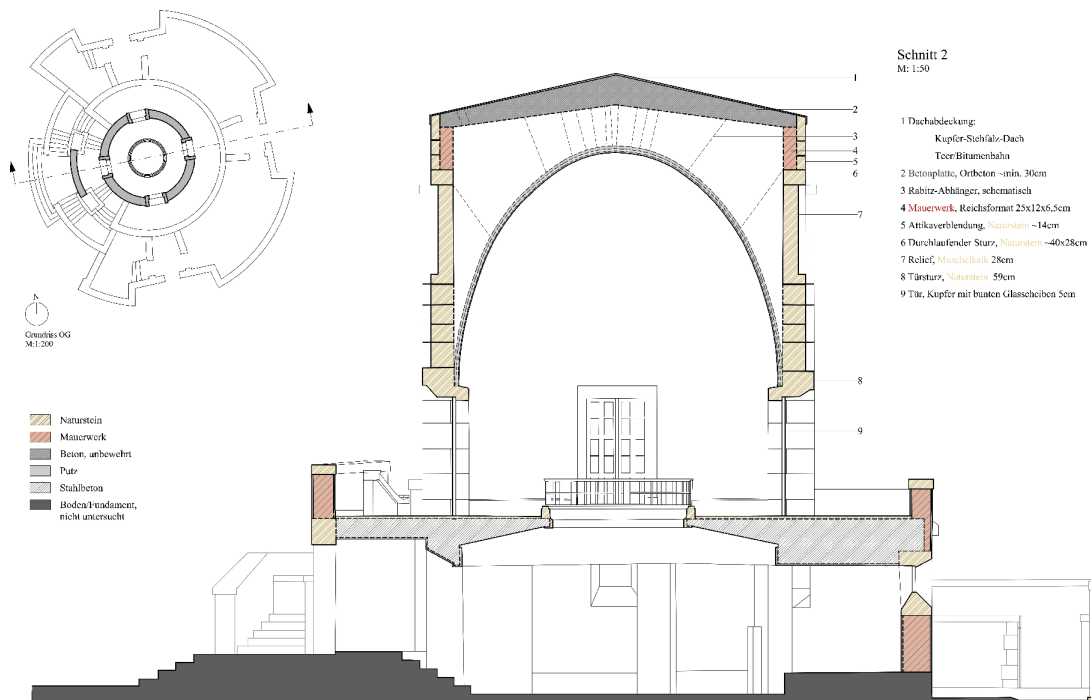


Abb. 4 Schnitt durch das Mausoleum von Herff. Zu erkennen ist neben den zwei hauptsächlich für die Konstruktion des Gebäudes benutzten Baustoffen Ziegel (terrakottafarben) und Naturstein (ockerfarben) das steil ansteigende Gewölbe im oberen Geschoss.



Abb. 5
Der Gedächtnisraum des Mausoleums
mit seinem steil ansteigenden Gewölbe
aus Natursteinimitat



Abb. 6
Restaurationswürdiger Zustand
des Mausoleums im Jahr 2024

Deckputz versehen, der mit einer Stärke von bis zu 2 mm aufgetragen wurde [12, S. 4]. Darunter befindet sich ein Grundputz mit hellem Bindemittel und gerundeten, bunten Zuschlägen. Er weist eine Stärke von 1,5 cm auf. Die Mauerkronen, die vier Risalite, die Fenstergewände und die Attika sind in Werksteinen aus grauem Muschelkalk ausgeführt, dessen Oberfläche scharriert wurde. An verschiedenen Stellen am Gebäude lassen sich spätere Um- und Überarbeitungen feststellen, etwa an den Werksteinen und der Fassade. Dabei hat man einzelne Verputzbereiche bis auf das Mauerwerk entfernt und anschließend bereichsweise grauen Zementverputz aufgetragen.

3.2 Bauhistorische Untersuchungen des Mausoleums

Insgesamt befindet sich das Mausoleum heute in einem restaurationswürdigen Zustand (Abbildung 6), der allerdings zahlreiche Informationen zu Materialverwendung, Konstruktion und Umbauten birgt. In diesem Zustand wurde das Gebäude im November 2024 mittels 3D-Fotogrammetrie und Laserscanning aufgenommen (Abbildung 7). Auf Grundlage des Bestandsmodells wiederum wurden sowohl zweidimensionale Pläne als auch das HBIM-Modell erstellt.

Für ein möglichst originalgetreues HBIM-Modell mussten zunächst verschiedene bauhistorische Analysen und Untersuchungen durchgeführt werden, von denen hier die Analyse des Rabitzgewölbes im Gedächtnisraum exemplarisch beschrieben wird. Die Frage, ob dieses Bauteil hauptsächlich aus Gips oder vielmehr aus Zement besteht, ist entscheidend, um den Umgang mit den Schäden zu planen. Zur Materialbestimmung wurden von Christian Reetz (NetzPlan-Bau) Proben aus den Bohrkernen entnommen und am Mainzer Institut für Steinkonservierung (IFS) durch Christian Soder einer infrarotspektroskopischen Untersuchung unterzogen. Dabei stellte sich heraus, dass das Gewölbe aus drei Schichten mit unterschiedlicher Mörtelzusammensetzung aufgebaut ist. Bei der auf das Drahtgeflecht aufgetragenen Schicht, die



Abb. 7 Dreidimensionale Aufnahme des Bestandes mittels Laserscanning und 3D-Fotogrammetrie

dem Mauerwerk zugewandt ist (Abbildung 8), handelt es sich um einen kalkhaltigen hydraulischen Mörtel, vermutlich ähnlich dem bis in das frühe 20. Jahrhundert weit verbreiteten Romazement. Die mittlere Schicht wird durch einen Gipsmörtel gebildet und die äußere, dem Rauminneren zugewandte Schicht ist ein in Werksteinoptik ausgeführter Steinputz.

Mit diesen Informationen wurde eine wichtige Lücke im typologischen ebenso wie baukonstruktiven Wissen zu dem Mausoleum geschlossen. Gleichzeitig wurden potenzielle Ursachen für die Wasserschäden und Rissbildungen im Gewölbe bestimmt.

3.3 Die HBIM-Modellierung des Mausoleums

Um die Funktionsweise von HBIM als Datenspeicher am Mausoleum von Herff zu erproben, wurde das Gebäude mit der 3D-Modelliersoftware Blender und dem BIM-Plugin Bonsai anhand der Bauaufnahmemodelle und -pläne nachgebaut (Abbildung 9). Die Wahl fiel auf diese Softwarelösung, da sie eine einfache und stimmige Modellierung einzelner Elemente ermöglicht. Vor allem komplexe Formen wie gekrümmte Wände und nicht normierte Werksteine lassen sich schnell darstellen (Abbildung 10). Darüber hinaus sind Blender und Bonsai als Open-Source-Software kostenfrei nutzbar. Diese Lösung eignet sich folglich insbesondere für kleinere Büros, Ämter und Universitäten, die das HBIM-Konzept testen und gegebenenfalls umsetzen möchten. Da Bonsai recht neu ist, befindet sich der von vergleichbaren Produkten bekannte Support noch im Aufbau. Das kann den Einstieg in das Programm erschweren, vor allem bei fehlender BIM-Erfahrung. Dies dürfte künftig allerdings keine größere Herausforderung mehr darstellen: Allein in den rund sechs Monaten von der ersten Modellierung des Mausoleums bis zum Verfassen dieses Beitrags hat sich die Dokumentation zu der Software, inklusive Handbücher und Tutorials, stetig verbessert.



Abb. 8

Blick durch ein Bohrloch im Dach des Mausoleums in den Raum zwischen Außenwand und Gewölbe. Klar zu erkennen ist die Struktur des Rabitzgewölbes und der Aufbau der inneren Mörtelschicht.

Um die Handhabbarkeit von HBIM in Blender zu testen, wurde zunächst ein Detaillierungsgrad des Levels 2 bis 3 verwendet. Statt also jeden einzelnen Stein zu modellieren, wurden konstruktive Gruppen, z.B. Mauerwerksverbände, als geschlossene Elemente erstellt.

Der Fokus bei der HBIM-Modellierung lag auf dem Gedächtnisraum. Jedem Element des Modells konnten nun IFC-Klassen zugewiesen werden. Dabei handelt es sich um einen Datenstandard, der Informationen zu Bauteilen enthält, etwa digitale Beschreibungen und geometrische Eigenschaften. Die in BIM-Software verfügbaren Klassen sind umfangreich, beziehen sich aber überwiegend auf Neubauten. So beschreiben sie moderne Elemente in Bezug auf Heizung, Lüftung und Klimatechnik (z.B. „IfcFlow-Controller“) oder Photovoltaik (z.B. „IfcSolarDevice“). Es gibt allerdings auch global nutzbare Klassen wie „IfcDoor“ oder „IfcWall“, die ohne Weiteres auf historische Bauwerke anwendbar sind.

Abb. 9
HBIM-Modell
des Mausoleums.
Insbesondere das
obere Geschoss
wurde detailliert
modelliert und
mit Informationen
angereichert.

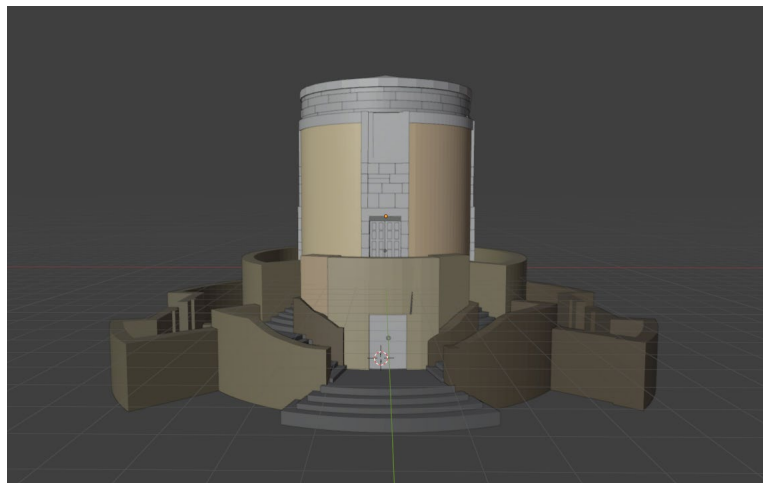
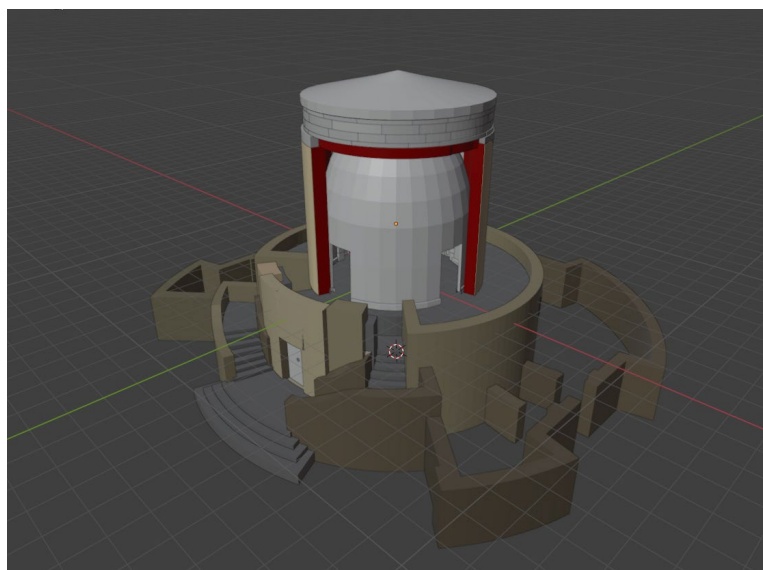


Abb. 10
Modellierung
komplexer Struk-
turen wie das
Rabitzgewölbe in
Blender



Entscheidend für die weitere Bearbeitung des Modells ist allerdings eine präzise Benennung der Bauteile, damit sie auffindbar, ansprechbar und verwendbar sind. Ausgehend von einer ersten allgemeinen Klassifizierung als z.B. „Wand“ oder „Tür“ sollte jedes Bauteil einen eigenen, konsistenten Namen erhalten. Zurzeit werden standardisierte Benennungen nach einheitlichen Vokabularen wie dem Art & Architecture Thesaurus (AAT) des Getty Research Institute [13] entwickelt, was die Kommunikation zwischen den Nutzenden eines Modells auch auf internationaler Ebene erleichtern wird.

Um diese Lücke zumindest vorerst zu umgehen, wurden die Bauteile des Mausoleummodells nach den Konventionen eines Raumbuchs benannt. So heißt die Gruft „Raum1“ und der Gedächtnisraum „Raum2“. Ausgehend von der Eingangstür wurden daraufhin die Mauerwerkswände entgegen dem Uhrzeigersinn benannt. Diesen Elementen wurden dann in Bonsai vorhandene oder neu erstellte Materialien samt zugehörigen physischen Eigenschaften zugewiesen. Im vorliegenden Fall wurde allen Mauerwerksverbänden das Material Ziegel zugewiesen und allen Natursteinelementen das Material Muschelkalk. Dadurch können sämtliche Elemente mit demselben Material gleichzeitig ausgewählt werden. Dies erlaubt weiterführende Analysen, z.B. Berechnungen des Volumens oder der statischen Abhängigkeiten.

Anhand mehrerer Beispiele wurde im nächsten Schritt ausprobiert, wie bzw. inwiefern sich die einzelnen Modellbauteile mit Informationen aus der Bauforschung anreichern lassen – etwa mit Gutachten zu Materialproben oder mit Informationen zu Wasserschäden (Abbildung 11). Trotz einiger technischer Hürden, z.B. einer

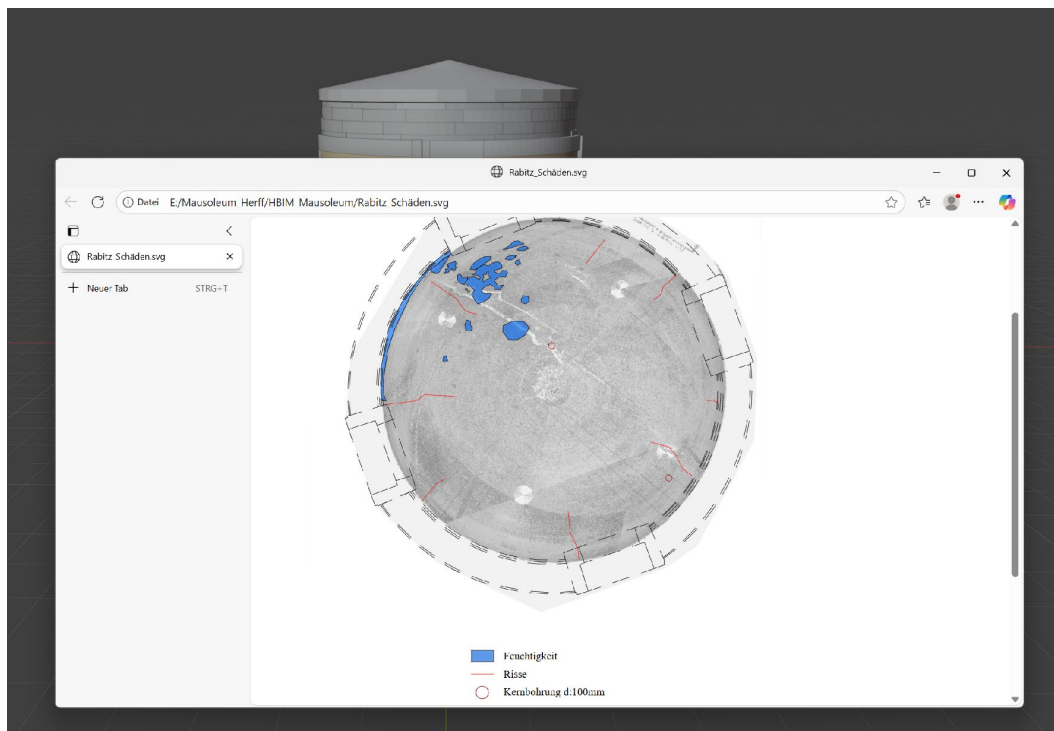


Abb. 11 Informationen zu Wasserschäden im Rabitzgewölbe des Mausoleums von Herff können in Bonsai hinterlegt werden.

unpräzisen geometrischen Verortung und eingeschränkten Dateiformatoptionen, ist die Anreicherung mit Informationen möglich. Die resultierende Projektbibliothek wirkt etwas unstrukturiert, kann jedoch alle relevanten Informationen zum Bauwerk enthalten. Dies ist ein entscheidender Vorteil der HBIM-Methodik.

Ebenso wie die Bauteile müssen auch die dazugehörigen Informationen nach einem stringenten System benannt werden, damit sie bei steigender Modellkomplexität zweifelsfrei zuweisbar bleiben. Als sinnvoll hat sich eine Benennung in Übereinstimmung mit dem Bauteil erwiesen. So beginnen beispielsweise alle Datensätze mit Informationen zum Mausoleumgewölbe mit „Rabitz_“. Trotz mancher Schwierigkeiten bei der Informationszuweisung sind die Autoren davon überzeugt, dass auch diese Funktion der noch jungen Open-Source-Software im Laufe der Zeit den Routinen proprietärer Software angeglichen wird.

4 Fazit

HBIM hat nach Ansicht der Autoren insbesondere für interdisziplinäre Zusammenarbeit wie in der Bauforschung und Denkmalpflege großes Potenzial. Mit der Erstellung eigener HBIM-IFC-Klassen und der damit einhergehenden Vereinheitlichung des verwendeten Fachvokabulars werden sowohl die Modelle als auch die daraus gewonnenen Analysen vergleichbar und weiterverwendbar. Für die Bauteilbezeichnung kann grundsätzlich auf in der Denkmalpflege bewährte Gliederungssysteme zurückgegriffen werden. Langfristig ist jedoch die Entwicklung internationaler Bezeichnungsstandards essenziell, um eine gemeinsame Nutzung und Bearbeitung von Modellen in größeren, (bundes-)länderübergreifenden Zusammenhängen zu ermöglichen. Neben den in diesem Beitrag beschriebenen technischen Hürden im Open-Source-Versuch gilt es vor allem, die in der praktischen Anwendung so kostbare Ressource Zeit zu beachten. Doch der zunächst kaum im Alltag zu bewältigende Mehraufwand einer sauberen (Daten-)Modellierung kann gewinnbringend sein. Er liefert nicht nur aufbereitete und erweiterbare Modelle eines Denkmalbestands, sondern vielmehr klar strukturierte Kommunikations- und Analysetools. Dies ist umso relevanter, da der HBIM-Ansatz den Forschungsgegenstand selbst – also das Bauwerk bzw. sein Abbild mit all seinen Einzelementen – in einen Wissenscontainer verwandelt.

Literaturverzeichnis

- [1] Vössing, Timo: *HBIM in der Bauforschung und Denkmalpflege am Beispiel des Mausoleums der Familie von Herff in Darmstadt*. Masterarbeit (unveröffentlicht) an der Hochschule RheinMain, Fachbereich Architektur, Wintersemester 2024/25. Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Friedmar Voormann (Hochschule RheinMain), Prof. Dr.-Ing. Clemens Brünenberg (TU Darmstadt).
- [2] Böhl, Franziska: „Geschichte digital vermessen“. In: *Einblicke Forschungsmagazin 2023*. Leipzig: Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig, 2023, S. 19–23.
- [3] Lovell, Lucy J. / Davies, Richard J. / Hunt, Dexter V. L.: „The Application of Historic Building Information Modeling (HBIM) to Cultural Heritage: A Review“. In: *Heritage*, 6 (2023), S. 6691–6717.

- [4] Pocobelli, Danae P. / Boehm, Jan / Bryan, Paul / Still, James / Grau-Bové, Josep: „BIM for heritage science: a review“. In: *Heritage Science*, 30 (2018), 6, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40494-018-0191-4>.
- [5] Eckstein, Günter: *Empfehlungen für Bauaufnahmen. Genauigkeitsstufen, Planinhalte, Kalkulationsrahmen*. Stuttgart: Landesdenkmalamt Baden-Württemberg, 1986.
- [6] Architekturinstitut der Hochschule Mainz: „Heritage BIM in Monument Preservation – Innovative Strategies for Preservation and Monitoring“. URL: <https://architekturinstitut.hs-mainz.de/projects/HBIM-Worms-Conference>, abgerufen am 11.07.2025.
- [7] Ewert, Eric: *Heritage-BIM – die Nutzung digitaler Modelle in der Baudenkmalpflege*. Dissertation an der Technischen Universität Dresden, Fakultät für Bauingenieurwesen. Verteidigung der Dissertation am 19.09.2024; Publikation ausstehend.
- [8] Viehmann, Ilka: *HBIM - Gebäudeinformationsmodelle als Werkzeug der Bauforschung und Denkmalpflege*. Dissertation an der Technischen Universität Darmstadt, Fachbereich Architektur. Verteidigung der Dissertation voraussichtlich im ersten Quartal 2026.
- [9] NFDI4Objects: *NFDI4Objects in der NFDI*. URL: <https://www.nfdi4objects.net/about/wie-wir-funktionieren>, abgerufen am 11.07.2025.
- [10] Fiederling, Otto: „Mausoleum der Familie V. Herff – Darmstadt“. In: *Deutsche Kunst und Dekoration: Illustrierte Monatshefte für moderne Malerei, Plastik, Architektur, Wohnungskunst u. künstlerisches Frauen-Arbeiten*, 66 (1930), S. 102–105.
- [11] Datenbank der Forschungsstelle für Biografien ehemaliger Bauhaus-Angehöriger (BeBA): „Auerbach, Johannes Ilmari“. URL: <https://bauhaus.community/person/26>, abgerufen am 11.07.2025.
- [12] Schaack, Natalie: *Mausoleum der Familie von Herff, Restauratorische Voruntersuchung, Außenhülle, Kurzbericht* (unveröffentlichter Bericht). 2024.
- [13] Art & Architecture Thesaurus (AAT): *Was ist der AAT?* URL: https://www.aat-deutsch.de/aat_info, abgerufen am 11.07.2025.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 8 Christian Reetz, Ingenieurbüro NetzPlan-Bau, Mühlthal und Darmstadt

Alle weiteren Abbildungen stammen von Timo Vössing.

Sebastian Krück

DAS ASSET-INFORMATIONSMODELL IM BESTAND

Gestaltung des Workflows

DOI: 10.60628/9783738810493-87

Der Beitrag stellt einen Workflow vor, mit dem Asset-Informationsmodelle (AIM) speziell für historische Bauwerke entwickelt und genutzt werden können. Zur gezielten Einbindung denkmalpflegerischer Anforderungen in das Asset-Informationsmodell werden die Vorgaben des deutschen BIM-Handbuchs für den Bundesbau mit dem H-AIM-Leitfaden der staatlichen Denkmalpflegebehörde Englands (Historic England) kombiniert und an die Systematik der ISO 19650 angepasst. Die methodischen Vorteile des Ansatzes werden herausgearbeitet, aber auch bestehende normative und technische Lücken benannt. Der Beitrag unterstützt damit die Erarbeitung eines standardisierten HBIM-Prozesses in Deutschland und verdeutlicht den weiteren Forschungsbedarf auf diesem Gebiet.

1 Einführung

Präzise Informationen sind essenziell für einen angemessenen Umgang mit Gebäuden, insbesondere mit historischen. Nur auf Grundlage genauer Kenntnisse – z.B. über die Konstruktion, die verwendeten Materialien und die Bau- sowie Restaurierungsgeschichte – lassen sich Instandhaltungs-, Reparatur- und Umbaumaßnahmen fachgerecht planen und umsetzen. Doch trotz des in den einschlägigen Fachdisziplinen etablierten Instrumentariums zur Bauaufnahme und -analyse fehlen einheitliche Schnittstellenstandards und interoperable Datenformate für eine konsistente und langfristige digitale Dokumentation sowie Nutzung der gesammelten Informationen.

Building Information Modeling (BIM) ist ein Ansatz für eine solche nachhaltige, interdisziplinäre Verwendung und Verwaltung von Gebäudedaten über alle Lebenszyklusphasen hinweg. Im Mittelpunkt steht der kontinuierliche, modellbasierte und verlustfreie Austausch von Informationen über ein Gebäude oder Bauvorhaben [1]. Die BIM-Methodik wurde mit dem Ziel entwickelt, Datenverluste im Planungs- und Bauprozess eines Gebäudes zu minimieren und die Zusammenarbeit zwischen den Beteiligten zu verbessern. In zahlreichen Ländern, darunter die USA und Singapur, ist BIM seit vielen Jahren etabliert. In Deutschland findet seit 2022 eine schrittweise Einführung für öffentliche Bauvorhaben statt. Ab 2027 sollen alle entsprechenden Vorhaben mit einem Volumen von über 500.000 Euro nach der BIM-Methodik realisiert werden [2, S. 14]. Sowohl international als auch in Deutschland liegt der Schwerpunkt der entwickelten Richtlinien, Softwarelösungen und Verfahren bisher auf Anwendungen im Neubau. Das gilt ebenso für das BIM-Handbuch für den Bundesbau, das zur Unterstützung der Anwendung dieser Methodik nach dem Stand der Technik für öffentliche Auftraggebende entwickelt wurde und derzeit zwölf Arbeitshilfen sowie drei Dokumentvorlagen umfasst [3].

Der Ansatz des Historic BIM (HBIM) soll daher die Anwendung der BIM-Methodik auf historische Gebäude erlauben, unter Berücksichtigung ihrer schützenswerten Eigenschaften und besonderen Gestaltungsmerkmale [4]. Neben technischen Hürden sind jedoch insbesondere die Standardisierung und Methodik lückenhaft, was die Umsetzung eines HBIM-Projekts in Deutschland nach dem aktuellen Stand der Technik erheblich erschwert. Die folgenden Überlegungen zur Entwicklung eines strukturierten Workflows zur Erstellung eines Asset-Informationsmodells für ein denkmalgeschütztes Objekt basieren auf der Masterarbeit des Verfassers im Studiengang Digitale Denkmaltechnologien an der Universität Bamberg [5]. Das Vorgehen kombiniert Ansätze aus Deutschland und Großbritannien.

2 Entwicklung eines Workflows zur Erstellung eines Asset-Informationsmodells für ein historisches Gebäude in Deutschland

Grundlegende Begriffe und Verfahren für die BIM-Methodik sind in der ISO-19650-Reihe festgelegt, die auch in deutscher Fassung als DIN EN ISO 19650 (DIN EN ISO 19650-1) vorliegt [6]. Für die Anwendung der BIM-Methodik wird darin zwischen zwei grundlegenden Zielen unterschieden:

- Das Projektinformationsmodell (PIM) wird im Planungs- und Ausführungsprozess entwickelt und soll diese beiden Phasen unterstützen.
- Anschließend wird ein Asset-Informationsmodell (AIM) erstellt, um die Betriebs- oder Nutzungsphase eines Bauwerks zu begleiten.

Die Daten der zwei Informationsmodelle sollten als Grundlage für die Erstellung des jeweils anderen Modells verwendbar sein, z. B. wenn die Nutzungsphase in eine Umnutzung übergeht oder umgekehrt. Leitlinien für beide Modellarten wurden von der staatlichen Denkmalpflegebehörde Englands, Historic England, veröffentlicht [4] [7]. Im Folgenden werden die wichtigsten Aspekte für die Anwendung von HBIM nach diesen Leitlinien herausgearbeitet. Im zweiten Schritt wird die Arbeitsmethode nach dem BIM-Handbuch für den Bundesbau vorgestellt. Anschließend werden die beiden Ansätze zu einer Methode zusammengefasst.

2.1 HBIM-Ansatz von Historic England: Entwicklung eines Asset-Informationsmodells

Referenz- und Forschungsprojekte in England haben gezeigt, dass der Einsatz von BIM für historische Gebäude zu ähnlich positiven Effekten führt wie im Bereich des Neubaus [4, S. 2]. Besondere Anforderungen eines (denkmalgeschützten) historischen Gebäudes können beispielsweise die Planung von Konservierungs- und Restaurierungsarbeiten oder die Unterstützung der Bauforschung in Form einer Datenbank sein [4, S. 5]. Im Unterschied zu regulären baulichen Maßnahmen oder Aktivitäten sind bei einem denkmalgeschützten Gebäude vor der Planung und Durchführung von Arbeiten zunächst sämtliche schützenswerte Merkmale der Bauteile zu erfassen und analysieren; diese sind in allen nachfolgenden Arbeitsschritten zu berücksichtigen. Schützenswerte Elemente sind beispielsweise gestalterische Merkmale (z. B. Fassadengestaltung, historische Fenster und Türen, Dachformen), konstruktive Merkmale (z. B. Bauweise, originale Tragstrukturen) und Oberflächenbearbeitungen (z. B. handwerkliche Bearbeitungsspuren, Farbschichten). Dafür ist eine umfassende und korrekte Datenbank unerlässlich, in der erhaltenswerte Bauteile mit sowohl räumlicher Eingrenzung als auch fachlicher Einordnung hinterlegt sind [7, S. 27].

Um sicherzustellen, dass die zusammengetragenen Daten verwertbar sind, ist die Arbeit nach etablierten internationalen und nationalen Standards essenziell. Dabei besteht die Schwierigkeit, dass denkmalpflegerische Anforderungen und spezifische Merkmale von Denkmälern in den Normen kaum erfasst sind. Daher müssen die Beteiligten die Prozess- und Modellierungsspezifikationen projektspezifisch definieren und gemeinsam einhalten.

Das zu erstellende H-AIM soll das Asset Management durch die gemeinsame Erfassung, Verwaltung und Bereitstellung von Gebäudeinformationen über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes hinweg unterstützen [7, S. 13; Originaltext: „the collaborative production, management and delivery of building information across a building’s lifecycle“]. Abbildung 1 zeigt die im Leitfaden vorgeschlagenen Arbeitsschritte.

Als Grundlage für den Betrieb einer (denkmalgeschützten) Immobilie werden zu Beginn die Entwicklung einer übergreifenden Strategie für das Kulturgütermanagement (Heritage Asset Management Strategy bzw. Heritage AMS) und eines objektspezifischen Plans für das Kulturgütermanagement (Heritage Asset Management Plan bzw. Heritage AMP) vorgeschlagen [7, S. 9 ff.]. Diese beiden Schritte sind zunächst unabhängig von der Anwendung der BIM-Methodik gemäß ISO 19650-1 [6]. Ausgehend von einer Analyse der Anforderungen der betreibenden Organisation und des Betriebs der abzubildenden Liegenschaft folgt die Ermittlung der übergreifenden organisatorischen Informationsanforderungen (Organisational Information Requirements, OIR) und der liegenschaftsbezogenen Asset-Informationsanforderungen (Asset Information Requirements, AIR). Sowohl für die Entwicklung der grundlegenden Asset-Management-Dokumente als auch für die Ableitung der Informationsanforderungen empfiehlt Historic England einen breit angelegten Partizipationsprozess, der alle am Informationsfluss beteiligten Parteien und die betreffende Liegenschaft miteinbezieht [7, S. 23 ff.]. Die erforderlichen Informationen werden dann in einer Form beschafft, die für die spätere Integration in das H-AIM geeignet ist.

Schließlich werden die verfügbaren Daten zu einem H-AIM zusammengeführt. Dabei können auch vorhandene Ressourcen und Systeme genutzt werden, wobei bestehende ebenso wie neu erworbene Daten zu validieren und verifizieren sind [7, S. 32]. Um

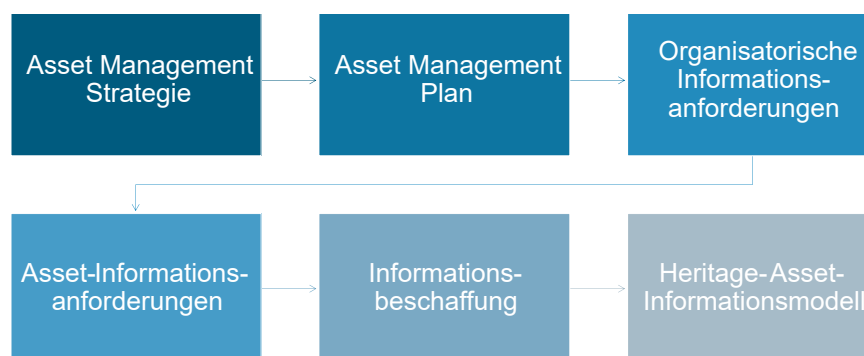


Abb. 1 H-AIM-Workflow nach Historic England (orientiert an [7, S. 14])

einen Nutzen über den gesamten Lebenszyklus hinweg zu erzielen, ist eine kontinuierliche Pflege des H-AIM erforderlich, wofür geeignete Prozesse etabliert werden müssen. Entscheidend ist dabei ein Informationsfluss, der, wie erwähnt, alle Beteiligten involviert. Die Bedeutung eines dreidimensionalen Gebäudemodells tritt besonders in der Einführungsphase des H-AIM in den Hintergrund. Die H-AIM-Richtlinie bezeichnet 3D-Modelle bei der Einführung eines BIM-Ansatzes für die Verwaltung historischer Gebäudedaten zwar als wünschenswert, aber nicht als zwingend erforderlich [7, S. 44; Originaltext: „In adopting a BIM approach for the management of historic building data, it is suggested that 3D models might be desirable but they are not a necessity“].

Das beschriebene Verfahren setzt somit ISO 19650-1 in Beziehung zu den Anforderungen an den Betrieb eines historischen Gebäudes – und ergänzt einerseits vorangehende Analysen und Konzepte sowie andererseits nachfolgende Routinen zur Datenpflege. Im Detail wird immer auf britische Normen verwiesen, weshalb das Verfahren nicht eins zu eins auf Deutschland übertragbar ist.

2.2 BIM in Deutschland

Für die Anwendung der BIM-Methodik steht in Deutschland bei öffentlichen Bauvorhaben das oben genannte BIM-Handbuch für den Bundesbau zur Verfügung. BIM Deutschland bietet die Arbeitshilfen auch für private Akteur:innen zum Download an [8]. Die Methode orientiert sich stark an einem Bauprozess mit – folgende Begriffe stammen aus der ISO 19650 – Informationsbesteller (Auftraggeber) und Informationsbereitsteller (Auftragnehmer) und fokussiert somit auf die Erstellung eines Projektinformationsmodells (PIM). Zunächst wird ein mehrstufiger Prozess zur Ermittlung der Informationsanforderungen des Auftraggebenden durchlaufen, was mit der Definition der BIM-Ziele beginnt. Abbildung 2 zeigt den BIM-Arbeitsablauf in vereinfachter Form.

Neben den Normen der DIN-EN-ISO-19650-Reihe wurde für die Entwicklung des BIM-Handbuchs auch die VDI-Richtlinienreihe 2552 „Building Information Modeling (BIM)“ herangezogen. In einigen Fällen weicht die Vorgehensweise erheblich von

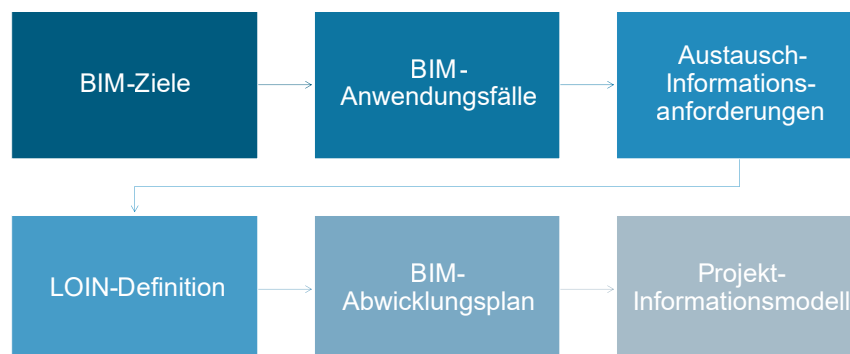


Abb. 2 BIM-Arbeitsablauf nach dem BIM-Handbuch für den Bundesbau

der reinen Arbeitsweise gemäß ISO 19650 ab. Dies gilt vor allem für die ersten Arbeitsschritte mit der Definition der BIM-Ziele und Anwendungsfälle. BIM-Ziele sind diejenigen Ziele, die Auftraggebende durch Anwendung der BIM-Methodik erreichen möchten. Sie werden individuell definiert [9, S. 301], wobei zwischen übergeordneten strategischen Zielen und Projektzielen unterschieden wird [13, S. 16].

Auf Grundlage der BIM-Ziele werden die sogenannten BIM-Anwendungsfälle abgeleitet. Dazu heißt es: „Ein BIM-Anwendungsfall beschreibt die Umsetzung eines bestimmten Prozesses oder Arbeitsschritts unter Verwendung der BIM-Methodik. Die Umsetzung von BIM-Anwendungsfällen dient der Erreichung von BIM-Zielen“ [2, S. 16]. Für die Definition von Anwendungsfällen steht die VDI/DIN-EE 2552 Blatt 12.1. zur Verfügung [10]. Darin werden die mit jedem Anwendungsfall verbundenen Aktivitäten oder Prozesse und die daraus resultierenden Informationsbedarfe (Level of Information Need, LOIN) beschrieben [vgl. 11, S. 4 ff.].

Die vom Auftragnehmer zu definierenden Spezifikationen fließen in ein zusammenfassendes Dokument ein – die Austausch-Informationsanforderungen (AIA) oder international Exchange Information Requirements (EIR). Diese fassen „die Anforderungen des Auftraggebers an die vom Auftragnehmer zu liefernden Informationen unter Berücksichtigung der definierten BIM-Ziele und Anwendungsfälle“ zusammen [12, S. 4]. Sie sollten zu Projektbeginn projektspezifisch definiert werden [12, S. 11] und ein Vertragsbestandteil werden [13, S. 6].

Im Rahmen der AIA werden die Qualität und Quantität der Informationslieferung ebenso wie Meilensteine, d. h. Zeitpunkte für die Übermittlung, festgelegt [12, S. 4 f.]. Darüber hinaus werden Rollen, Prozesse und technische Rahmenbedingungen für die Projektumsetzung beschrieben [12, S. 7 ff.]. Dies kann für alle Lebenszyklusphasen erfolgen [13, S. 5]. Bestimmte Themen, etwa die detaillierte Darstellung des Informationsbedarfs, sind in separaten Anhängen zur AIA festzuhalten. Für die Dokumentation der AIA steht eine Word-Vorlage zur Verfügung [14].

Mit der vollständigen Erstellung der AIA und der dazugehörigen Anhänge sind alle Vorgaben der Auftraggebenden definiert. Die entsprechenden Leistungen werden dann ausgeschrieben. Die Auftragnehmer (im Sinne der ISO 19650 „Informationsbereitsteller“) erstellen dann einen sogenannten BIM-Abwicklungsplan (BAP oder engl. BIM Execution Plan, BEP). Dieser legt fest, wie die in den AIA beschriebenen Informationsanforderungen und die darin enthaltenen weiteren Vorgaben zu erfüllen sind [12, S. 12]. Der BAP wird daher ebenfalls projektspezifisch erstellt sowie während der Projektumsetzung kontinuierlich aktualisiert und hat den Charakter einer BIM-Spezifikation [13, S. 6]. So werden beispielsweise die zu verwendenden Softwarelösungen benannt, aber auch die in der AIA definierten Prozesse und Spezifikationen für die Modellierung festgelegt [vgl. 1, S. 17].

2.3 Kombination der beiden Ansätze

Der in der Historic-England-Leitlinie für die Entwicklung eines Asset-Informationsmodells skizzierte Ansatz stellt sicher, dass die schützenswerten und gestalterischen Merkmale eines denkmalgeschützten Gebäudes bei der Entwicklung eines Asset-Informationsmodells angemessen berücksichtigt werden. Hierzu dienen insbesondere die Entwicklung der Asset Management Strategy und des Asset Management Plan sowie der partizipative Ansatz zur Ableitung der Informationsanforderungen. Diese Ansätze lassen sich sehr gut auf Deutschland übertragen. Die H-AIM-Richtlinie verweist jedoch stets auf entsprechende britische Standards.

Im Folgenden wird das grundlegende Vorgehen zur Berücksichtigung denkmalpflegerischer Belange aus der H-AIM-Richtlinie abgeleitet. Allerdings ist die langfristige Verwendbarkeit der Arbeitsergebnisse mit Blick auf die in Deutschland etablierten Vorgaben und Arbeitsweisen sicherzustellen. Als Basis für den zu entwickelnden Prozess wird daher die Grundstruktur der im BIM-Handbuch dargelegten Arbeitsweise verwendet, zusammen mit Elementen wie der Definition von BIM-Zielen zu Prozessbeginn und der darauf aufbauenden Ableitung von Anwendungsfällen. Dabei können geeignete Vorlagen aus dem BIM-Handbuch für die Dokumentation genutzt werden. Zusammenfassend wurde somit die im BIM-Handbuch beschriebene Methodik um spezifische Aspekte zur Berücksichtigung von Fragen des Kulturerbes erweitert.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Einführung des entwickelten Arbeitsablaufs

Der entwickelte Arbeitsablauf ist in Abbildung 3 dargestellt. Die im Rahmen der einzelnen Arbeitsschritte erforderlichen Aktivitäten wurden in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben.

Der Ansatz wurde teilweise anhand der Alten Schäferei im Kloster Benediktbeuern erprobt, dem Fraunhofer-Zentrum für energetische Altbausanierung und Denkmalpflege [5].

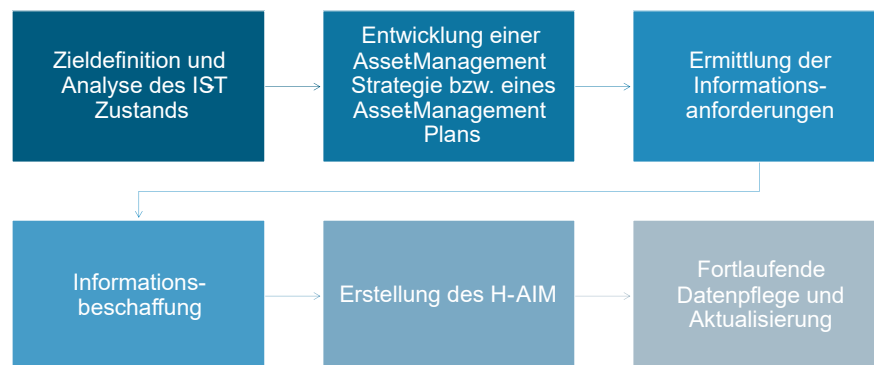


Abb. 3 Kombinierte Arbeitsablauf für die Entwicklung eines H-AIM in Deutschland

3.2 Diskussion

Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeit war die Umsetzung des entwickelten Prozesses nur exemplarisch und partiell realisierbar. Ein Schwerpunkt lag auf der Möglichkeit, die definierten Vorgaben mit den im BIM-Handbuch bereitgestellten Tools und Vorlagen abzubilden. Die einzelnen Arbeitsschritte konnten nicht vollständig getestet werden, vor allem die partizipative Entwicklung grundlegender Dokumente (z. B. Asset-Management-Strategie, Asset-Management-Plan), die Ableitung des Informationsbedarfs und die Definition der Informationsbedarfstiefe. Die dargestellte Methodik ist daher als Arbeitsstand zu verstehen und muss in der Praxis erprobt werden.

4 Fazit und Ausblick

Die Kombination der beiden Ansätze scheint zu einem Gesamtergebnis zu führen, das die Entwicklung eines Asset-Informationsmodells für denkmalgeschützte Gebäude unter den in Deutschland geltenden Rahmenbedingungen ermöglicht. Die methodischen Herausforderungen lassen sich besser bewältigen, wenn der Ansatz von Historic England miteinbezogen wird. Gravierender sind technische und normative Lücken in den bestehenden Softwarelösungen und geltenden Normen. Sie behindern die dringend erforderliche Standardisierung der Arbeitsmethoden und damit die Interoperabilität der Arbeitsergebnisse, etwa von Asset- und Projektinformationsmodellen für denkmalgeschützte Gebäude.

Insgesamt besteht weiterhin ein erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um die Anwendung der BIM-Methodik für historische Gebäude zu präzisieren und ihre speziellen Vorteile zu erschließen. Asset-Informationsmodelle ermöglichen eine langfristige Bereitstellung von Informationen und deren fortlaufende Aktualisierung durch dauerhafte Nutzung. Auf diese Weise lassen sich bauliche Eingriffe effizient, substanzschonend und denkmalgerecht planen sowie umsetzen.

Hinweis und Danksagung

Dieser Beitrag basiert auf einem Vortrag im Rahmen der Conference on Cultural Heritage and New Technologies vom 04. bis zum 06.11.2025 in Wien. Eine Veröffentlichung in englischer Sprache ist in Vorbereitung.

Die beschriebenen Untersuchungen erfolgten im Rahmen einer Masterarbeit an der Otto-Friedrich-Universität Bamberg. Der Verfasser dankt Prof. Dr. Ralf Kilian und Rafael Gramm (Fraunhofer IBP), Dr. Alexander Stenzer (AriInfoWare GmbH) sowie Prof. Dr. Mona Hess und Michael Groh (Universität Bamberg) für die fruchtbaren Diskussionen und die inhaltliche und organisatorische Unterstützung.

Literaturverzeichnis

- [1] Borrmann, A. / König, M. / Koch, C. / Beetz, J.: „Die BIM-Methode im Überblick“. In: A. Borrmann, M. König, C. Koch, J. Beetz (Hrsg.): *Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021, S. 1–31. DOI: 10.1007/978-3-658-33361-4_1.
- [2] BMI / BMVg: *Masterplan BIM für Bundesbauten: Erläuterungsbericht*. 2021. URL: https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/veroeffentlichungen/2021/10/masterplan-bim.pdf?__blob=publicationFile, abgerufen am 27.10.2025.
- [3] BMVg / BMWSB / BImA: *Umsetzungsstrategie BIM für Bundesbauten*. 2023. URL: https://www.bimdeutschland.de/fileadmin/user_upload/Umsetzungsstrategie_BIM_Bundesbauten.pdf, abgerufen am 27.10.2025.
- [4] Historic England: *BIM for Heritage: Developing a Historic Building Information Model*. Swindon: 2017. URL: <https://historicengland.org.uk/images-books/publications/bim-for-heritage/heag-154-bim-for-heritage>, abgerufen am 27.10.2025.
- [5] Krück, S.: *Lebenszyklusphasen-übergreifende Nutzung von Planungs- und Gebäudedaten am Beispiel der Alten Schöfflerei, Benediktbeuern*. Masterarbeit im Studiengang Digitale Denkmaltechnologien an der Universität Bamberg, 2024.
- [6] DIN Media GmbH: *DIN-EN-ISO-19650-1 Organisation und Digitalisierung von Informationen zu Bauwerken und Ingenieurleistungen, einschließlich Bauwerksinformationsmodellierung (BIM) – Informationsmanagement mit BIM – Teil 1: Begriffe und Grundsätze (ISO 19650-1:2018); Deutsche Fassung EN ISO 19650-1:2018*. Berlin: Beuth-Verlag, 2019. DOI: 10.31030/3030494.
- [7] Historic England: *BIM for Heritage: Developing the Asset Information Model*. Swindon: 2019. URL: <https://historicengland.org.uk/images-books/publications/bim-for-heritage-aim/heag271-bim-developing-asset-info-model>, abgerufen am 27.10.2025.
- [8] BIM Deutschland. Downloads BIM Deutschland. URL: <https://www.bimdeutschland.de/bim-wissen/downloads>, abgerufen am 27.10.2025.
- [9] Krischler, J. / König, M. / Scheffer, M. / Exner, H.: „BIM-Projektmanagement.“ In: A. Borrmann, M. König, C. Koch, J. Beetz (Hrsg.): *Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2021, S. 293–308. DOI: 10.1007/978-3-658-33361-4_14.
- [10] Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI): *VDI/DIN-EE 2552 Blatt 12.1:2022-10: Building Information Modeling – Struktur zu Beschreibung von BIM-Anwendungsfällen*. Berlin: Beuth Verlag, 2022. URL: <https://www.beuth.de/de/technische-regel/vdi-din-ee-2552-blatt-12-1/357878944>, abgerufen am 27.10.2025.
- [11] BMVg / BMWSB / BImA: *BIM-Handbuch – Arbeitshilfe Anwendungsfallsteckbriefe*. 2023. URL: https://www.fib-bund.de/Inhalt/Themen/BIM_fuer_Bundesbauten/2024-07_BIM_AH_AwF-Steckbriefe_2.0.pdf, abgerufen am 27.10.2025.
- [12] Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI): *VDI 2552 Blatt 10: Building Information Modeling – Auftraggeber-Informations-Anforderungen (AIA) und BIM-Abwicklungspläne (BAP)*. Berlin: Beuth Verlag, 2021. URL: <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-2552-blatt-10-building-information-modeling-auftraggeber-informations-anforderungen-aia-und-bim-abwicklungsplaene-bap>, abgerufen am 27.10.2025.
- [13] BMVg / BMWSB / BImA: *BIM-Handbuch – Arbeitshilfe Muster-AIA*. 2022. URL: https://www.bimdeutschland.de/fileadmin/media/Downloads/Download-Liste/Hochbau/BIM_fuer_Bundesbauten_AH_Muster-AIA.pdf, abgerufen am 27.10.2025.
- [14] BIM Deutschland: *Bereichsspezifische Muster-AIA: Hochbau – Muster-Auftraggeberinformationsanforderungen*. 2023. URL: https://www.bimdeutschland.de/fileadmin/media/Downloads/Muster-AIA/BIM_D_AP43b_Muster-AIA_Hochbau_Beispiel_Verwaltungsbau.pdf, abgerufen am 27.10.2025.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 [7, S. 14]

Alle weiteren Abbildungen stammen vom Verfasser des Beitrags.

Annina De Carli-Lanfranconi

DAS RAUMBUCH

Ein Arbeitsinstrument für die Bauforschung

DOI: 10.60628/9783738810493-97

Das Raumbuch dient der systematischen Dokumentation des baulichen Ist-Zustands und bildet eine zentrale Grundlage für baugeschichtliche Analysen. Es beschreibt Raumboflächen detailliert, ohne unmittelbare bauhistorische Interpretationen, und ermöglicht dadurch ein vertieftes Verständnis des Bauwerks. Die Detaillierung variiert je nach Modernisierungsgrad des Objekts, Projektziel und Budget. Spätere Befundaufnahmen, weitere Quellen und Untersuchungen können laufend ergänzt werden. Schließlich unterstützt das Raumbuch die denkmalpflegerische Bewertung, die z. B. anhand von Ampelplänen visualisiert werden kann. Es ist damit unentbehrlich für Restaurierungsmaßnahmen, Umbauten und Umnutzungen. Der Beitrag zeigt, dass das „händisch“ geführte Raumbuch eine praxisnahe und flexible Grundlage für die Bauwerkserfassung darstellt und insbesondere bei kleineren oder spezifischen Projekten auch ohne komplexe Softwarelösungen auskommt.

1 Das Raumbuch – Bestandsaufnahme des Ist-Zustands

Das Raumbuch ist ein etabliertes methodisches Instrument, um vor einer Planung den Ist-Zustand eines Gebäudes in Wort und Bild zu dokumentieren (siehe z. B. [1]). Es hält das Objekt als Quelle für die Baugeschichte fest. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den Raumboflächen sowie auf ihren stilistischen und materiellen Ausführungen, mit Fokus auf die Entstehungsgeschichte des Gebäudes. Nicht relevant sind der aktuelle Zustand, bereits angedachte Umbauideen oder geplante Maßnahmen.

Das Raumbuch gibt die Struktur vor, wie ein Gebäude systematisch aufgenommen werden kann. Es zwingt zur genauen Betrachtung und stellt sicher, dass alles festgehalten und nichts übersehen wird. Durch die gleichbleibende Systematik wird auch das nicht vergessen, was vor Ort vielleicht als unwichtig erschien, sich im Nachgang aber als bedeutsam erweist.

Der Inhalt des Raumbuchs ist eine reine Beschreibung des Bestands und enthält in der Regel keine baugeschichtlichen Interpretationen. Er bildet jedoch eine der wichtigsten Grundlagen für die bauhistorische Analyse, die als Quellen neben dem Gebäude selbst auch historische Schriften, Fotografien und Pläne zur Auswertung heranzieht. Das Raumbuch kann somit nicht eingespart oder von vorneherein weggelassen werden. Gerade durch diesen Dokumentationsvorgang lernen Forscher:innen das Objekt bis in das kleinste Detail kennen: Sie sehen Bauveränderungen auch dort, wo diese normalerweise kaum auffallen, erkennen Stellen, die für weitere Untersuchungen wichtig sind, und fertigen bereits ein umfassendes Fotomaterial an. Als Ergänzung zum Raumbuch ist die Aufnahme des Rohbaus inklusive Dachwerk sowie die Fassadenbeschreibung unabdingbar.

2 Softwarelösungen

Immer wieder steht die Frage im Raum, ob für die Erstellung oder Präsentation eines Raumbuchs eine spezielle Software oder eine Datenbanklösung nötig ist. Grundsätzlich braucht es für diese Erfassung kein spezielles Format, zumal alle Inhalte mit einem gängigen Textverarbeitungsprogramm wie Microsoft Word festgehalten werden können. Aufgrund der Menge an Daten wird pro Raum ein Dokument angelegt. Bei umfangreicheren Gebäuden kann jedoch zum besseren Handling der Datenmenge eine Datenbanklösung von Vorteil sein. Nachträgliche Layoutänderungen, die Bildintegration oder auch spätere Themenergänzungen lassen sich einfacher umsetzen. Zudem ist die Suchfunktion bei Datenbanken leichter handhabbar. Für große Bauten, deren Raumbücher als Grundlage für zukünftige Maßnahmen-, Unterhalts- und Monitoringprojekte dienen und fortlaufend aktualisiert werden sollen, wäre außerdem eine interaktive Verortung vorteilhaft. Dies lohnt sich vor allem für die Verwaltung und Archivierung größerer Bauten oder Anlagen, wie sie bisher in unserem Arbeitsumfeld kaum bestehen.

3 Verschiedene Detaillierungsgrade und Inhalte

Es hat sich im Laufe der Jahre gezeigt, dass es nicht „das eine“ Raumbuch gibt, sondern dass immer wieder verschiedene Varianten von Raumbüchern erarbeitet werden müssen, die sich in ihren Genauigkeitsstufen unterscheiden können. Diese sind abhängig vom Modernisierungsgrad des Objekts, vom Budget der Voruntersuchung und von der Fragestellung und den Anwendungswünschen der Auftraggeber:innen. Gerade bei Schutzwürdigkeitsklärungen vor Unterschutzstellungsprozessen, wie es in der Schweiz üblich ist, stehen im Allgemeinen nur geringe finanzielle Mittel zur Verfügung, sodass nach einer kurzen Begehung das Wichtigste in einem summarischen, geschossweise gegliederten Raumbuch festgehalten wird. Voruntersuchungen vor großen Renovationen oder auch Abbruchdokumentationen fallen in der Regel umfangreicher aus; hier kommt es darauf an, alle Details zu erfassen. Die Varianz zeigt sich dabei vor allem im Detaillierungsgrad der Beschreibungen.

Raumbücher werden in der Regel nach den einzelnen Bestandteilen eines Raumes geordnet (Abbildung 1). Hierzu gehören *Boden, Wände, Decke, Fenster, Türen* und *besondere Ausstattungsteile* wie z.B. *Wandschränke, Öfen* oder *Treppen*. Zusätzlich gibt es Übersichts- und Detailfotos sowie Übersichts- und gegebenenfalls Detailpläne, die die Raumdokumentation vervollständigen.

Besonderer Wert wird in den Beschreibungen der Bauteile und Oberflächen auf einheitliche Bezeichnungen für die gleichen Bestandteile gelegt. Dies ermöglicht es, Ausstattungsteile innerhalb eines Baus zu vergleichen und Besonderheiten bzw. Unterschiede schneller zu erfassen. Außerdem werden die Raumbücher miteinander vergleichbar. Gerade unterschiedliche Terminologien machen den Vergleich von Raumbüchern aus verschiedenen Händen oft schwierig. Eine einheitliche Terminologie, wie man sie für den vorindustriellen Holzbau kennt, würde die Beschreibung von Raumausstattungen und das Verstehen der Raumbücher für alle deutlich vereinfachen. Wichtig ist außerdem die Erfassung kleiner Bestandteile, die für die stilistische Datierung wichtig sein können, wie z.B. Türbänder oder Schlossmechanismen.

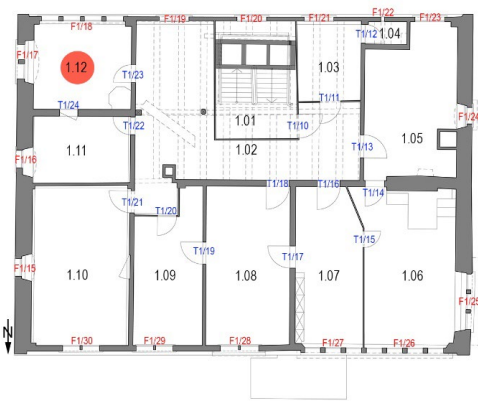
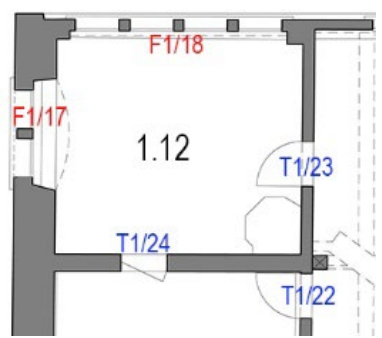
Ein weiterer – oft unterschätzter – Arbeitsschritt ist die Datierung sämtlicher Raumbestandteile. Bei detaillierten Aufnahmen können beispielsweise auch Türblätter getrennt von den Beschlägen datiert werden, sodass Zweitverwendungen oder Reparaturen deutlich werden.


Eine Herausforderung ist zudem, dass nur die sichtbaren Oberflächen beschrieben und datiert werden, während die dahinterliegenden Strukturen weitaus wertvoller und älter sein können. Daher ist vor allem für die Bauforschung ein Hinweis auf möglicherweise ältere, verborgene Strukturen äußerst wichtig.

Bei sehr einheitlich ausgeführten Ausstattungen ist der Gebrauch von Typenblättern, z.B. für Fenster oder Türen, hilfreich. Das vermeidet, dass in jedem Raum die immer gleichen Beschreibungen wiederholt werden und Leser:innen schlussendlich nicht

Adresse des Objekts – Raumbuch 2021

1. Obergeschoss





	
Bearbeiterinnen: De Carli, Marinowitz	Aufnahmen April 2021

Raum 1.12	Abbildungen
<p>Allgemein: Stübchen</p> <p><u>Datierungen:</u> Rohbau: 1582 oder älter Raumboflächen (ohne Putz und Anstrich): 1582 bis 17. Jh. Boden: 17./18. Jh. Fenster: 2. H. 20. Jh. Türen: 1582 bis 17. Jh.</p> <p>Boden: Dielenboden, breite Bretter. Datierung: 17./18. Jh.</p> <p>Wände: Alle Wände einschliesslich der Fensterlaibungen mit raumhohem stehendem Brettäfer mit profilierten Deckleisten verkleidet (wie Brettäfer in Raum 1.06). Oberflächen mit unterschiedlich geformten Kartuschen und Rahmungen mit illusionistischer Holzmaserierung in Form von Intarsien bemalt (Sehr lebendig, durch nachgedunkelten Firnis heute stark verbräunt). An N-Wand links neben der Tür T1/24 unbemaltes Feld mit Jahreszahl 1731. Ursprünglich vermutlich durch einen Wandkasten verdeckt. Holz verbräunt.</p> <p><u>Datierung:</u> Massivwand 1582 oder älter, Täfer 1582 oder 17. Jh., Bemalung 1731.</p>	 <p>Blickrichtung Nordosten mit Tür T1/24, Fenster F1/17</p>  <p>Blickrichtung Norden mit Tür T1/24</p>  <p>Blickrichtung Südwesten mit Fenster F1/18</p>

Netzwerk Bau & Forschung De Carli-Lanfranconi

Abb. 1 Beispiel einer Raumbuchdoppelseite (Netzwerk Bau & Forschung)

Adresse des Objekts – Raumbuch 2021

Raum 1.12	Abbildungen
<p>Decke: Felderbretterdecke, gleich gestaltet wie Wandtäfer. <u>Datierung:</u> Täfer 1582 oder 17. Jh., Bemalung 1731.</p> <p>Türen: <u>T1/23:</u> Beschreibung siehe Raum 1.02. <u>T1/24:</u> baugleich wie T1/23, von Raum 1.11 mit Schrank verstellt und nicht einsehbar. <u>Rahmen/Einfassung:</u> in Täfer integriert. <u>Beschläge:</u> geschmiedeter Schieberiegel, darunter ein Kurzschild mit Blattverzierungen. <u>Oberfläche:</u> Bemalung wie an Täfer und Decke. <u>Datierung:</u> 1582 oder 17. Jh., Bemalung 1731.</p> <p>Fenster: <u>F1/17 und F1/18:</u> Typ 1b, F1/17 in rundbogiger Nische. <u>Datierung:</u> Nische (Massivwand 1582 oder früher), Täferverkleidung 1582 bis 17. Jh. Flügel 2. H. 20. Jh.</p> <p>Sonstiges: <u>Turmofen</u> mit weissen Blattkacheln auf weissen Kachelfüssen. Eckkacheln mit zarten Kartuschen in Rocailleform, Leisten- und Gesimskacheln mit feinem Blattrankenornament, beides in rotbraun. Unter dem Gesims zwei Wappenkacheln, links unterschrieben mit „Hafner“, rechts mit Wittenbach. <u>Datierung:</u> 1992, Firma «Schreiber Keramik, Matzingen» (Ersatzkacheln mit Datierung und Firmenstempel im Dachgeschoss).</p>	 <p>Detail Felderdecke</p>  <p>Detail Tür T1/23</p>  <p>Detail offenes Kastenschloss T1/23</p>  <p>Detail Jahreszahl Nordwand</p>

wissen, ob die Türen tatsächlich alle gleich oder durchaus leicht verschieden sind. Auf den Typenblättern lässt sich dies leicht analysieren und zusammenfassen, sodass die Informationen gebündelt an einem Ort zu finden sind.

Das Raumbuch ist somit eine reine und uninterpretierte Bestandsaufnahme des Ist-Zustands. Gleichwohl bietet es sich bei gewissen Gebäuden an, baugeschichtliche Beobachtungen bereits raumweise mitzuerfassen. Sie liefern erste wichtige Anhaltspunkte für eine anschließende Bauforschung. Diese Befunde sollten aber deutlich vom Bestandsaufnahme-Teil getrennt aufgeführt werden, in einem gesonderten Abschnitt wie „Baugeschichtliche Beobachtungen“.

4 Weiterführungsmöglichkeit des Raumbuchs – Fallbeispiel Schloss Hagenwil

Gerade während großer Umbauten, für die im Vorfeld ein Raumbuch erstellt wurde, werden oft gezielt weitere Sondagen geöffnet, um bauforscherische Fragen mit Blick auf den Bestand zu beantworten. Die durch die neuen Öffnungen gewonnenen Erkenntnisse können ebenfalls im Raumbuch ergänzt werden, wenn nicht ein separater Befundkatalog geführt wird. Die Dokumentation des Objekts wird dadurch noch umfangreicher und detaillierter.

Im Folgenden wird die Erstellung eines Raumbuchs am Beispiel des mittelalterlichen Wasserschlosses Hagenwil (CH) vorgestellt (Abbildung 2). Die Burg steht in einem Weiler, der zur Gemeinde Amriswil im Thurgau gehört, und ist als eine der wenigen Wasserburgen der Schweiz von nationaler Bedeutung. Sie stammt im Kern aus dem 13. Jahrhundert und wurde im frühen 15. Jahrhundert nach einem Brand wieder aufgebaut. Aus dieser Zeit sind die umfangreichen Fachwerkaufbauten mit ihren Dachkonstruktionen sowie der frühe, liegende Dachstuhl auf dem Bergfried. Im



Abb. 2
Schloss Hagenwil bei
Amriswil (CH) (Netzwerk
Bau & Forschung)

18. Jahrhundert erfolgten umfangreiche Anpassungen an die barocke Wohnkultur unter dem Fürstabt von St. Gallen, zu dessen Herrschaft das Schloss von 1684 bis zur Auflösung des Klosters St. Gallen um 1805 gehörte. Aus dieser Epoche existieren nach wie vor Kammern mit bemalten Täfern, Türen und französischen Papiertapeten. Seit 1805 ist das Schloss im Besitz der Familie Angehrn, die darin bis heute erfolgreich einen Gastronomiebetrieb führt.

Um 1937 sowie in den 1960er-Jahren erfolgten im Schloss viele bauliche Veränderungen und Renovationen, die leider weder schriftlich noch planerisch festgehalten wurden. Neben den Beobachtungen am Bestand ermöglichen es heute lediglich einzelne Schriftstücke aus Briefwechseln und wenige Fotos, den Umfang dieser Maßnahmen zu umreißen. In den letzten 40 Jahren wurden zudem diverse Forschungen durchgeführt, wie z. B. dendrochronologische Holzaltersbestimmungen und Befundaufnahmen während diverser Renovationen (seit 2015). Bereits 2006 wurden die vorhandenen Quellen und Informationen im Rahmen einer Lizenziatsarbeit (heute Masterarbeit) systematisch zusammengestellt und im Hinblick auf eine erste baugeschichtliche These ausgewertet [2].

Für die anstehenden statischen Sicherungsmaßnahmen und weiteren Restaurierungsschritte verbunden mit allfälligen Raumnutzungen wurde von der Denkmalpflege erstmals ein umfangreiches Raumbuch gefordert. Zusätzlich zu den üblichen Raumbuchinformationen sollte es raumweise auch die bereits bekannten Schriftquellen, historischen Fotografien und Pläne, dendrochronologischen Untersuchungen und Befundaufnahmen enthalten. Die Grundidee dahinter war, das bisherige Wissen zum Schloss in diesem Raumbuch zu bündeln, auf das künftig alle zugreifen können. Dies erleichtert insbesondere den Planer:innen die Arbeit, da sie für Fragen zu den Räumen nur ein Dokument konsultieren müssen, ohne selbst nochmals alle Akten zu wälzen und wichtige Details zusammenzusuchen.

Die erste Seite des jeweiligen Raumbuchs zeigt eine Verortung mit dem Detailplan (Abbildung 3). Es folgt eine denkmalpflegerische Bewertung der einzelnen Raumbestandteile sowie die Aufstellung offener Fragen, die vor Renovierungen oder für die Bau- und Restaurierungsgeschichte geklärt werden müssen. Auf der zweiten Seite beginnt der eigentliche Beschreibungsteil des Raumbuchs (Abbildung 4). Danach werden die baugeschichtlichen Erkenntnisse aus bereits erfolgten Befundaufnahmen und dendrochronologischen Untersuchungen zusammengefasst und durch Verweistabellen ergänzt (Abbildung 5). Daran schließen die Fotodokumentation, die Sammlung der historischen Abbildungen und Pläne sowie die Dokumentation der Bauforschung an.

Das Beispiel von Hagenwil zeigt, wie vielfältig und flexibel ein Raumbuch sein kann – und sein muss, damit es sich laufend erweitern und praktisch nutzen lässt.

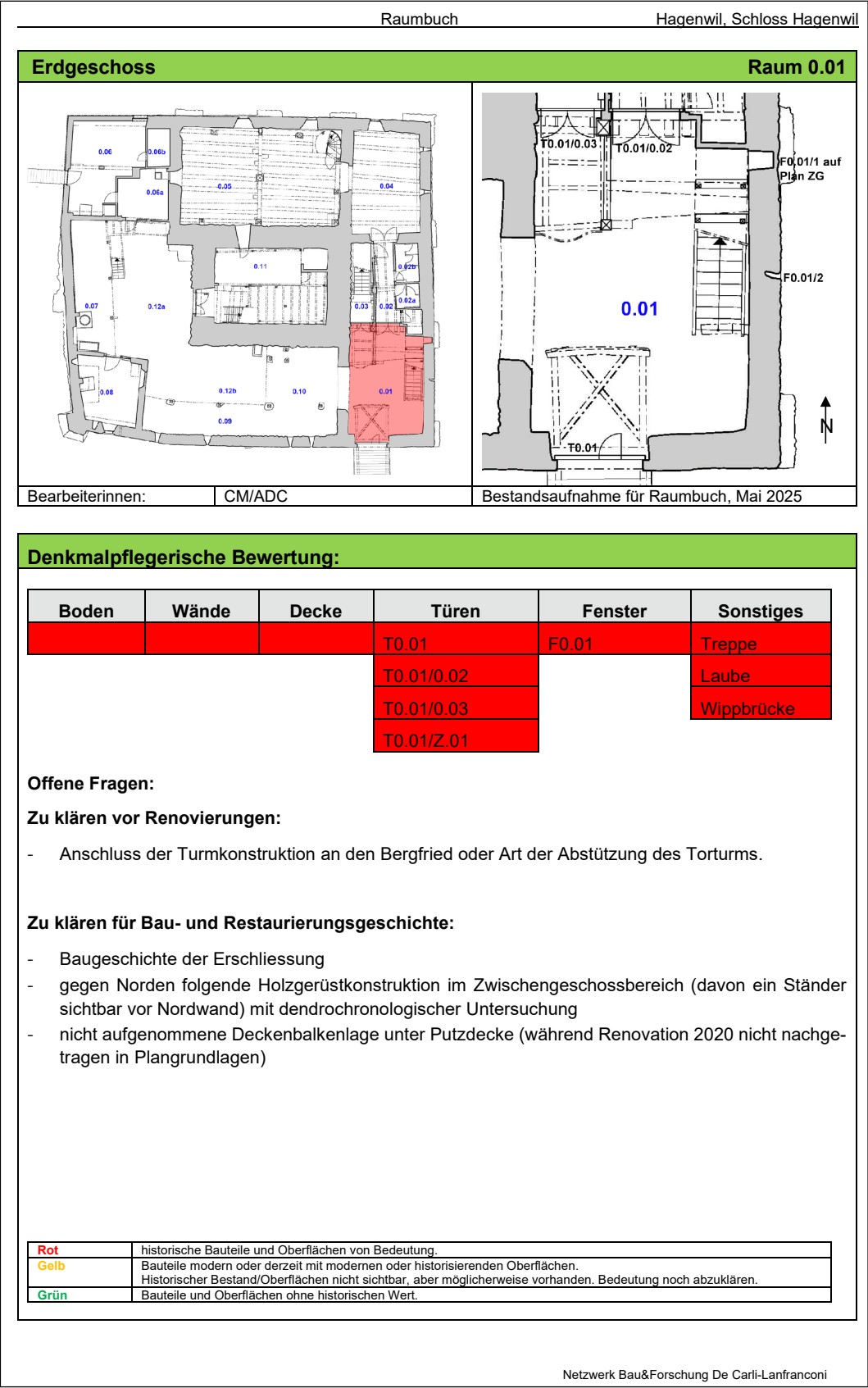


Abb. 3 Beispielseite der ersten Raumbuchseite des Schlosses Hagenwil (Netzwerk Bau & Forschung)

Hagenwil, Schloss Hagenwil	Raumbuch
Beschreibung – Raum 0.01	
<p>Allgemein: Eingangshalle.</p> <p>Boden: Grossformatige Sandsteinplatten, unregelmässig verlegt. <u>Datierung:</u> Gesamtrenovation 1937.</p> <p>Wände: Verputzt und weiss gestrichen. Sichtputz mit Ausbesserungen (im Streiflicht sichtbar). Putz am Durchgang zu Hof aus der Zeit nach 1687. <u>Datierung:</u> Sichtputz 1687 (darunter ältere Putze möglich), Ausbesserungen Gesamtrenovation 1937, Anstrich nach 2006.</p> <p>Decke: Verputzt und weiss gestrichen. <u>Datierung:</u> Sichtputz nach 1687, Anstrich nach 2006.</p> <p>Türen: T0.01: <u>Gewände/Rahmen:</u> innen gerader Holzsturz und aussen ein rundbogiges Sandsteingewände, im Schlussstein mit Jahreszahlkartusche 1741. <u>Türblatt:</u> überhohes, zweiflügliges Tor mit rundbogiger Mannstür. Brettertürblätter, an der Aussenseite mit schräg verlaufenden Brettern aufgedoppelt, innen gefügt mit geraden und schrägen Gratsbalken. Über der Mannstür ein Arretier-Balken, im westlichen Türflügel mit Kette gesichert. Mannstür in östlichem Türflügel: ebenfalls Brettertür, aufgedoppelt mit schräg verlaufenden Brettern (im grossen Türblatt integriert). <u>Beschlagwerk:</u> bei grossen Türblättern Bretter zusätzlich stabilisiert durch geschmiedete Metallbänder. Mit hölzernen Drehzapfen im Boden und im Türsturz verankert. Kette in Schloss gesichert. Mannstür mit geschmiedeten Scharnierbändern mit Blatt verzierten Endungen auf den Gratsbalken. Dreifach-Schnapp-Schloss mit verziertem Drehgriff und Schlüsselloch. Dazu ein geschlossener Schliesskasten (von innen und aussen zu bedienen). Darunter ein Schieberiegel mit Rundung und kleinem Griff am Ende, gehalten von geschmiedeten und mit Blüten verzierten Eisenklammern, dazu ein offener Schliesshaken. <u>Datierung:</u> Sandsteingewände 15. Jh. (?). Brettertürflügel und Schlösser 15. Jh. (?), Aufdoppelung und Inschrift im Schlussstein 1741.</p> <p>T0.01/0.02: <u>Gewände/Rahmen:</u> Holzgewände ohne Profilierung, gegen Raum 0.01 rundbogige Blende. <u>Türblatt:</u> zweiflüglige aufgedoppelte Tür mit geradem Abschluss, nach Raum 0.01 rundbogige Aufdoppelung mit schräg verlaufenden Brettern, nach Raum 0.02 aufgedoppelt mit senkrechten Brettern. <u>Beschlagwerk:</u> äussere Bretter mit schmiedeeisernen Ziernägeln befestigt. Einbohrbänder und eingeschobenes Schloss mit historisierendem Schlüsselschild und Drücker, von Innen mit Drehknopf zum Schliessen. <u>Datierung:</u> äussere Aufdoppelung möglich Gesamtrenovation 1937, innere Türblätter 1960er Jahre.</p> <p>T0.01/0.03 <u>Gewände/Rahmen:</u> Massiver Holzrahmen, ohne Profilierung. <u>Türblatt:</u> Rahmenfüllungstür, rundbogig, zweiflüglig. Obere Füllungen als verschraubtes Verbundfenster ausgebildet, gesprosst und mit Antikglas verglast. Untere Füllungen nach Raum 0.01 abgeplattet, nach Raum 0.03 schmal abgeplattet und mit Leisten versehen.</p>	
Netzwerk Bau&Forschung De Carli-Lanfranchi	

Abb. 4 Beispielseite des Beschreibungsteils zum Schloss Hagenwil
(Netzwerk Bau & Forschung)

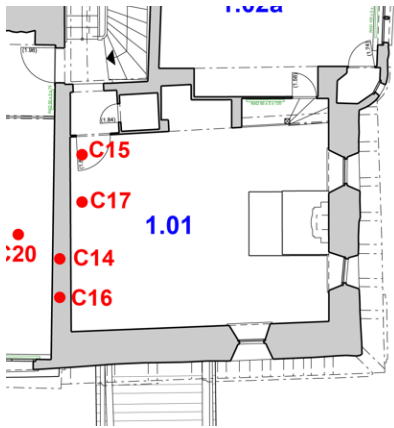
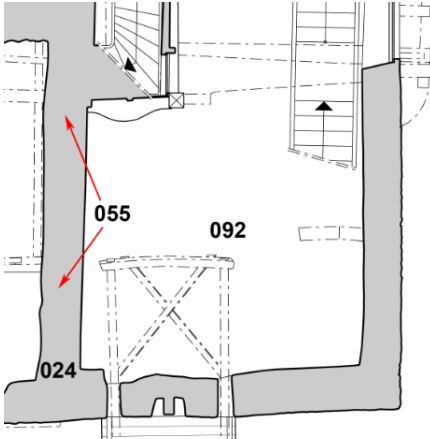
Hagenwil, Schloss Hagenwil	Raumbuch
Erdgeschoss	Raum 0.01
	
Dendro-Verortung, 1. OG, Stand 2025	Befund-Verortung, Stand 2025
Baugeschichtliche Zusammenfassung – Raum 0.01	
<p>Baugeschichtliche Bemerkungen:</p> <p><u>Durchgang zu Hof (Befund 055):</u> Hinter der verputzten Laibung des Rundbogendurchgangs in den Hof hat es zwei mächtige Ständer mit verzierten Sattelhölzern, die einen Unterzug tragen, auf welchem die Ostfassade des Torturms steht. Der Unterzug datiert laut Dendro nach 1678. Da die Sattelhölzern gleich beschnitzt sind wie das mit 1687 datierte Sattelholz des Treppenständers im Raum 0.01, dürfte hier ein zeitlicher Zusammenhang bestehen.</p> <p><u>Treppenanlage:</u> Wie anhand der Skizzen von Johann Rudolf Rahn (siehe Pläne bei Datenblatt Raum 0.01) ersichtlich ist, gab es 1894 eine andere Erschliessung des 1. Obergeschosses. Vom Zwischenpodest der Treppe führte ein südlicher Treppenlauf direkt in die Wirtsstube (Raum 1.16). Ein nördlicher Treppenlauf reichte zu einem Zwischenpodest, von dem aus die Treppe dann nach Norden abbog und ins 1. Obergeschoss führte (siehe Planskizze von Rahn Raum Z.01). Diese bei Rahn abgebildete Treppengestaltung kann, muss aber nicht gleichzeitig wie die laubenartige Konstruktion, datiert mit 1687, sein. Eigenartig im Zusammenhang mit der Treppe scheint der geschwungene Laubenabschluss mit Balusterbrettern. Ebenfalls für zwei Bauphasen spricht der Schleifzapfen an der Unterseite der Laubenschwelle. Dieser diente für einen Ständer, der zwischen den Treppenläufen positioniert war und wohl zur Treppenkonstruktion gehörte.</p> <p><u>Bug vor Ostwand:</u> Die Deckenkonstruktion unter der Putzdecke ist nicht erforscht.</p> <p><u>Liegendes Fenster 0.01:</u> Noch auf einer Fotografie von 1930 (ETH Bildarchiv Zürich, ANS_05106-018) ist das Fenster als hochrechteckige Öffnung zu erkennen, die innerhalb des Gewändes im unteren Bereich geschlossen ist. Beim Umbau 1937 wurde das Fenster in die heutige Form gebracht.</p> <p><u>Lichtscharte in Ostfassade:</u> Die Lichtscharte ist heute nur noch von aussen ablesbar.</p> <p>Fazit:</p> <p>Der Eingangsraum wurde vermutlich um 1687 umgestaltet. Zu diesem Zeitpunkt wurde der Torturm im EG neu unterfangen (Ständer, Schwelle und Deckenbalken). Vermutlich im gleichen Zusammenhang wurde auch die Erschliessung der Obergeschosse neu organisiert, ob sie so gestaltet waren, wie 1894 erstmals dokumentiert, oder ob es eine Zwischenversion der Erschliessung gab, ist zurzeit nicht geklärt.</p> <p>Die heutige Gestaltung des Raumes geht auf die Gesamtrenovation von 1937 zurück.</p>	
Netzwerk Bau&Forschung De Carli-Lanfranconi	

Abb. 5 Beispielseite der baugeschichtlichen Zusammenfassung zum Schloss Hagenwil (Netzwerk Bau & Forschung)

5 Auswertung auf Basis des Raumbuchs

Wie bereits erläutert, dient das Raumbuch als Grundlage für viele Arbeitsbereiche. Vor allem für die Auswertungen des Bauwerks in der Baugeschichte ist es unerlässlich. Durch das Festhalten der Erkenntnisse im Dokumentationsteil ist die spätere Interpretation für alle nachvollziehbar.

Als weiteres Resultat aus dem Raumbuch erfolgt die denkmalpflegerische Bewertung bzw. Würdigung des Bestands, wie von Denkmalämtern meist gefordert, um eine Entscheidungsgrundlage für die Planung zu erhalten. Als einfachstes visuelles Format haben sich dabei Ampelpläne bewährt (Abbildung 6). In ihnen werden die Grundrisse nach den international verbreiteten Ampelfarben eingefärbt, jeweils mit folgender Bedeutung:

- Rot: „bedeutende Bausubstanz, ist zu erhalten und nach denkmalpflegerischen Grundsätzen zu restaurieren“
- Orange: „wertvolle Bausubstanz, Eingriffe sind jedoch in Absprache mit der Denkmalpflege möglich“
- Grün: „denkmalpflegerisch unbedeutend, kann verändert werden“

Neben der Binnenstruktur fordert die Denkmalpflege mitunter auch eine Bewertung der Raumausstattung. Wenn diese nicht bereits im Plan berücksichtigt wird, kann man sich damit behelfen, die Datierungen hinter den beschriebenen Bestandteilen einzufärben oder separate Übersichtstabellen einzufügen, wie dies im Beispiel des Schlosses Hagenwil erfolgt ist (Abbildung 3). Der Ampelplan ermöglicht somit einen schnellen Überblick über den Bestand sowie eine erste bewertende Grundlage für die weitere Planung.

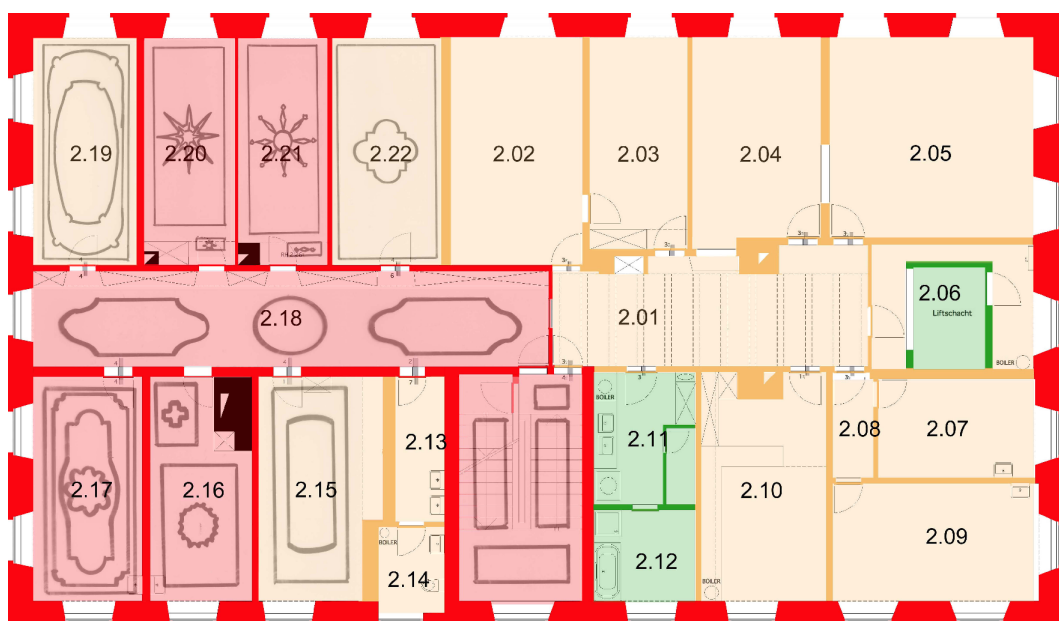


Abb. 6 Beispiel eines Ampelplans (Netzwerk Bau & Forschung)

6 Fazit

Das Raumbuch ist ein „Must-have“ für die Dokumentation und das Verständnis des Ist-Zustands eines zu untersuchenden Gebäudes. Damit bildet es eine Quelle ebenso wie ein Arbeitsinstrument für die vertiefte Erfassung des Objekts. Die Systematik des Raumbuchs schafft ein Raster, das einerseits Orientierung zu einzelnen Oberflächen bietet und andererseits zur Kontrolle dient, ob der gesamte Bau lückenlos erfasst wurde. Wie gezeigt, ist die Methode offen für verschiedene Vertiefungsvarianten – bis hin zur Vernetzung mit anderen Quellen und Untersuchungen, die darin platziert und somit übersichtlich fassbar gemacht werden können. Auch im Kontext der schnell voranschreitenden Digitalisierung bleibt das klassische Raumbuch aufgrund seiner Anpassungsfähigkeit und Übersichtlichkeit ein unverzichtbares Werkzeug der Bauwerkserfassung und liefert weiterhin eine solide Basis für Forschung, Planung und Denkmalpflege.

Literaturverzeichnis

- [1] Schmidt, Wolf: *Das Raumbuch als Instrument denkmalpflegerischer Bestandsaufnahme und Sanierungsplanung*. Arbeitsheft des Bayrischen Landesamt für Denkmalpflege, Bd. 44. München: 2002.
- [2] Lanfranconi, Annina: *Schloss Hagenwil. Eine bauhistorische Untersuchung*. Lizentiatsarbeit an der Philosophischen Fakultät der Universität Zürich. 2007.

Abbildungsverzeichnis

Alle Abbildungen stammen von der Verfasserin des Beitrags.

Michaela Kuhn und Alexander Stenzer

VON DER DATENBANK ZUM RAUMBUCH

Digitale Werkzeuge für die Bauwerksdokumentation

DOI:10.60628/9783738810493-109

Für ein zukunftsorientiertes Bauwerksmanagement ist ein digitales Informationssystem unverzichtbar. Es erfasst Objektdaten wie Materialien, Schäden oder Bilder in einer zentralen Datenbank – sicher gespeichert und mehrdimensional verknüpfbar. Auf dieser Grundlage lassen sich digitale, datenbankgestützte Raumbücher des Bauwerks erstellen, welche die Weitergabe und Nutzung der Informationen erleichtern. Der Beitrag zeigt, wie sich mit geeigneter Software automatisiert konsistente und stets aktuelle Raumbücher generieren sowie verwalten lassen. Als Beispiel wird die Software MonArch vorgestellt. Datenbankbasierte Raumbücher unterstützen somit die Digitalisierung der Bauwerksdokumentation und können eine zukunftsweisende Grundlage für die Erforschung, Bewahrung und Nutzung historischer Bauwerke schaffen.

1 Einleitung

Ein Raumbuch dient der systematischen Erfassung, Strukturierung und Auswertung der raumbezogenen Informationen eines Bauwerks. Es stellt eine raumweise gegliederte Dokumentationsgrundlage dar, die typischerweise in Form textbasierter Berichte vorliegt. Da bislang keine einheitliche Definition des Begriffs existiert, ist seine Verwendung disziplin- und projektphasenabhängig. So variieren die Anforderungen an Inhalt, Detailtiefe und Darstellungsform eines Raumbuchs erheblich – von der rein deskriptiven Bestandsaufnahme bis hin zu normgerechten, komplexen Berichten für Ausschreibungsprozesse, Bauausführungen oder die Denkmalpflege. Auch die Inhalte sind breit gefächert. Sie reichen von geometrischen Grunddaten und Materialangaben über Ausstattungsmerkmale bis zu Schadensmerkmalen, restauratorischen Befunden, dokumentierten oder geplanten Maßnahmen und denkmalpflegerischen Bewertungen.

Während Raumbücher früher manuell erstellt wurden, helfen heute datenbankbasierte Softwareplattformen (auch „Informationssysteme“ genannt) bei der Erzeugung. Dieser Beitrag wird zunächst die Idee und Vorteile eines solchen datenbankgestützten Raumbuchs erläutern. Es leistet einen wichtigen Beitrag zur Digitalisierung der Bauwerksdokumentation – und schafft eine zukunftsweisende Grundlage für die Erforschung, Verwaltung und nachhaltige Sicherung historischer ebenso wie moderner Bauwerke. Anschließend werden die dem Raumbuch zugrunde liegende Datenbank und seine Erstellung selbst erläutert. Als Beispiel wird dafür die Software MonArch [1] beschrieben, die ursprünglich an der Universität Passau entwickelt wurde.

2 Die Idee des datenbankbasierten Raumbuchs

Wie erwähnt wird der Begriff des Raumbuchs unterschiedlich definiert. MonArch versteht darunter die räumlich strukturierte Sammlung der für ein Gebäude relevanten Informationen – ein digitaler Zwilling auf Datenbankebene. Die Sammlung kann beliebig detailliert und jederzeit bearbeitet werden, um sie an unterschiedliche Projektanforderungen anzupassen, auch von mehreren Personen gleichzeitig. Sie lässt sich darüber hinaus als druckbare PDF-Datei exportieren, mit individuell konfigurierbaren Inhalten und Layouts. Diese verkleinerte Momentaufnahme des gesamten Datenstands dient der Informationsvermittlung – und kann nach einer Veränderung der Daten auf Klick neu exportiert werden.

Eine datenbankbasierte Raumbucherstellung bietet mehrere Vorteile im Vergleich zu manuellen Verfahren. Neben dem reduzierten Zeitaufwand ist vor allem der erleichterte Umgang mit einer Fülle an Informationen zu nennen: Bei einfachen Raumfolgen kann ein Raumbuch noch händisch erzeugt werden, doch bei einer Vielzahl an Räumen oder zu berücksichtigenden Sachverhalten wird es schwierig, dies alles

übersichtlich zu erfassen. Ein weiterer Punkt ist die erleichterte Zusammenarbeit im Team: Bei der manuellen Erstellung eines Raumbuchs kann insbesondere die Beteiligung vieler Personen zu redundanten oder inkonsistenten Datenständen oder fehlerhaften Layouts führen. Informationssysteme wie MonArch hingegen basieren auf einer relationalen Datenbank (lokal oder remote) mit optionaler Mehrpersonennutzung und Transaktionsschutz. So können mehrere Projektbeteiligte gleichzeitig am selben Datenstand arbeiten, ohne dass es zu inkonsistenten oder redundanten Einträgen kommt. Die Informationen sind dabei zukunftsorientiert gesichert abgelegt, lassen sich aber intuitiv abrufen und jederzeit aktualisieren, was einen strukturierten Überblick über den digitalen Gebäudezwilling gewährleistet. Auch bei noch unvollständiger Datengrundlage kann per Klick ein formal konsistenter und optisch ansprechender Bericht generiert werden.

3 Datenbankbasierte Informationssysteme

Datenbankgestützte Raumbücher können heute mithilfe von Softwareplattformen erzeugt werden, welche die digitale Bauwerksdokumentation unterstützen. Ein Beispiel ist das Informationssystem MonArch [1], das auf die raumbezogene digitale Dokumentation von strukturellen Objekten wie Bauwerken spezialisiert ist. Das Programm ist ein Werkzeug für den Bestandsbau, richtet sich aber gleichermaßen an die Bauforschung, Bauplanung, Denkmalpflege und das Facility-Management.

Das Programm wurde ursprünglich an der Universität Passau [2] entwickelt, um ein digitales Werkzeug zur reinen Dokumentation und langfristigen Sicherung aller Daten kulturhistorischer Bauten wie des Passauer Doms bereitzustellen. Im Laufe der Zeit ergab sich seine zusätzliche Verwendung als digitale Arbeitsumgebung für Management, Pflege und Analyse von modernen Bauten sowie von Bestandsbauten. Über zwei Jahrzehnte lang wurde das Programm im Rahmen interdisziplinärer Forschungsprojekte weiterentwickelt, bis das MonArch-Team – zu Beginn des Ruhestands von Prof. Dr. Burkhard Freitag – im August 2021 aus der Universität heraus die AriInfoWare GmbH [3] gründete.

Programme wie MonArch erlauben es, den gesamten Lebenszyklus eines Objekts virtuell abzubilden, von der Planung über die Restaurierung bis zur Instandhaltung. Sie generieren eine räumliche sowie semantisch vernetzte Abbildung des digitalen Zwillings, selbst bei komplexen Bauwerken. Die Software dient allerdings nicht nur zur Dokumentation, sondern auch zur dynamischen und kollaborativen Nutzung durch multiple Anwender im Projektalltag. MonArch wurde bereits in mehreren Projekten eingesetzt, darunter die Kaiserthermen in Trier, die Weißenhofsiedlung in Stuttgart und bedeutende deutsche Domkirchen wie in Köln (Abbildung 1).

4 Die Datenbank

Im Zentrum eines Datenbestands steht in MonArch die Repräsentation eines oder mehrerer Bauwerke. Die Repräsentation hat die Form einer Strukturhierarchie, die aus strukturellen Abhängigkeiten besteht und dadurch das Gebäude in immer detailliertere Einzelteile zerlegt. Die räumliche Struktur ist jederzeit veränderbar, das heißt, Bauteile müssen nicht bereits zu Beginn eines Projekts vollständig im System angelegt werden, sondern können je nach Bedarf inkrementell erweitert werden. Dies gilt auch für das zu Beispielzwecken erfundene, zu sanierende „Gasthaus Weißenstein“. Hier startet die hierarchische Aufgliederung in MonArch am Gebäude selbst und teilt sich dann über Geschosse und Räume in einzelne Wände, Fenster, Türen usw. auf.

MonArch ermöglicht es, die einzelnen Gebäudeteile – wie Räume, Wände, Fenster oder sogar Bausteine – mehrdimensional mit vielfältigen Informationen zu verknüpfen. Diese Gebäudeinformationen umfassen Eigenschaften (wie Bezeichnungen, Beschreibungen, Adresse), Themen (wie notwendige Restaurierungsmaßnahmen, vorhandene Schäden, verantwortliche Personen, Materialangaben), Strukturtypen (wie die Art von Böden, Türblättern oder Treppen) und Notizen (etwa zur Baubeschreibung). Die Informationen können auch digitale Dokumente jeglichen Formats einschließen (wie Maßnahmenberichte, Bildbefunde, Videos oder Scans analoger Pläne).

Je detaillierter die Struktur, desto genauer können die Informationen räumlich an einzelnen Gebäudeteilen verortet werden. Im Gegensatz zu starren Ordnersystemen erlaubt dies einen mehrdimensionalen Zugriff auf die Informationen – sowohl aus räumlich strukturierter Sicht als auch über alle vorhandenen semantischen Ebenen hinweg, z.B. zeitliche Einordnungen, Materialien, Schadenskartierungen, Typzuordnungen, Wartungsintervalle oder Dokumenttypen.

Die strukturelle Navigation durch ein Gebäude wird optional über ein interaktives Visualisierungsfenster unterstützt. Dieses kann 2D-Pläne, 3D-Modelle (wie GLB- oder DAE-Dateien, aber auch BIM-Modelle) oder Punktwolken enthalten. Die Einbindung externer webbasierter Viewer ist ebenfalls möglich. Die Zuordnung eines



Abb. 1
Eines der komplexesten deutschen Bauwerke, das in MonArch angelegt ist: der Kölner Dom [4]

grafischen Modells und selektierbarer Elemente innerhalb des Modells an Bauteile der Strukturhierarchie eröffnet eine intuitive Navigation durch das virtuelle Bauwerk: Klickt man auf einen Bereich in der Visualisierung, wird automatisch das entsprechende Bauteil in der Strukturhierarchie angewählt. Umgekehrt wird ein in der Hierarchie ausgewähltes Element im Modell automatisch farblich markiert. In beiden Fällen wird zeitgleich eine Suchanfrage gestartet, die alle zur aktuellen Auswahl gehörenden Informationen im Ergebnisfenster darstellt.

Dieses Ergebnisfenster kann neben Dokumenten auch Notizen, Themen und Strukturelemente selbst enthalten. Mit jeder Selektion eines Elements in der Strukturhierarchie wird die Ergebnismenge aktualisiert. Im Standardfall wird eine solche Suchanfrage hierarchisch nach unten ausgeführt. Wird also das Element „Gasthaus Weißenstein“ ausgewählt, beinhaltet das Ergebnis alle Dokumente, die entweder direkt dem Gebäude zugeordnet wurden oder einem der darunterliegenden Elemente wie dem „Erdgeschoss“ oder der „Wand a“ in „Raum 0.A“. Wird dagegen der Unterpunkt „Wand a“ direkt angewählt und damit tiefer in die Gebäudestruktur eingetaucht, reduziert sich die Ergebnismenge auf alle Dokumente, die mit diesem verkleinerten Teilbaum verknüpft sind.

Ergänzend dazu lassen sich mehrdimensionale Themenhierarchien entweder selbst aufbauen oder aus etablierten Vokabularen oder Normen importieren. Entsprechende Vokabulare sind z. B. Iconclass oder das vom Getty Research Institute herausgegebene Art and Architecture Thesaurus (AAT). Jedem Dokument, jeder Notiz und jedem Bauteil kann eine beliebige Anzahl solcher Themen zugeordnet werden, wodurch sich Daten nicht nur räumlich, sondern auch mehrdimensional semantisch erschließen lassen. Die Aufschlüsselung eines Vokabulars folgt im System – ähnlich der Strukturhierarchie – einer Spezialisierung. Bei der Auswahl des Themas „Schäden“ beispielsweise werden im Ergebnis alle Dokumente, Notizen oder Bauteile inkludiert, die mit diesem oder spezifischeren Themen (wie „Putzabplatzung“ oder „Rostschäden“) ausgezeichnet wurden. Bei Direktauswahl des Themas „Putzabplatzung“ dagegen beinhaltet das Ergebnis die entsprechend verringerte Teilmenge an Daten.

Diese Kombination aus der strukturellen Repräsentation eines Bauwerks und der Verwendung von Vokabularen ermöglicht den erwähnten mehrdimensionalen Informationszugriff. Das erlaubt Anfragen wie „Suche alle zweiflügeligen Fenster in Raum 1.A des Gasthauses, die einen hölzernen Fensterrahmen besitzen und auf das 19. Jahrhundert datiert wurden“ oder „Suche alle geplanten Maßnahmen, die das Dachgeschoss betreffen und als dringend eingestuft wurden“. Mit einem regulären Ordnersystem stößt man beim Management eines komplexen Bauwerks schnell an logistische Grenzen, da der Blick auf die Informationen eindimensional ist und daher oft redundante Daten abgelegt werden. Systeme wie MonArch dagegen sind für die kollaborative Arbeit mit Gebäudedaten ausgelegt. Durch mehrdimensionale Auszeichnungsmöglichkeiten machen sie komplexe Informationslandschaften nicht bloß digital und transparent erfassbar, sondern zudem intuitiv durchsuchbar und nachhaltig nutzbar.

5 Von der Datenbank zum Raumbuch

Der beschriebene digitale Gebäudedatenbestand kann anschließend in ein Raumbuch in Form eines PDF-Berichts exportiert werden. Der Export erzeugt eine Momentaufnahme des aktuellen Datenstands, oft in komprimierter Form. Hierfür werden gezielt diejenigen Informationen übertragen, die für die vorliegende Forschungsarbeit, Fragestellung oder Projektphase relevant sind. Im weiteren Kapitel wird das exportierte Dokument als „Raumbuch“ bezeichnet, doch es gilt zu beachten: Als Raumbuch betrachtet MonArch primär den digitalen Zwilling des Gebäudes, in Form sämtlicher raumweise gesammelter Informationen. Das erzeugte Dokument selbst stellt nur einen aus der Datenbank exportierten Ausschnitt zu einem gegebenen Zeitpunkt dar.

In einem einzigen Datenstand lassen sich parallel nicht nur mehrere Bauwerke, sondern auch mehrere dazugehörige Raumbuchprojekte verwalten. So können aus ein und demselben Gebäudedatensatz unterschiedlich strukturierte Raumbücher hervorgehen, die spezifische Schwerpunkte setzen – etwa ein reduzierter Überblick für die Bauaufnahme oder eine ausführlich kommentierte Fassung für die wissenschaftliche Analyse. Jedes der Raumbücher wird als eigenständiges Projekt modelliert, das dem betreffenden Bauwerk explizit zugeordnet ist. So bleibt der Export auf den aktuellen Datenstand bezogen und ist konsistent reproduzierbar. Ebenso wie die Strukturierung der exportierten Raumbücher zu einem Gebäude ist auch die Auswahl der Begriffe aus der Themenhierarchie, die in den Büchern jeweils erscheinen, projektspezifisch. Für eine Bestandserfassung sind z.B. Materialangaben und Typisierungen wichtiger, für eine Schadenskartierung eher Restaurierungs- und Schadenshinweise. Auch hier gilt: Der Datenstand der Software kann (und soll) mehr Informationen enthalten als das zur Weitergabe exportierte Dokument.

Das Gebäude selbst liegt in einer typisierten Strukturhierarchie vor. Von der Gesamtkonstruktion über Fassaden, Geschosse und Räume bis hin zu einzelnen Fensterflügeln sind alle Bauteile klar ausgezeichnet. So können daran angehängte Zusatzinformationen im Export präzise ausgelesen und platziert werden. Dank ihrer Typisierung erscheinen die Bauteile im Raumbuch an der richtigen Stelle. Die Zuweisung erfolgt über einen vordefinierten Katalog aus Standardtypen wie „Fassade“, „Raum“ oder „Fenster“, kann jedoch durch selbst erzeugte Typen verfeinert werden. Die zusätzlichen Informationen wie Personennamen, Bilder oder Notizen werden nach demselben Prinzip im exportierten Raumbuch platziert. So erscheinen Personen an der für ihre Funktion vorgesehenen Stelle, etwa als Auftraggeber:innen, Ansprechpartner:innen oder Fachpersonal. Dokumente werden über zugewiesene Dokumenttypen verortet, beispielsweise als Fassadenansichten, Grundrisspläne, Befunde oder Logos. Notizen wiederum lassen sich über vorgegebene Kategorien wie „Historie“, „Baubeschreibung“ oder „Copyright-Hinweis“ einordnen.

Kernstück der Raumbuchgenerierung ist das hierarchische Auslesen der typisierten Gebäudestruktur. Ein Bauteil wird im PDF ausgegeben, wenn sein zugewiesener Strukturtyp dem im entsprechenden Kapitel geforderten Typ entspricht. Dafür wird

zunächst für jede Fassade – falls vorhanden – ein eigenes Kapitel erzeugt. Die Kopfzeilen der Kapitel geben Name, Anschrift und Koordinaten des Gebäudes wieder, ergänzt um Fassadenbezeichnung, Projektzeitraum, Bildmaterial und die jeweils verantwortlichen Bearbeiter:innen (Abbildung 2 links). Es folgen mögliche Beschreibungen, eine Auswahl zugewiesener Fassadenansichten und Befunde in Bild- oder Textform.

Nach der Ausgabe aller Fassaden wird das Gebäude geschossweise von unten nach oben durchlaufen. Sowohl Geschosse als auch Räume werden dabei abermals über ihre Typen erkannt. Möglich sind auch Mehrfachnennungen, etwa zwei Obergeschosse. Die Struktur der Raumkapitel entspricht zunächst derjenigen der Fassaden: Kopfzeile, Beschreibung, Raumansichten. Anschließend werden alle einem Raum untergeordneten Bauteile auf einzelnen Seiten aufgeführt – etwa Fenster, Türen, Wände, Decke, Boden oder Inventar (Abbildung 2 rechts). Der Exportdialog erlaubt eine präzise Auswahl der einzubeziehenden Kategorien. Für jedes Unterelement werden neben möglichen Bemerkungen und Detailfotos auch alle zugewiesenen Themen ausgegeben, wahlweise in Listen- oder Baumstruktur. Die Kapitel enden jeweils auf raumspezifische Befunde.







Objekt: Gasthaus Weißenstein Am Stadtplatz 14 94482 Niederviehbach Geographische Koordinaten: 43°01'24" n, 10°43'59" e		Fassade Nord-Fassade Stand: Januar/Oktober 2025 Bearbeiter: Alexander Stenzer, Matthias Schmid	Objekt: Gasthaus Weißenstein Am Stadtplatz 14 94482 Niederviehbach Geographische Koordinaten: 43°01'24" n, 10°43'59" e		Erdgeschoss 0.A Fenster 0.A_b Stand: Januar/Oktober 2025 Bearbeiter: Alexander Stenzer, Matthias Schmid
 <p>Foto: Facade_Detail1.JPG Erstelldatum: 08. August 2024</p> <p>Anmerkungen: Ansicht Nord-Fassade ehem. Gasthaus Weißenstein</p>			 <p>Foto: Window1.JPG Erstelldatum: 08. August 2024</p> <p>Zusätzliche Informationen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fensteröffnung • Fensterelement • Fensterart: Kippfenster • Fensterfügel: Holz • Material: Metall 		
Auftraggeber: Bauamt Dachau Bergstraße 34 84164 München	Ansprechpartner: AriInfoWare GmbH Innsbräule 69b 94032 Passau Michaela Kuhn Tel. +49 (0)51 966 09 022 Email: michaela.kuhn@ariinfoware.de		Auftraggeber: Bauamt Dachau Bergstraße 34 84164 München	Ansprechpartner: AriInfoWare GmbH Innsbräule 69b 94032 Passau Michaela Kuhn Tel. +49 (0)51 966 09 022 Email: michaela.kuhn@ariinfoware.de	

Abb. 2 Beispiellayout der Nordfassade und eines Fensters im Erdgeschoss des Gebäudes „Gasthaus Weißenstein“ im exportierten Raumbuch

Neben der Dokumentation der Fassaden und Räume können weitere Kapitel für das Raumbuch erzeugt werden – selektiv konfigurierbar im Exportdialog. Ein PDF beginnt stets mit Titelblatt und automatisch generiertem Inhaltsverzeichnis. Optional folgen z. B. eine Projektzusammenfassung und ein Objektdatenblatt, das die zentralen Gebäudedaten (in Form von Eigenschaften und Themenzuordnungen) bündelt. Die Angaben zu Anlass und Untersuchungsart stammen aus den Projekteigenschaften; eine nachgestellte Legende erläutert alle verwendeten Strukturtypen und ihre Kürzel.

Ein weiteres mögliches Kapitel im Raumbuch widmet sich der Baugeschichte des betrachteten Gebäudes. Die Grundlage bilden chronologisch geordnete Notizen mit Jahresangaben oder Zeitspannen, etwa „1717“, „zwischen 1884 und 1909“ oder „Anfang 20. Jahrhundert“. Diese Angaben können durch Dokumente wie Bau- oder Befundfotos ergänzt werden.

Eine anschließende Quellen- und Literaturliste basiert auf der Themenhierarchie: Jede Quelle wird als eigenes Thema modelliert; untergeordnete Themen erfassen präzise Seitenangaben. Auf diese Weise kann ein Literaturverzeichnis zentral erstellt und gepflegt werden. Es lässt sich in jedem Raumbuch spezifisch zuordnen, aber auch mehrfach in verschiedenen Projekten verwenden. Die durch eine Themenzuweisung an Dokumente oder Notizen im Raumbuch platzierten Quellen werden über fortlaufende Fußnoten den jeweiligen Text- oder Bildstellen der Baugeschichte zugeordnet.

Als letztes Kapitel vor der Auflistung der eigentlichen Fassaden und Räume kann ein Bauteilkatalog generiert werden, der sämtliche im Projekt vorhandenen Strukturtypen in tabellarischer Form vorstellt. Neben Beschreibungen und Themenzuordnungen enthält er repräsentatives Bildmaterial und fungiert damit als kompakte Typen- und Materialdatenbank des Gebäudes.

Das hier skizzierte Prinzip der Raumbucherzeugung zeichnet sich damit vor allem durch Modularität und Anpassungsfähigkeit aus, aber auch durch Datenkonsistenz und Reproduzierbarkeit. Wesentlich dabei ist, dass das Raumbuch nicht als separat erstellter Datensatz in Form eines händisch erzeugten Berichts existiert, sondern als formatierte und oft komprimierte Darstellung der Informationen, die in der Datenbank vorliegen. Mit jedem Export entstehen neue PDF-Dokumente, die – je nach Anforderung – von einer knappen Bauzustandsübersicht bis zu einer umfassenden Gebäudebiografie reichen, dabei jedoch immer auf die gleichen Daten zurückgreifen. Durch die Konsistenz und Aktualität der hinterlegten Informationen bildet der Raumbuchexport eine tragfähige Grundlage sowohl für wissenschaftliche Auswertungen als auch für praktische Dokumentationsaufgaben.

6 Fazit und Ausblick

Der Ansatz, Bauwerksinformationen datenbankbasiert zu erfassen, zu strukturieren und dynamisch als Raumbuchbericht zu exportieren, erweitert die Möglichkeiten der digitalen Bauwerksdokumentation. Entsprechende Systeme eröffnen durch die mehrdimensionale Verknüpfung von Informationen neue Möglichkeiten der wissenschaftlichen Analyse und nachhaltigen Bewahrung von Gebäudedaten. Eine grundlegende Verschiebung im Verständnis von Dokumentation zeigt sich besonders im Zusammenspiel zwischen dem stets erweiterbaren und kollaborativ gepflegten Datenstand in Form eines digitalen Gebäudezwillings einerseits und den daraus generierten, projektspezifisch formatierten PDF-Raumbüchern andererseits: Nicht mehr das starre Endprodukt, sondern die dynamische Datenbasis bildet den Kern der Wissensrepräsentation.

Das hier skizzierte Vorgehen weist über die reine Dokumentation hinaus und kann als lebendige und sehr flexible Arbeitsumgebung betrachtet werden. Die mehrdimensionale Strukturierung der Daten ermöglicht vergleichende Analysen zwischen Bauteilen, während die Integration externer Normvokabulare eine semantische Anschlussfähigkeit an übergeordnete Forschungsinfrastrukturen erlaubt. Gleichzeitig schafft die schnelle Generierung konsistenter und aktueller Raumbücher die notwendige Brücke zur praktischen Anwendung und Informationsweitergabe. Künftige Forschung wird verstärkt die Integration in umfassendere digitale Ökosysteme in den Blick nehmen müssen – etwa im Hinblick auf Building Information Modeling (BIM), Linked Open Data (LOD) oder KI-gestützte Auswertungsverfahren. Software wie MonArch liefert hierfür ein erprobtes Fundament. Es zeigt, dass ein datenbankbasiertes, offenes und modulierbares Konzept nicht nur als Werkzeug für die Verwaltung einzelner Gebäude verstanden werden kann, sondern auch als methodischer Beitrag zu einem nachhaltigeren Bauwerksmanagement.

Literaturverzeichnis

- [1] MonArch-Website. URL: <https://openmonarch.org>, abgerufen am 26.05.2025.
- [2] Universität Passau: Institut für Informationssysteme und Softwaretechnik.
URL: <https://www.ifis.uni-passau.de>, abgerufen am 26.05.2025.
- [3] AriInfoWare GmbH. URL: <http://www.ariinfoware.de>, abgerufen am 26.05.2025.
- [4] Kölner Dombauhütte. URL: <https://www.koelner-dombauhuetten.de>, abgerufen am 10.06.2025.

Abbildungsverzeichnis

Alle im Beitrag gezeigten Screenshots stammen aus der Software MonArch und wurden von den Verfasser:innen des Beitrags erstellt. Die darin enthaltenen Beispielbilder des fiktiven Gasthauses werden gemäß der Inhaltslizenz von Pixabay verwendet (URL: <https://pixabay.com/de/service/license-summary>, abgerufen am 10.06.2025).

David Wendland

HISTORISCHE BAUWERKE MIT KOMPLEXER FORM

Mit Reverse Engineering und digitalen
Werkzeugen auf den Spuren der frühen
Bauhütten

DOL:10.60628/9783738810493-119

Moderne Untersuchungstechniken eröffnen neue Perspektiven auf historische Bauwerke. Mit der Methode des Reverse Engineering lassen sich Planungs- und Konstruktionsprozesse an den Objekten nachvollziehen, was wiederum größere baugeschichtliche Zusammenhänge erschließen kann. Dies wird im vorliegenden Beitrag anhand komplexer Gewölbekonstruktionen von der Antike bis zur Gotik illustriert. Ihre Planung basierend auf Flächen- oder Kurvenkonzepten ist eng mit der Entwicklung der Stereotomie als Lehre des räumlichen Steinschnitts verbunden. Die Betrachtungen geben Anlass, über Expertennetzwerke sowie Wissens- und Lehrorte im Umfeld der mittelalterlichen Großbaustellen nachzudenken. So erweisen sich digitale Werkzeuge als Schlüssel nicht nur zur Erforschung, sondern auch zum Erhalt historischer Architektur.

1 Verstehen historischer Konstruktionen durch Reverse Engineering

Die heutigen technischen Mittel für die Vermessung von Bauwerken und die Verarbeitung räumlicher Information sowie die digitalen Werkzeuge für die geometrische Analyse ermöglichen es, umfassende und belastbare Aussagen über die geometrische Konzeption der Objekte zu formulieren. Dies erschließt zwei wesentliche Untersuchungsperspektiven. Einerseits kann untersucht werden, an welchen Stellen die am Objekt gemessene Form deutliche Entsprechungen zu solchen Formen aufweist, die durch geometrische Begriffe beschrieben werden können, deren Anwendung auch in der Planung infrage kommt – oder aber Formen, die den geometrischen Gesetzmäßigkeiten der Konstruktion oder des Materialgefüges entsprechen. Andererseits können anhand von Hypothesen Formen modelliert und mit den Objektmessdaten verglichen werden, um zu untersuchen, ob sie diesen Daten in hinlänglicher Genauigkeit entsprechen oder ob systematische Abweichungen zur Generierung neuer Hypothesen führen müssen. Die Toleranzen bei der Entsprechung und die Prämissen der Modellierung lassen sich dabei visuell oder numerisch nachvollziehbar darstellen, was eine Diskussion der Schlussfolgerungen erlaubt [1–3]. Diese Methode des „Reverse Engineering“ gibt ausgehend von dem Bauwerk sowohl Einblick in die Entscheidungen und Vorgehensweisen bei der Planung als auch in das der Planung zugrunde liegende Wissen: Das Bauwerk wird als Primärquelle für die Wissensgeschichte erschlossen. Dank dieses Verständnisses können auch andere Quellen wie Zeichnungen oder Schriften neu interpretiert werden.

Insbesondere bei der Untersuchung geometrisch komplexer Konstruktionen – etwa Gewölbe oder sehr anspruchsvolle Werksteinkonstruktionen – lassen sich mithilfe der dreidimensionalen Messdaten und des Reverse Geometric Engineering konzeptionelle Grundlagen der Planung beschreiben. Das kann Bezüge offenlegen, die über die Wissensgeschichte hinaus auch allgemein für architekturhistorische Überlegungen relevant sind. Für den konservatorischen Umgang mit den Bauten ist dies schon allein deshalb von Belang, da die Spuren des Planungsprozesses ebenfalls Teil des dokumentarischen Wertes eines Baudenkmals darstellen und daher unbedingt zu erhalten sind. Mit Blick auf bildkünstlerische Objekte würde man dies als selbstverständlich betrachten. Darüber hinaus ist das Erscheinungsbild des räumlichen Gebildes wesentlich dadurch geprägt, wie das Objekt geplant und welche geometrische Konzeption dabei verwendet wurde – sprich, wie die gebaute Form beschrieben, geplant und hergestellt wurde. Eingriffe, die nicht der geometrischen Definition des Originals entsprechen, bergen daher die sehr große Gefahr, nicht nur den Denkmalwert zu schädigen, sondern auch die charakteristischen ästhetischen Qualitäten des Bauwerks zu verfälschen oder gar zu vernichten.

2 Gewölbeplanung und Geometrie

Gewölbe sind besonders anspruchsvoll in der Planung, da sie durch ihre Form stabil sind, indem sie gekrümmte Flächen aus Mauerwerk oder Werkstein bilden. Zum einen ist die Massivbaukonstruktion selbst in der zuvor festgelegten Form herzustellen, einschließlich ihrer konstruktiven Details, die bei der Verwendung von Werkstein in der Regel passgenau vorzufertigen sind. Zum anderen muss die temporäre Stützkonstruktion, die meist nötig ist, in der entsprechenden Form realisiert und daher exakt beschrieben werden. Die koordinierte Umsetzung der Planung an verschiedenen Stellen und durch unterschiedliche Gewerke erfordert einen verlässlichen Informationstransfer zur Ausführung. Hierfür sind geeignete Planungsmedien zu verwenden [2, S. 161–170] [4–5]. Vor allem aber muss die Form in geometrischen Begriffen definiert werden, die sich vermitteln und auch von den Ausführenden korrekt interpretieren lassen. Daraus wiederum ergibt sich ein unmittelbarer Bezug zur historischen Entwicklung der praktischen Mathematik.

Für die geometrische Beschreibung bei der Planung von Gewölben sind zwei grundsätzliche Herangehensweisen bekannt: Die eine geht von den Flächen aus, die andere von den Kurven [2] [6–7]. Der erste Ansatz basiert auf einer Definition der Flächen in geometrischen Begriffen. Er liegt zunächst der Entwicklung der Kreuzgewölbe in der antiken römischen Architektur zugrunde: Für die orthogonale Überschneidung zweier Tonnengewölbe, bei der diagonale Grate resultieren, ist die geometrische Beschreibung als Verschneidung zweier Halbzylinder naheliegend. Diese lässt sich bei der Ausführung der Gewölbeflächen aus Werkstein unmittelbar in die Planung überführen, indem der Verband aus den Gewölberändern zur Mitte hin extrudiert wird, sodass die Werkstücke aus den üblichen Bogensteinen abgeleitet sind.

Im Bereich der Kreuzgrate ist der Zuschnitt allerdings recht kompliziert, da die Bauteile am Grat die radialen Lagerfugen in beide Richtungen enthalten müssen (Abbildung 1). Ein eindeutiges Beispiel dieser Konzeption liefert die geometrische Analyse

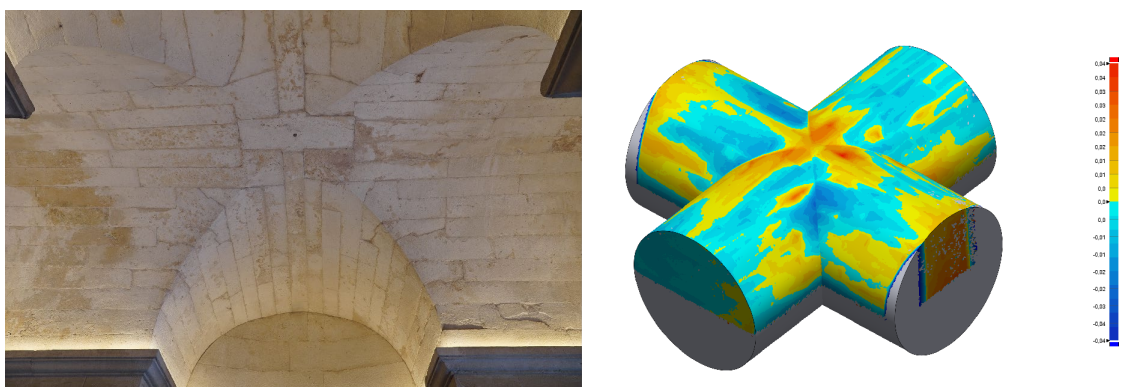


Abb. 1 Ravenna, Mausoleum des Theoderich, Kreuzgratgewölbe aus Werkstein im unteren Geschoss, 6. Jahrhundert – links ein Foto des Gewölbes (David Wendland); rechts eine geometrische Analyse davon, welche die Entsprechung des Gewölbes zu idealen Zylindermänteln zeigt (Mark Gielen, Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg [BTU])

des Tonnengewölbes im unteren Geschoss des um 520 errichteten Theoderich-Grabmals in Ravenna, Italien.¹ In die Punktwolke des Bauwerks (erzeugt mit terrestrischer digitaler Fotogrammetrie) lassen sich zylindrische Flächen einpassen. Gibt man die Abweichungen der einzelnen Punkte farbig aus, kann die Entsprechung durch die angegebene Toleranz nachvollziehbar dargestellt werden.

Die Kurven der Kreuzgrate beschreiben bei dieser Konzeption Ellipsen, was insofern nachteilig ist, als nicht nur das Anreißen, sondern auch die Bestimmung der radialen Bogenfugen mit Schwierigkeiten und Unsicherheiten verbunden ist, da die Krümmung an jeder Stelle unterschiedlich ist. In der Architekturgeschichte kommen elliptische Bögen daher selten vor [7]. Noch komplizierter wird es, wenn der Grundriss des Kreuzgewölbes nicht quadratisch ist. Bei der Verschneidung von Zylindern mit verschiedenen Radien oder auf verschiedenen Höhen entstehen räumlich gekrümmte Schnittkurven, deren geometrische Definition und konstruktive Umsetzung schwierig ist. In kleineren Dimensionen ist die Konstruktion mithilfe vollflächiger Schalung realisierbar, indem die Kurven ad hoc mit den Schalbrettern gebildet werden [8]. Bei einer Ausführung in Werkstein ist allerdings das Anreißen, basierend auf der geometrischen Konstruktion der räumlichen Kurven, sehr anspruchsvoll und deutet daher auf Virtuosität in Planung und Ausführung hin, wie wir noch sehen werden. Demgegenüber wurden in größeren Dimensionen, bei weit gespannten Gewölben, räumlich gekrümmte Grate in den Gewölbeflächen allgemein vermieden.

Die zweite grundsätzliche Herangehensweise an die Planung von Gewölben geht von den Kurven aus, die mit einfachen geometrischen Begriffen dargestellt werden. So können im Kreuzgewölbe sämtliche Kurven, also die Randbögen ebenso wie die Kreuzbögen, als Kreissegmente definiert werden, die in vertikale Ebenen einbeschrieben sind. Ausgehend von den Kurven sind die Flächen zu entwickeln. Mit dieser Konzeption lassen sich Kreuzgewölbe auf rechteckigen oder trapezförmigen Grundrissen ebenso problemlos konstruieren wie Grat- oder Rippengewölbe auf beliebigen Grundrissen: Zu bestimmen sind lediglich die Ansätze und Scheitelpunkte sowie die Radien der Bögen. Die Gewölbeflächen sind dann nicht mehr durch geometrische Grundkörper definiert. Im einfachsten Fall beschreiben sie Regelflächen, aber es können auch geometrisch komplexe Formen resultieren. In dieser Konzeption ist die Planung der Grate sehr leicht zu bewerkstelligen, ebenso wie die Ausführung der Lehrbögen entlang der Grate und, bei Rippengewölben, der Werksteinrippen. Dem steht die geometrische Komplexität der Gewölbeflächen gegenüber. Teils kann allerdings auf die Formulierung und Übermittlung von Begriffen für die Beschreibung ihrer Form verzichtet werden – etwa, wenn die Gewölbeschalen auf einer Bretterschalung hergestellt werden, die auf die Lehrbögen montiert wird, oder wenn sie zwischen den Lehrbögen oder Rippen freihändig gemauert werden.

Diese zweite Konzeptionsweise ist charakteristisch für den gotischen Gewölbebau [6] und kommt auch bei den komplexen spätgotischen Gewölben zum Tragen [2].

¹ Laufende Forschung gemeinsam mit Marina Döring-Williams (TU Wien) und Luise Albrecht

Inzwischen ist bekannt, dass sie schon vor der Gotik weit verbreitet war [9–12], wenn-
gleich der Ursprung zurzeit noch eine offene Frage der Architekturgeschichte ist.

Die geometrische Untersuchung von Gewölben erschließt, ob ihre Planung aus dem spätantiken oder aus dem „gotischen“ Schema abzuleiten ist. Im unteren Umgang des Aachener Doms – um 800 unter Karl dem Großen errichtet – bestehen die beiden Konzeptionen nebeneinander. Der Umgang ist um das mittlere Oktogon über einem 16-eckigen Grundriss ausgeführt. Dabei schließt an jede Arkade des Oktogons jeweils ein Kreuzgewölbe auf annähernd quadratischem Grundriss an. Die Raumteile dazwischen werden von dreiteiligen Gewölben überspannt, bestehend jeweils aus zwei halbzyklindrischen Kappen in Fortsetzung des Kreuzgratgewölbes und aus einer Stichkappe, die gegenüber der Ecke des Oktogons gegen die Außenwand gerichtet ist (Abbildungen 2 und 3). Wie die geometrische Analyse der Kreuzgratgewölbe zeigt [13–14],² sind diese, obgleich nicht perfekt quadratisch, aus der orthogonalen Verschneidung zweier Zylindermäntel gebildet – mit Kreuzgraten, deren Kurven Ellipsen beschreiben: Die Abweichungen der gemessenen Punkte von den modellierten Zylindermänteln sind sehr gering (Abbildung 3). Anders in dem zuvor genannten dreiteiligen Gewölbe: Hier lässt sich die Stichkappe keinesfalls als Mantelfläche eines geometrischen Grundkörpers definieren. Vielmehr sind die Grate als Kreissegmente in vertikalen Ebenen vorgegeben. Die Flächen dazwischen entsprechen Regelflächen mit geraden Erzeugenden: Die Schalbretter wurden zwischen den geometrisch bestimmten Randbögen – den beiden Graten der Stichkappe und dem Schildbogen – aufgelegt. Interessant ist auch die Ausbildung des gegenüberliegenden Grades, der an der Außenecke des inneren Oktogons entspringt. Dort wurde offenbar ebenfalls ein einfach kreissegmentförmiger Leirbogen verwendet, der allerdings nur im oberen Teil des Gewölbes die Form bestimmte. Die untere Partie des Grades – der im Ganzen eigentlich eine Ellipse beschreiben müsste, da er aus der schrägen Verschneidung zweier Zylindermäntel resultiert – wurde einfach weggelassen. An dieser Stelle hat das Gewölbe in der Ecke einen Einschnitt (Abbildung 2). Die Planenden des karolingischen Baus hatten somit beide Definitionen im Repertoire: die der Gewölbe-
flächen aus geometrischen Grundkörpern und die von den Kurven ausgehende, bei der die Bögen geometrisch beschrieben und die Flächen an ihren Verlauf angepasst werden. Dies bedeutet keineswegs, dass die letztgenannte Konzeption hier erfunden wurde. Vielmehr wurde sie genutzt, sofern sie bekannt war.

Aus der mittelalterlichen Architektur des späten 10. und frühen 11. Jahrhunderts sind mehrere Kreuzgratgewölbe bekannt, deren Konzeption ganz auf der Definition der Kurven beruht. Es sind also nicht nur die Kurven der Ränder, sondern auch die diagonalen Grate als Kreissegmente angelegt; die Fläche der Gewölbeschale ist somit zwischen diese gelegt. Ein prominentes und frühes Beispiel sind die Gewölbe in den Abseiten des Westbaus der Kölner Abteikirche St. Pantaleon [9–10], die in das späte 10. Jahrhundert datieren. Anhand von Vermessung und geometrischer Analyse konnte ihre geometrische Konzeption geklärt werden – einschließlich der Konstruktion der

2 Laufende Forschung am Fachgebiet (FG) Bautechnikgeschichte der BTU

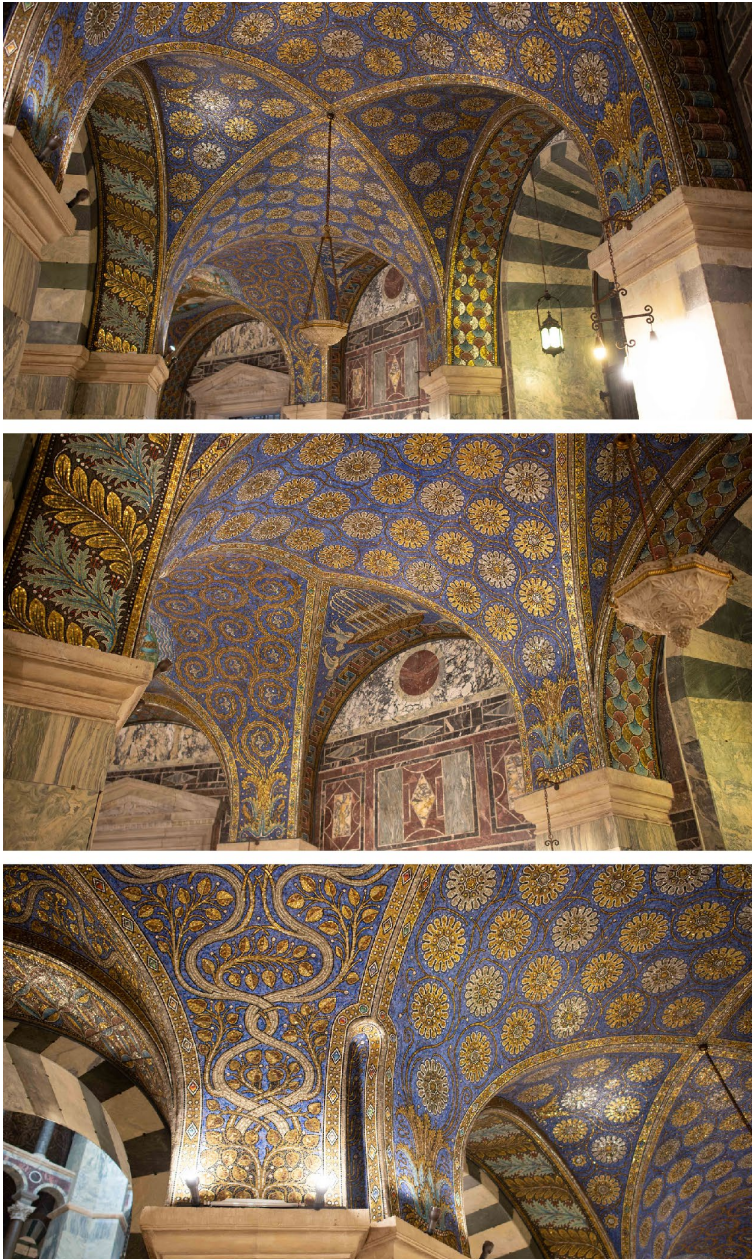


Abb. 2

Aachen, Dom, Gewölbe im Umgang des Oktogons (um 800) – oben: Kreuzgewölbe mit elliptischen Graten; Mitte: dreistrahliges Gewölbe mit kreissegmentförmigen Graten; unten: Aussparung der unteren Partie des Grates an der inneren Ecke (Mark Gielen, BTU)

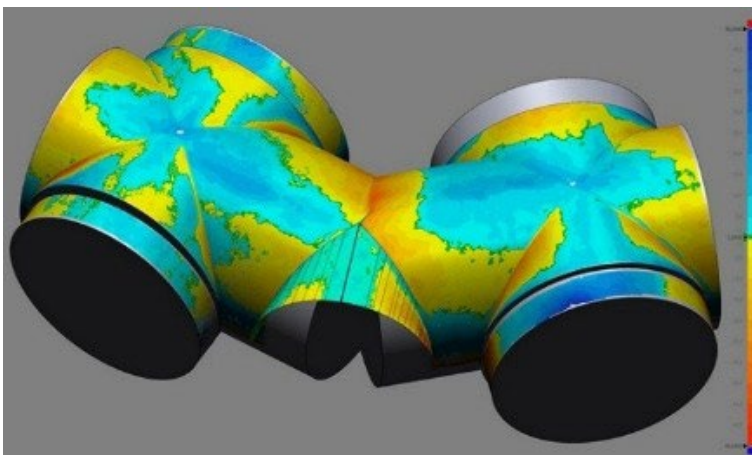


Abb. 3

Aachen, Dom, geometrische Analyse des Gewölbes im Umgang des Oktogons (Abweichungen der Punktwolke von ideellen Flächen farbig dargestellt): Sie zeigt zylindrische Schalen im Kreuzgratgewölbe und eine Regelfläche zwischen Graten, die vertikale Kreissegmente beschreiben (Mark Gielen, BTU).

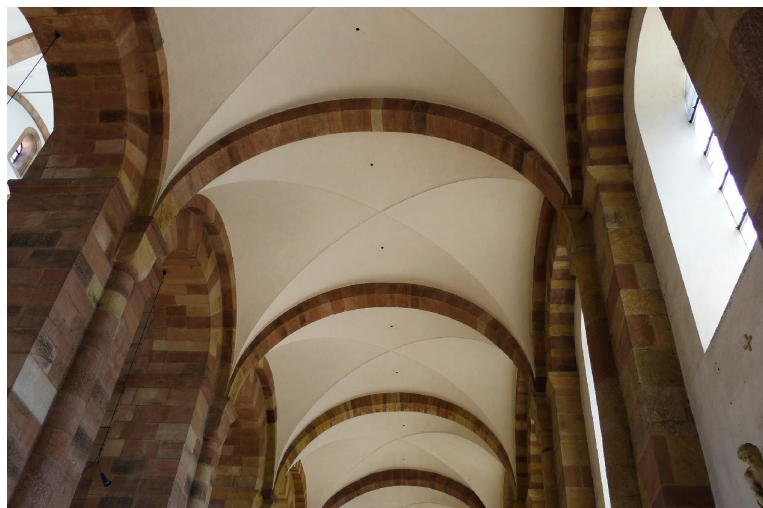
Bretterschalung, die auf den Rüstbögen montiert war und deren Abdrücke noch erkennbar sind. Ähnliche Analysen wurden unter anderem für Kreuzgratgewölbe in der Abteikirche von Saint-Philibert in Tournus, Frankreich, und in weiteren Bauten in Burgund durchgeführt [11–12].

Die Planung von Kreuzgratgewölben auf rechteckigen oder sogar trapezförmigen Grundrissen mit der zusätzlichen Schwierigkeit, dass die Kappen von den Rändern her zur Mitte hin ansteigen, lässt sich in den Seitenschiffen des Doms in Speyer untersuchen (Abbildung 4). Sie sind der ersten mittelalterlichen Bauphase in der Mitte des 11. Jahrhunderts zuzuordnen.³ Anders als in der Forschung bisher beschrieben, beruht auch die Konzeption dieser Gewölbe auf den Kurven [13–14]: Die Gewölberänder bilden jeweils Halbkreise, die Kreuzgrate Kreissegmente. Nur in den unteren Partien weicht der Kurvenverlauf hiervon aus konstruktiven Gründen ab. Wegen des rechteckigen Grundrisses ragen die Gewölberänder über den Gurtbögen deutlich höher auf als an den längs des Kirchenschiffes liegenden Schildbögen über den Arkaden und äußeren Fenstern. In der Planung wurde der Scheitel in der Gewölbemitte auf dem Niveau der höheren Randbögen festgelegt. Das Anreißen der vier halben Kreuzbögen jeweils als Kreissegment konnte dann mit den gegebenen beiden Punkten am unteren und oberen Ansatz sowie der Lage des Kreismittelpunktes unter dem Gewölbescheitel erfolgen (Abbildung 5).

Die Fläche der Gewölbeschalen zwischen den Kreuzgraten und den höheren Randbögen beschreibt jeweils eine Regelfläche mit geraden Erzeugenden. Offensichtlich wurden in den Diagonalen der Gewölbejoche ebenso wie an den Rändern Lehrbögen aufgestellt und darauf die geraden Schalungsbretter befestigt. An den Gewölbeschultern liegen die geraden Erzeugenden der Gewölbeffläche aufgrund der unterschiedlichen Kurvenverläufe von Kreuz- und Randbogen nicht horizontal – entsprechend

³ Laufende Forschung am Dom zu Speyer seit 2021 durch den Verfasser mit Mark Gielen, Soheil Nazari, Jonas Lengenfeld und Vladimir Korensky. Wir danken der Dombaumeisterin Hedwig Drabik und dem Domkapitel für die großzügige Unterstützung.

Abb. 4
Speyer, Dom,
Gewölbe im südlichen
Seitenschiff: Die Joche
sind im Grundriss rechteckig, die Kreuzgrate verlaufen jedoch gerade. Folglich wurde die Gewölbeffläche ausgehend von den Kurven – und nicht anhand der Mantelflächen geometrischer Grundkörper – konzipiert.



den jeweils zwischen zwei Lehrbögen gespannten und äquidistant zum jeweiligen Kappenscheitel angeordneten Schalungsbretter. In Querrichtung ist die Flächenform etwas komplexer: Die Kappen steigen von den Schilden zunächst gerade an – auch hier lässt sich die Fläche also mit geraden Erzeugenden definieren –, während sie in den oberen Partien, nahe dem Scheitel, eine konkave Krümmung beschreiben (Abbildung 5). Hier wird auf ein Problem reagiert, das bei ansteigenden Kappen auftreten kann: Eine vom niedrigeren Schildbogenscheitel zum mittleren Gewölbescheitel hin gerade ansteigende Verbindung würde dort niedriger zu liegen kommen als die Kurven der Kreuzgrate, die mit horizontaler Tangente am Scheitel anschließen, woraus in diesem Bereich eine konkav-konvex gekrümmte Flächenpartie resultieren würde. Das Problem wird in technischen Publikationen des 19. Jahrhunderts angesprochen, die sich mit der Konstruktion von Gewölben befassen [13–16]. Die geometrische Analyse der Gewölbe in Speyer zeigt, dass das Problem dort systematisch vermieden wurde – dass wir in den Erbauer:innen des 11. Jahrhunderts somit ausgewiesene Expert:innen sehen müssen, die mit den geometrischen Aspekten der Planung und Konstruktion von Gewölben bereits bestens vertraut waren. Diese Aussage zeigt im Übrigen sowohl die Signifikanz geometrischer Eigenschaften, die zum historischen Quellenwert des gebauten Objekts gehören, als auch die Potenziale digitaler Analysewerkzeuge, um die Eigenschaften zu erkennen und zu beschreiben.

Wie das simple Beispiel der Kreuzgratgewölbe beweist, bewirkt eine Konzeption von Gewölben, die von den definierten Kurven der Bögen ausgeht, eine Vereinfachung auf mehreren Ebenen. Es erlaubt die Planung über nicht-quadratischen, unregelmäßigen oder sogar beliebigen Grundrissen, unterstützt die Formulierung von Konstruktionsvorgaben für die Lehrgerüste und hat dann auch in der Entwicklung der Rippengewölbe den Zuschnitt der Rippensteine erleichtert. Zugleich aber wird die geometrische Beschreibung der Gewölbeflächen erheblich erschwert. Der einfachste Fall sind die Regelflächen, die durch das Aufbringen einer Bretterschalung über den Lehrbögen entstehen – wobei sich, wie wir gesehen haben, selbst hier Herausforderungen bei der Planung ergeben können. Noch schwieriger wird es, wenn die Schalen der Gewölbe

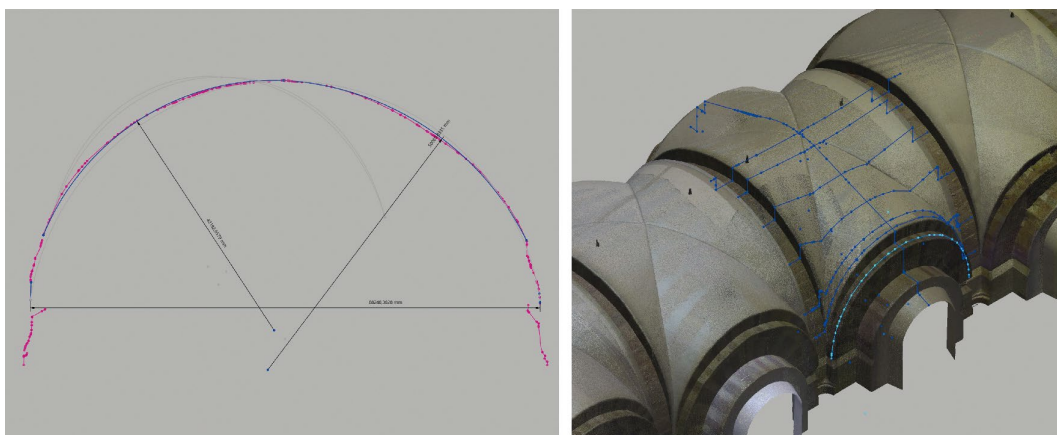


Abb. 5 Speyer, Dom, Seitenschiffgewölbe, geometrische Analyse – links die Kurven der Kreuzgrate als Kreissegmente; rechts Punktwolke mit charakteristischen Schnitte durch die Gewölbefläche (Mark Gielen, BTU)

in einem regelmäßigen Mauerwerksverband angelegt werden sollen, insbesondere bei sorgfältig ausgeführtem Sichtmauerwerk.

Die Gewölbe der westlichen Partien der Abteikirche Saint-Denis in Frankreich wurden in den 1130er-Jahren unter Abt Suger neu errichtet und gelten als Ursprung der gotischen Architektur. Sie weisen Rippen aus Werkstein auf – ein Motiv, das offenbar ausgehend vom Querhausgewölbe im Speyerer Dom in den großen normannischen Kirchenbauten entwickelt und dann in Saint-Denis aufgenommen wurde. Darüber hinaus wurden hier auch die Schalen der Gewölbe aus Werkstein in Sichtmauerwerk ausgeführt. In dem sehr sorgfältig angelegten Mauerverband sind die Lagerfugen in ihrem Verlauf an den Scheiteln der Kappen ausgerichtet, wodurch sie an den Gewölbeschultern schräg ansteigen. Die Gewölbefläche lässt sich hier ebenfalls als Regelfläche mit geraden Erzeugenden beschreiben. Realisierbar war dies, indem Latten auf die Rippenbögen gelegt wurden. Für die Ausführung des Sichtmauerwerks war das besser geeignet als eine vollflächige Bretterschalung.⁴

Noch schwieriger werden Planung und Ausführung des Sichtmauerwerks in den Gewölbeschalen, wenn diese eine doppelte Krümmung erhalten. Ein frühes Beispiel sind die Gewölbe im Mittelschiff der Kathedrale von Angers, Frankreich, die um 1160 eingebaut wurden. Die Kreuzrippengewölbe über rechteckigen Jochen weisen eine ausgeprägte konkave Krümmung der Gewölbeflächen auf, in denen die Lagerfugen ebenfalls äquidistant zu den Kappenscheiteln verlaufen.

In ähnlicher Weise, allerdings in einem sechsteiligen Gewölbe und damit in einer weit komplizierteren Anlage, wurden die Gewölbe des 12. Jahrhunderts in Notre-Dame in Paris errichtet [17]. Die konkave Krümmung der Gewölbeflächen zwischen den Rippen (Abbildung 6) ist architektonisch plausibel und auch aus statischer Sicht vorteilhaft. Zugleich implizierte sie erhebliche Anforderungen an die Herstellung in Sichtmauerwerk aus regelmäßigen quaderförmigen Mauerblöcken und ist in ihrer perfekten Ausführung besonders kunstvoll. Die Flächenkrümmung wird durch die Kurven erzeugt, welche die einzelnen Kappenscheitel beschreiben. In den „gebusten“ Kappen freihändig gemauerter Kreuzgewölbe entstehen die Kurven in den Scheiteln von selbst durch das Aufmauern in bogenförmigen Schichten und bilden infolgedessen Kurven mit wechselnden Krümmungsgradienten [15] [18]. Bei den konkav gekrümmten Gewölbeflächen hingegen sind die Scheitel der Kappen präzise als Kreissegmente geformt, wie die geometrische Analyse zeigt.⁵ Sie müssen also durch eigene Lehrbögen geführt und damit auch durch Planung vorgegeben worden sein. In den westlichen Jochen des Mittelschiffs, die sich der letzten Phase der Einwölbung um 1200 zurechnen lassen, sind die Radien der Kreissegmente, welche die Kappenscheitel beschreiben, offensichtlich in die Gesamtkonzeption des Gewölbeentwurfs

4 Eine bauzeitliche, temporäre Stützkonstruktion aus Holzlatten hat sich an einem Rippengewölbe in Schloss Chillon, Schweiz, erhalten (Hinweis von Frédéric Degenève).

5 Die Untersuchungen an den Gewölben von Notre-Dame wurden 2023 bis 2024 vom Verfasser gemeinsam mit Mark Gielen und Vladimir Korensky durchgeführt. Wir danken den Architekten Philippe Villeneuve und Pascal Prunet sowie Elsa Duculot für die freundliche Unterstützung.

integriert [17]. Im Gewölbe des Hochchors, das vor 1177 vollendet wurde [17, S. 22], ist dies noch nicht der Fall. Allerdings dient die Krümmung hier bereits systematisch zur Vermeidung des Problems, das wir für die Gewölbe im Seitenschiff des Doms zu Speyer erläutert haben – denn auch in den hohen Gewölben in Notre-Dame liegen die Schildbögen überall deutlich unterhalb der Gewölbescheitel.

Der Mauerwerksverband in den Gewölbeschalen ist so angelegt, dass insbesondere in den oberen Partien eine große Regelmäßigkeit erreicht wird. Die Lagefugen des nahtlos in jeder Kappe ausgeführten Mauerwerks sind an den Kappenscheiteln ausgerichtet. Sie verlaufen daher nicht horizontal, was durch die konkave Flächenform noch verstärkt wird (Abbildung 7). In den unteren Partien weicht die Richtung der Fugen noch von diesem Schema ab: Zunächst erhalten die Fugen eine stärkere Neigung, die dann oberhalb davon in Richtung der zum Scheitel äquidistanten Fugen korrigiert wird. Das hat offenbar geometrische Gründe und ermöglichte es auch, diese Partien freihändig zu mauern. Oberhalb davon war das Mauerwerk der Schalen durch eine temporäre Konstruktion unterstützt, deren Spuren an den Rippen erkennbar sind. Die Mauertechnik und die Stützkonstruktion sind Gegenstand laufender Forschung, basierend auf der geometrischen Analyse der Messdaten (Abbildung 7). Die zentrale



Abb. 6

Paris, Notre-Dame, sechsteilige Gewölbe im Mittelschiff, westliche Joche, wohl um 1200: Die Schalen sind konkav gekrümmt und in Sichtmauerwerk aus Werkstein ausgeführt; die Scheitel beschreiben vertikale Kreissegmente.

Frage ist, wie die Anlage des Mauerwerksverbands effektiv geplant werden konnte, um im Scheitel mit der erkennbaren Präzision „anzukommen“ – und auf diese Weise auch die nicht geometrisch definierten Gewölbefflächen als Werksteinkonstruktion zu realisieren.

Bemerkenswert ist das konstruktive Detail der Kappenscheitel: Während das Schalenmauerwerk aus seriellen Blöcken besteht, die man nur dort, wo die Richtung zu korrigieren war, eigens zugerichtet hat, wurden bei den Kappenscheiteln spezielle Formsteine verwendet, die dem Schlussstein eines Bogens entsprechen (Abbildung 6). Das Detail ist in den Gewölben von Saint-Denis noch nicht vorhanden und scheint erstmals in Angers aufzutauchen. In den auf Notre-Dame folgenden großen Gewölbekonstruktionen der Gotik verschwindet es wieder. Die fugenlosen Scheitel der Gewölbekappen, an denen das Mauerwerk sorgfältig ausgerichtet ist, unterstreichen die Perfektion der ausgeklügelten Werksteinkonstruktion des Gewölbes, die den Erbauer:innen offensichtlich sowohl bei der Planung als auch bei der Ausführung besonders wichtig war: eine radikal zu Schau gestellte, ungemein komplexe und anspruchsvolle Werksteinkonstruktion.

Die Planung des Gewölbes ging, entsprechend der auf den Kurven basierenden Konzeption, von den Rippen und Schlusssteinen aus. Letztere wurden zuerst positioniert, was – wie aus Bauuntersuchungen und Quellen zu spätgotischen Gewölben bekannt ist – mithilfe vertikaler Pfosten im Lehrgerüst erfolgen konnte [2]. Die oberen Enden der Lehrbögen für die Rippen wurden dann an den Schlusssteinen ausgerichtet. Bei der Ausrichtung ihrer unteren Enden auf den Kämpferplatten in Notre-Dame halfen Ritzlinien (Abbildungen 8 und 9). Sie wurden vermutlich zusammen mit einem Werkriß auf einer in der Kämpferebene eingezogenen Arbeitsplattform gezeichnet, in dem sich das geometrische System des Gewölbes aus der Planung auf den Bau übertragen

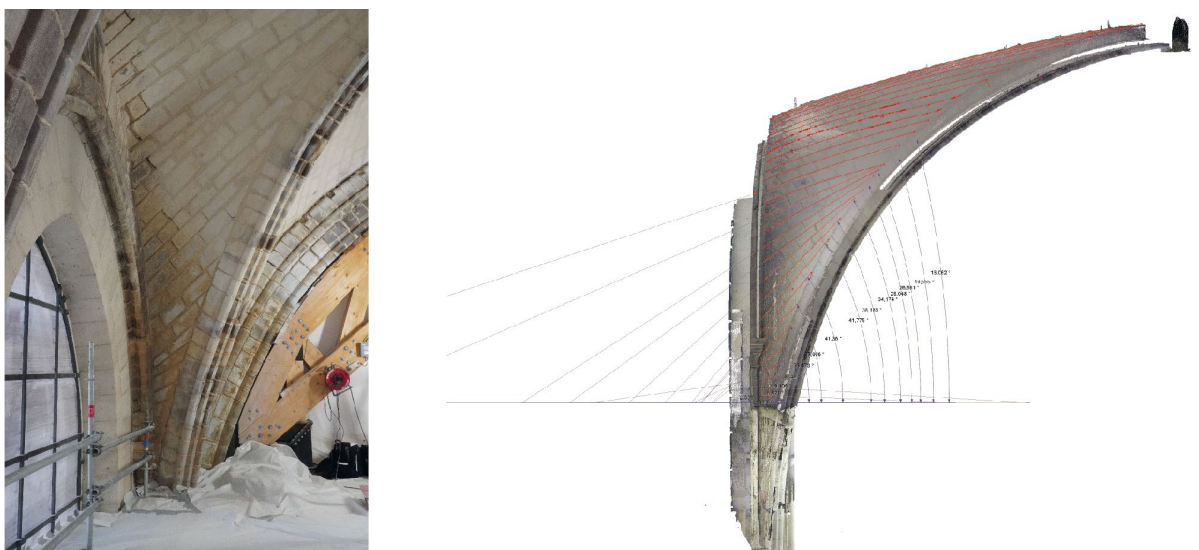


Abb. 7 Paris, Notre-Dame, Gewölbe im Mittelschiff (östliche Joche, Südseite), spätes 12. Jahrhundert – links die Mauerwerkstextur der Schale (David Wendland), rechts eine geometrische Analyse davon basierend auf 3D-Lascans (Mark Gielen, BTU)



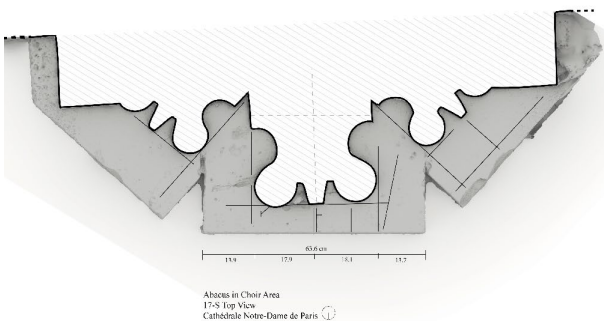
Abb. 8

Paris, Notre-Dame, Ansatz des Gewölbes im Hochchor, vor 1177: Auf den Kämpferplatten sind Ritzlinien gezeichnet, die der Positionierung der Rippen und ihrer Lehrbögen dienen.



Abb. 9

Notre-Dame, Gewölbe im Hochchor, Ritzlinien auf den Kämpferplatten: Analyse basierend auf Punktwolken aus der Kombination von 3D-Laserscan und digitaler Fotogrammetrie. Selbst sehr feine Linien werden in der Punktwolke sichtbar. Die digital nachmodellierten Linien sind in das räumliche Koordinatensystem der Gesamtaufnahme integriert (Soheil Nazari, BTU).



ließ [17] [19]. Die Linien laufen mitunter über mehrere Steinplatten hinweg und wurden somit sicher erst in situ gezogen (Abbildung 9 Mitte). Die Kombination aus digitaler Fotogrammetrie und Laserscanning ermöglicht es heute, die Ritzlinien zu untersuchen und in ihrem exakten geometrischen Zusammenhang zu modellieren. Diese Analyse lässt sich auch mit einer mittelalterlichen Planzeichnung in Bezug setzen, die sich in der Sammlung der Straßburger Münsterbauhütte befindet und den Grundriss des Chors von Notre-Dame im Maßstab von ca. 1:100 zeigt. Dabei handelt es sich vermutlich um die Kopie des ursprünglichen Bauplans des um 1160 begonnenen Chors [17]. Dieser Befund erlaubt es uns indirekt, den Architekt:innen des 12. Jahrhunderts bei ihrer Arbeit über die Schulter zu schauen und ihre Planungsmedien zu untersuchen. Er ließ sich nur durch aktuelle Methoden der Bauwerksuntersuchung erschließen – was zugleich die Bedeutung der wissenschaftlichen Interpretation und Einordnung unterstreicht, um solche Befunde an den Bauwerken zu sichern.

3 Stereotomie und ihre Vorgeschichte in den Bauhütten

Der Anspruch, mit dem Bau von Notre-Dame eine hochkomplexe und zugleich perfekt gefügte Werksteinkonstruktion zu schaffen, betrifft nicht nur die Gewölbe, sondern die gesamte Architektur. Besonders deutlich wird dies im Chorrund, das sich im Grundriss hufeisenförmig an die Mittel- und Seitenschiffe sowie an die Empore anschließt. In seinem gesamten Wandaufbau, einschließlich der Arkaden von Umgang und Emporen sowie der Obergadenfenster, ist die zylindrische Krümmung in aller Konsequenz ausgeführt. So besitzen sämtliche Bögen eine räumliche Krümmung, was einen entsprechenden Zuschnitt jedes einzelnen Bogensteins erfordert (Abbildung 10). Diese besonders anspruchsvolle Konstruktion ist nicht singulär: Ähnliches gibt es bereits in Saint-Denis und auch in anderen früheren ebenso wie zeitgenössischen Pariser Abteikirchen. Doch in Notre-Dame kann sie als besonders kunstvoll und in der Durchführung sogar radikal bezeichnet werden.

Die Steinplanung für räumlich gekrümmte Bögen ist eine klassische Aufgabe der Stereotomie, also der Lehre des räumlichen Zuschnitts der Bauteile komplexer Werksteinkonstruktionen. Sie ist durch eine Gruppe von Traktaten aus der frühen Neuzeit bekannt, deren Anfang in dem 1567 erstmals gedruckten Architekturtraktat von Philibert de l'Orme liegt [20–21]. Die Texte beschreiben einen Kanon von Aufgaben, der neben verschiedenen Gewölbeformen auch gewölbte Treppen, Trompen, Fensteröffnungen sowie Bögen über verschiedenen Grundrissen – schräg, rund, exzentrisch oder durch die Ecke führend – erläutert. Der Kanon blieb bis in das 19. Jahrhundert bemerkenswert konstant, während sich die empfohlenen Lösungen im Kontext der Entwicklung der praktischen Mathematik wandelten, bis hin zur Einführung der modernen darstellenden Geometrie um 1800.

Allerdings deutete sich der Kanon der Stereotomie bereits lange vor der Entstehung dieser Bücher an. Prominente Beispiele für die Bogenaufgaben sind die Werksteinkonstruktionen der Spätgotik. So ist etwa das gesamte Spektrum der Aufgaben in

der 1471 begonnenen Albrechtsburg in Meißen vorhanden [2, S. 41–55]. Auch die Planung von Gewölben mit räumlich gekrümmten Rippen hat einen Bezug zu den Praktiken und Planungsmedien, die in den frühen Traktaten der Stereotomie beschrieben werden [2] [5]. Die bekannten Lehrschriften aus dem Kontext der spätgotischen Planungspraxis, z. B. von Jakob Facht von Andernach und Hans Hammer, zeigen die Planungsaufgaben ebenfalls explizit [2, S. 46–51].

Der früheste bekannte schriftliche Beleg für den Kanon der Stereotomie findet sich im *Carnet* des Villard de Honnecourt [22]. Die Handschrift ist um 1230 entstanden und gibt Einblick in die Lehre, die sich damals um die großen Baustellen der Gotik



Abb. 10

Paris, Notre-Dame, gekrümmte Bögen in der Chorempore: Die einzelnen Bogensteine müssen in dieser Konstruktion so angerissen werden, dass sie entsprechend dem kreisförmigen Grundriss verdreht sind.



Abb. 11

Villard de Honnecourt, *Carnet*, um 1230, Anleitung zur Planung eines Bogens in einer zylindrischen Wand [22, fol. 20 r]

etablierte. Der Abschnitt, welcher der Steinplanung gewidmet ist, zeigt schon allein in der Terminologie enge Bezüge zu den frühneuzeitlichen Beschreibungen der Stereotomie [2, S. 225]. Mitunter sind es die gleichen Aufgaben, während die Anleitungen selbst obskur bleiben. Bereits hier ist, wie in den neuzeitlichen Schriften, die Konstanz der Aufgabenstellungen mit einer breiten Variabilität der Lösungen zu beobachten. Als Lehrbeispiel taucht auch der Steinschnitt im gekrümmten Bogen auf (Abbildung 11), wie er bereits vor 1177 im Chor von Notre-Dame und eine Generation davor wiederum in Saint-Denis an prominenter Stelle realisiert wurde. Er ist begleitet von der Erläuterung: „So schneidet man einen verdrehten Bogenstein in einer runden Mauer“ [22, fol. 20 r] [2] [17].

Die Geschichte der Stereotomie in der europäischen mittelalterlichen Architektur ist allerdings deutlich älter als die Großbaustellen des 12. Jahrhunderts in der Île-de-France. Ein besonders prominenter Bau mit sehr komplexen und zur Schau gestellten Werksteinkonstruktionen, die nur mit dem Wissen der Stereotomie geplant werden konnten, ist wiederum der Dom in Speyer [14]. Ein Beispiel ist die Gestaltung der Innenwand der Apsis, die vermutlich bereits vor 1060 realisiert wurde: In der runden Blendarkade öffnen sich Nischen mit jeweils halbkreisförmigem Grundriss, über denen je ein Gewölbe in Form einer Kugelfläche mit der zylindrischen Wand der Apsis verschnitten ist. Wand, Nischen und Kalotten sind sorgfältig in Werkstein ausgeführt. Das Fugennetz entspricht nicht der neuzeitlichen Systematik, aber auch hier hat sich die Aufgabe gestellt, anhand einer geometrischen Beschreibung die Werkstücke entsprechend den Formen und ihren Schnittkurven exakt zu definieren und zu fertigen.

Ein weiteres auffälliges Beispiel für anspruchsvolle Stereotomie sind die seitlich verzogenen Fenstergewölbe des Querhauses des Speyerer Doms (Abbildung 12), die der zweiten mittelalterlichen Bauphase (1080 bis kurz nach 1100) zuzurechnen sind [14]. Wie die einzelnen Gewölbesteine anzureißen und zuzuschneiden sind, wird in den

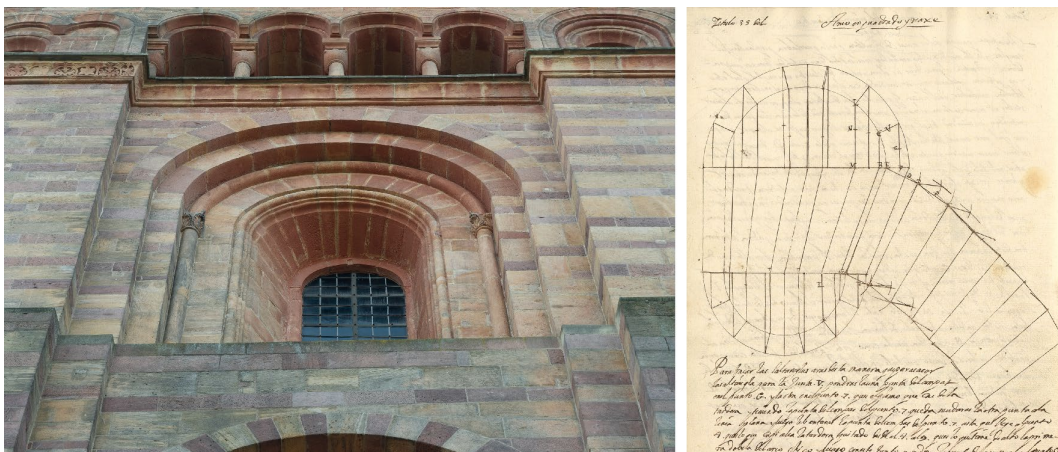


Abb. 12 Speyer, Dom, verzogene Fenster in der nördlichen Querhausfassade, spätes 11. Jahrhundert – links ein Foto davon (David Wendland); rechts die Anleitung zur Planung eines verzogenen Fenstergewölbes in der Lehrschrift der Stereotomie des Alonso de Vandelvira (spätes 16. Jahrhundert). Sie zeigt im Werkriss die Konstruktion der Abwicklungen der Leibungen und der Winkel an der Bogenstirn [21].

neuzeitlichen Traktaten detailliert beschrieben. Mit geometrischen Verfahren in der Ebene sind auf dem Reißboden die Abwicklungen der Leibungen für die Schablonen zu konstruieren, ebenso wie die Winkel der Fugen zwischen Leibung und Bogenstirn für die entsprechende Einstellung der Schmiegen (Abbildung 12).

Der Speyerer Dom bietet noch weitere besonders gut erhaltene Beispiele anspruchsvoller Stereotomie, etwa die ebenso der zweiten großen Bauphase zugehörigen oberen Partien der Osttürme, deren Inneres jeweils durch einen zylindrischen Treppenschacht eingenommen wird. Eine Türöffnung im Nordostturm ist exzentrisch angelegt, sodass ihr zylindrischer Bogen schräg in die gleichfalls zylindrische Wandfläche einschneidet (Abbildung 13). Philibert de l'Orme bezeichnet diese Bogenform knapp 500 Jahre später als „tour ronde biaise“ [20].

Besonders raffiniert ist auch die Anlage der konisch zulaufenden Fensterbögen im Speyerer Dom. Wie die geometrische Analyse der Messdaten beweist (Abbildung 14), entsprechen die Leibungen präzise der Geometrie von Kegelmänteln.⁶ Der Zuschnitt der Werksteine beruht daher auf der Verschneidung dieser Kegelmäntel mit dem Zylindermantel der Wand, was die exakte Konstruktion der Schnittkurve ebenso

6 Siehe Fußnote 3, Untersuchung der Fenster in den Treppentürmen im Rahmen der Masterarbeit von Josephine Tillmann (BTU, FG Bautechnikgeschichte), 2024

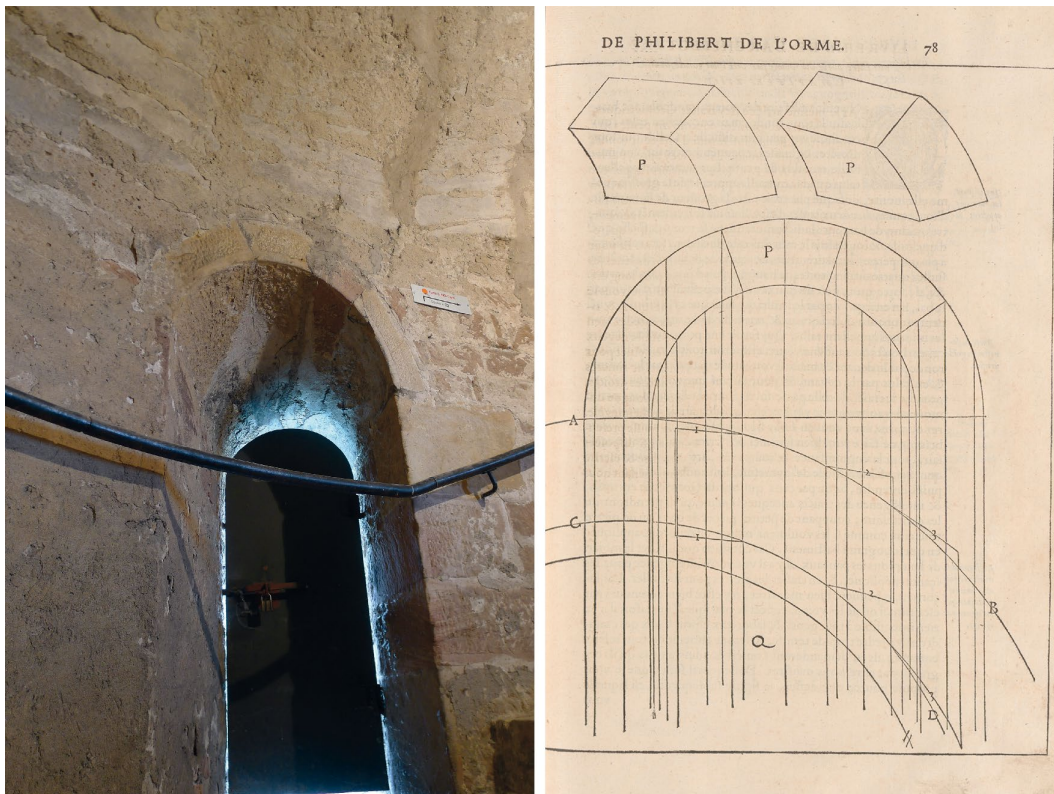


Abb. 13 Speyer, Dom, exzentrische Tür im Nordostturm, spätes 11. Jahrhundert – links ein Foto davon (David Wendland); rechts die Anleitung zum Werkriss einer „tour ronde biaise“ [20]

erfordert wie die Anlage der radialen Fugen und der Winkel, die sich an diesen Fugen zwischen Leibung und Bogenstirn ergeben. In einigen Fällen beruht der Zuschnitt der Bogensteine sogar auf der Verschneidung der kegelförmigen Leibung mit dem spiralförmig ansteigenden Tonnengewölbe der Treppe; auch das belegen die Messdaten zweifelsfrei.

Detaillierte Lösungen für diese Planungsaufgaben werden erstmals im 16. Jahrhundert beschrieben. Wir können zeigen, dass die Prozeduren auch auf die Beispiele in Speyer

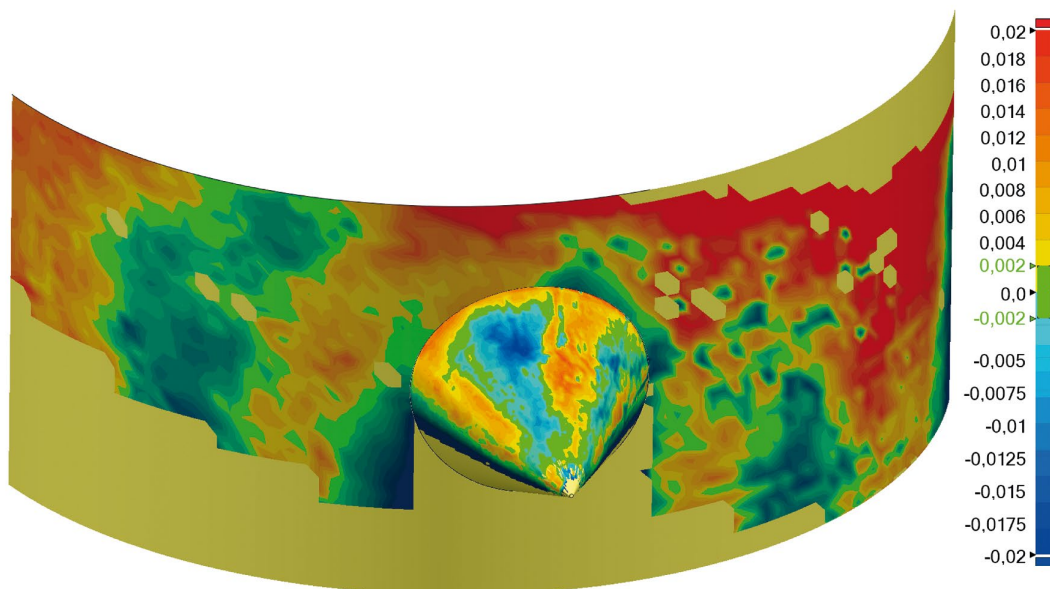


Abb. 14 Speyer, Dom, Fenster im Südostturm, spätes 11. Jahrhundert – oben ein Foto davon (David Wendland); unten die geometrische Analyse der Stereotomie (Josephine Tillmann, BTU)

anwendbar sind und funktionieren (Abbildung 15). Was sich hingegen unserer Kenntnis entzieht, sind die Fragen, wie diese Werksteinkonstruktionen im 11. Jahrhundert tatsächlich geplant und hergestellt wurden, auf welches mathematische Wissen dabei zurückgegriffen wurde und welche Planungsmedien zum Einsatz kamen.

4 Ausblick

Ebenso wie bei Villard die aus der Neuzeit bekannten Konstruktionen mit anderen Methoden gelöst werden, unterscheiden sich auch die Werksteinkonstruktionen in Speyer unter einigen Gesichtspunkten von den klassischen Lösungen, die in den späteren Traktaten präsentiert werden. Die Konstruktionen haben ihre eigene Systematik, die zu verstehen ein zentrales Anliegen der laufenden Forschung ist. Doch es handelt sich hier offensichtlich nicht um Experimente oder um ein Herantasten an Lösungen. Vielmehr ist zu erkennen, dass die Planenden genau wussten, was sie taten – dass es also mit einer etablierten Praxis auf Basis entwickelter Expertise zu tun haben. Dies führt zur Frage der Herkunft der komplexen Lösungen in Speyer, denn Vorbilder dafür sind bisher weder speziell in dieser geografischen Region noch allgemein in Mitteleuropa bekannt. Beim jetzigen Forschungsstand lässt sich hierzu nur spekulieren. Einige Zitate byzantinischer Architektur im Speyerer Dom, und sogar deutliche Verweise auf die Hagia Sophia in Istanbul, Türkei, suggerieren, dass der Blick hierfür nach Osten zu richten ist. Dies scheint auch naheliegend, wenn man die damaligen Beziehungen nach Konstantinopel bedenkt. Weiterhin stellt sich angesichts der großen Expertise, die in Speyer über die lange Bauzeit hinweg vorhanden gewesen sein muss – sowohl im Gewölbebau als auch auf dem Gebiet der Stereotomie – die Frage, ob es auf dieser Baustelle nicht bereits eine Instanz gegeben haben könnte, über die

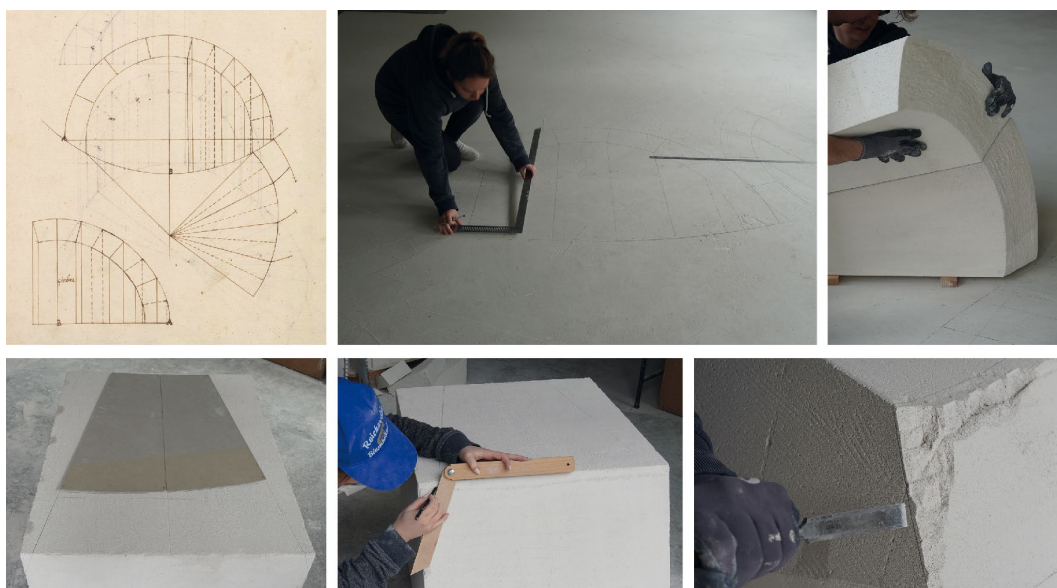


Abb. 15 Experimentelle Reproduktion der Bogensteine (Abb. 14) anhand einer Anleitung einer ähnlichen Konstruktion bei Vandelvira [21] (Masterarbeit Josephine Tillmann, BTU).

dieses Wissen vermittelt und konstant vorgehalten wurde – ganz so, wie wir uns in den Großbaustellen der folgenden Generationen die Bauhütten mit ihren Wissensressourcen, ihrem Lehrbetrieb und ihrer weitreichenden Vernetzung vorstellen. Schriftquellen hierzu sind nicht bekannt, sodass die Bauten selbst sprechen müssen – als Quellen, die durch Bauwerksaufnahme und deren Interpretation zu erschließen sind.

Literaturverzeichnis

- [1] Wendland, David: „Arches and Spirals: The Geometrical Concept of the Curvilinear Rib Vault in the Albrechtsburg at Meissen and Some Considerations on the Construction of Late-Gothic Vaults with Double-Curved Ribs.“ In: Robert Carvais et al. (Hrsg.): *Nuts and Bolts of Construction History: Culture, Technology and Society* (Bd. 1). Paris: Picard, 2012, S. 351–357.
- [2] Wendland, David: *Steinerne Ranken, wunderbare Maschinen: Entwurf und Planung spätgotischer Gewölbe und ihrer Einzelteile*. Mit Beiträgen von M. J. Ventas Sierra, M. Aranda Alonso und A. Kobe. Petersberg: Michael Imhof Verlag, 2019.
- [3] Schmitt, Rebecca / Wendland, David: „Untersuchung der geometrischen Konzeption der Gewölbe der Basilika Vierzehnheiligen auf Basis von 3D-Scanningdaten im Kontext der Stereotomie“. In Christoph Rauhut et al. (Hrsg.): *Materialgerecht konstruiert?!?* (Tagungsband der Fünften Jahrestagung der Gesellschaft für Bautechnikgeschichte 2021). Petersberg: Michael Imhof Verlag, 2023, S. 105–121.
- [4] Völkle, Peter: *Werkplanung und Steinbearbeitung im Mittelalter*. Ulm: Ebner Verlag, 2016.
- [5] Wendland, David: „Architekturzeichnung und ihre Rolle beim Entwurf komplexer Werksteinkonstruktionen in Spätmittelalter und Früher Neuzeit: Überlegungen am Beispiel der Katharinenkapelle im Straßburger Münster“. In: *Architectura*, 47 (2017 [2019]), S. 1–23.
- [6] Müller, Werner: *Grundlagen gotischer Bautechnik*. München: Deutscher Kunstverlag, 1990.
- [7] Müller, Werner: *Steinmetzgeometrie zwischen Spätgotik und Barock*. Petersberg: Michael Imhof Verlag, 2002.
- [8] Holzer, Stefan M.: *Gerüste und Hilfskonstruktionen im historischen Baubetrieb: Geheimnisse der Bautechnikgeschichte*. Berlin: Ernst und Sohn, 2021.
- [9] Heckner, Ulrike: „Über 1000 Jahre altes Bauholz im Westbau von St. Pantaleon in Köln entdeckt“. In: *Denkmalpflege im Rheinland*, 38 (2021), 2, S. 1–8.
- [10] Heckner, Ulrike: „Der Westbau von St. Pantaleon in Köln: Ergebnisse der Bauforschung“. In: *Jahrbuch der Rheinischen Denkmalpflege* (Band 48). Petersberg: Michael Imhof Verlag, 2022, S. 144–191.
- [11] Holzer, Stefan M. / Vandenabeele, Louis / Pfister, Marius: „Das 11. Jahrhundert: Beobachtungen zu bautechnischen Innovationen an der Abteikirche Tournus und anderswo.“ Vortrag, Sechste Jahrestagung der Gesellschaft für Bautechnikgeschichte, Berlin, 12.05.2023.
- [12] Pfister, Marius / Vandenabeele, Louis: „Vaulting Techniques in Romanesque Burgundy: Advanced Large-span Groin Vaults at Sainte-Trinité in Anzy-le-Duc (1001–1120)“. In: Stefan M. Holzer et al. (Hrsg.): *Construction Matters. Proceedings of the 8th International Congress on Construction History*. Zollikon: vdf Hochschulverlag, 2024, S. 762–770.
- [13] Wendland, David / Gielen, Mark: „Some considerations on the early development of cross vaults and rib vaults in medieval architecture“. In James Campbell (Hrsg.): *Studies in Construction History. The Proceedings of the Tenth Annual Conference of the Construction History Society*. Cambridge, 2023, S. 29–42.
- [14] Wendland, David / Gielen, Mark: „The revolution in vault construction before the Gothic: Speyer Cathedral, some related examples, and the development of wide spanned vaults in the 11th and 12th centuries.“ In Stefan Holzer et al. (Hrsg.): *Construction Matters. Proceedings of the 8th International Congress on Construction History*. Zollikon: vdf Hochschulverlag, 2024, S. 771–779.
- [15] Wendland, David: *Lassaulx und der Gewölbebau mit selbsttragenden Mauerschichten: Neumittelalterliche Architektur um 1825–1848*. Petersberg: Michael Imhof Verlag, 2008.
- [16] Ungewitter, Georg G. / Klaus Mohrmann: *Lehrbuch der gothischen Constructionen*. Leipzig: Weigel, 1890.
- [17] Wendland, David / Gielen, Mark / Korensky, Vladimir: „Towards the Gothic: Design and Construction of the 12th Century Vaults in Notre-Dame in Paris, and Possible Origins“. In: *International Journal of Architectural Heritage*, 2024. DOI: 10.1080/15583058.2024.2427661.

- [18] Wendland, David: „Traditional Vault Construction Without Formwork: Masonry Pattern and Vault Shape in the Historical Technical Literature and in Experimental Studies“. In: *International Journal of Architectural Heritage*, 4 (2007), S. 311–365.
- [19] Hartmann-Virnich, Andreas: „Ogives et doubleaux de Notre-Dame : Tracés d'épure et de positionnement“. In: *Bulletin Monumental*, 182 (2024), 4, S. 353–360.
- [20] *Traité d'architecture* ('*Novelles Invention pour bien bastir et à petits fraiz*', 1561; '*Premier Tome de l'Architecture*', 1567. Nachdr. der Ed. Rouen: Ferrand, 1648; Nachwort von J.-M. Pérouse de Montclos). Paris: Léonce Laget, 1988. Erstausgabe: Philibert de l'Orme: *Premier Tome de l'Architecture*, Paris: Morel, 1567.
- [21] Palacios, José Carlos: *Alonso de Vandelvira, Libro de trazas de cortes de Piedra* (Faksimile-Edition des Manuskripts in der Bibliothek der Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid (ETSAM), Politecnico de Madrid, mit einleitendem Essay), Madrid: Instituto Juan de Herrera, 2015.
- [22] Villard de Honnecourt: *Album de dessins et croquis*. Bibliothèque nationale de France (BnF), Paris, ms. fr 19093. Digitalisat unter <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b10509412z>, abgerufen am 03.09.2025.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 12 Frei verwendbare Zeichnung der Bibliothèque nationale de France (BnF), Paris, Frankreich

Abb. 13 rechts: Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Madrid, Spanien

Alle weiteren Abbildungen im Beitrag stammen vom Verfasser bzw. von Mark Gielen, Soheil Nazari und Josephine Tillmann von der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg (BTU).

Andrea Lilienthal und Torsten Bark

FACHWERKGEBÄUDE

Monitoring des hygrothermischen Verhaltens

DOI: 10.60628/9783738810493-139

Als wertvoller Teil des historischen Baubestands prägen Fachwerkgebäude das Erscheinungsbild vieler Innenstädte. Unerlässlich für ihre langfristige Erhaltung und Nutzung ist ein möglichst energieeffizientes und behagliches Raumklima. Zur energetischen Sanierung werden daher zunehmend Innendämmungen eingesetzt. Falls Dämmschichtdicken die Werte nachweisfreier Konstruktionen überschreiten, ist ein Feuchteschutznachweis mittels hygrothermischer Bauteilsimulation erforderlich. Die Entwicklung und Validierung geeigneter Simulationsmodelle basiert auf einem wissenschaftlich begleiteten Monitoring des hygrothermischen Verhaltens von Fachwerkkonstruktionen. Dieser Beitrag erläutert ein Messkonzept zur systematischen Erfassung relevanter klimatischer und materialbezogener Parameter, das in einem Prüfstand der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg (BTU Cottbus-Senftenberg) umgesetzt wird. Ziel der Forschungsarbeiten ist die Formulierung einer Handlungsempfehlung für die Erstellung feuchteschutztechnischer Nachweise.

1 Die Erhaltung historischer Fachwerkkonstruktionen

1.1 Historische Fachwerkkonstruktionen

Fachwerkgebäude tragen in Deutschland wesentlich zur Identität vieler Innenstädte bei. Zahlreiche Bauten aus verschiedenen Jahrhunderten sind bis heute erhalten und zeugen gleichermaßen von handwerklicher Tradition und regionaler Baukultur. Sie sind damit ein wertvoller Teil des historischen Baubestands und als kulturhistorisches Erbe zu schützen. Um sie zu erhalten und auch zukünftig zu nutzen, gewinnt ihre energetische Sanierung zunehmend an Bedeutung – unter Wahrung der historischen Substanz und gestalterischen Qualität.

Fachwerkkonstruktionen finden sich nicht nur in historischen Stadtkernen, sondern auch in Burgen und Schlössern. Viele dieser Anlagen weisen Gebäudeteile mit Fachwerk



Abb. 1
Schloss Philippsburg
in Braubach: Fach-
werkgiebel mit Zier-
elementen von außen
(oben) und innen (unten)

auf, was ihre historische Entwicklung eindrucksvoll dokumentiert – etwa das in mehreren Bauphasen errichtete Schloss Philippsburg in Braubach (Abbildung 1 oben). Die Innenansicht des Fachwerks (Abbildung 1 unten) zeigt eine traditionelle Ausfachung aus Lehm, Stroh und Holz, wie sie über Jahrhunderte hinweg angewendet wurde.

Je nach Region unterscheiden sich Fachwerkgebäude in ihrer Ausführung, einschließlich ihrer hölzernen Zierelemente. Die Gefache bestehen dabei entweder aus Staakung mit Lehm, Stroh und Holz oder aus Mauerwerk. Während Staakungen mit Lehmbaumaterialien immer verputzt sind, können Gefache aus Ziegelsteinen auch als Sichtmauerwerk ausgeführt sein. Diese Bauweise ist besonders in Küstenregionen verbreitet.

1.2 Energetische Sanierung mit Innendämmungen

Bei der energetischen Sanierung von Fachwerkgebäuden wurden in den letzten Jahren zunehmend Innendämmungen eingesetzt. Um die Dämmungen mit verschiedenen Baustoffen und in verschiedenen Ausführungen zu untersuchen, wurde das Forschungsvorhaben „Fachwerk 2.0“ ins Leben gerufen – ein gemeinsames Projekt der Hochschule RheinMain in Wiesbaden, der BTU Cottbus-Senftenberg und des Freilichtmuseums Hessenpark in Neu-Anspach. Zur Beurteilung des Schadenrisikos werden die Forschungsarbeiten von einem wissenschaftlichen Monitoring des hygrothermischen Verhaltens begleitet. Messtechnisch erfasst und bewertet werden dabei sowohl die Temperatur und Materialfeuchte an verschiedenen Stellen an und in der Konstruktion – im Holz und im Gefach – als auch das Außen- und Innenklima.

Innendämmungen, die den Wärmedurchlasswiderstand einer Fachwerkaußenwand bis $\Delta R_i = 0,8 \text{ m}^2\text{K/W}$ verbessern, sind nach [1] ohne zusätzlichen Feuchteschutznachweis zulässig, sofern die Anforderungen des Schlagregenschutzes eingehalten werden. Gleichzeitig sollte die wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke der Innendämmung einschließlich Innenbekleidung im Bereich von $0,5 \text{ m} \leq s_{d,i} \leq 2,0 \text{ m}$ liegen, um eine Abtrocknung der Konstruktion nach innen zu ermöglichen. Diese nachweisfreien Konstruktionen erfüllen in der Regel den baulichen Mindestwärmeschutz.

Eine energetische Sanierung von Fachwerkkonstruktionen mit Innendämmungen in größeren Schichtdicken erreicht einen höheren Wärmedurchlasswiderstand, verändert aber die hygrothermische Situation der Außenwand erheblich. Der geringere Wärmeenergieeintrag in die Wand reduziert das Temperaturniveau und verzögert dadurch das Abtrocknen von Schlagregen. Inwieweit mit dieser Veränderung ein Schadenrisiko einhergeht, wird mit einem umfassenden Feuchteschutznachweis mittels hygrothermischer Bauteilsimulation nach DIN 4108-3 [2] in Verbindung mit den WTA-Merkblättern 6-2 [3] und 6-5 [4] beurteilt.

1.3 Feuchteschutznachweis mittels hygrothermischer Simulation

Für die Beurteilung des Schadenrisikos bei der Planung von Innendämmmaßnahmen hat sich numerische Simulationssoftware zur hygrothermischen Bewertung von Baukonstruktionen bewährt [5]. In den vorliegenden Forschungsarbeiten wurde die Software Delphin 6 verwendet, die das Institut für Bauklimatik der TU Dresden entwickelt hat. Mit der Berechnung ist prognostizierbar, ob eine Austrocknung der Baufeuchte möglich ist und ob sich unter den jeweiligen Randbedingungen ein jahreszeitlich wiederkehrender Zustand einstellt. Diese Randbedingungen umfassen die Geometrie des Wandaufbaus, die Baustoffeigenschaften, das Außenklima und die nutzungsbedingten Einflüsse des Innenklimas. Die Außenklimarandbedingungen – wie der Niederschlag oder die Besonnung – hängen wesentlich von der Fassadenausrichtung ab, aber auch von der städtebaulichen Lage [6].

Die Simulation erlaubt unter anderem eine Berechnung der Temperaturverteilung und der Verteilung der relativen Porenluftfeuchte. Letztere beschreibt das Verhältnis des Wassergehalts der Luft in den Poren eines Baustoffs zur maximal möglichen Sättigung bei der jeweiligen Temperatur, also die relative Luftfeuchtigkeit innerhalb der Porenräume. Die Abbildung 2 zeigt die entsprechenden Berechnungen für den

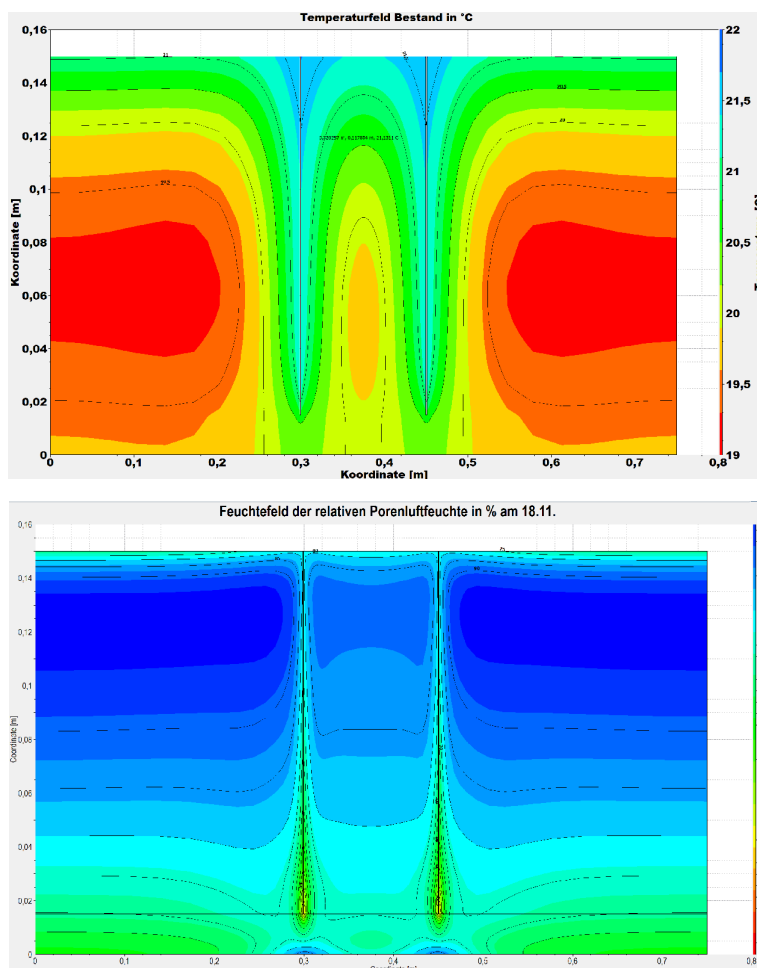


Abb. 2
Simulation der Temperaturverteilung (oben) und der Verteilung der relativen Porenluftfeuchte (unten) im Horizontalschnitt des Tragwerks einer historischen Fachwerkkonstruktion (Fuge zwischen Riegel und Stiel)

Horizontalschnitt des Tragwerks einer historischen Fachwerkkonstruktion ohne Innendämmung im Bereich zwischen Stiel und Riegel (für eine Darstellung dieses Bereichs siehe Abbildung 4 unten).

2 Messkonzept zur hygrothermischen Bewertung der Fachwerkkonstruktion

Grundlage der bauphysikalischen Untersuchungen bildet ein Messkonzept, das den Verlauf der Feuchte- und Temperaturentwicklung in der Konstruktion abbildet. Es findet an mehreren Standorten Anwendung: sowohl an Testhäusern des Freilichtmuseums Hessenpark und der Handwerkskammer Bildungszentrum (HBZ) Münster als auch an einem Prüfstand mit Fachwerk der BTU Cottbus-Senftenberg. In den Testhäusern wird das Konzept zur Bewertung des Schadenrisikos aus der Ausführung verschiedener Sanierungslösungen angewendet, während es in dem Prüfstand die Validierung des hygrothermischen Bauteilsimulationsmodells unterstützt. Der Ansatz und seine Implementierung werden im Folgenden vorgestellt.

2.1 Messtechnik

Für die Bewertung des hygrothermischen Verhaltens in der Konstruktion werden an ausgewählten Stellen die Temperatur und Porenluftfeuchte erfasst. Die Messung des Verlaufs der Porenluftfeuchte im Holz und im Gefach ermöglicht unter anderem Rückschlüsse auf Schadenspotenziale aus der Baufeuchte oder aus eingedrunenem Schlagregen.

Für die Messung werden digitale Fühler für Luftfeuchte und Temperatur aus dem Almemo-System der Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH verwendet (Abbildung 3). Der Einsatzbereich des Multisensormoduls liegt bei Temperaturen von -20°C bis 80°C und bei einer relativen Luftfeuchte von 5 % bis 98 %.



Abb. 3
Digitaler Fühler
FHAD46 für
Luftfeuchte und
Temperatur der
Firma Ahlborn

2.2 Lage der Sensoren in der Konstruktion

Von Interesse für die bauphysikalische Bewertung der Konstruktion ist das hygrothermische Verhalten im Holz der Fachwerkkonstruktion und im Gefach. Abbildung 4 (oben) zeigt die Anordnung der Sensoren in einem Horizontalschnitt des Fachwerks. Da entlang der Fuge zwischen Holz und Gefach eine erhöhte Gefährdung durch eindringenden Schlagregen besteht, sieht das Messkonzept auf der Außenseite je einen Sensor im Holz und im Gefach vor. Für die Darstellung des Feuchteprofils werden auf der Innenseite der Bestandskonstruktion die Sensoren ebenso angeordnet. Weitere Sensoren liegen auf der kalten Seite der Innendämmung über dem Ausgleichsputz, jeweils im Bereich über dem Holz und in der Mitte des Gefachs. Mit dieser Anordnung kann sowohl die Feuchtebelastung aus dem Einbau (Baufeuchte) als auch die Wirkung des Außenklimas auf der Außenseite bewertet werden.

Analysen an Fachwerkgebäuden dokumentieren sehr häufig Schäden an den Fugen zwischen den Hölzern. Im Prüfstand wird dieser Bereich daher ebenfalls näher untersucht. Die Lage der Sensoren ist in Abbildung 4 (unten) dargestellt.

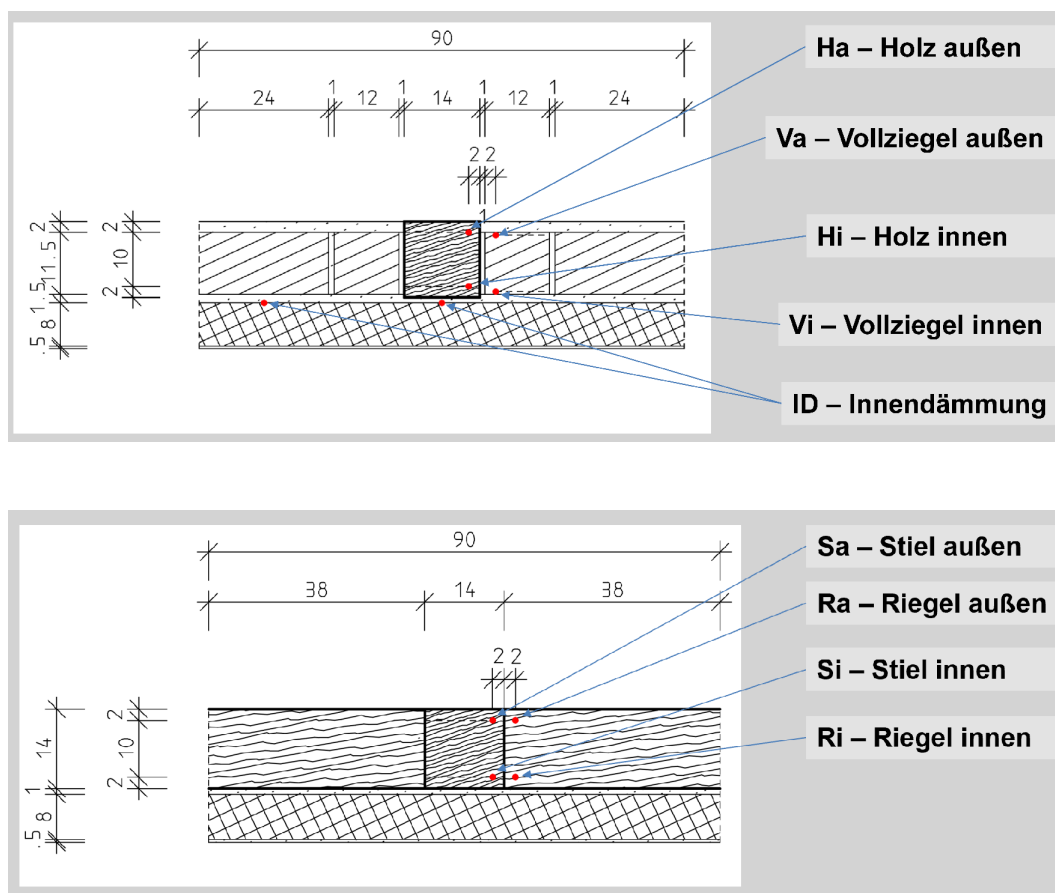


Abb. 4 Horizontalschnitt Fachwerkmodell – oben Gefach, unten Tragwerk

2.3 Laborprüfstand am BTU-Campus

Ziel des Projekts und der numerischen Bauteilsimulation ist eine Prognose des instationären Temperatur- und Feuchteverhaltens über mehrere Jahre hinweg. Maßgebend sind dabei das Trocknungsverhalten nach Abschluss der Sanierungsmaßnahme und das sich einstellende hygrothermische Gleichgewicht.

Eine der beteiligten Einrichtungen am Forschungsprojekt „Fachwerk 2.0“ ist die BTU Cottbus-Senftenberg. Der dortige Laborprüfstand erlaubt die Entwicklung und Validierung eines Simulationsmodells für Fachwerkkonstruktionen, wobei das Messkonzept für insgesamt zwölf Referenzflächen umgesetzt wird. Diese umfassen zum einen Flächen mit Sichtfachwerk und zum anderen Flächen, bei denen das Sichtfachwerk zusätzlich mit einer hinterlüfteten Fassadenbekleidung versehen ist. Die zwei Varianten erlauben einen direkten Vergleich der Einflüsse von Strahlung und Konvektion sowie von Schlagregen. Die Umsetzung des Messkonzepts im Laborprüfstand wird im Kapitel 3 erläutert.

2.4 Testhäuser im Freilichtmuseum Hessenpark

An dem Forschungsprojekt „Fachwerk 2.0“ ist außerdem das Freilichtmuseum Hessenpark in Neu-Anspach beteiligt. Dort stehen für das Monitoring des hygrothermischen Verhaltens von Fachwerkaußenwänden drei Testhäuser zur Verfügung. Es sind Wiederaufbauten, die nach ihren Herkunftsorten benannt wurden: Lauterbach-Maar, Momberg I, Momberg II (Abbildung 5). In 28 Testflächen werden hier Sanierungslösungen mit verschiedenen Innendämmungen und Gefachausführungen untersucht. Eingesetzt werden unter anderem Plattenwerkstoffe aus Holzweichfaser, Stroh und Lehm sowie Wärmedämmputze mit Mikrohohlglasskugeln, Perlite und Aerogel.



Abb. 5
Fassaden der Testhäuser
im Freilichtmuseum
Hessenpark (von links
nach rechts:
Lauterbach-Maar,
Momberg I, Momberg II)

3 Laborprüfstand am BTU-Campus

Der Laborprüfstand am Campus der BTU Cottbus-Senftenberg ermöglicht ein umfassendes Monitoring des hygrothermischen Verhaltens von Fachwerkkonstruktionen. In dieser Nachbildung einer Fachwerkkonstruktion mit verputzten Gefachen aus Ziegelmauerwerk werden verschiedene Ausführungen eines Innendämmsystems untersucht. Die insgesamt zwölf Testflächen sind in einem Raum demselben Innenklima ausgesetzt.

3.1 Standort

In dem Gebäude können zwei Fassadenflächen mit Fachwerkkonstruktionen mit Ausrichtung nach Westen und nach Osten ausgeführt werden. In Abbildung 6 ist die Ostfassade des Gebäudes zu sehen. Die Testflächen bestehen aus zwei Sichtfachwerkbereichen und einem Testfeld mit hinterlüfteter Fassadenbekleidung.

Die Stadt Cottbus im Bundesland Brandenburg ist der Schlagregenbeanspruchungsgruppe II nach DIN 4108-3 zuzuordnen und unterliegt damit einer mittleren Beanspruchung, bei einer Jahresniederschlagsmenge von 600 bis 800 mm [2]. Aufzeichnungen des Deutschen Wetterdienstes belegen, dass die Sommer hier zunehmend von extremen Hitzeperioden mit großer Trockenheit gekennzeichnet sind. Auch Extremwetterereignisse wie Starkregen und heftiger Wind treten an diesem Ort auf und werden sich zukünftig häufen.

3.2 Errichtung

Die Fachwerkkonstruktion aus Fichtenholz wurde in der Forschungswerkstatt der BTU Cottbus-Senftenberg vorgefertigt. Dadurch konnten die Messpunkte vorgebohrt werden, was eine präzise Anordnung von Sensoren im Holz erlaubt. Das geborgene Bohrmehl wird zur Bestimmung der Sorptionsisothermen im Labor verwendet und dient der Bewertung der Porenluftfeuchte und Holzfeuchte in Masseprozent.



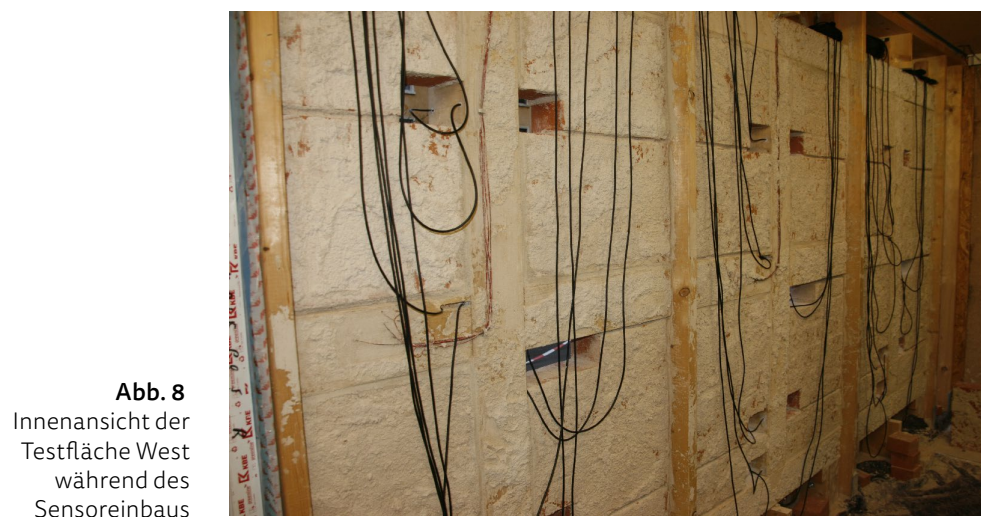
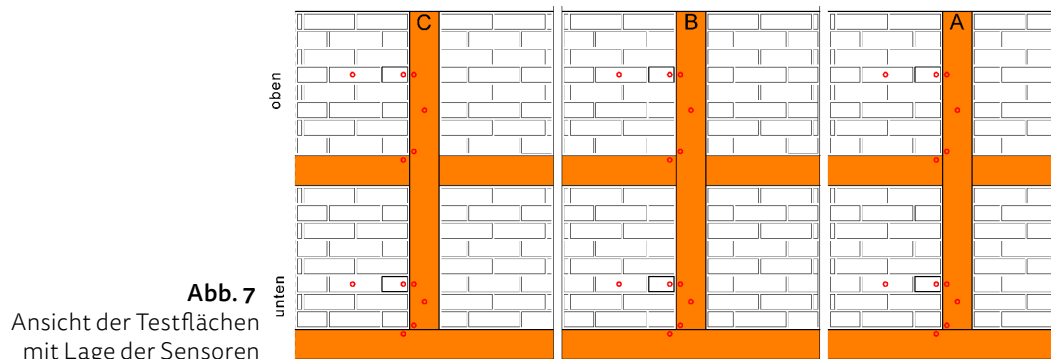
Abb. 6
Ostfassade des Fach-
werkprüfstands
am BTU-Campus
Cottbus-Senftenberg

Jedes Testfeld besteht aus einem mittig platzierten Stiel mit Riegel und einer Schwelle. Die Lage der Sensoren ist in der Ansicht in Abbildung 7 dargestellt. Je Testfläche gibt es einen oberen und einen unteren Messbereich.

Die Sensoren für die Messung in den Gefachen wurden im Übergangsbereich zwischen Putz und Mauerwerk im Ziegel ebenfalls vorinstalliert. Abbildung 8 veranschaulicht die Innenansicht der Westseite im Rohbau unmittelbar vor dem Einsetzen der vorbereiteten Ziegel. Sensoren lassen sich in einem Prüfstand mit Vorarbeiten in einer Werkstatt deutlich präziser einsetzen als unter realen Baustellenbedingungen.

Durch die Maurer- und anschließenden Putzarbeiten dringt Baufeuchte in die Konstruktion ein, die im überhygroskopischen Bereich liegt und daher den Messbereich des Sensors überschreitet. Andere wissenschaftlich begleitete Messprojekte zeigen aber, dass sich Sensoren nach einem Ausfall aufgrund der erhöhten Baufeuchte und des Erreichens des hygroskopischen Bereichs regenerieren können und bei erneutem Erreichen ihres Messbereichs die Datenerfassung wieder aufnehmen [7].

Um den Sensor bei seiner Installation in der Konstruktion vor Verschmutzung zu schützen, wird er mit einer Schutzkappe versehen, welche die Forschungswerkstatt der BTU Cottbus-Senftenberg entwickelt hat. Dazu wird die im Lieferumfang des Sensors enthaltene Kappe so modifiziert, dass die Oberseite verschlossen und im



Bereich des Sensors beidseitig geöffnet ist. Der Sensor selbst ist mit einer diffusions-offenen Bahn ummantelt. Die Funktionsfähigkeit dieser Lösung wurde durch eine Überprüfung der Sensoren im Klimaschrank bestätigt (Abbildung 9).

3.3 Verarbeitung der Innendämmung

Für den Prüfstand kommt eine Innendämmung aus diffusionsoffenem mineralischen Dämmputz zum Einsatz, der in unterschiedlichen Dicken ausgeführt wird. Abbildung 10 zeigt die Verarbeitung des Putzes, der mehrlagig aufgebracht wird. Die Wärmeleitfähigkeit des Putzes beträgt $0,048 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Für die West- und Ostseite werden jeweils drei Varianten umgesetzt:

Westseite:

- A – Fachwerkaußenwand mit Sichtfachwerk ohne Innendämmung
- B – Fachwerkaußenwand mit hinterlüfteter Fassadenbekleidung und 8 cm Innendämmung
- C – Fachwerkaußenwand mit Sichtfachwerk und 8 cm Innendämmung

Ostseite:

- A – Fachwerkaußenwand mit Sichtfachwerk und 3 cm Innendämmung
- B – Fachwerkaußenwand mit hinterlüfteter Fassadenbekleidung und 16 cm Innendämmung
- C – Fachwerkaußenwand mit Sichtfachwerk und 16 cm Innendämmung

Die Ausführung ohne Innendämmung entspricht der historischen Ausführung und erfüllt die Anforderungen an den Mindestwärmeschutz nicht. Durch eine 3 cm dicke Innendämmung hingegen werden diese Anforderungen erfüllt. Eine energetische Verbesserung zeigt sich bei einer Innendämmung von 8 cm Dicke ($U = 0,47 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) bzw. 16 cm Dicke ($U = 0,26 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$). Zum Vergleich: Das Gebäudeenergiegesetz [8] schreibt für neu zu errichtende Außenwände einen U-Wert von $0,24 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ vor.



Abb. 9
Überprüfung der Sensoren mit Schutzkappe im Klimaschrank (Torsten Toepel, BTU Cottbus-Senftenberg)

3.4 Durchführung der Messungen

Zum Schutz der Sensoren vor der hohen Baufeuchtebelastung, die mit der Neuerrichtung des Prüfstands einhergeht, wird die Datenaufzeichnung erst nach dem Voranschreiten des Trocknungsprozesses gestartet. Nach dem weitgehenden Abklingen der Baufeuchte in der Fachwerkkonstruktion des Prüfstands beginnt die Aufzeichnung daher im März 2025. Für die Aufzeichnung der Temperatur und der relativen Porenluftfeuchte wird ein Messzyklus von zehn Minuten gewählt. Für die Auswertung und weitere Betrachtung werden die Daten als Stunden-, Tages- und Monatsmittelwerte ausgegeben.

Die Diagramme in Abbildung 11 zeigen Tagesmittelwerte der relativen Porenluftfeuchte in den oberen Testflächen A und B auf der Westseite des Prüfstands. In Testfläche A, die einer historischen und energetisch nicht sanierten Fachwerkkonstruktion entspricht, liegen alle gemessenen Werte in einem Bereich unter 75 % relativer Porenluftfeuchte. Damit ist die Konstruktion in recht kurzer Zeit im hygroskopischen Bereich und außerhalb eines Schadenrisikos, für das eine flüssige Phase von Wasser erforderlich ist.

In Fläche B (mit 8 cm Innendämmung und Fassadenbekleidung) stellt sich die hygrothermische Situation anders dar. Ab Mitte April 2025 ist der Trocknungsprozess so weit vorangeschritten, dass an Messpunkten auf der Innenseite der Konstruktion, die unter dem Einfluss der Baufeuchte aus dem Einbau der Innendämmung standen, der hygroskopische Bereich erreicht ist. So können die Daten an den Messstellen auf der Innenseite der Hölzer wieder erfasst werden. An den anderen Messstellen auf der Innenseite des Fachwerks ist dieser Bereich erst im Juni 2025 erreicht.

In DIN 68 800 wird der Bereich der Fasersättigung und das damit einhergehende hohe Risiko für Pilzwachstum bei den gebräuchlichen Nadelholzarten mit 30 M-% angegeben [9]. Als Obergrenze für das Vermeiden eines Pilzbefalls werden 20 M-% Holzfeuchte genannt. Entsprechend den im Labor ermittelten Sorptionsisothermen der untersuchten Hölzer ist dieser Grenzwert bei einer relativen Porenluftfeuchte von



Abb. 10
Verarbeitung des
Dämmputzes im
Prüfstand

ca. 85 % erreicht. Die in den Hölzern der Testfläche B gemessenen Werte liegen mehr als sechs Monate lang über diesem Bereich.

Die Diagramme in Abbildung 12 veranschaulichen die im Holz der Gefachebene gemessenen Temperaturen der oberen Testflächen A, B und C auf der Westseite des Prüfstands in ausgewählten Zeiträumen. Der Verlauf verdeutlicht, wie sich die unterschiedlichen Ausführungen auf das Temperaturniveau im Holz auswirken.

Abbildung 12 (oben) stellt die Temperaturen während der Heizperiode im März 2025 dar – in einem Zeitraum, in dem die Nachttemperaturen unter 0°C liegen und es tagsüber sonnig ist. Der Vergleich der drei Testflächen demonstriert, dass der Frost nachts in der Testfläche C (mit 8cm Innendämmung und Sichtfachwerk) bis in die Konstruktion eindringt, während die Flächen A und B am gleichen Messpunkt bis zu 4K höhere Temperaturen aufweisen. Tagsüber gestaltet sich die Situation aufgrund

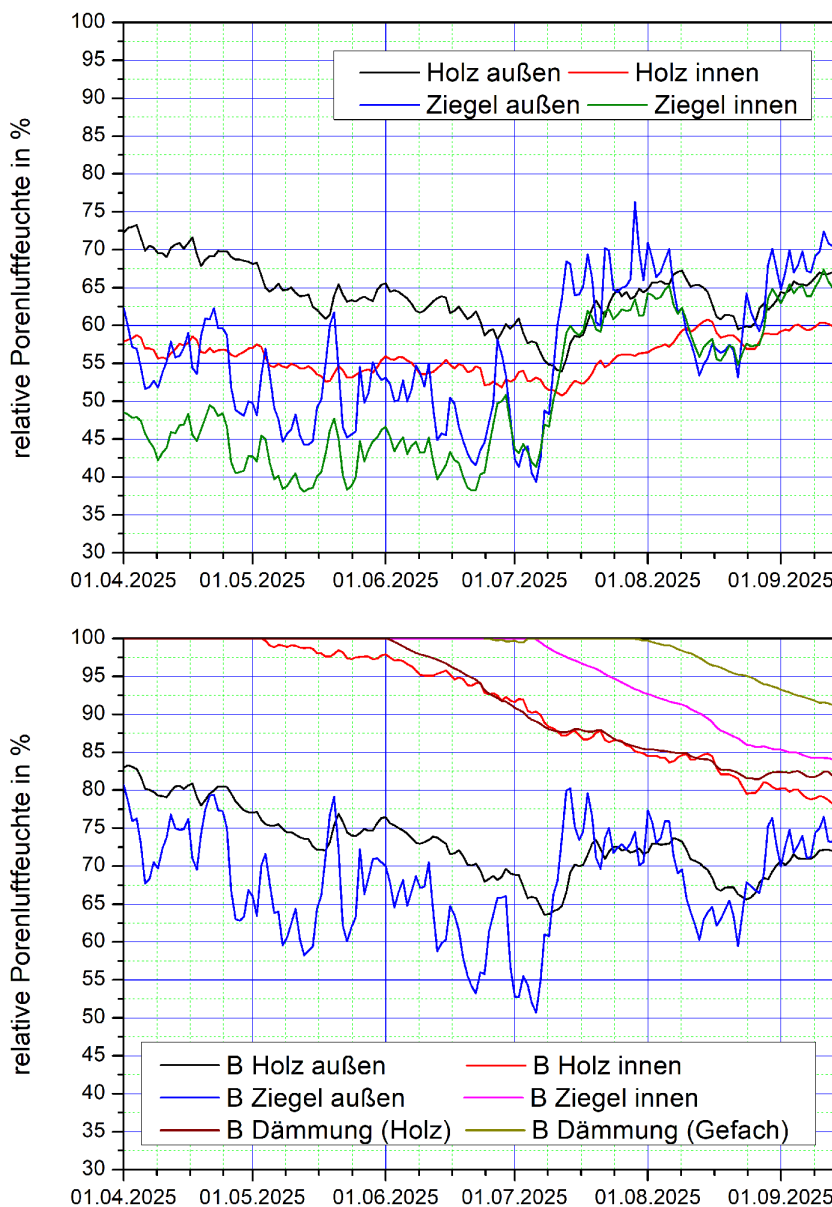


Abb. 11

Verlauf der relativen Porenluftfeuchte – oben die Testfläche A Westseite (oben, ohne Dämmung), unten die Testfläche B Westseite (oben, mit Dämmung)

der Wirkung der Sonnenstrahlung anders. Hier liegen die Temperaturen an den beiden Testflächen A und C (mit Sichtfachwerk) signifikant über der Temperatur in der Fläche B (mit Fassadenbekleidung).

Noch deutlicher wird der Strahlungseinfluss anhand der Messwerte in den Sommermonaten, wie in Abbildung 12 (unten) dargestellt. Wie der ausgewählte Zeitraum im Juni 2025 zeigt, beträgt der Temperaturunterschied zwischen der Fläche B (mit Fassadenbekleidung) und den Flächen A und C (ohne Fassadenbekleidung) bis zu 10 K.

Unterschiede im Temperaturniveau beeinflussen maßgebend den Trocknungsprozess der Baufeuchte und das hygrothermische Verhalten der Konstruktion, sobald der Beharrungszustand erreicht ist. Darüber hinaus erfährt die Fläche ohne Fassadenbekleidung im Sommer eine deutlich höhere Aufheizung.

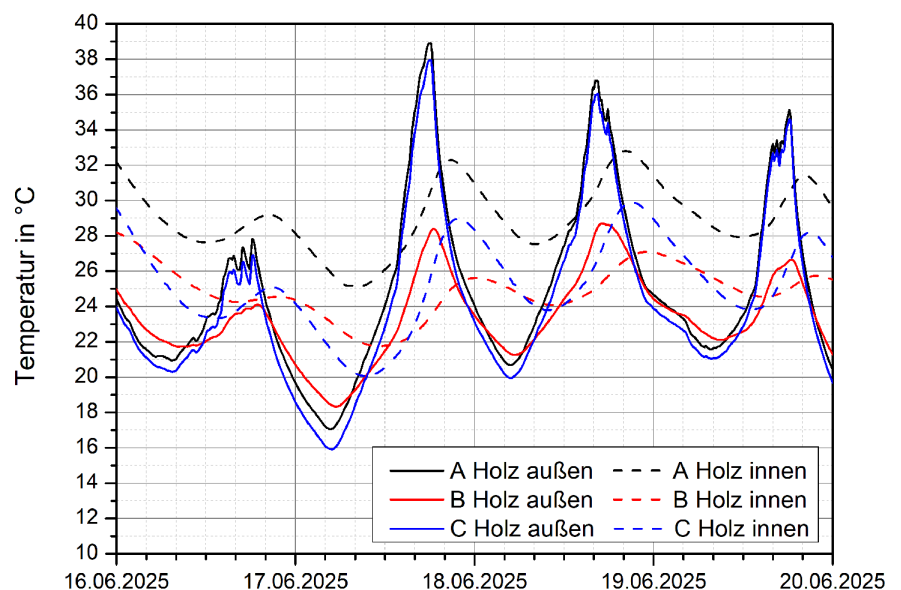
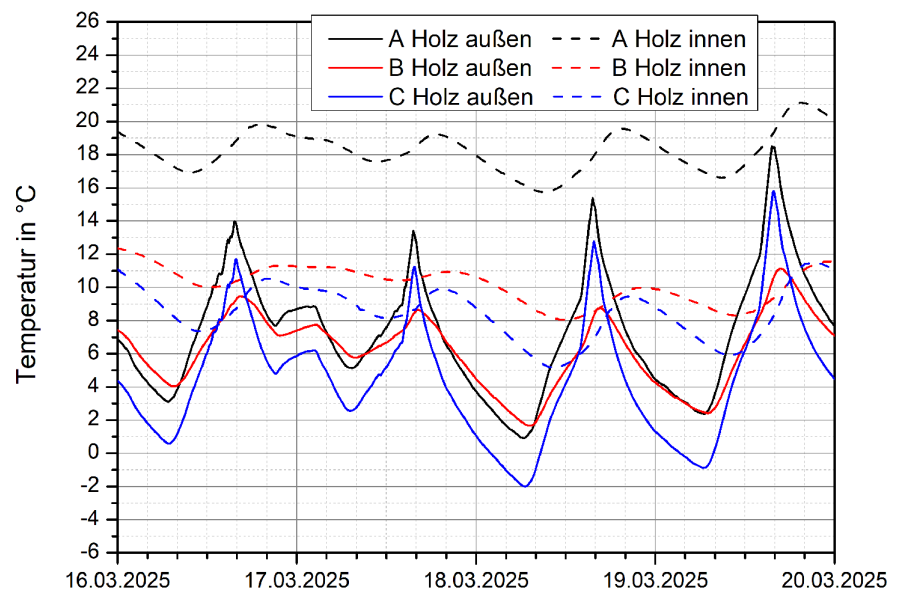


Abb. 12
Gegenüberstellung
der Temperaturen
im Fachwerkstiel in
den Testflächen A,
B, C – oben während
der Heizperiode,
unten während der
Sommermonate

4 Zusammenfassung

Das Monitoring dokumentiert die Zeit für die Abtrocknung der Baufeuchte im Prüfstand. Nach dem Abklingen ist eine Bewertung der Konstruktion unter dem Einfluss des standortbezogenen Außenklimas und des nutzungsbedingten Innenklimas möglich. An allen Monitoringpunkten des Prüfstands werden durch die hygrothermische Simulation der Verlauf der Temperatur und der relativen Luftfeuchte berechnet. Im Ergebnis wird zunächst die Genauigkeit des Simulationsmodells bewertet. Darauf aufbauend erfolgt eine Untersuchung des Einflusses von Materialeigenschaften und klimatischen Randbedingungen.

Für die praktische Anwendung der hygrothermischen Bauteilsimulationen ist die Bewertung einer Vielzahl von Einflussgrößen essenziell. Neben den Abmessungen der Konstruktion und den Baustoffeigenschaften sind konstruktive Besonderheiten und Klimarandbedingungen miteinzubeziehen. Die Qualität der verfügbaren Daten und getroffenen Annahmen hat einen entscheidenden Einfluss auf die Ergebnisse der Simulation.

Zur Berücksichtigung der Klimarandbedingungen bieten Softwareanwendungen standortbezogene Klimadatensätze. Diese enthalten den Jahresverlauf der Außenlufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit der Außenluft, die Regenstromdichte, die Windrichtung und -geschwindigkeit sowie verschiedene Strahlungsparameter. Für die Anwendung als Planungswerkzeug sind diese Komponenten je nach städtebaulicher Lage individuell zu bewerten. Mit dem Forschungsvorhaben „Fachwerk 2.0“ wird darüber hinaus die bauphysikalische Wirkung von Extremwetterereignissen auf die Konstruktion untersucht.

Baufeuchte aus Sanierungsmaßnahmen hat einen erheblichen Einfluss auf Fachwerkkonstruktionen. Durch eine hygrothermische Simulation lässt sich dieser temporäre Einfluss bei einem Feuchteschutznachweis berücksichtigen und das Schadenrisiko für die Konstruktion bewerten.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben „Fachwerk 2.0 – Entwicklung und Erforschung neuartiger Dämmsysteme zur energieeffizienten und ressourcenschonenden Fachwerkinstandsetzung an Versuchsgebäude des Freilichtmuseums Hessenpark; Teilvorhaben Bauteilentwicklung, hygrothermische Simulationen und Sozioökonomie“ wird von dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert, im Rahmen des Programms „Energieoptimiertes Bauen“ (Förderkennzeichen 03EN1063B) infolge eines Beschlusses des Deutschen Bundestags. Die Betreuung erfolgt durch den Projektträger Jülich (PTJ).

Literaturverzeichnis

- [1] WTA-Merkblatt 8-5, Ausgabe 04.2018/D: *Fachwerkinstandsetzung nach WTA V: Innendämmungen*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2018.
- [2] Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN): *DIN 4108-3:2024-03: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung*. Berlin: Beuth Verlag, 2024.
- [3] WTA-Merkblatt 6-2, Ausgabe: 12.2014/D: *Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2014.
- [4] WTA-Merkblatt 6-5, Ausgabe: 04.2014/D: *Innendämmung nach WTA II: Nachweis von Innendämmsystemen mittels numerischer Berechnungsverfahren*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2014.
- [5] Staar, Andrea / Strangfeld, Peter / Bark, Torsten: „Numerische Simulation als Planungswerkzeug in der Bauphysik – Praxisbeispiel Holzbalkenkopf“. In: *GI – Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis*, 138 (2017), 2, S. 122–131.
- [6] Staar, Andrea: *Zum Einsatz von Innendämmsystemen an erhaltenswerten Fassaden mit im Außenmauerwerk eingebundenen Holzbalkenköpfen*. Dissertation, Fakultät für Architektur, Bauingenieurwesen und Stadtplanung. Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, 2018.
- [7] Bark, Torsten: *Hygrothermische Bewertung von Fachwerkwänden mit Vormauerung bei Einsatz von Innendämmung*. Dissertation, Fakultät für Architektur, Bauingenieurwesen und Stadtplanung. Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, 2019.
- [8] Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz/GEG), Fassung 2024, Bundesgesetzblatt Jahrgang 2020 Teil I Nr. 45, veröffentlicht am 08.08.2020, zuletzt geändert durch Artikel 1 des Gesetzes vom 16. Oktober 2023 (BGBl. I S. 280), in Kraft seit 01.01.2024.
- [9] Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN): *DIN 68800-1:2019-06: Holzschutz – Teil 1: Allgemeines*. Berlin: Beuth Verlag, 2019.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 12 Torsten Toepel, BTU Cottbus-Senftenberg, Cottbus

Alle weiteren Abbildungen stammen von den Verfasser:innen des Beitrags.

Anna Luib

INFRAROT-THERMOGRAPHIE

Zerstörungsfreie Untersuchungsmethode für die Bauforschung

DOI: 10.60628/9783738810493-155

Infrarot-Thermographie (IRT)¹ ermöglicht die berührungslose und zerstörungsfreie Dokumentation von Oberflächentemperaturen. Je unterschiedlicher das thermische Verhalten der einzelnen Materialien eines Objekts, desto klarer treten sie im Thermogramm zutage. Diese Fähigkeit, Unterschiede und Besonderheiten im Materialbestand sichtbar werden zu lassen, macht die IRT zu einem wertvollen Werkzeug für die Bauforschung. Im vorliegenden Beitrag wird ihre Anwendung mit Fokus auf historische Objekte anhand konkreter Beispiele veranschaulicht.

¹ Die Schreibweise „Thermographie“ – statt modernisiert „Thermografie“ – orientiert sich an der Praxis der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. (DGZfP) und an dem international verwendeten Begriff *thermography*.

1 Einleitung

Thermographiekameras dokumentieren berührungslos die Oberflächentemperaturen von Objekten. Dafür wird die elektromagnetische Strahlung im Infrarotbereich, die von der Oberfläche abgegeben wird, erfasst und in einem sogenannten Thermogramm visualisiert. Je stärker sich das thermische Verhalten der einzelnen Materialien des Objekts unterscheidet, desto deutlicher treten die Unterschiede im Thermogramm zutage. Dies gibt Hinweise auf die physikalische Beschaffenheit und somit auf die Konstruktion des Objekts. IRT eignet sich daher für zahlreiche bauforscherische Fragestellungen (Abbildung 1). Typische Anwendungen sind die zerstörungsfreie Erkundung von Fachwerk und Mauerwerk unter Putz, ebenso von Deckenaufbauten und Gewölben. Bei Voruntersuchungen und Erstbegehungen historischer Objekte eröffnen sich Anzeichen für zentrale Befundstellen und potenzielle Schäden, während sich bei Detailuntersuchungen konstruktive Zusammenhänge erhellen. IRT-Kameras erlauben zudem die Detektion und Visualisierung von Rissen und feuchtebedingten Schäden. In Monitoring-Verfahren und Wiederholungsmessungen schließlich können Materialveränderungen, Anomalien und die Entwicklung von Schadstellen festgehalten sowie verglichen werden.

Gerade für die Untersuchung historischer Bauwerke und Kunstobjekte bietet IRT diverse Vorteile. Sie kann berührungslos durchgeführt werden und zählt zu den zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP). Bei der aktiven IRT wird das Untersuchungsob-

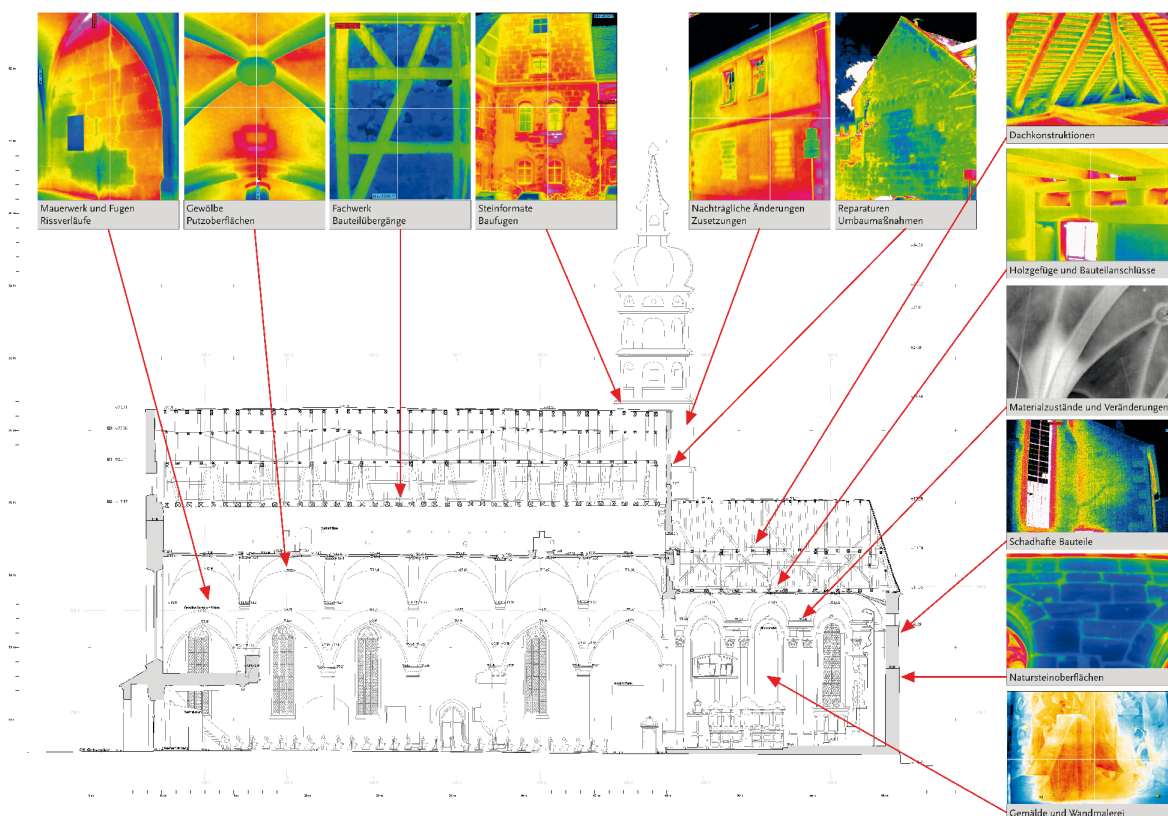


Abb. 1 Anwendungsmöglichkeiten der IRT

jekt durch externe Quellen angeregt, sei es optisch (z. B. Blitzlampen, Halogenstrahler), thermisch (Heizlüfter, Infrarotheizstrahler) oder mittels Verfahren auf Basis von Ultraschall, Mikrowellen oder Induktion. Bei der passiven IRT hingegen zeichnet man nur die Eigenstrahlung des Objekts auf. Dies gestattet Messungen von empfindlichen, weit entfernten oder unzugänglichen Befundstellen.

Weiterhin ermöglicht IRT eine individuelle und effiziente Untersuchung historischer Objekte *in situ*, dank des unmittelbar bildgebenden Verfahrens, der Echtzeitdarstellung der Messwerte und ihrer frei wählbaren Farbcodierung. Messungen können direkt am Kamera-Interface vor Ort ausgewertet, geprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Die hohen Messgeschwindigkeiten moderner IRT-Kameras sind für die thermisch trägen Baumaterialien und -teile historischer Gebäude nicht zwingend nötig, erlauben aber Aufnahmen ohne Stativ. Dies macht die portablen, akkubetriebenen Kameras zu flexiblen und vielseitigen Mess- und Visualisierungsinstrumenten, sowohl für Einzeluntersuchungen als auch für vergleichende Wiederholungsmessungen und Monitoring-Einsätze. Die bildgebende Thermographie lässt sich mit anderen bauforscherischen Untersuchungs- und Dokumentationsmethoden kombinieren, etwa formtreuen Bauaufnahmen, Kartierungen oder Verformungs- und Schadensanalysen (Abbildung 2). Insbesondere die geometrisch referenzierte Überlagerung erhobener Daten bietet einen erheblichen Erkenntnismehrwert.

2 Messbedingungen

Die thermographische Untersuchung historischer Gebäude findet überwiegend *in situ* statt. Aufgrund der thermischen Trägheit der Baumaterialien können veränderliche Einflussgrößen wie Umgebungstemperatur, Luftfeuchte oder Strahlungsintensität der Einfachheit halber als konstant angenommen werden. Die tages- und jahreszeitlich veränderlichen Umgebungsbedingungen hingegen lassen sich für IRT durchaus

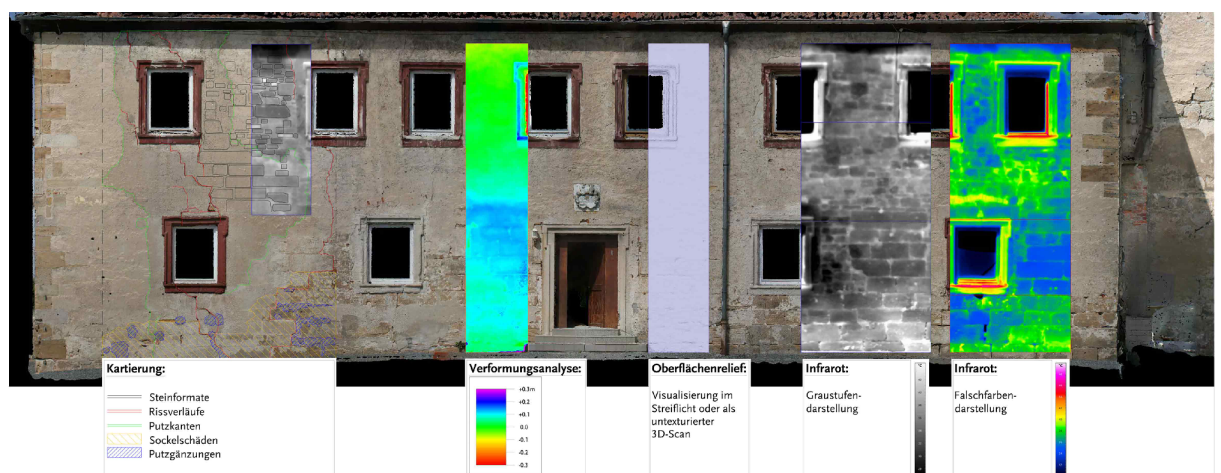


Abb. 2 Einbindung der IRT in den Kanon bauforscherischer Untersuchungs- und Kartierungsmethoden

nutzen: Größere Temperaturdifferenzen am Untersuchungsobjekt ergeben kontrastreichere Thermogramme und damit klarere Befunde. Zur Untersuchung beheizter Gebäude eignen sich daher vor allem kalte Wintertage, wenn der Temperaturkontrast zwischen beheiztem Innenraum und kalter Außenluft oder abgekühltem Nebenzimmer maximal ist. Vergleichbar scharfe Kontraste ergeben sich an Außenwänden bei direkter und möglichst intensiver solarer Einstrahlung. Fassaden, Decken und Gewölbe zu aufgewärmten Dachräumen lassen sich deshalb auch im Sommer gut untersuchen (Abbildung 3).

3 Anwendungsbeispiele

3.1 Voruntersuchungen und Erstbegehungen

In der Bauforschung kommt Thermographie insbesondere für Voruntersuchungen und Erstbegehungen historischer Gebäude sowie Objekte zum Einsatz. Zusätzlich zu den visuellen und haptischen Eindrücken vor Ort verschafft der Live-Modus der IRT-Kameras einen Überblick über die lokalen thermischen Verhältnisse. Daraus lassen sich Informationen zu Konstruktion und Gefüge des Objekts ableiten, die mit bloßem Auge nicht ersichtlich sind (Abbildung 4).

Zu den aus der IRT gewonnenen Informationen zählen verdeckte Strukturen wie Fachwerk oder Mauerwerk unter Putz. Die folgenden zwei Beispiele präsentieren das Untersuchungsobjekt jeweils als Thermogramm (links) und als visuelles Bild (rechts). Jedes Thermogramm liegt einmal in Falschfarbendarstellung vor, die weiter verbreitet ist und von Kamerafirmen eher beworben wird, und einmal in Graustufendarstellung, die für die Bauforschung meist bessere Kontraste und Details bietet.

Abbildung 5 zeigt das Thermogramm des Alten Rathauses Bamberg. Es visualisiert ein steinsichtiges Erdgeschoss, ein gemauertes und verputztes erstes Obergeschoss sowie eine regelmäßige Fachwerkkonstruktion im zweiten Obergeschoss. Die illusionistische Farbfassung und steinsichtige Giebelseite verbergen diese Konstruktionsunterschiede.

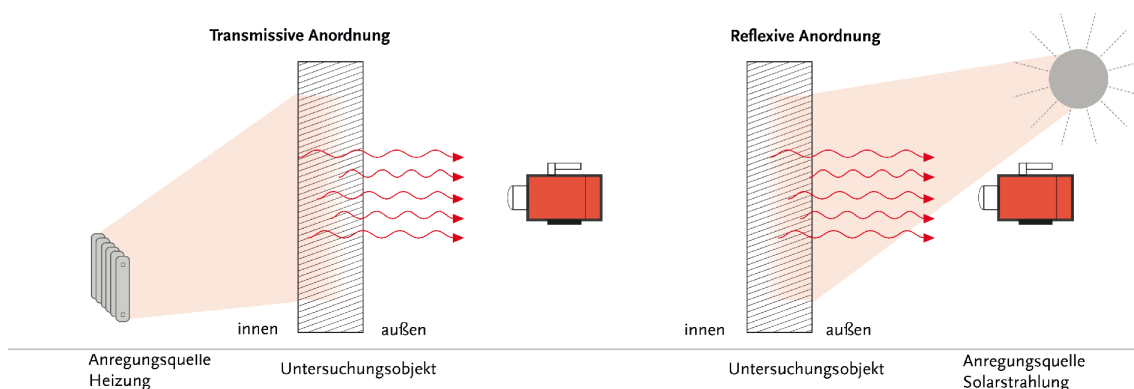


Abb. 3 Typische Wärmequellen in der Bauforschungsthermographie

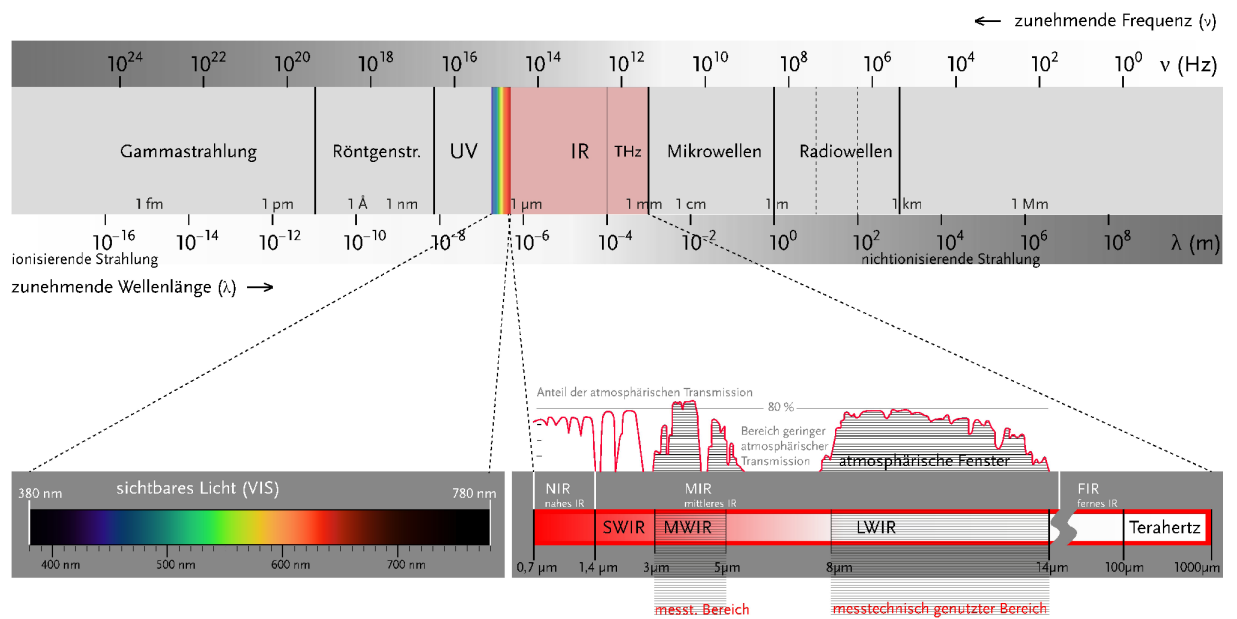


Abb. 4 Visueller Spektralbereich im Vergleich zum elektromagnetischen Spektrum, mit Fokus auf den infraroten Wellenlängenbereich und die für die bauforscherische IRT relevanten Messbereiche von 3–5 μ m (Mid-Wave Infrared) und 8–14 μ m (Long-Wave Infrared)

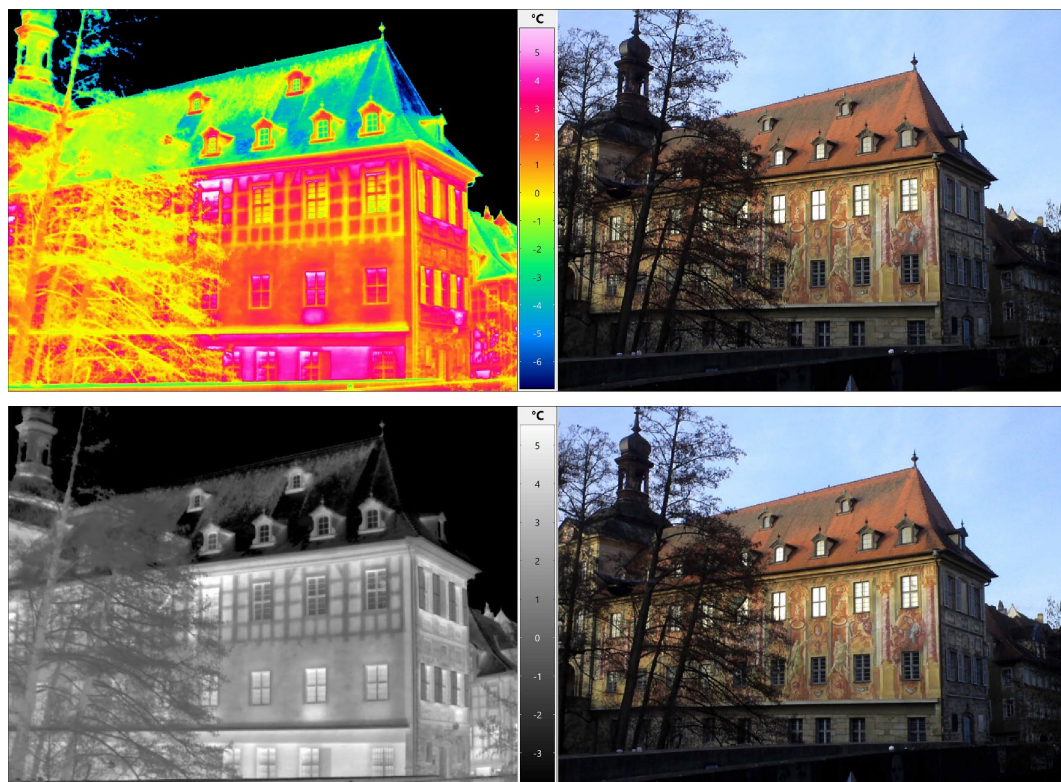


Abb. 5 IRT-Untersuchung des Alten Rathauses in Bamberg

Die Verwendung der IRT für Voruntersuchungen lässt sich auch am Residenzschloss Geyerswörth in Bamberg illustrieren (Abbildung 6). Das Wärmebild stellt ein thermisch heterogenes Mauerwerksgefüge mit lokalen thermischen Störungen dar, was auf die Überlagerung verschiedener Sanierungsphasen hindeutet. Die Störungen umfassen zugesetzte Öffnungen, welche die frühere Fassadengestaltung veranschaulichen und ein Indiz für Erweiterungen und Nutzungsänderungen sind. Weiterhin zeigt das Thermogramm eine vertikale thermische Kante unterhalb des Dachversprungs, die eine Baufuge mit versetzten Steinlagen markiert. Darüber hinaus sieht man Entlastungsbögen über den Fenstern sowie Risse und Putzschäden im Brüstungsbereich des Erdgeschosses. Diese sind wahrscheinlich das Resultat von Materialdegenerationen und lokalen Setzungen, möglicherweise infolge des flussnahen Standorts.

Neben den regelmäßigen thermischen Strukturen besitzt vor allem die Entdeckung thermischer Anomalien bauforscherischen Mehrwert. Ursache sind oft Material- und Konstruktionswechsel oder Materialveränderungen, die sowohl auf potenzielle Baufugen und Bauteilanschlüsse als auch auf Schwachstellen und Schäden schließen lassen. Diese Stellen sollten untersucht werden. IRT hilft hier bei der Generierung erster Hinweise zum Objektzustand und der Lokalisierung neuralgischer Befundstellen. Ergänzende bauforscherische und materialwissenschaftliche Methodik vertieft die Erkenntnisse zu konstruktiven Zusammenhängen und stratigrafischen Schichtungen – und damit auch zur Baugeschichte des Objekts. So können geeignete Befundöffnungen verortet und Stellen für Bohrungen und Probeentnahmen festgelegt werden.

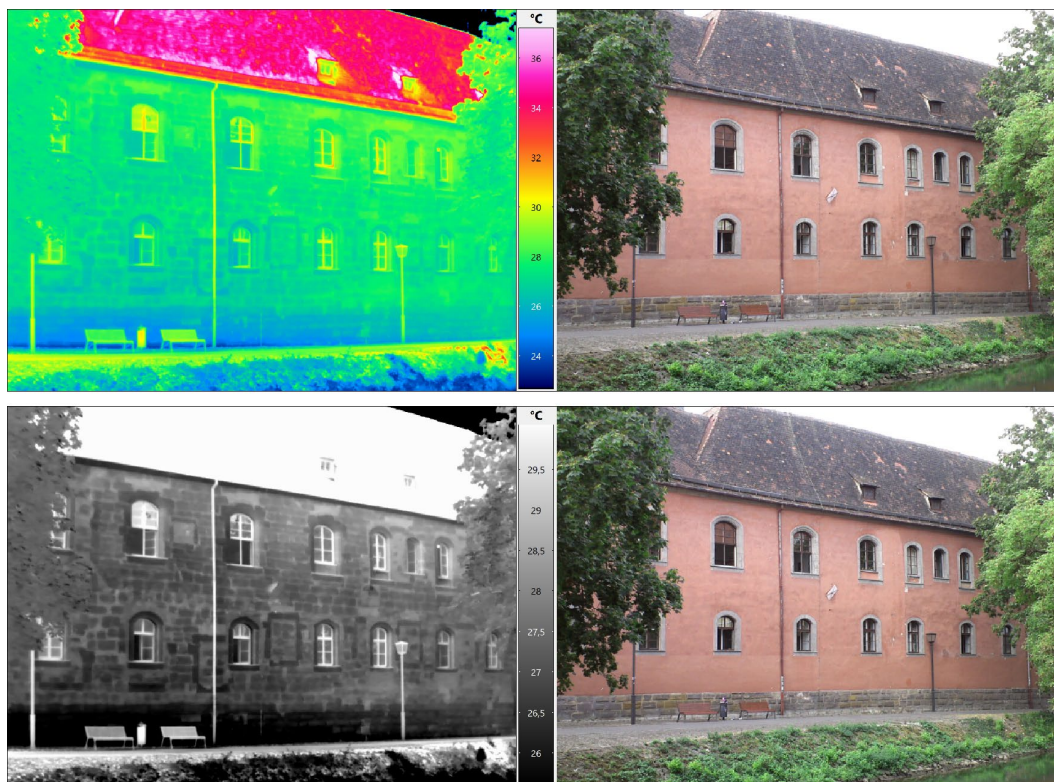


Abb. 6 IRT-Untersuchung des Residenzschlosses Geyerswörth in Bamberg

3.2 Baukonstruktive Details

Über ihre Funktion in der Voruntersuchung hinaus unterstützt IRT außerdem die zerstörungsfreie Analyse baukonstruktiver Details, indem sie Erkenntnisse zu Art und Dimension der verwendeten Baumaterialien liefert. Voraussetzung hierfür ist eine ausreichende geometrische und thermische Auflösung der Kamera, damit diese hinreichend kleine Messflächen und Temperaturdifferenzen darstellen kann.

Abbildung 7 präsentiert die thermische Detailuntersuchung des Kreuzrippengewölbes im Bamberger Dom. Die Analyse gibt Aufschluss zur Größe, Ausrichtung und Lage der Mauersteine, zur Art des gemauerten Gewölbeverbandes, zum Verhältnis zwischen Fugen- und Steinfläche sowie begrenzt zu variierenden Steinmaterialien. All das ermöglicht Rückschlüsse auf den Bauprozess. Die Gratlinien der Wölbflächen sind schlusssteinartig und gleichmäßig mit größeren Steinformaten ausgemauert. Ab den Drittelpunkten der Gewölbezwickel zeigen sich symmetrisch zu den Gewölberippen ebenfalls thermisch aktive Steinformate, doch ihre Anordnung ist unregelmäßiger und unterscheidet sich in den einzelnen Zwickeln. Die thermischen Signaturen deuten auf variierende Steinarten und -formate hin. Ihre Platzierung an statisch beanspruchten Stellen legt nahe, dass diese durch gezielte Aufmauerung verstärkt wurden.

Auch bei der ehemaligen Dominikanerkirche in Bamberg erschließt die IRT baukonstruktive Details (Abbildung 8). Die thermische Signatur der untersuchten Scheidbögen

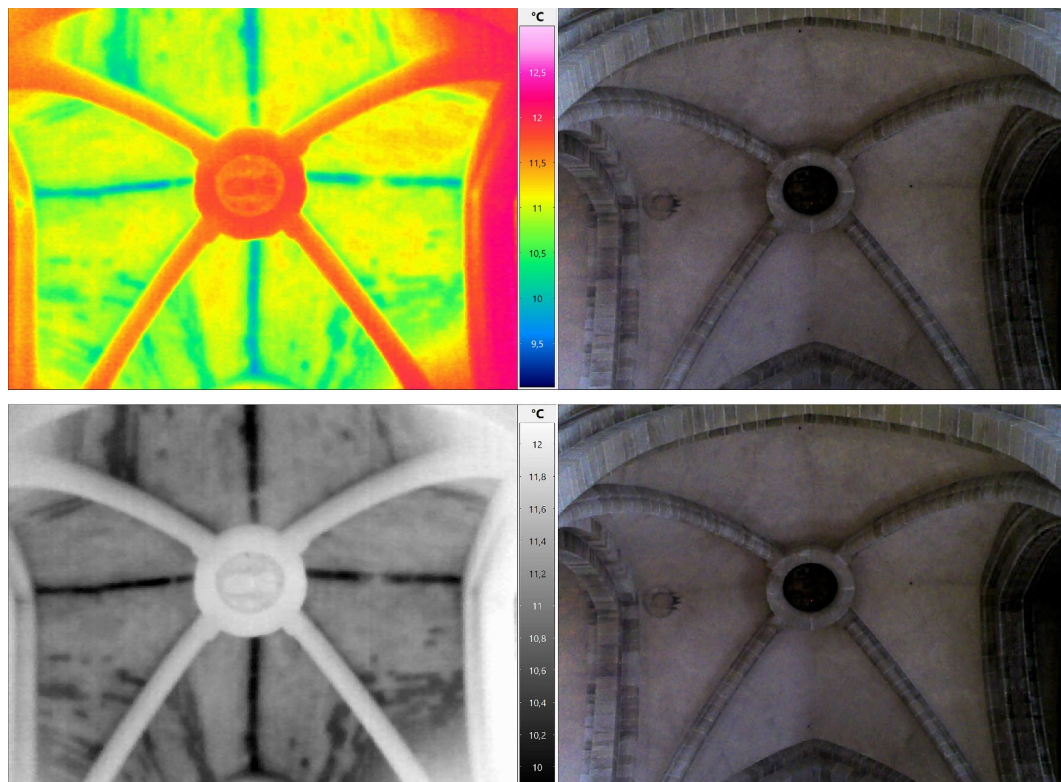


Abb. 7 IRT-Untersuchung des Bamberger Doms – Detektion von Aufmauerung

verdeutlicht ein aufgehendes Fachwerkgefüge mit regelmäßig angeordneten vertikalen und horizontalen Hölzern, das sich über den thermisch homogenen Scheidbögen befindet. Dahinter liegen die Deckenbalken der Flachdecke über dem Seitenschiff und die unterseitige Lattung. Vermutlich wurde die Fachwerkwand im Zuge der nachträglichen Mittelschiffeinwölbung auf die bestehenden, massiv gemauerten Scheidbögen eingebracht – als Traggerüst für das Holztonnengewölbe (im Dachraum einsehbar) und zur Erhöhung des Kirchenraums.

Die Rekonstruktion der Gewölbebauten im Dom und in der ehemaligen Dominikanerkirche in Bamberg erfordert ergänzende bauforscherische, archivalische und materialwissenschaftliche Untersuchungen.

3.3 Umbauten und Veränderungen

Neben Indizien zu Baumaterialien und Konstruktionsweisen eignet sich die thermographische Detailuntersuchung zur berührungsfreien Lokalisierung nachträglich veränderter Bauteile oder Gebäudebereiche. Letztere zeichnen sich im Thermogramm häufig als Störung im umliegenden homogenen Bauegefüge aus. Solche Veränderungen umfassen zugesetzte Öffnungen, Reste abgegangener Bauteile, Materialwechsel und jüngere Baustoffe sowie Konstruktionen.

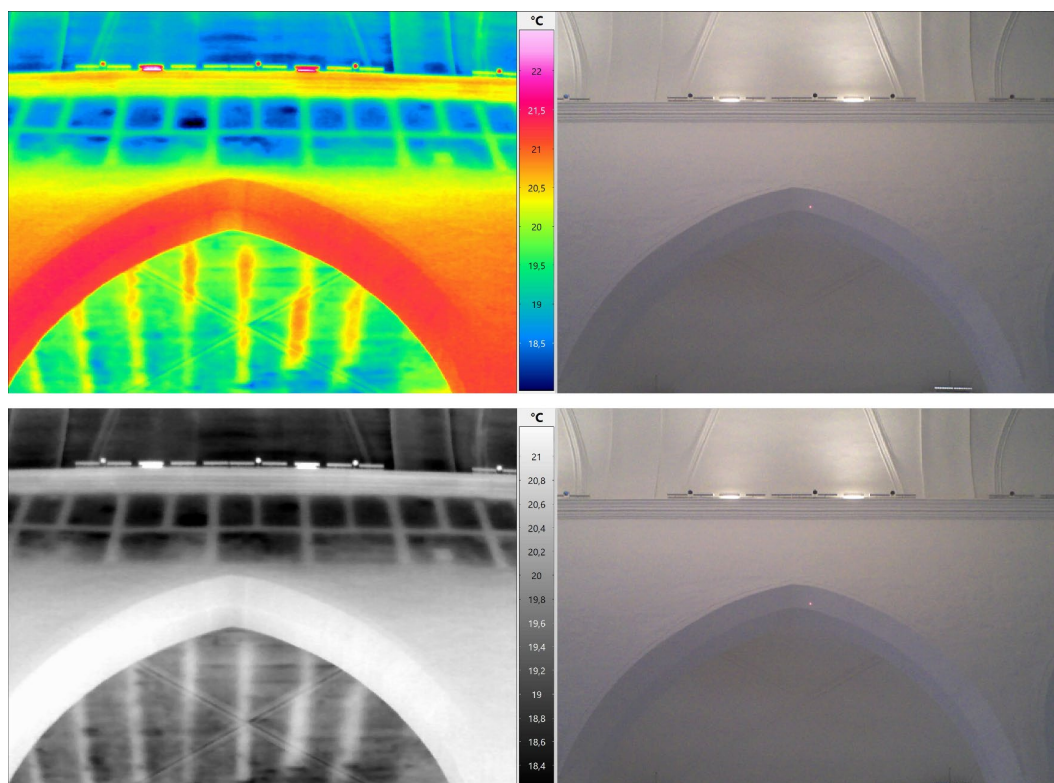


Abb. 8 IRT-Untersuchung der ehemaligen Dominikanerkirche in Bamberg – Detektion nachträglich eingebrachter Fachwerkwand mit Holztonnengewölbe darüber

Die Erkennung nachträglicher Umbauten dank IRT lässt sich anhand der ehemaligen Dominikanerkirche in Bamberg demonstrieren (Abbildung 9). Auf der Fassade zeigen sich zwei spitzbogenförmige thermische Signaturen gleicher Größe sowie rechts davon der Ansatz einer dritten Signatur. Die drei Bögen weisen in ihren Laibungen variierende Steinformate auf, die in das Mauerwerk einzahnen. Auf der rechten Seite wirken die Steinlagen regelmäßig alternierend, auf der linken hingegen weniger systematisch. Die thermischen Befunde lassen auf eine massive Umgestaltung dieses Fassadenteils schließen. Die Mittelachse der heutigen Fensteranordnung weicht stark von der Achse der drei zugesetzten Spitzbogenöffnungen ab. Das spricht für eine Umgestaltung der Raumkonfiguration oder eine Neuausrichtung der Hauptachse des Kirchenraums. Die drei Spitzbogenöffnungen und ihre regelmäßige Anordnung könnten entweder die frühere Westportalseite markieren (dann müsste der damalige Eingang darunter liegen) oder sie waren Teil der Kirchenlängsseite.

Auch die IRT-Untersuchung des Rathauses in Lichtenfels deckt nachträgliche bauliche Veränderungen auf. Im Thermogramm der Fassade (Abbildung 10) deuten drei abgegrenzte thermische Signaturen auf zugesetzte Wandöffnungen hin. Die Öffnungen links und mittig entsprechen den Fensterachsen im Obergeschoss; ihre Gewände haben keine klare thermographische Signatur. Die Öffnungen links und rechts sind überwiegend mit größeren Ziegelformaten zugesetzt; nur zu den Gewänden hin wurde kleinformatisch angestückt. Die mittlere Öffnung hingegen ist, abgesehen von der untersten Lage, durchgehend mit kleinen Ziegelformaten zugesetzt. Die Steinformate

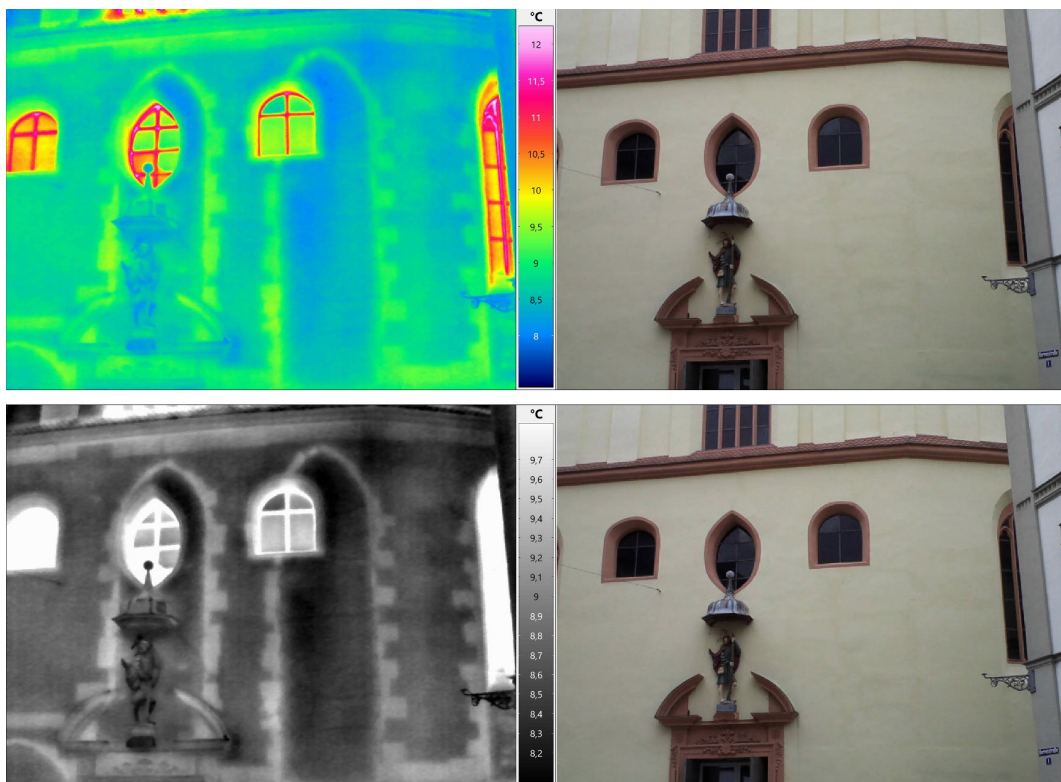


Abb. 9 IRT-Untersuchung der ehemaligen Dominikanerkirche in Bamberg – Detektion umgestalteter Fassade

lassen auf eine jüngere Umbau- oder Sanierungsmaßnahme schließen, wahrscheinlich in ein bis zwei Phasen, verbunden mit einer Umnutzung der Räume dahinter.

Die IRT-Detailuntersuchungen der ehemaligen Dominikanerkirche in Bamberg und des Rathauses in Lichtenfels haben erste wichtige Anhaltspunkte für Umbauten und Veränderungen dieser Gebäude geliefert. Eine vollständige Untersuchung der Objekte würde die endgültige Einordnung der Befunde erlauben.

3.4 Baufugen und Bauphasen

Die thermische Detektion nachträglicher Umbauten hilft, die Veränderungsgeschichte von Objekten zu rekonstruieren – ein Prozess, der durch die Entdeckung von Alt-schäden und deren Reparaturen sowie von bestehenden Schäden unterstützt wird. Besonders bedeutsam sind dabei thermisch aktive Baufugen und Bauteilanschlüsse. Die Visualisierung der Fugen ermöglicht eine räumlich-zeitliche Zuordnung thermografischer Befunde zu historischen Konstruktionsphasen: Anhand der im Thermogramm ersichtlichen Materialwechsel und Verzahnungen von später veränderten Bauteilen sowie Gebäudebereichen können einzelne bauliche Veränderungen rekonstruiert und, bei guter Befundlage, zeitlich eingeordnet werden.

Ein Beispiel bietet das Rathaus II in Lichtenfels. Rein optisch wirken Putz und Dachhaut homogen, doch die IRT-Untersuchung des Gebäudes (Abbildung 11) enthüllt eine klare thermische Kante, die auf unterschiedliche Materialien hindeutet. Der linke Gebäudeteil besteht aus Mauerwerksgefüge, der rechte Teil erscheint thermisch homogen; an der rechten Außenecke sind zudem Eckverzahnungen erkennbar. Die beiden Fensterachsen rechts wurden daher vermutlich nachträglich ergänzt. Ein weiteres Indiz hierfür ist der sichtbare Versprung im Traufgesims.

Die IRT-Untersuchung des Rathauses Hollstadt wiederum deckt eine nachträgliche Umgestaltung der Giebelseite auf (Abbildung 12). Es treten multiple thermische Signaturen verschiedener Mauerwerksformate und Fensterstürze zutage, ebenso wie eine

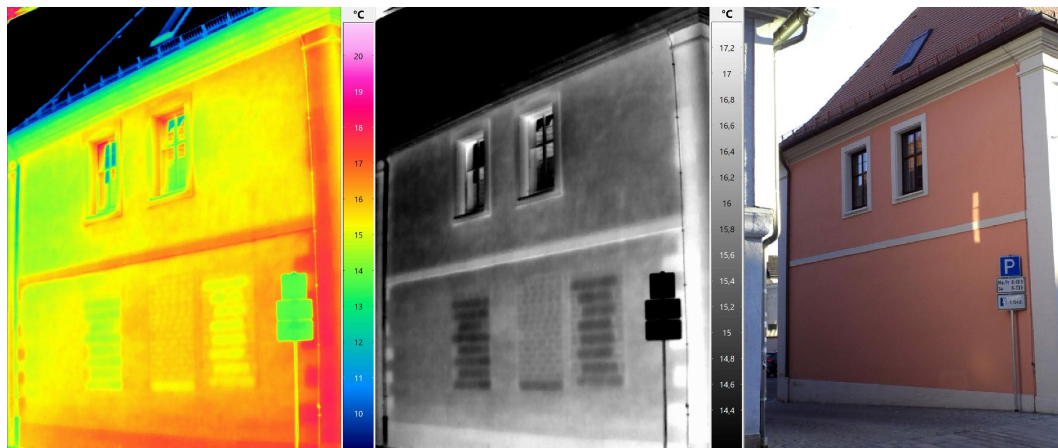


Abb. 10 IRT-Untersuchung des Rathauses II in Lichtenfels – Detektion zugesetzter Wandöffnungen

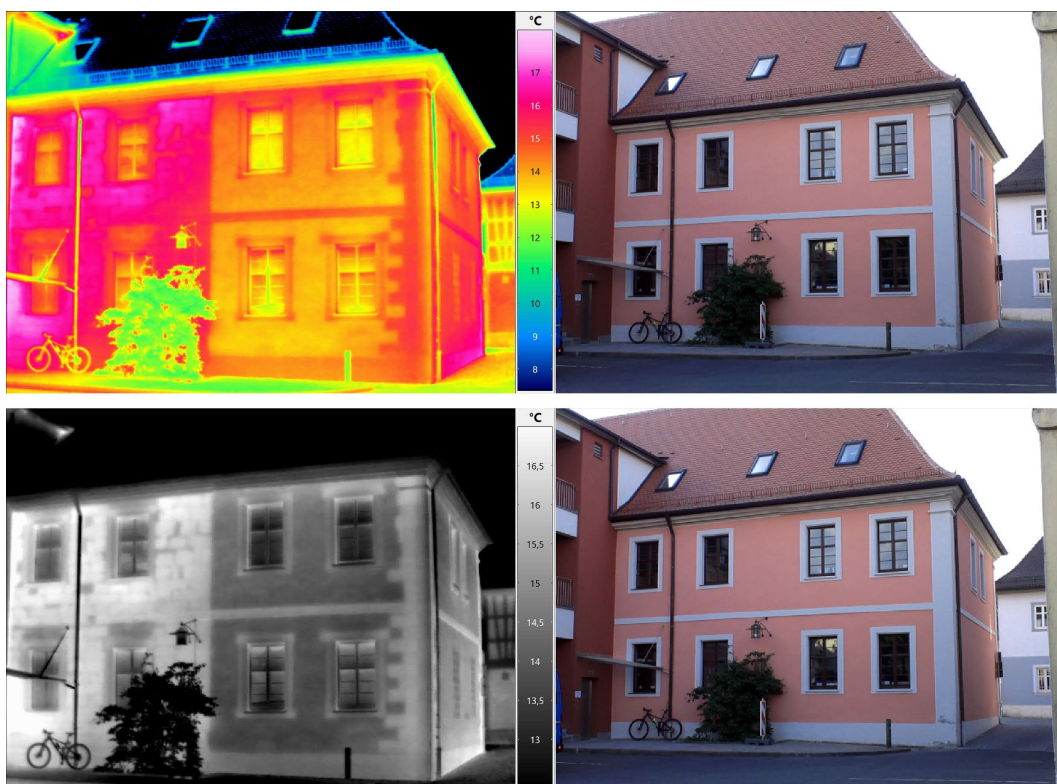


Abb. 11 IRT-Untersuchung des Rathauses II in Lichtenfels – Detektion ergänzter Fensterachsen

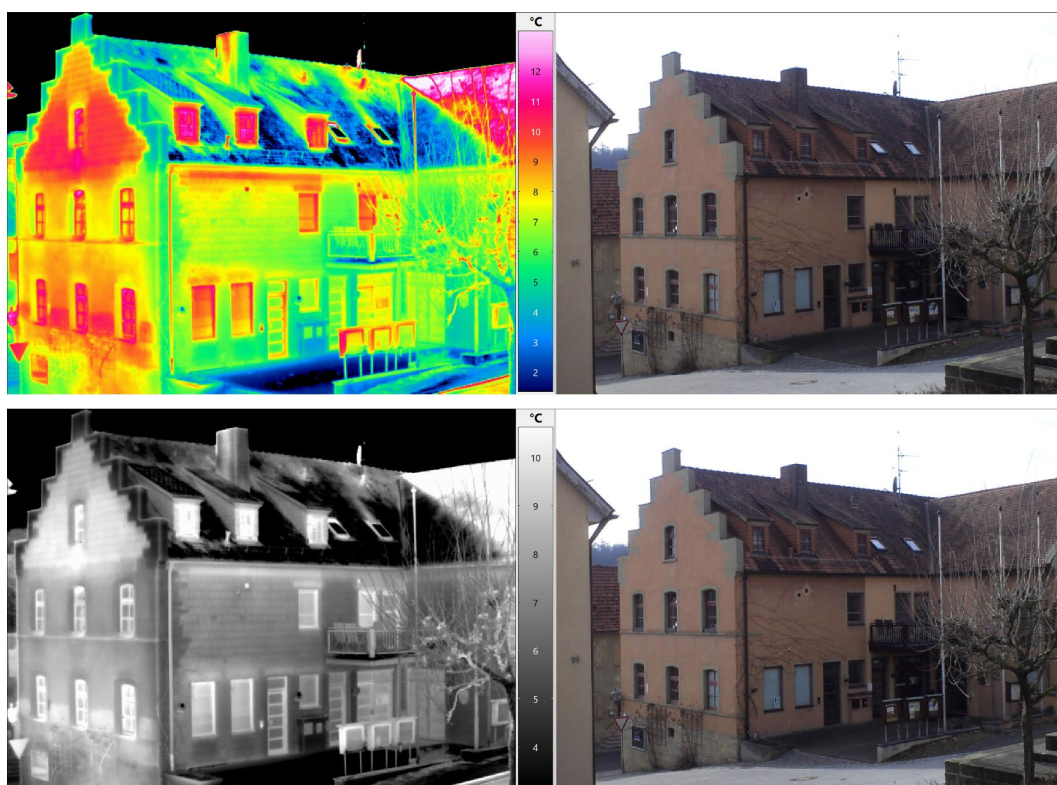


Abb. 12 IRT-Untersuchung des Rathauses in Hollstadt – Detektion umgestalteter Giebelseite

unregelmäßige Verzahnung in Außenwanddecke und Staffelgiebel. Die hochrechteckigen Fensterformate der Rückseite weichen von den segmentbogenförmigen Fenstern der Giebelseite ab; weiterhin zeigen sich monolithische Stürze. Diese Befunde weisen auf einen umfangreichen Umbau des rückwärtigen Gebäudeteils und des Giebeldreiecks hin. Die Steinformate lassen auf Hochlochziegel schließen, während die neuen Fensterstürze eventuell aus Betonfertigteilen bestehen und folglich eine jüngere Umbaumaßnahme darstellen.

Die Ermittlung der realen Bauphasen der Rathäuser in Lichtenfels und Hollstadt erfordert ergänzende archivalische und naturwissenschaftliche Datierungsmethoden.

3.5 Schäden und Reparaturen

Zusätzlich zu Hinweisen auf die Veränderungsgeschichte eines Objekts decken thermographische Untersuchungen häufig auch bauliche Schäden auf. Unter Umständen können baukonstruktive sowie material- und alterungsbedingte Schäden voneinander differenziert werden. Die IRT-Analyse des Rathauses in Gerolzhofen (Abbildung 13) zeigt eine durchlaufende horizontale Kante im Erdgeschoss sowie die eines Diagonalrisses entlang der Mauerwerksfugen unter dem linken Fenster. Ebenfalls zu sehen sind quadratische thermische Strukturen im Brüstungsbereich der Fenster im



Abb. 13 RT-Untersuchung des Rathauses in Gerolzhofen – Detektion von Sockelsanierung

Obergeschoss. Die horizontale Kante im Erdgeschoss ist das Resultat einer Sockelsanierung: Die thermischen Eigenschaften des erneuerten Putzes weichen von denen des Bestands ab. Ursache der Sanierung war vermutlich eine feuchtegeschädigte Sockelzone. Der diagonale Rissverlauf hat wahrscheinlich eher statische Ursachen. Durch ergänzende Analysen wie Rissmessungen und Baugrunduntersuchungen könnte man die Schadensursachen und -verläufe präziser rekonstruieren.

Die Thermographie kann nicht nur baukonstruktive Schwachstellen und potenzielle Schadstellen, sondern auch Altreparaturen nachweisen. Dies erlaubt Rückschlüsse auf Art, Umfang und Tauglichkeit früherer Instandsetzungen und Sanierungen. Relevant ist das etwa bei visuell nicht mehr sichtbaren Putzausbesserungen – siehe die IRT-Untersuchung des Rathauses in Thiersheim (Abbildung 14). Die Fensterecken besitzen wiederkehrende thermisch aktive Bereiche mit klaren Kanten, die über die Putzfaschen hinausreichen. Dies deutet auf lokale, flickstellenartige Putzinstandsetzungen mit einem thermisch abweichenden Produkt hin, mutmaßlich aufgrund lokal begrenzter Risse.

Während IRT die Schäden und Reparaturen eines Objekts visualisieren kann, veranschaulicht sie ebenso seine Intaktheit und Schadensfreiheit. So unterstützt sie die Dokumentation der Qualität und Leistungsfähigkeit historischer Bausubstanz.

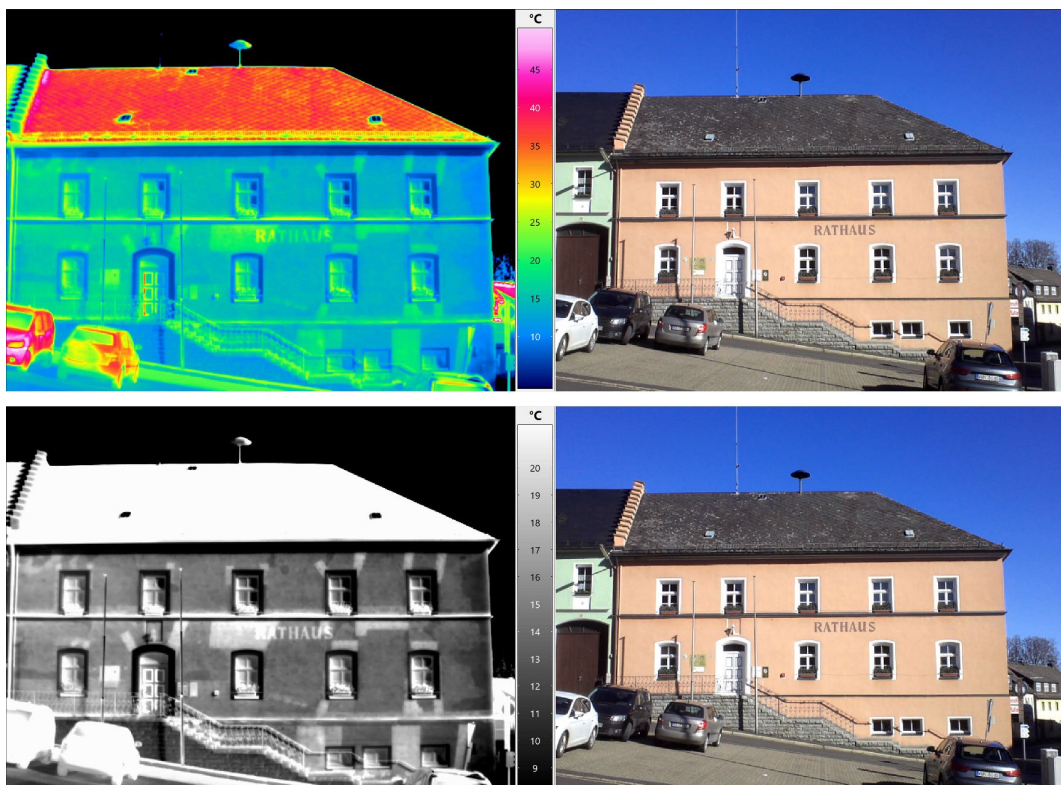


Abb. 14 IRT-Untersuchung des Rathauses in Thiersheim – Detektion von Putzinstandsetzungen

4 Grenzen und Potenziale

IRT-Untersuchungen bieten der Bauforschung neue Einsatz- und Erkenntnismöglichkeiten, sind jedoch auch mit Einschränkungen verbunden. Die wichtigsten entsprechenden Aspekte im bauhistorischen Kontext werden nachfolgend erläutert.

Die IRT-Methode ist im Kontext der Bauforschung ausschließlich als Instrument zu verstehen, das einer Auswertung mit hinreichender Sachkenntnis und Detaillierung bedarf. Ihre Aussagekraft wird sowohl durch die technischen Parameter der Kamera als auch durch die physische Umgebung des Bauwerks bestimmt. Hinsichtlich der Kamera setzen insbesondere deren geometrische und thermische Auflösung gewisse Grenzen, also das Detektorformat und die kleinstmögliche darstellbare Temperaturdifferenz. Die bauliche Umgebung wiederum beeinflusst die IRT-Ergebnisse durch tages- und jahreszeitlich wechselnde Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Strahlungsintensität. Limitiert ist die Aussagekraft von Thermogrammen bei stark reflektierenden Oberflächen und bei Strukturen in großer Tiefe oder mit viel Deckmaterial. Gleiches gilt bei geringem Unterschied im thermischen Verhalten verschiedener Materialien, bei homogener Wärmeverteilung über Bauteile hinweg und bei vorgehängten Fassadenelementen oder Dämmschichten, die eine thermische Pufferung bewirken.

Trotz aller Einschränkungen bietet die Thermographie für die bauforscherische Befundanalyse und -dokumentation vielfältige Möglichkeiten. Die modernen Kameras zeichnen sich durch robuste Technik, einfache Handhabung und unkomplizierte Datenaufbereitung aus. Das zerstörungsfreie Vorgehen und die vollflächige Visualisierung ermöglichen einen behutsamen Umgang mit den Objekten. Die IRT ist dadurch insbesondere für den Einsatz in komplexen und mitunter schwer erreichbaren Großstrukturen wie historischen Gebäuden prädestiniert. So dient die Thermographie letztendlich nicht nur als Untersuchungsmethode und -instrument, sondern trägt auch langfristig zur Erhaltung historisch bedeutsamer Bausubstanz bei.

Abbildungsverzeichnis

Alle Abbildungen in diesem Beitrag wurden von der Autorin erstellt und bereits 2021 veröffentlicht in:

Luib, Anna: *Infrarot-Thermographie in der Bauforschung. Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen* (Bamberger Empfehlungen für Bauforschung und praktische Baudenkmalpflege, Band 1). Bamberg: University of Bamberg Press, 2021. DOI: 10.20378/irb-52281.

Mark Böttges

DAS DEUTSCHE MUSEUM IN MÜNCHEN

Belastungsversuche an Leichtbetonrippendecken

DOI: 10.60628/9783738810493-169

Der Saalbau des Deutschen Museums auf der Münchner Museumsinsel stammt aus den 1930er-Jahren. Aufgrund von Schäden an der denkmalgeschützten Leichtbetonrippendecke wurde 2021 eine statische Untersuchung mit dem Ziel einer minimalinvasiven Instandsetzung beauftragt. Geringe Betonfestigkeit und ausgeprägte Rissbildung verhinderten die Anwendung normativer Berechnungsverfahren; stattdessen kam ein bogenförmiges Druckmodell zum Einsatz. Zudem wurden die rund 1.000 m Rippenflanken auf 390 m² Deckenfläche untersucht, um die Schadensbilder festzustellen und die instandsetzungsbedürftigen Bereiche zu identifizieren. Die meisten Rippen erwiesen sich als ausreichend tragfähig. Die daraufhin ausgeführten gezielten Ertüchtigungsmaßnahmen minimierten nicht nur die Kosten, sondern auch den Eingriff in die denkmalgeschützte Bausubstanz.

1 Einleitung

Wie lässt sich die Tragfähigkeit einer historischen Betondecke nachweisen, die seit fast einem Jahrhundert Lasten trägt, gemäß heutigen Normen jedoch rechnerisch als unzureichend gilt? Und wie kann sie ertüchtigt werden, wenn sie zudem deutliche Schäden aufweist, aber unter Denkmalschutz steht?

Vor diesen Fragen stand das Ingenieurbüro des Artikelauteurs (Kayser + Böttges | Barthel + Maus: Ingenieure und Architekten, kurz KB+BM), als es mit der statischen Untersuchung des Saalbaus im Deutschen Museum München beauftragt wurde. Die Konstruktion stammt aus den 1930er-Jahren. Die Festigkeit des Betons liegt daher weit unter den heute geforderten Werten und wie zur Bauzeit üblich wurde keine Schubbewehrung eingebaut. Ein statischer Nachweis der Bestandskonstruktion schien schon im ungeschädigten Zustand nicht möglich zu sein. Zudem wies die Decke substanzielle Schäden auf. Die Aufgabe erforderte ein individuelles und präzises Vorgehen, das sowohl rechnerisch fundiert und bautechnisch umsetzbar war als auch die Belange der Denkmalpflege beachtete.

2 Baubeschreibung

Das 1925 eröffnete Deutsche Museum ist nach Ausstellungsfläche eines der weltweit größten Wissenschafts- und Technikmuseen [1]. Drei Jahre später begann die Errichtung zweier Erweiterungen: eines Bibliotheks- und Verwaltungsgebäudes („Studienbau“) und eines Kongresssaals („Saalbau“), siehe Abbildung 1. Die Entwürfe beider Bauten stammen von dem Architekten German Bestelmeyer [2]. Während der Studienbau bereits 1932 eröffnet wurde, verzögerte sich die Fertigstellung des Saalbaus – siehe Abbildung 2 – aus finanziellen Gründen bis 1935 [1].



Abb. 1
Errichtung des
Saalbaus (vorn) und
des Studienbaus
(dahinter) des Deutschen
Museums, November
1929 (Deutsches Muse-
um Archiv, München)

Der Kongresssaal zählt zu den ersten vollständig in Stahlskelettbauweise errichteten Großbauten Deutschlands [3]. Die tragende Konstruktion besteht aus einem rasterartigen System von Stahlträgern, die in die Geschossdecken integriert sind. Zwischen den Hauptträgern wurden unterschiedliche Betondeckensysteme eingehängt: Während die Kellerdecke aus massivem Stahlbeton besteht, kamen im Erdgeschoss neben Hohlstein-, Normalbetonrippen- und massiven Stahlbetondecken auch Leichtbetonrippendecken zum Einsatz (Abbildung 3).



Abb. 2
Der fertiggestellte Saalbau und Studienbau des Deutschen Museums, nach 1935 (Bulgarische Staatsagentur für Archive; gemeinfrei)

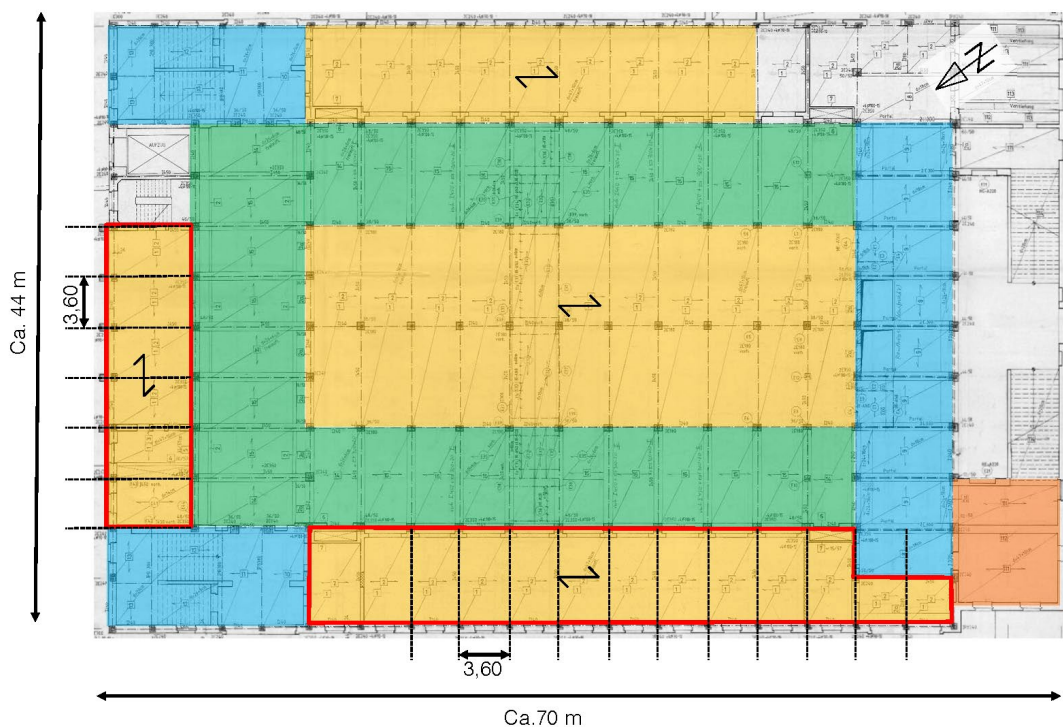


Abb. 3 Die verschiedenen Deckensysteme über dem Erdgeschoss des Saalbaus: Massivdecke (blau), Hohlsteindecke (grün), Leichtbetonrippendecke (gelb), Normalbetonrippendecke (orange). Die untersuchten Decken sind rot eingrahmt. (Dipl.-Ing. Ernst Treitl – Ingenieurbüro, München)

Die Leichtbetonrippendecken bilden durchlaufende Trägersysteme, die sich über bis zu 13 Felder mit je 3,60m Spannweite erstrecken. Die schwach bewehrten Rippen sind in regelmäßigem Achsabstand von ca. 80cm angeordnet und setzen sich aus zwei unterschiedlichen Betonen zusammen (Abbildung 4). Im unteren Bereich der insgesamt 47cm hohen Rippen wurde konventioneller Kiesbeton verwendet, der oben etwa auf Höhe der Längsbewehrung abschließt. Darüber – in der unbewehrten Druckzone und dem nur ca. 10cm starken Deckenspiegel – ist ein Leichtbeton mit Bimskörnung eingesetzt. Die Längsbewehrung besteht aus zwei glatten Rundeisen mit 12-mm-Durchmesser, von denen eines an den Auflagern nach oben aufgebogen ist. Eine Schubbewehrung in Form vertikaler Haken oder Bügel ist nicht vorhanden.

Die Untersicht der Decke wird mit einem historischen Rohrputz gebildet, der auf einer quer zu den Rippen verlaufenden durchgehenden Holzlattung angebracht ist. Dadurch entsteht eine glatte, flächige Untersicht, die in den Eingangsbereichen mit Stuckelementen verziert ist (Abbildung 5).

Im Zweiten Weltkrieg verursachten mehrere Bombenangriffe am Saalbau sichtbare, aber in ihrem Ausmaß begrenzte Schäden [4]. In den untersuchten Deckenbereichen blieb die bauzeitliche Substanz bewahrt. Nach einem raschen Wiederaufbau des Gebäudes erfolgte bereits 1946 die Neueröffnung [4]. Der Raum im Obergeschoss direkt oberhalb der untersuchten Decken war für viele Jahre der größte Veranstaltungssaal der Stadt und ein beliebter Ort für Konzerte, Feste sowie Kongresse, bevor er 1989 in das „Forum der Technik“ mit Planetarium und Kino umgestaltet wurde [4]. Ab 2010 stand das Gebäude größtenteils leer, ab 2016 wurden für fünf Jahre verschiedene Zwischennutzungen genehmigt [5].

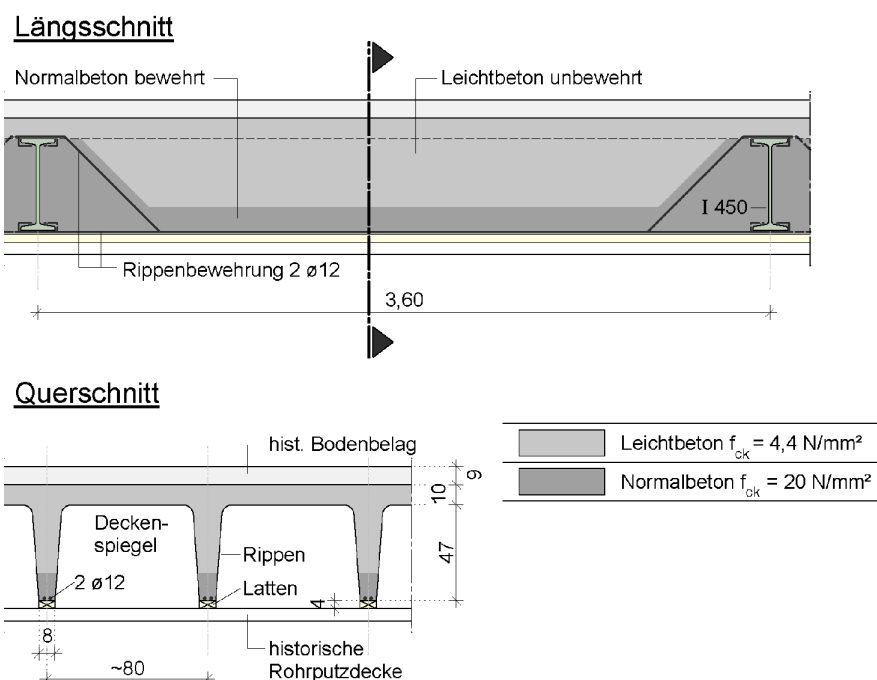


Abb. 4 Längs- und Querschnitt durch die Leichtbetonrippendecke im Kongresssaal; Übergang zwischen Leichtbeton und Kiesbeton schematisch dargestellt

3 Ausgangslage

Als Grundlage für einen Bauantrag zur Zwischennutzung einzelner Bereiche im Erd- und ersten Obergeschoss wurde 2016 ein statisch-konstruktives Gutachten erstellt [6]. Vereinzelt großformatige Öffnungen an der Unterseite der Leichtbetonrippendecken offenbarten teils erhebliche Rissbildungen, sowohl an den unbewehrten Deckenspiegeln als auch an den Rippen. Die beteiligten Ingenieurbüros dokumentierten nicht nur bis zu 4 mm breite vertikal oder schräg verlaufende Risse in den Rippen, sondern ebenso Trennrisse zwischen Rippe und Deckenspiegel sowie Leichtbetonausbrüche und vereinzelt Durchbrüche im Deckenspiegel. Als Rissursache wurden insbesondere Schwindverformungen des Betons identifiziert, die man im Wesentlichen auf die unterschiedlichen Materialeigenschaften von Leicht- und Normalbeton zurückführte.

Für weitergehende Materialuntersuchungen wurden Druckversuche an über 26 Bohrkernen durchgeführt. Die festgestellte charakteristische Zylinderdruckfestigkeit des Leichtbetons von $4,4 \text{ N/mm}^2$ [3] lag deutlich unter der heutigen normativen Mindestanforderung von 8 N/mm^2 [7]. Selbst bei einem ungeschädigten Zustand konnte auf dieser Grundlage kein normgerechter Tragfähigkeitsnachweis als Biegebalken unter der geforderten Nutzlast von 2 kN/m^2 geführt werden: Aufgrund der fehlenden Schubbewehrung und geringen Betondruckfestigkeit befürchteten die Büros ein Versagen einzelner Rippen infolge von Querkraft [3], [6].

Um dennoch die Tragfähigkeit der Decke einzuschätzen, fand ein Belastungsversuch an einem vorgeschädigten Deckenfeld statt. Dieses war 1,6 m breit und umfasste damit zwei benachbarte Rippen. Das Feld widerstand einer Prüflast, die mit einer



Abb. 5

Untersicht der Decke mit Stuckapplikation; daneben eine Deckenöffnung aus der Untersuchungskampagne 2016 (Deutsches Museum, München)

äquivalenten Flächenlast von $15,4 \text{ kN/m}^2$ einem Vielfachen der geforderten Nutzlast entsprach, ohne dass sich eine nennenswerte Zunahme der Rissbildung zeigte [8]. Trotz fehlender rechnerischer Nachweise erfolgte daher die Genehmigung einer fünfjährigen Nutzung dieser Deckenbereiche. Lediglich der unbewehrte und vielfach gerissene Deckenspiegel wurde durch aufliegende Stahlplatten entlastet, die jeweils von Rippe zu Rippe spannten und ein lokales Versagen unter Einzellasten verhindern sollten.

2021 stand eine Verlängerung der Nutzungsgenehmigung um weitere fünf Jahre an, zusammen mit einer Ausweitung auf zusätzliche Deckenbereiche gleicher Konstruktionsart. Hierfür forderte die Genehmigungsbehörde eine detaillierte statische Untersuchung inklusive prüffähiger statischer Berechnungen. Ziel war es, die denkmalgeschützte Konstruktion mit möglichst geringen Eingriffen instand zu setzen und ihre Tragfähigkeit für die geforderte Nutzlast nachzuweisen.

4 Statischer Nachweis

Da für die Leichtbetonrippendecke bereits im intakten Zustand wegen des befürchteten Querkraftversagens kein Tragfähigkeitsnachweis möglich schien, wurde zunächst im Rahmen einer Machbarkeitsstudie geprüft, ob sich ein statisches Modell finden ließ, das einen solchen Nachweis erlaubte. Der alternative Berechnungsansatz basierte auf einem bogenförmigen Druckmodell („Stützlinie“). Im Gegensatz zum klassischen Biegeträgermodell, in dem die Belastung in Biegung und Querkraften aufgeteilt wird, erfolgt der Lastabtrag beim Druckbogenmodell über eine gekrümmte Drucklinie, die sich innerhalb des Querschnitts einstellt, über die gesamte Feldlänge spannt und sämtliche Lasten in die Auflager ableitet (Abbildung 6). Dieses Tragverhalten bei Stahlbetondecken wurde vor rund einhundert Jahren durch Versuche erkannt und seither wissenschaftlich untersucht (für eine Auflistung und Kurzbeschreibung der wesentlichen Untersuchungen, siehe [9], [10], [11]). Das Modell fand jedoch bisher keinen Eingang in Bemessungsnormen.

Voraussetzung für die Anwendung des Druckbogenmodells ist, dass der horizontale Anteil der Bogendruckkraft („Bogenschub“) an den Feldenden sicher aufgenommen wird – ob durch ausreichend verankerte Bewehrung, externe Verankerungen oder ausreichend steife angrenzende Wände oder Decken. Bei den Zwischenauflagern von Durchlaufträgern hingegen kompensieren sich die gegenläufig wirkenden Horizontal-

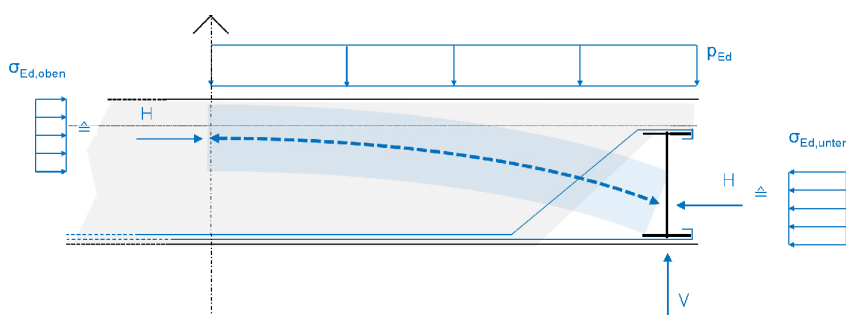


Abb. 6
Schematische Darstellung des Druckbogenmodells (nur eine Hälfte der Rippenlänge)

kraftanteile aus dem Bogenschub benachbarter Felder weitgehend (Abbildung 7). Dadurch benötigen diese Bereiche unter idealisierten Bedingungen keine Bewehrung.

Die Überprüfung der Tragfähigkeit fand per Handrechnung statt. Dabei wurde die Geometrie des sogenannten Stützbands [12] – der Stützlinie mit entsprechendem Querschnitt – so lange variiert, bis an jeder Stelle des Systems ein Zustand vorlag, bei dem die ermittelten Druckspannungen innerhalb der zulässigen Betondruckfestigkeit blieben. Der Nachweis gilt als geführt, wenn innerhalb des Querschnitts eine Stützbandfläche gefunden wird, welche die Druckkraft des sich einstellenden Bogens vollständig aufnehmen kann.

Mit dem Druckbogenmodell gelang nicht nur ein rechnerischer Nachweis der ungeschädigten Rippen, sondern teils auch der geschädigten Rippen. Dafür wurden die in den vorliegenden Gutachten beschriebenen Schadensbilder in vier Kategorien unterteilt. Für jede Schadensart wurde geprüft, inwieweit sie die Bogentragwirkung beeinflusst und ob sich trotzdem ein tragfähiger Druckbogen bildet.

Kategorie a) Horizontaler Abriss zwischen Deckenspiegel und Rippe (Abbildung 8a)

Bei einem solchen Abriss kann sich der Deckenspiegel nicht mehr am Lastabtrag beteiligen. Der Druckbogen wird flacher, was die Druckspannungen erhöht. Dennoch lagen die berechneten Spannungen unterhalb der Betondruckfestigkeit, sodass der Nachweis geführt werden konnte.

Kategorie b) Vertikaler oder nach außen geneigter Riss in der Rippe zwischen den Aufbiegungen der Bewehrung (Abbildung 8b)

Ein Riss senkrecht zur Bogenrichtung schließt sich bei Lastbeanspruchung, weshalb ein Nachweis der reinen Druckübertragung genügt. Bei geneigtem Rissverlauf wird infolge von Reibung zusätzlich Schubspannung entlang der Rissufer übertragen. Die Berechnung dieser Schubübertragung erfolgte nach DIN EN 1992-1-1:2004, Abschnitt 6.2.5, analog zur unbewehrten Betonierfuge [13]. Für Risse zwischen den Aufbiegungen reicht die Reibung aus, um die Vertikalkomponente der Bogendruckkraft sicher zu übertragen (ausgenommen nach innen geneigte Risse, siehe Kategorie (d)).

Kategorie c) Vertikaler oder nach außen geneigter Riss in Auflagernähe (Abbildung 8c)

Bei nahezu vertikalen Rissen im Bereich der diagonal verlaufenden Bewehrungseisen reicht Reibung nicht aus, um die zum Auflager hin zunehmende Vertikalkomponente der Bogendruckkraft aufzunehmen. Es werden daher zwei Druckbögen angesetzt: Der erste (in Abbildung 8c blau markiert) entspricht dem bisherigen Verlauf zwischen den Auflagern, dessen Tragfähigkeit durch die begrenzte Schubübertragung im Riss

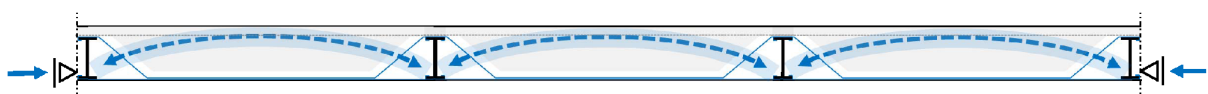


Abb. 7 Schematische Darstellung des Druckbogenmodells beim Durchlaufträger; Horizontal-komponente des Bogenschubs in den Zwischenauflagern hebt sich auf

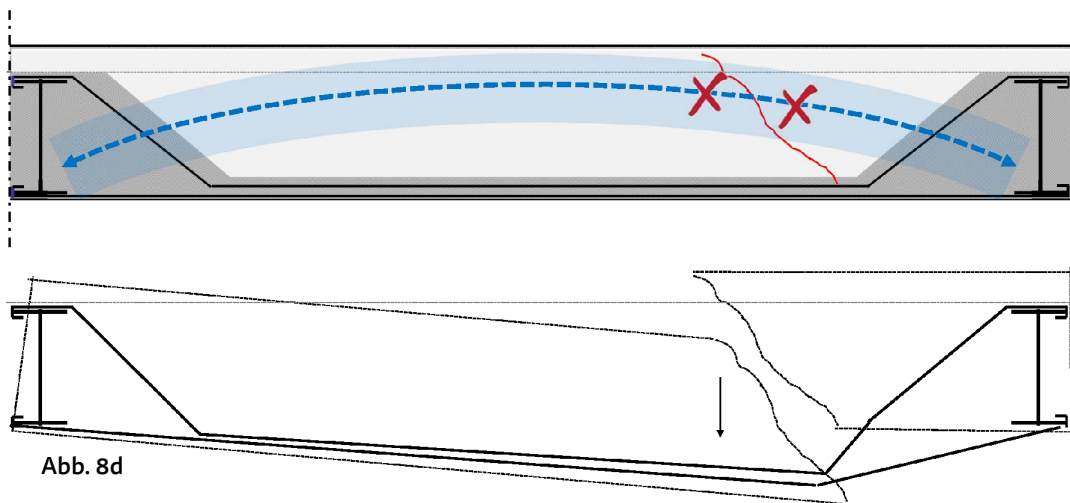
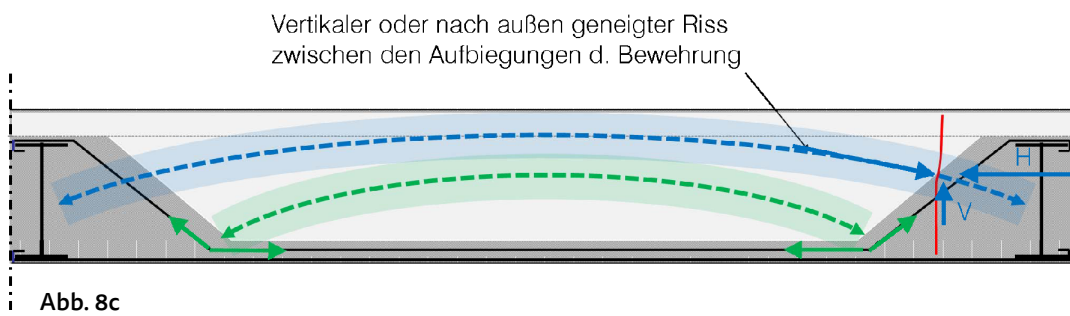
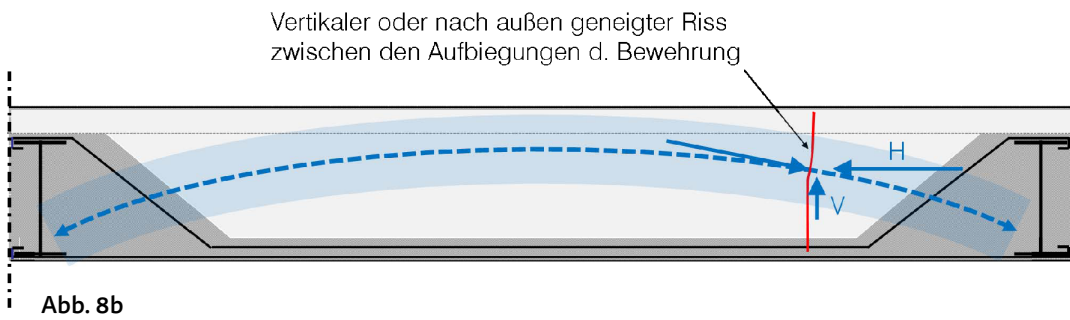
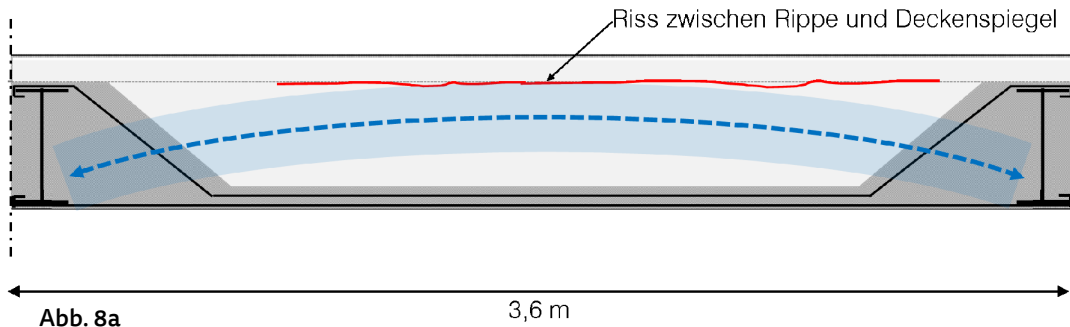


Abb. 8a–d Schematische Darstellung des Druckbogenmodells unter Berücksichtigung verschiedener Schadensbilder. Mit Ausnahme von (d) ist ein Standsicherheitsnachweis möglich.

eingeschränkt ist; der zweite (grün) verläuft zwischen den Aufbiegungen der Bewehrungsseisen und nimmt die restliche Last auf. Die Auflagerkräfte des zweiten Bogens werden über die schräg verlaufende Bewehrung in den Trägerflansch eingeleitet. Die Tragfähigkeit ist hier durch die Verankerung der Bewehrung begrenzt, doch gemeinsam tragen die Bögen die geforderten Lasten ab.

Kategorie d) Nach innen geneigte schräge Risse (Abbildung 8d)

Bei diesem Rissverlauf ist die Übertragung von Reibungskräften stark reduziert bzw. je nach Neigung sogar gänzlich ausgeschlossen. Besonders Risse zwischen den Aufbiegungen können das innere Rissufer nach unten wegrutschen lassen und die Bewehrung unplanmäßig auf Biegung beanspruchen, was zu einem Versagen führt. Ein Nachweis für dieses Schadensbild war somit nicht möglich.

Diese differenzierte Betrachtung zeigte, dass nicht alle Schäden die Tragfähigkeit gleichermaßen reduzieren. Vielmehr bestätigte das Druckbogenmodell die rechnerische Tragfähigkeit der Rippen mit den Schadensbildern (a) bis (c) für die geforderte Nutzlast von 2 kN/m^2 . Lediglich Schadensbild (d) erforderte eine statische Ertüchtigung.

Zu den hier verwendeten Modellen lässt sich kritisch anmerken, dass das Auftreten von Rissen grundsätzlich auf den Abbau von Zugspannungen hinweist und dass Druckkräfte offenbar nicht senkrecht zu geöffneten Rissen übertragen werden. Die Modelle bilden jedoch nicht zwangsläufig den tatsächlichen Kraftfluss ab, sondern stellen einen statisch möglichen Lastweg dar – in diesem Fall unter der Annahme, dass gewisse Verformung den Riss schließen und damit die Übertragung von Druckkräften wieder erlauben. Der bekannte britische Bauingenieur Jaques Heyman fasste diese Herangehensweise treffend zusammen: „[...] if the designer can find a way in which the structure behaves satisfactorily, then the structure itself certainly can“ [14].

Beim tatsächlichen Lastabtrag wirken offenbar weitere Mechanismen mit, vor allem die klassische Biegetragwirkung und Zugfestigkeit des Betons. Dass die Standsicherheit selbst ohne deren rechnerische Berücksichtigung nachgewiesen werden konnte, zeigt, dass im Gesamtsystem über den geführten Nachweis hinaus Tragreserven vorhanden sind – was der oben genannte Belastungsversuch eindrucksvoll bestätigt hat. Ergänzend zu den hier vorgestellten Berechnungen wurde die Bogentragwirkung von Betondecken mithilfe nichtlinearer numerischer Verfahren in drei Masterarbeiten untersucht, die unter Mitbetreuung des Artikelauteurs an der Technischen Universität München entstanden sind [9], [10], [11]. Wenngleich diese Arbeiten keine vorgeschädigten Deckensysteme behandeln, bestätigen sie, dass der bogenförmige Kraftfluss – bei ausreichend steifen Widerlagern – die rechnerische Traglast gegenüber dem konventionellen Biegeträgermodell deutlich steigert. Zugleich zeigen sie, dass die Betrachtung nach dem Bogenmodell, verglichen mit numerischen Simulationen, ausreichend konservativ und somit sicher ist. Eine der Masterarbeiten beschäftigte sich konkret mit den hier untersuchten Leichtbetonrippendecken und ermittelte für die ungeschädigten Rippen mittels Finite-Elemente-Modellierung sogar eine theoretische Traglast, die oberhalb der im Belastungsversuch aufgebrauchten Werte liegt [9].

5 Bauwerksuntersuchung

Nach dem rechnerischen Nachweis der grundsätzlichen Tragfähigkeit wurden alle Schäden an den Rippen untersucht und kartiert, um jene zu identifizieren, in denen aufgrund des Schadensbilds kein Standsicherheitsnachweis möglich war. Dafür kam ein visuelles Inspektionsverfahren mit Weitwinkelkamera (Marke: GoPro) zum Einsatz, mit je zwei Sondierungsöffnungen pro Rippenzwischenraum (Abbildung 9). Diese 100-mm-Öffnungen in der Putzdecke erlaubten eine Inspektion der Rippenflanken und der Unterseite des Deckenspiegels. Zugleich ermöglichte es dieser Durchmesser, einen Meterstab in den Hohlraum einzulegen und entlang der Rippen auszurichten (Abbildung 10). So wurden Lage und Ausdehnung jedes sichtbaren Rissbilds exakt kartiert. Diese Genauigkeit hätten klassische Endoskopiemethoden über kleinere Bohröffnungen (z. B. 20 mm) nicht erreicht.



Abb. 9
Deckenuntersuchung im Saalbau des Deutschen Museums mittels Kernbohrungen durch KB+BM (Gapp GmbH, München)



Abb. 10
Rippenzwischenraum: oben ein Ausbruch im Deckenspiegel, hinten links eine durchlaufende Schalfuge und Risse

Rund 300 Sondieröffnungen erlaubten die Erfassung von etwa 390 m² Deckenfläche mit ca. 1.000 m Rippenflanken. Jede Rippenansichtsfläche und jedes Deckenfeld wurde grafisch dokumentiert, wobei alle Risse maßstabsgerecht eingetragen und den definierten Schadenskategorien zugeordnet wurden (Abbildungen 11 und 12). Dies ermöglichte die Festlegung und Verortung der nötigen Instandsetzungsmaßnahmen.

6 Instandsetzung

Nachdem der Instandsetzungsbedarf ermittelt war, folgte die Planung und Ausführung der entsprechenden Maßnahmen. Zunächst wurde – analog zum Vorgehen fünf Jahre zuvor – der Deckenspiegel in den zusätzlich zu nutzenden Bereichen durch aufliegende Stahlplatten entlastet, die von Rippe zu Rippe spannten. Hierzu verlegte man oberseitig Elastomerstreifen in Achse der Rippen auf dem Fußboden und platzierte dann Stahlplatten darauf. So wirkten die Verkehrslasten nicht auf den unbewehrten und geschädigten Deckenspiegel ein. Kritische Risse im Deckenspiegel wurden zusätzlich von unten mit Zementleim injiziert; lose Betonteile wurden vorab entfernt.

Bei Rissen der Kategorie (d) wurden die Rippen an 42 Stellen durch außen liegende Klammerverbindungen verstärkt (Abbildung 13). Dafür befestigte man oben und unten an der Rippe je eine Stahlplatte und verband diese über Gewindestangen. Die Risse wurden zudem kraftschlüssig mit Zementleim verfüllt. Durch diese Maßnahmen konnte sich wieder ein stabiler Druckbogen bis zum Riss ausbilden (blau): Die

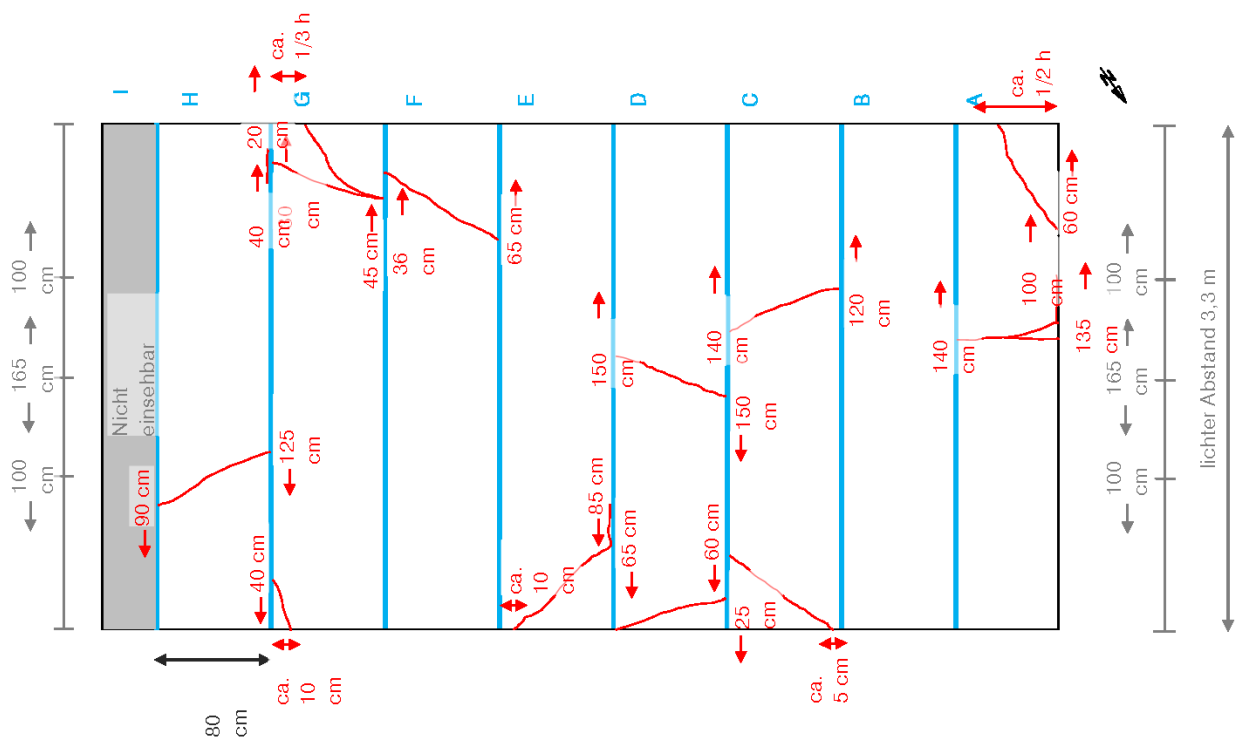


Abb. 11 Schematische Schadenskartierung des Deckenspiegels, mit Maßangabe der Risslage

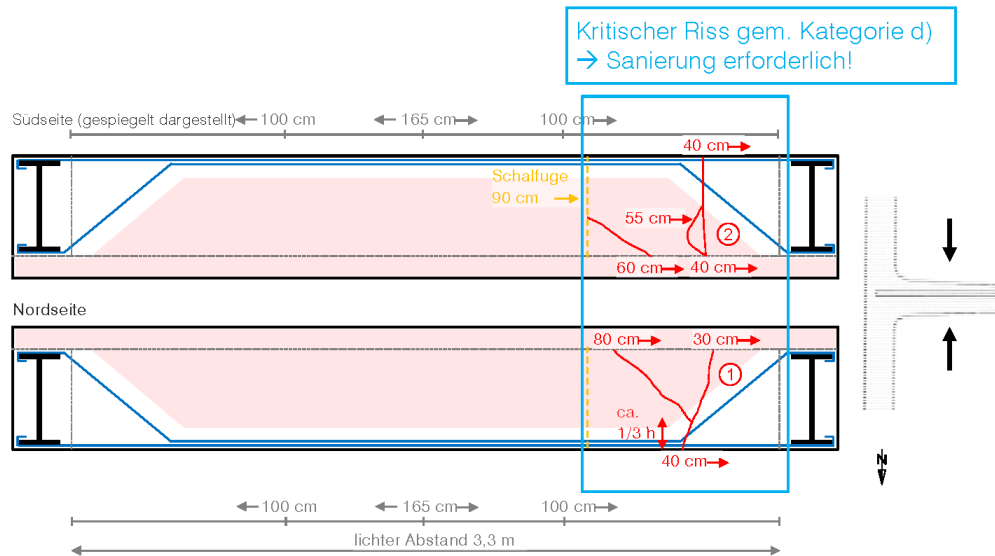


Foto Riss Nordseite



Foto Riss Südseite

Abb. 12 Ausschnitt aus der schematischen Schadenskartierung der Rippen (oben). Um die beiden Ansichtsflächen der Rippe in der gleichen Ausrichtung darzustellen, ist die Südseite auf dem Kopf abgebildet (unten).

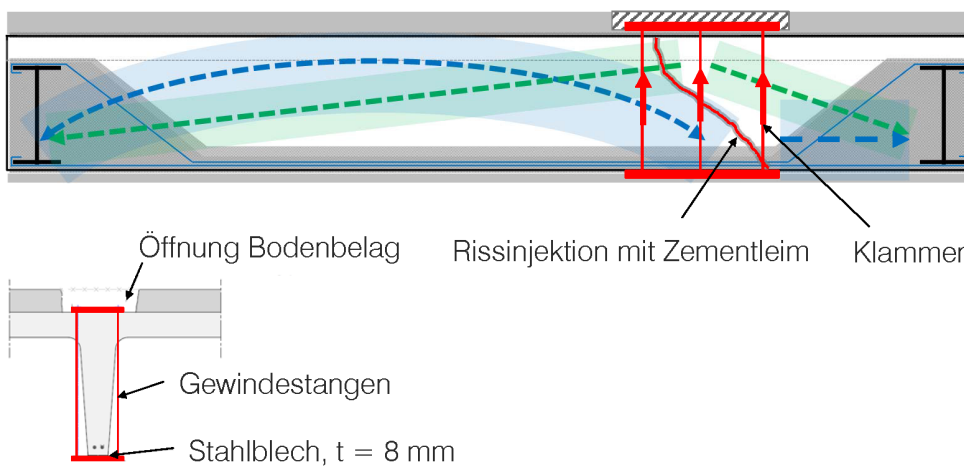


Abb. 13 Instandsetzung der Risse der Kategorie (d) mit Darstellung der sich einstellenden Druckkräfte in der Rippe: kurzer Bogen bis zur Reparaturstelle (blau) und Sprengwerk von Auflager zu Auflager (grün)

untere Platte dient als Auflager für die Vertikalkomponente der Bogendruckkraft, während die obere Platte diese Kräfte über die Zugwirkung der Gewindestangen (rote Pfeile) auf das gegenüberliegende Rissufer überträgt. Die dort entstehenden Auflagerkräfte werden über ein sich in der Rippe ausbildendes Sprengwerk (grün) in beide Auflager eingeleitet.

Die Klammerverbindungen erforderten Öffnungen (jeweils ca. 1×1 m) in der Putzdecke. Dafür wurde die Schadensstelle exakt eingemessen und die Position der Verklammerung auf die Oberseite übertragen, wo der Restaurator in Abstimmung mit der Denkmalpflege die betreffenden historischen Bodenfliesen vorsichtig ausbaute (Abbildung 14). Nach dem Einbau der oberen Bleche setzte er die Fliesen originalgetreu wieder ein.

Die Verankerung der bauzeitlichen Bewehrung reichte rechnerisch nicht aus, um den horizontalen Bogenschub der Endfelder vollständig aufzunehmen. Die Aufnahme und Ableitung der verbleibenden Horizontalkraft erforderte ausreichend steife angrenzende Bauteile. Wo diese fehlten, wurden zusätzliche Zuganker eingebaut.

Freiliegende Bewehrungsseisen an den unterseitigen Deckenöffnungen wurden mit M2-Reparaturmörtel wieder mit ausreichend Betondeckung versehen. Dies erfolgte nur in Bereichen, die ohnehin für andere Reparaturen geöffnet worden waren, da keine Anforderungen an den Feuerwiderstand bestanden und es sich um einen trockenen Innenraum handelte.



Abb. 14

Ertüchtigungsmaßnahme für Risse der Kategorie (d); Draufsicht Deckenoberseite mit ausgebauten Fliesen

Die Summe aller unterseitigen Deckenöffnungen betrug etwa 80 m². Nach Abschluss der statischen Maßnahmen wurden die Öffnungen wieder verschlossen und oberflächenbündig verputzt (Abbildung 15). Damit blieben rund 80 % der historischen Unterdeckfläche komplett erhalten. Die ursprüngliche Ansicht der Deckenuntersicht ist unverändert und auch die Stuckelemente sind bewahrt.

7 Schlussbetrachtung

Die Konstruktion der historischen Leichtbetonrippendecken im Kongressaal des Deutschen Museums in München entzieht sich klassischen Nachweisverfahren: keine Schubbewehrung, geringe Betonfestigkeit und teils deutliche Schäden. Ziel der Untersuchung war die Entwicklung eines Instandsetzungskonzepts, das sowohl die Anforderungen des Bauordnungsrechts erfüllt als auch die historische Substanz schützt. Grundlage bildete ein statischer Nachweis auf Basis eines bogenförmigen Druckmodells, ergänzt durch eine systematische Kartierung der Schadensbilder. Dies erlaubte eine präzise Differenzierung der statischen Relevanz einzelner Risse und eine Beschränkung der Instandsetzungsmaßnahmen auf kritische Bereiche. Zur Dokumentation wurden durch ca. 300 Sondierungsöffnungen rund 390 m² Deckenfläche visuell untersucht. Die Ertüchtigung kritisch geschädigter Rippen erfolgte über außen liegende Klammerverbindungen, kombiniert mit Rissinjektionen und Ankern in ausgewählten Endfeldern. Der unbewehrte Deckenspiegel wurde mit auf dem Boden aufgelegten, von Rippe zu Rippe spannenden Stahlplatten entlastet.

Die Maßnahmen betrafen lediglich etwa 20 % der historischen Putzdecke, deren Stuckelemente vollständig erhalten blieben. Ergänzende numerische Simulationen bestätigen die Tragfähigkeit des gewählten Bogenmodells. Das Projekt zeigt exemplarisch, wie sich auch scheinbar rechnerisch defizitäre Tragwerke mit ingenieurtechnischem Feingefühl sowie denkmalpflegerischer Sorgfalt instand setzen und erhalten lassen.

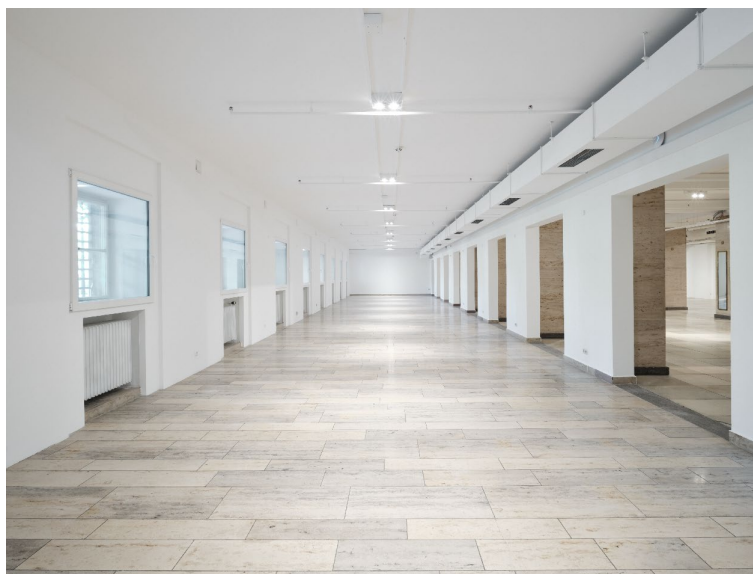


Abb. 15
Untersicht einer der beiden Leichtbetonrippendecken nach der Instandsetzung (Deutsches Museum, München)

Literaturverzeichnis

- [1] Deutsches Museum: „Das Ensemble auf der Museumsinsel“. URL: <https://www.deutsches-museum.de/museum/geschichte/das-ensemble-auf-der-museumsinsel>, abgerufen am 02.07.2025.
- [2] Chevalley, Denis A. / Weski, Timm: *Denkmäler in Bayern. Landeshauptstadt München – Südwest: Ensembles – Baudenkmäler – Archäologische Denkmäler*. Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege (Hrsg.). München: Edition Lipp, 2004.
- [3] Ingenieurbüro Schiessl Gehlen Sodeikat GmbH: *Gutachterliche Stellungnahme; Baustoffuntersuchungen Bibliotheks- und Saalbau Deutsches Museum*. Unveröffentlichtes Gutachten. München 2015.
- [4] Mayr, Otto: *Wiederaufbau: Das Deutsche Museum 1945–1970*. München: Deutsches Museum, 2003.
- [5] Deutsches Museum: „Vom Kongresssaal zum Forum der Zukunft“. URL: <https://www.deutsches-museum.de/museum/presse/wer-wir-sind/das-forum-der-zukunft>, abgerufen am 02.07.2025.
- [6] Henke Rapolder Frühe – Ingenieurgesellschaft mbH: *Deutsches Museum München: Bibliotheks- und Saalbau – Erläuterungsbericht Tragwerk – Hier: Saalbau*. Unveröffentlichtes Gutachten. München 2016.
- [7] Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN): *DIN EN 206:2021-06: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*. Berlin: Beuth Verlag, 2021.
- [8] Keuser, Manfred: *Versuchsbericht – Belastungsversuche an Rippendecken im Deutschen Museum in München*. Unveröffentlichtes Gutachten. Neubiberg: Universität der Bundeswehr München, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, 2015.
- [9] Dorn, Sebastian: *Numerische Untersuchungen zur Gewölbetragswirkung am Beispiel einer Rippendecke im Saalbau des Deutschen Museums*. Masterarbeit, Bauingenieurwesen. München: Technische Universität München, 2021.
- [10] Hauck, Patrick: *Vergleich verschiedener Nachweiskonzepte und numerische Untersuchungen von Eisenbetondecken*. Masterarbeit, Bauingenieurwesen. München: Technische Universität München, 2021.
- [11] Philipper, Christoph: *Parametrische numerische Untersuchungen zur Gewölbetragswirkung in Deckenplatten*. Masterarbeit, Bauingenieurwesen. München: Technische Universität München, 2023.
- [12] Holzer, Stefan M.: *Statische Beurteilung historischer Tragwerke, Band 1: Mauerwerkskonstruktionen*. Berlin: Ernst & Sohn, 2013.
- [13] Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN): *DIN EN 1992-1-1:2011-01, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010*. Berlin: Beuth Verlag, 2011.
- [14] Heyman, Jacques: *The Stone Skeleton. Structural Engineering of Masonry Architecture*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995, S. 11.

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1 Deutsches Museum Archiv, München, November 1929
- Abb. 2 Bulgarische Staatsagentur für Archive, Fonds 237K „Nikola Zhekov“, Inventar 1, Archivalieneinheit 351, Blatt 128, 1930er-Jahre. Die Abbildung ist gemeinfrei. Digitalisat bereitgestellt von der Bulgarian Archives State Agency im Rahmen eines Kooperationsprojekts mit Wikimedia Commons.
- Abb. 3 Plangrundlage von Dipl.-Ing. Ernst Treitl – Ingenieurbüro, München, November 1990
- Abb. 5 Deutsches Museum, München, vermutlich 2016
- Abb. 9 Gapp GmbH – Projektsteuerung & Architektur, München, 2022
- Abb. 15 Deutsches Museum, München, 2022

Alle weiteren Abbildungen stammen von Kayser + Böttges | Barthel + Maus: Ingenieure und Architekten, München.

Gabriele Patitz und Markus Hübner

BAURADAR UND ULTRASCHALL

Minimalinvasive Methoden der Strukturerkundung

DOI: 10.60628/9783738810493-185

Bauwerksaufnahme bedeutet nicht nur, Informationen an der Oberfläche zu erfassen, sondern auch, den Zustand im Inneren zu erkunden, zu verstehen und zu bewerten. Als zerstörungsarme Hilfsmittel haben sich in den letzten 30 Jahren insbesondere Bauradar und Ultraschall bewährt, sowohl einzeln als auch in Kombination. In der interdisziplinären Zusammenarbeit mit erfahrenen Fachpersonen aus Geophysik und Bauingenieurwesen helfen diese geophysikalischen Methoden, zahlreiche Fragestellungen zur Bausubstanz zu beantworten – bei minimalem physischem Eingriff. Die beiden Verfahren eignen sich zur Erkundung von Natursteinmauerwerk ebenso wie von Beton- und Stahlbetonbauten. So ermöglichen sie die Untersuchung diverser Objekte: von Stützmauern, Geschosswänden oder Gewölben über Kunstgegenstände bis hin zu im Boden verborgenen Strukturen. Darüber hinaus unterstützen sie die Beurteilung der Ausführungsqualität von Bauwerkssanierungen, etwa von Injektionsmaßnahmen.

1 Zerstörungsarmes Erkunden

Die Kombination zerstörungsfreier geophysikalischer Untersuchungsverfahren mit minimalinvasiven Eingriffen hat sich als effektive Analysemethode etabliert. Sie ermöglicht es, Bausubstanz zu erforschen und zu verstehen, dabei aber nur geringfügig oder gar nicht physisch einzugreifen. Dieses Vorgehen trägt zugleich dem wachsenden Stellenwert der Ressourcenschonung Rechnung. Zerstörungsarme Untersuchungen unterstützen sowohl die Qualitätskontrolle im Neubau als auch die Analyse von Bestandsbauten – und leisten damit einen Beitrag zum denkmalpflegerischen Bewahren und Erhalten. Zwei wichtige geophysikalische Methoden dafür sind Bauradar und Ultraschall, die inzwischen sogar, entsprechende Erfahrung vorausgesetzt, eine zerstörungsfreie Bestandsanalyse erlauben können. Das Bauradar eignet sich vor allem zur Erkundung der inneren Struktur von Bauteilen, während Ultraschall bei der Beurteilung von Verwitterungsprozessen hilfreich ist. Besonders ihr kombinierter Einsatz vermittelt daher einen umfassenden ersten Eindruck der Bausubstanz.

2 Bauradar zur Untersuchung innerer Bauwerksstrukturen

Ein wichtiges geophysikalisches Verfahren für die zerstörungsarme Bauwerkserkundung ist das Bauradar. Im Folgenden werden die Funktionsweise und der Ablauf der Untersuchungen erläutert, ebenso wie deren Grenzen. Abschließend veranschaulicht die Erkundung einer Stützmauer den praktischen Nutzen der Methode.

2.1 Funktionsweise

Bauradarsensoren erzeugen elektromagnetische Wellen, die in das Untersuchungsobjekt eindringen und deren Reflexionen aus dem Inneren dann erfasst werden. Die Art und Stärke der Reflexionen hängt zum einen von dem Radarsensor selbst ab: Seine Sendefrequenz beeinflusst maßgeblich die Eindringtiefe und Detailauflösung. Zum anderen hängen die Reflexionen von dem jeweiligen Objekt ab. Sie eröffnen somit Rückschlüsse auf die Beschaffenheit eines Bauteils – seine Abmessungen und seinen konstruktiven Aufbau. Die Untersuchungen ermöglichen es, Hohlräume im Objekt zu erkennen (Lage, Anzahl, Größe) oder eingebaute Metalle (z.B. Stahlträger, Bewehrungseisen, Dollen, Steinklammern). Entsprechende Stellen zeigen sich in den Radardaten durch typische Reflexionsmuster. Neben dieser Zustandsbeurteilung von Bauteilen helfen Radaruntersuchungen, den Erfolg von Bauteilsanierungen (auch „Bauteilvergütungen“ genannt) mittels Injektion mineralischer Bindemittel zu bewerten. Hierfür untersucht man das Objekt je einmal vor und nach den ausgeführten Injektionen und vergleicht anschließend die Radardatensätze.

Radarbasierte Erkundungen können an verschiedenen Materialien und Objekten durchgeführt werden. Geeignete Materialien sind Natursteinmauerwerk sowie Beton und Stahlbeton, in Einzelfällen auch Holz. Auf diese Weise lässt sich eine Vielzahl an Objekten erforschen, von Wänden und Decken über Brückenbögen und Pfeiler bis hin zu skulpturalen Bauteilen und Kunstobjekten. Ebenso kann das Radar im Boden verborgene Strukturen entdecken, ob Kanäle, Leitungen oder Gräber.

Je nach Tiefe und Material des studierten Bauteils kommen verschiedene Sensoren zum Einsatz. Höhere Frequenzen bieten eine höhere Detailauflösung, dringen aber nicht so tief in das Objekt ein. Generell verwendet man deshalb 2- oder 1,5-GHz-Sensoren für bis zu ca. 50 cm Bauteiltiefe (oberflächennahe Erkundung), 900- oder 400-MHz-Sensoren für ca. 50 bis 100 cm Bauteiltiefe und 150-MHz-Sensoren für mehr als ca. 100 cm Bauteiltiefe (Tiefenerkundung). Tabelle 1 bietet einen Überblick der häufigen Untersuchungsziele und der jeweils passenden Sensoren.

2.2 Ablauf


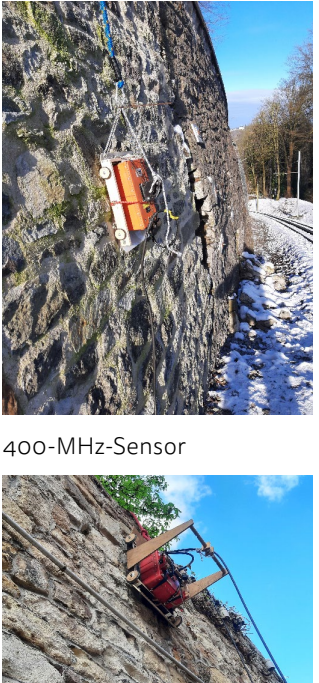

Bei Radaruntersuchungen wird der Sensor von Hand an der Objektoberfläche entlanggeführt. Je nach Fragestellung kann es sinnvoll sein, mit mehreren Sensoren unterschiedlicher Eindringtiefe zu arbeiten. Aussagekräftige Radarergebnisse hängen von verschiedenen Faktoren ab:

- eine gut erreichbare und bewuchs- sowie verkleidungsfreie Objektoberfläche;
- eine ausreichend große Messfläche, die für das Objekt und die Fragestellung repräsentativ ist;
- ein für die zu erreichende Bauteiltiefe passender Sensor;
- ein objektbezogenes Untersuchungs raster;
- vergleichende Messungen an ungeschädigten/unauffälligen und geschädigten/auffälligen Stellen.

Die Messgeschwindigkeit hängt sowohl von der Leistungsfähigkeit der Hilfsmittel als auch von der Zugänglichkeit des Untersuchungsobjekts ab. Falls es nicht direkt zugänglich ist, helfen Leitern, Gerüste, Hebebühnen oder Abseilkonstruktionen. Besonders praktisch sind Hebebühnen, die ein Objekt ohne Unterbrechung von oben nach unten abfahren, etwa bei Gebäuden von der Traufe bis zum Boden.

Auf welche Weise die Radaruntersuchungen auch ausgeführt werden: Ihr großer Vorteil liegt darin, dass die Anzahl und Größe kalibrierender und damit zerstörender Bauteilöffnungen auf gezielt festgelegte Stellen reduziert werden kann – oder dass Öffnungen im besten Fall obsolet werden. Gleichzeitig ermöglicht das Radar eine Analyse großer Flächen in sehr kurzer Zeit. Kalibrierungsöffnungen können sich auch durch die Nutzung bereits vorhandener Öffnungen im Bauteil erübrigen, durch Vergleichsmessungen an ausreichend bekannten Bauteilen oder durch ergänzende

Tab. 1 Typische Erkenntnisziele radarbasierter Untersuchungen und jeweils geeignete Sensoren

Bauteiltiefe	Bauradar: Typische Untersuchungsziele	Geeignete Sensoren
Bis ca. 50 cm	Ortung von Metallen (z. B. Bewehrungs-eisen, Dollen, Steinklammern, Ring-anker, Stahlträger)	2-GHz-Sensor
	Erfassung von Gefügestörungen (z. B. Schalenablösungen) und strukturellen Veränderungen in Naturstein	
	Ortung von Hohlräumen (z. B. Kanäle, Schächte)	
	Erkundung der Einbindetiefe von Mauersteinen und ihrer Verzahnung mit dem Mauerkern	
	Erkundung von Geschossdecken (z. B. Abmessungen, Konstruktionsart)	
Ca. 50–100 cm	Bestimmung des Aufbaus und der Dicke von Bauteilen, v. a. von Natursteinmauerwerk	900-MHz-Sensor
	Erkundung des Mauerwerksaufbaus	
	Bestimmung der Dicken der Mauer-schalen	
	Ortung von Hohlräumen im Mauerwerk	
	Ortung von Ablösungen der vorderen Mauerschale vom Mauerkern	
Mehr als ca. 100 cm	Ermittlung von Stützmauerdicken	150-MHz-Sensor
	Ortung von Grabstellen	
	Weitere archäologische Erkundungen	

Informationen aus anderen Fachdisziplinen. Alternativ bzw. ergänzend können für die Kalibrierungen wenige kleine Öffnungen oder Bohrungen durchgeführt werden, kombiniert mit einer Endoskopie. Falls die Objektoberfläche eine wertvolle Ausstattung besitzt, sollte man sie zudem mit Vlies schützen, was die Untersuchungen jedoch allgemein nicht beeinträchtigt.

Die Radardaten werden vor Ort mittels Tablet oder Laptop erfasst, kontrolliert, bewertet und gespeichert. Ihre Aufbereitung, Interpretation und Dokumentation erfolgt anschließend im Büro mithilfe spezieller Software. Bei der lagegenauen Zuordnung von Radarergebnissen helfen dabei aktuelle Ansichtspläne der Messflächen oder Orthofotos mit der Angabe von Verformungen, z. B. Ausbeulungen. Die Bewertung und Interpretation der Messwerte erfolgt interdisziplinär in enger Zusammenarbeit mit erfahrenen Fachpersonen aus der Geophysik und dem Bauingenieurwesen.

2.3 Grenzen

Bauradaruntersuchungen sind jedoch auch gewisse Grenzen gesetzt. Die Reichweite der Sensoren stellt in der Regel kein Problem dar, da sie die im Bauwesen typischerweise erforderlichen Messtiefen meist erreichen. Einschränkungen ergeben sich aber bei Objekten mit hohem Salz- oder Feuchtigkeitsgehalt und bei der Ortung von Metallen. Zunächst einmal absorbieren Salz und Feuchtigkeit im Objekt einen Teil der eindringenden elektromagnetischen Wellen. Je höher die Salz- und Feuchtigkeitskonzentration, desto stärker die Absorption. Im Flächenvergleich erscheinen die belasteten Zonen auffällig anders als benachbarte, weniger belastete Bereiche und lassen sich dadurch erkennen sowie kartieren. Das wiederum vertieft das Verständnis der bauphysikalischen Zusammenhänge des Objekts und hilft gegebenenfalls auch bei seiner Sanierung. Die genaue Art und Konzentration von Salz oder Feuchtigkeit lassen sich allerdings nicht per Radar ermitteln; hierfür sind üblicherweise kleine Materialproben nötig. Eine weitere Einschränkung von Radaruntersuchungen besteht in der Detektion von Metallen: Die Analysen können keine Aussagen zu den geometrischen Abmessungen und Korrosionszuständen der Metalle liefern. Außerdem verschatten sich hintereinander und sehr eng liegende Metalle gegenseitig.

2.4 Praxisbeispiel: Erkundung einer Stützmauer

Die theoretische Erläuterung des Bauradars lässt sich durch ein Beispiel veranschaulichen: die Untersuchung einer Stützmauer parallel zur Gleisanlage der Drachenfelsbahn in Königswinter, Nordrhein-Westfalen, im Jahr 2025. Bei der Mauer handelt es sich um unverputztes Bruchsteinmauerwerk aus lokalem Gestein. Offene Mauerstellen und breite Risse lassen erkennen, dass die Steine der vorderen Wandschale sehr unterschiedliche Abmessungen haben und bis maximal ca. 35 cm in die Innenfüllung einbinden. Hinter der vorderen Mauerschale zeigt sich lokal ein mehr oder weniger lockerer und klüftiger Verbund aus Steinen, Mörtel, Erdreich und Wurzelresten. Zum

Schutz der Bahnstrecke vor herausfallendem Material wurden größere Wandbereiche bereits mit Stahlnetzen versehen.

Für eine konstruktive Einschätzung der Stützmauer und die Planung ihrer abschnittsweisen Instandsetzung sollten Hohlräume, Schalenablösungen und Wanddicken erkundet werden. Es folgte eine weitgehend flächendeckende Messung mithilfe eines 900-MHz-Bauradarsensors, unterstützt durch eine Abseilkonstruktion. Aus den aufgezeichneten vertikalen Radarprofilen wurden anschließend Zeitscheiben (Ergebnisdarstellung als Tiefenhorizont) berechnet. Hierbei werden die Reflexionsstärken über die Messfläche hinweg visualisiert. Sie sind in den berechneten Tiefenhorizonten wie folgt farbcodiert wiedergegeben (Abbildung 1):

- dunkelblau: kaum reflektive Bereiche mit homogenem, kompaktem Mauerwerk;
- dunkelblau/schwarz: gering reflektive Bereiche mit erhöhtem Salz-/Feuchtegehalt;
- grün, gelb, orange, rot: stark reflektive Bereiche mit Hohlstellen.

Für die Interpretation der Radardaten der Stützmauer wurden folgende Informationen herangezogen:

- augenscheinlicher Mauerzustand;
- erkennbare bzw. auskartierte Ausbeulungen;
- Position der Stahlnetze;
- Informationen aus den vier zuvor durchgeführten Kernbohrungen;
- Informationen zum Maueraufbau an der bereits ausgeführten Musterachse zur Instandsetzung.

Die Interpretation der Messdaten erfolgt ebenfalls farbcodiert in den Orthofotos und Ansichtsplänen (Abbildungen 2 bis 4).

Die Radaruntersuchung in Königswinter umfasste die gesamte Stützmauer. Exemplarisch werden hier die Daten eines etwa 15 m langen Abschnitts davon dargestellt. Die Radarreflexionen wurden sowohl für die vordere Mauerschale (Abbildung 3) als auch für die hintere (Abbildung 4) ausgewertet. Beide Abbildungen zeigen jeweils oben die

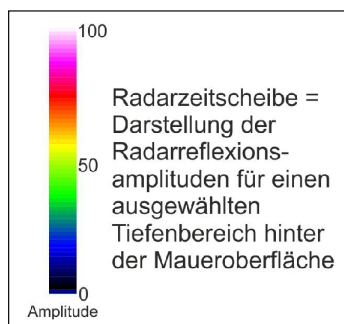


Abb. 1 Farblegende der Reflexionsstärken

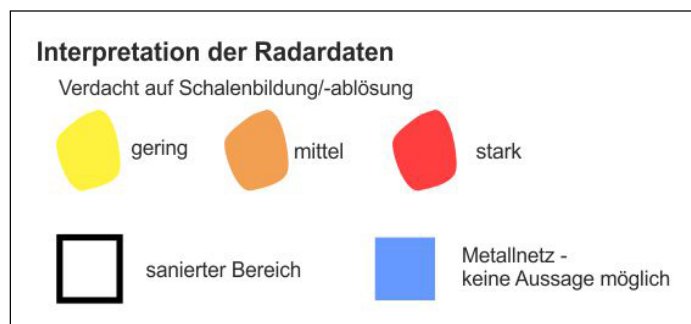
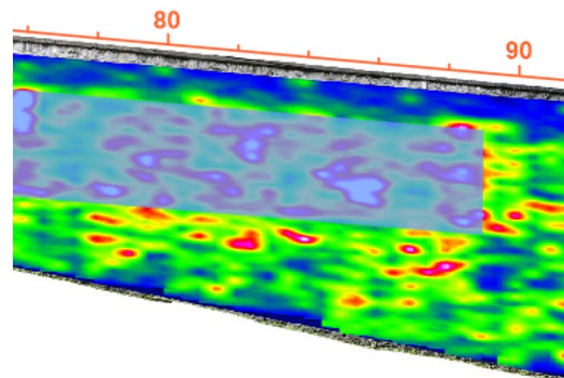
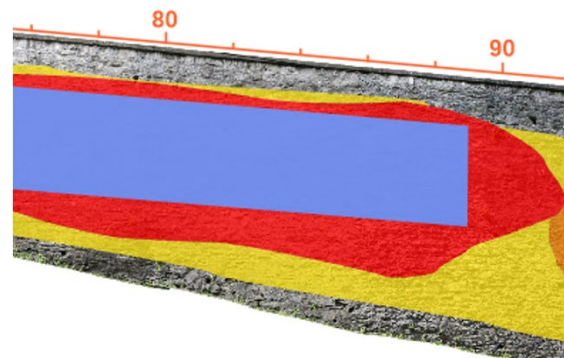


Abb. 2 Objektbezogene Farblegende zur Interpretation der Radardaten



Radarergebnisse im Bereich vordere Mauerschale bis ca. 35 cm

Außer im Brüstungsbereich stark bis sehr stark erhöhte Reflexionen im Wandabschnitt von $x = \text{ca. } 76 \text{ m}$ bis $\text{ca. } 92 \text{ m}$

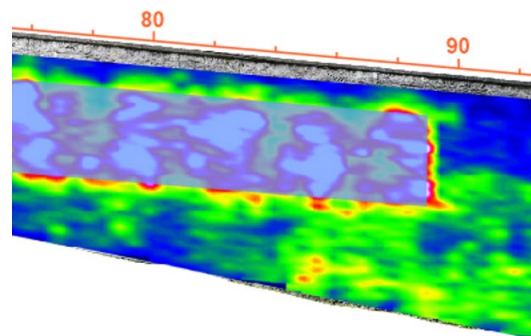


Interpretation:

Rot: Bereiche mit sehr hohem Verdacht auf vollflächige Hohllagen der gesamten vorderen Mauerschale

Gelb: Bereich mit lokalen Hohllagen, vermutlich ist die Ausbauchung im unteren Wandbereich noch lokal mit der Hinterfüllung verbunden.

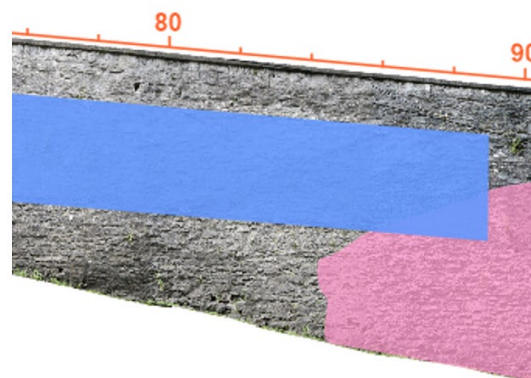
Abb. 3 Ergebnisse der Radaruntersuchung der Stützmauer (Ausschnitt); oben die farbcodierte Darstellung der Reflexionsstärken der elektromagnetischen Wellen bis ca. 35 cm Tiefe; unten die farbcodierte Interpretation davon



Radarergebnisse bis ca. 100 cm hinter die Mauerschale

stark erhöhte Reflexionen von $x = \text{ca. } 76 \text{ m}$ bis $\text{ca. } 92 \text{ m}$

kaum reflektiv ist der obere Wandbereich ab $x = \text{ca. } 89 \text{ m}$



Interpretation:

Der stark reflektive Wandbereich von $x = \text{ca. } 84 \text{ m}$ bis $\text{ca. } 92 \text{ m}$ ist umrissen. Hier besteht ein erhöhter Verdacht auf eine aufgelockerte und hohlraumreiche Hinterfüllung und/oder einen klüftigen Felshorizont.

Kalibrierungen über Bohrungen möglich oder während der Baumaßnahme.

Abb. 4 Ergebnisse der Radaruntersuchung der Stützmauer (Ausschnitt); oben die farbcodierte Darstellung der Reflexionsstärken der elektromagnetischen Wellen bis ca. 100 cm Tiefe; unten die farbcodierte Interpretation davon

farbcodierte Darstellung der Reflexionsstärken der Mauer und unten die farbcodierte Interpretation hiervon (Ergebnisplan). Wie in den Abbildungen 1 und 2 beschrieben, stehen rote Flächen für Verdachtsbereiche mit sehr hohlraumreichem Mauerwerk bzw. für Hohllagen und Schalenbildungen, während gelbe Flächen auf kleinere zusammenhängende Hohlstellen hindeuten, z. B. offene rückwärtige Mörtelfugen. Das blaue Rechteck in der Mitte symbolisiert das installierte Sicherungsnetz.

Abbildung 3 illustriert die Untersuchung der vorderen Mauerschale (Tiefenbereich von ca. 15 bis 35 cm). Die Analyse ergab, dass der stark geschädigte Wandabschnitt (rot) nicht mehr vollständig durch das Stahlnetz (blau) gesichert ist. Die restlichen Wandflächen (gelb) sind weniger stark gestört, aber nicht unauffällig.

Abbildung 4 zeigt die Radardaten und ihre Interpretation für die hintere Mauerschale (ca. 50 bis 100 cm Tiefe). Im Ergebnisplan ist ein auffallend stark reflektiver Bereich von $x = 84$ bis 92 m rosafarben schattiert. Hier besteht ein erhöhter Verdacht auf eine aufgelockerte und hohlraumreiche Hinterfüllung und/oder einen klüftigen Felshorizont.

Die Radaruntersuchungen der Stützmauer in Königswinter lieferten somit eine fundierte Zustandsbewertung. Gleichzeitig bieten die Ergebnispläne eine wertvolle Grundlage für Architekt:innen und Planer:innen, um Maßnahmen für die Wiederherstellung der Mauerstabilität zu entwickeln. Die Sanierung wird dabei abschnittsweise erfolgen.

3 **Ultraschall und Mikroseismik zur Beurteilung von Verwitterungen**

Wie das Bauradar ist auch der Ultraschall ein geophysikalisches Verfahren zur zerstörungsfreien Bauteilerkundung. Eine damit verwandte Methode ist die Mikroseismik, die eine größere Reichweite in die Bauteile erzielen kann. Die beiden Verfahren werden im Weiteren erläutert.






3.1 **Ultraschall**

Ultraschall basiert auf der Anregung und Ausbreitung mechanischer Wellen. Bei der einfachsten Messanordnung stehen sich die Sende- und die Empfangseinheit der Wellen direkt gegenüber; dazwischen befindet sich das durchschallte Untersuchungsobjekt. Um also Laufzeit und Amplitude der den Baukörper durchlaufenden Wellen zu messen, braucht man physischen Zugang zu zwei gegenüberliegenden Seiten des Objekts. Es handelt sich hierbei um punktuelle Einzelmessungen. Die Messpunktdichte (Anzahl und Abstand der Messpunkte) beeinflusst sowohl die räumliche Auflösung der Messwerte als auch den zeitlichen Aufwand der Erfassung. Eine zuverlässige Messung erfordert ein Ankopplungsmittel zwischen Sendeeinheit und Objekt und zwischen Objekt und Empfangseinheit.

Ultraschall dient meist zur Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Kompressionswellen, generell bei bekannter Geometrie des durchschallten Bauteils. Es besteht ein empirischer Zusammenhang zwischen Materialfestigkeit und Dichte einerseits und Wellengeschwindigkeit andererseits. Bereiche verringerter Wellengeschwindigkeit sind folglich ein Indiz für die fortgeschrittene Entfestigung des Materials. Sie weisen auf Verwitterungsschäden im Objekt hin, etwa Risse, Kiestester, Hohlstellen oder Schalenablösungen. Dies liegt daran, dass Luft die Wellenausbreitung beeinträchtigt: Die Wellen durchlaufen das Bauteil dann auf nicht eindeutig bestimmbar Weg. Das Empfangsmodul registriert die Wellen in solchen Fällen nur zeitverzögert oder gar nicht.

Ausgehend von einem repräsentativen Messbereich lassen sich vergleichend qualitative Aussagen zur Festigkeit treffen. Die Tiefenverläufe einzelner Risse können messtechnisch allerdings nur abgeschätzt werden. Eine quantitative Beurteilung der Festigkeit erfordert zusätzliche Materialprüfungen an objektbezogenen Probekörpern.

Tab. 2 Typische Erkenntnisziele von Ultraschall- und Mikroseismikuntersuchungen und jeweils geeignete Sensoren

Ultraschall und Mikroseismik: Typische Untersuchungsziele	Geeignete Sensoren	
Zentrums- und Sehnendurchschallung zur qualitativen Beurteilung des Verwitterungszustands, z. B. bei Säulen, Stützen und Skulpturen	Ultraschallsensoren	
		
Mikroseismische Durchschallung zur Ortung von Rissen und Schalenablösungen bei größeren Bauteilabmessungen	Impulshammer und Piezosensoren	
		
Erfassung von Bereichen unterschiedlicher Festigkeiten, z. B. bei Brückenpfeilern	Geophone	Hammerschlag
		

3.2 Mikroseismik

Die Reichweite des Ultraschalls ist auf ca. 50 bis 100 cm begrenzt, abhängig von der Natursteinart bzw. Betonqualität und den geometrischen Verhältnissen. Ein alternatives Verfahren ist die Mikroseismik, bei der die Signalanregung durch Hammer-schlag und der Signalempfang mittels Geophonen erfolgt. Wie der Ultraschall beruht die Mikroseismik auf der Anregung und Ausbreitung mechanischer Wellen, doch sie unterscheidet sich hinsichtlich der eingesetzten Energie, der Anregungsfrequenz und damit auch der Reichweite.

Ebenso wie beim Ultraschall werden bei der Mikroseismik vorrangig die Laufzeiten elastischer Wellen erfasst und die Wellengeschwindigkeiten berechnet, auf Grundlage des jeweiligen Untersuchungsrastrers. Dies erlaubt die Einschätzung des Zustands im Bauteilinneren, etwa die Ausdehnung von Schalenablösungen oder Rissen oder die Verwitterung von Natursteinen.

Die moderne Gerätetechnik für Ultraschall sowie Mikroseismik ist klein und handlich. Bereits vor Ort sind qualitative Aussagen möglich. Tabelle 2 gibt einen Überblick der üblichen Erkenntnisziele dieser Untersuchungen und der jeweils passenden Signalanregung und Sensoren.

4 Kombination von Bauradar und Ultraschall

Insbesondere bei Stützen, Säulen und skulpturalen Bauteilen sind Fragen nach der Homogenität der Objekte und Materialien zu beantworten. Die Kombination von Bauradar und Ultraschall bietet hier zwei zentrale Nutzen. Zum einen lassen sich Informationen zu baulichen Strukturen gewinnen, etwa der konstruktiven Ausführung, dem Bewehrungsgrad, Materialschichtungen, Abschalungen oder Kiesnestern. Zum anderen eröffnet die Methodenkombination auch Aussagen zu Veränderungen der Festigkeit, z. B. aufgrund gefügezerstörender Verwitterung.

Dies lässt sich anhand zweier Portalsäulen aus Schilfsandstein illustrieren. Aufgabe war es, den Zustand der Säulen zu erkunden und zu bewerten. Das ließ sich mittels Ultraschall und Bauradar in einer relativ einfachen Untersuchung durchführen. Der Einsatz beider Verfahren war nötig, da dies einerseits die Beurteilung der Verwitterung und Entfestigung des Natursteins ermöglichte und andererseits die Erfassung von Dollen und strukturellen Störungen im Inneren der Bauteile.

Die zwei Säulen wurden über die ganze Höhe und den kompletten Querschnitt flächendeckend tangential und radial mit Ultraschall untersucht (Abbildungen 5 und 6). Bei der Beantwortung der Frage nach Schalenablösungen, Gefügestörungen und metallischen Einbauteilen half ein hochfrequenter 2-GHz-Radarsensor. Damit wurden vertikale Radarprofile in einem so engen Profilabstand aufgenommen, dass von einer vollflächigen Erfassung des Säulenquerschnitts über die gesamte Bauhöhe ausgegangen werden konnte (Abbildung 7).



Abb. 5
Durchschallung
der Säulenschäfte



Abb. 6
Erfassung der Laufzeit
des Kompressions-
wellenimpulses

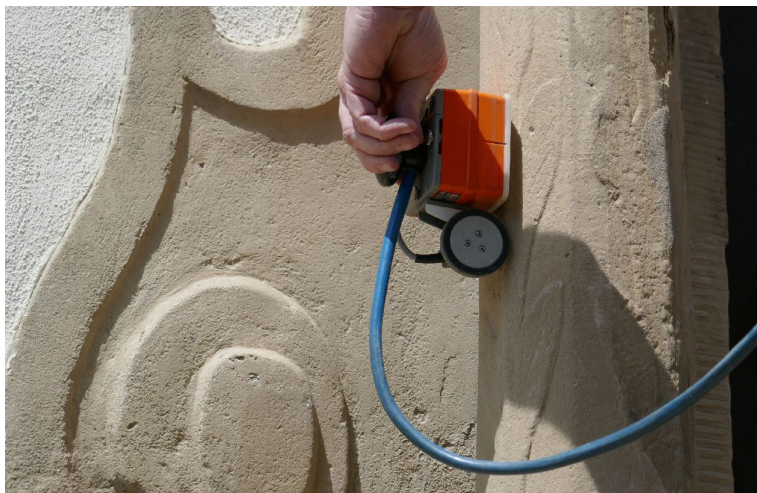


Abb. 7
Durchstrahlung der
Säulenschäfte mit einem
2-GHz-Radarsensor

Die Ergebnisse der Ultraschall- und Radardaten zu den beiden Portalsäulen sind in den Abbildungen 8 und 9 zusammengefasst. Die rote Farbcodierung steht für sehr geringe Ultraschallwellengeschwindigkeiten, die grüne für sehr hohe. Sehr niedrige Werte ergaben die Messungen in den oberflächennahen Bereichen der Säule 1 (ca. 1 bis 10 cm Tiefe) und in den – auch schon augenscheinlich sehr schadhaften – oberen und unteren Säulenabschnitten. Die geringen Wellengeschwindigkeiten deuten an, dass zusätzlich zu den vorhandenen Rissen und Schalenablösungen erheblich reduzierte Festigkeiten des Natursteins vorliegen. Die stark erhöhten Reflexionen in den Radardaten (rechtes Bild in Abbildung 8) geben Hinweise auf Dolln in der Schaftmitte, sowohl an der Basis als auch auf einer Höhe von ca. 80 cm. Deren Korrosion hat das Gefüge im Schilfsandstein aufgelockert.

Auf Basis der Untersuchungen ist der Zustand von Säule 1 als stark gestört und geschädigt zu bewerten. Die Messungen an Säule 2 ergaben über die ganze Schafthöhe hinweg hohe Wellengeschwindigkeiten (größer als 2.000 m/s). Hier ist der Schilfsandstein also deutlich geringer verwittert. In den Radardaten können auch die beiden Dolln erfasst werden. Angesichts der hohen Wellengeschwindigkeiten des Natursteins und kaum vorhandener struktureller Schäden sind die Dolln vermutlich erheblich weniger korrodiert.

Die minimal zu haltende Untersuchung erlaubte die Erfassung und Bewertung des Gesamtzustands je Säule und eine vergleichende Bewertung. Dies gelang dank der kombinierten Ultraschall- und Bauradaruntersuchung – ergänzt durch die visuelle Beurteilung der Situation, die vorhandenen Material- und Schadenskartierungen sowie bestehende Erfahrungswerte. Eine Kalibrierung an Materialproben, einhergehend mit zerstörenden Eingriffen, war nicht nötig.

5 Fazit aus 30 Jahren Praxiserfahrung

Bei der Erfassung, Bewertung und Interpretation eines Bauwerks oder Bauteils greifen zahlreiche Fachdisziplinen ineinander. Speziell bei der Substanzschonung und -erhaltung bietet dabei der Einsatz von Bauradar und Ultraschall eine wesentliche Unterstützung. Insbesondere vor (Um-)Bauprozessen erweisen sich diese zerstörungsarmen Verfahren als sehr sinnvoll, da sie Entwurfsplanungen, Machbarkeitsstudien und Nutzungskonzepte erleichtern. Dadurch lassen sich Bau- und Erhaltungsmaßnahmen kosten- und ressourcensparend zugleich realisieren. Zusätzlich ermöglichen Bauradar und Ultraschall eine effektive Kontrolle der Ausführung und Qualität entsprechender baulicher Maßnahmen.

Nach 30 Jahren Praxiserfahrung mit Bauradar und Ultraschall ziehen die Verfasser:innen dieses Beitrags vor allem eine Erkenntnis: Standardisierte Lösungen sind kaum einsetzbar und pauschale Ausschreibungen wie „1 × Radarmessung“ daher nicht zielführend. Der Einsatz der beiden Untersuchungsmethoden erfordert nicht nur eine professionelle Anwendung, sondern auch – insbesondere bei großen und

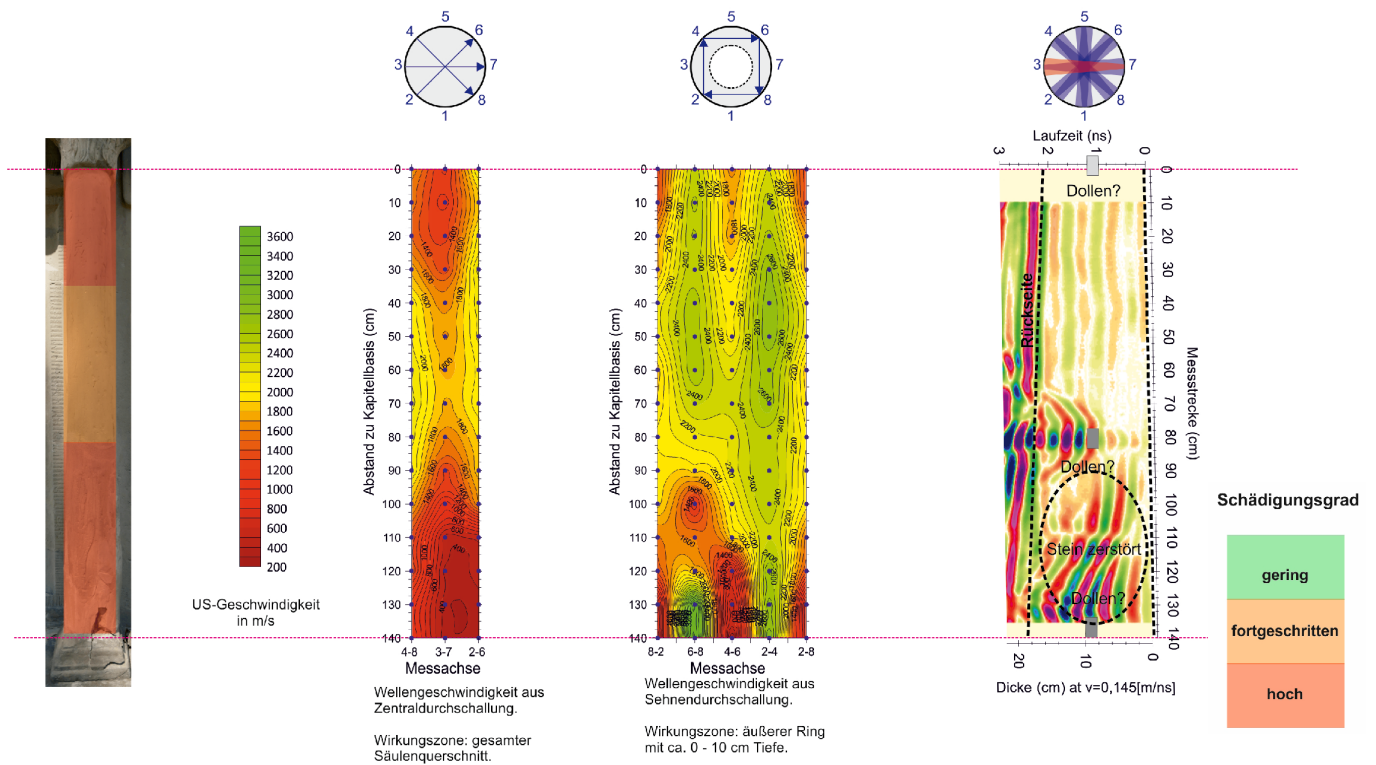


Abb. 8 Ultraschall- und Radarergebnisse von Säule 1 – Zustand: stark geschädigt

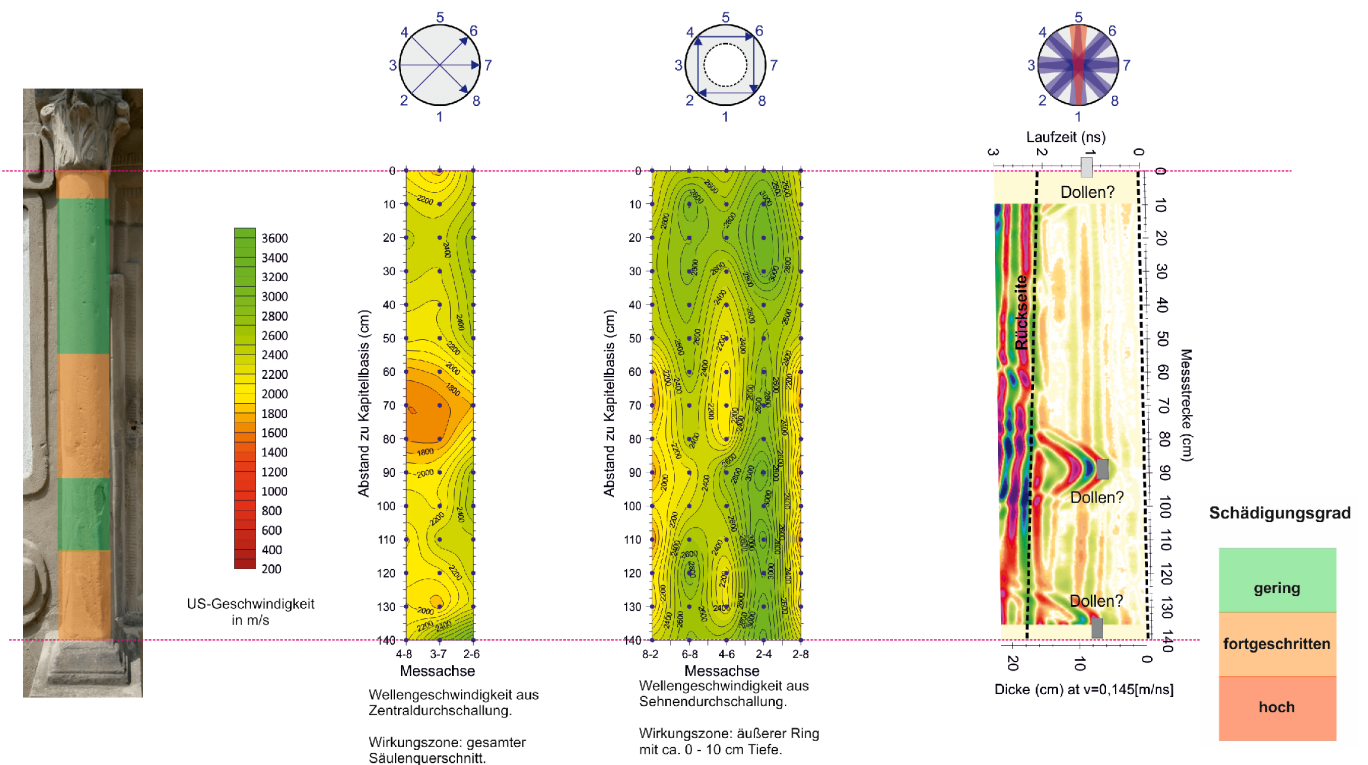


Abb. 9 Ultraschall- und Radarergebnisse von Säule 2 – Zustand: gering geschädigt

komplexen Projekten – eine hohe Individualität und beständige Flexibilität. Dies betrifft sowohl die Kombination der Verfahren als auch die Aufnahme, Verarbeitung, Bewertung und Dokumentation der gewonnenen Daten. Für jedes Objekt ist ein eigenes Untersuchungskonzept zu entwickeln, das die spezifischen Gegebenheiten und Fragestellungen berücksichtigt – und das nach Auswertung der ersten Datensätze und Ergebnisse gegebenenfalls optimiert wird. Gleichzeitig müssen die Fragestellungen und gewünschte Ergebnistiefen interdisziplinär mit allen Beteiligten abgestimmt und im Projektverlauf eventuell angepasst werden. Potenziale und Grenzen der Verfahren sind im Entscheidungsprozess ebenso wie bei der Ergebnisbewertung realistisch einzuschätzen und klar zu kommunizieren. Abschließend sind die erfassten Messdaten und Ergebnisse so aufzubereiten und zu dokumentieren, dass auch fachfremde Personen sie produktiv und verantwortungsvoll weiterverwenden können.

Literaturverzeichnis

- [1] Patitz, Gabriele: *Zerstörungsfreie Untersuchung an altem Mauerwerk: Radar, Ultraschall und Seismik in der Baupraxis*. Berlin: Beuth Verlag, 2009.
- [2] Gabriele Patitz: „Voruntersuchungen mit Radar und Mikroseismik am karolingischen Mauerwerk des Aachener Doms“. In: LVR-Amt für Denkmalpflege Rheinland (Hrsg.): *Die karolingische Pfalzkapelle in Aachen: Material, Bautechnik, Restaurierung* (Arbeitsheft 78 der rheinischen Denkmalpflege). Wernerscher Verlag, 2012, S. 281–296.
- [3] Seibel, Mark / Zöller, Matthias (Hrsg.): *Der Bausachverständige: Baurechtliche und -technische Themensammlung* (Arbeitshefte für Baujuristen und Sachverständige; Heft 7: *Bauteiluntersuchungen – Notwendigkeit und Grenzen*). Köln: Bundesanzeiger Verlag, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2016.
- [4] Patitz, Gabriele: „In unbekannte (Bauteil-)Tiefen schauen.“ In: *B+B Bauen im Bestand*, 7 (2016), S. 24–29.
- [5] Patitz, Gabriele: „Erkundung und Bewertung von Stützmauern mit Bauradar“. In: Gabriele Patitz und Christine H. Bauer (Hrsg.): *Sanierung historischer Stadtmauern: Planung – Ausführung – Wartung & Pflege*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2016, S. 49–56.
- [6] Patitz, Gabriele: „Bauradar zur Bestandsbewehrung am Laufenmühle-Viadukt“. In: *BAUSUBSTANZ* (Sonderheft 1: *Betoninstandsetzung*). Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2017, S. 22–31.
- [7] Patitz, Gabriele: „Schöner Schein? Zustandsbeurteilung von Natursteinmauerwerk.“ In: BuFAS e. V. (Hrsg.): *Schützen und Erhalten – mit Sachverstand und Handwerkskunst* (Tagungsband der 31. Hanseatischen Sanierungstage 2021). Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2021, S. 75–92.
- [8] Patitz, Gabriele / Hübner, Markus / Render, Robert / Stolz, Daniel: „Interdisziplinäre Bestandserfassung und Bewertung von Injektionen des Schwarza-Witznaustollens“. In: *Bautechnik*, 98 (2021), 4, S. 311–317.
- [9] Patitz, Gabriele: „Vor dem Bauen im Bestand – mit Bauradar Konstruktion und Material interdisziplinär analysieren und bewerten“. In: *Der Bausachverständige*, 2 (2023), S. 10–15.
- [10] Patitz, Gabriele: „Bestandserkundung mit Bauradar – Praxisbeispiele“. In: *Tagungsband der EIPOS-Sachverständigentage: Holzschutz – Sachverstand am Bau*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2023, S. 137–150.

Abbildungsverzeichnis

Alle Abbildungen stammen von den Verfasser:innen des Beitrags.

Matthias Frese, Judith Herrmann, Lennart Meid,
Eva Baldauf und Sabine Kuban

RÜCKGEBAUTES UND HISTORISCHES NADELSCHNITTHOLZ

Schwingungsanalysen zur Bewertung der Tragfähigkeit

DOI: 10.60628/9783738810493-199

Schwingungsanalysen gehören in der Festigkeitssortierung zum Stand der Technik. Ihre Anwendung zur Bewertung der Biegefestigkeit rückgebauter und historischer Bauteile aus Nadel schnittholz hingegen ist noch unüblich. Der vorliegende Beitrag regt dazu an, Schwingungsanalysen in diesen Anwendungsfällen zu erproben. Die dadurch ermittelten individuellen Daten zu jedem Stück Schnittholz erlauben eine statistisch abgesicherte Tragfähigkeitsprognose. So können die Statik und Konstruktion neuer ebenso wie historischer Baugefüge positiv beeinflusst werden. Da rückgebautes Nadel schnittholz und historische Holzbauteile während der Analysen jeweils einzeln so zu lagern sind, dass eine freie Schwingung möglich ist, sind die bisher üblichen Annahmen und Vorgehensweisen bei den Analysen zu überdenken und anzupassen.

1 Einleitung

1.1 Anlass und Allgemeines

Vor 25 Jahren begann die Entwicklung einer kombinierten maschinellen und visuellen Festigkeitssortierung für Nadelschnittholz. Es war beabsichtigt, eine visuelle Sortierung nach DIN 4074-1 [1] apparativ zu unterstützen, um Bretter, Bohlen und Kant-hölzer in C35 zu klassifizieren [2]. Damit sollte die mit S13 maximal erreichbare C30-Klassifizierung um S15 (C35) erweitert werden. Die apparative Unterstützung sah vor, bei S10 und besser sortiertem Material (S10+) entweder die Brutto Rohdichte (Rho -Verfahren) oder den dynamischen Elastizitätsmodul (E_{dyn} -Verfahren) als maschinelle Parameter zu ermitteln. Die hohe Korrelation zwischen Elastizitätsmodul und Festigkeit beim E_{dyn} -Verfahren ergibt – im Vergleich zum Rho -Verfahren – Erwartungswerte mit einem kleineren statistischen Rauschen. Seit Dezember 2008 ist das Format der apparativ unterstützten visuellen Sortierung ein fester Bestandteil der DIN 4074-1.

Als das Ministerium für Landesentwicklung und Wohnen Baden-Württemberg im Jahr 2022 ein Projekt zur Wieder- und Weiterverwendung u. a. von Holzbauteilen initiierte und beauftragte, erschloss dies für das E_{dyn} -Verfahren ein praktisches Anwendungsfeld für Nadelschnittholz aus selektivem Rückbau [3]. Entsprechendes Nadelschnittholz ist fallweise sehr heterogen, etwa in Bezug auf Maße, Qualität und bauzeitlich erfolgte Sortierung, weshalb das E_{dyn} -Verfahren zur Festigkeitsprognose für jedes Stück Schnittholz individuell auszulegen war. Dies bedeutet Handarbeit und verursacht technischen Untersuchungsaufwand, liefert aber wahre Werte für die Brutto Rohdichte und den Elastizitätsmodul sowie einen statistisch abgesicherten Wert für die jeweilige Biegefestigkeit. Individuelle Bauteilwerte machen nicht nur die Wiederverwendung technisch integren Nadelschnittholzes aus dem selektiven Rückbau attraktiver, sondern tragen bestenfalls auch in der Denkmalpflege zum Substanzerhalt bei. Rückblickend hätten etwa [4; 5] Voraussetzungen dafür geboten.

Dieser Beitrag demonstriert die Validität des E_{dyn} -Verfahrens im neu erschlossenen Anwendungsbereich anhand zweier Stichproben mit sechs bzw. sieben Biegeprüfungen. Zur Validierung des Verfahrens dienten etwa 90 Jahre alte Dach- und Kellerdeckenbalken bzw. 60 Jahre alte Sparrenabschnitte, jeweils aus Nadelschnittholz. Die Erprobung ihrerseits wurde an 60 Jahre alten Sparren und 55 Jahre alten Konstruktionshölzern durchgeführt. Die zerstörungsfreie Erprobung belegt Potenzial für die Kreislaufwirtschaft sowie die denkmalpflegerische Praxis und erweitert das vorhandene Spektrum von Methoden zur Analyse mechanischer Eigenschaften (vgl. [6–10]).

1.2 Hintergrund und Theorie des E_{dyn} -Verfahrens

Zur apparativen Unterstützung der visuellen Festigkeitssortierung von Nadelschnittholz der Holzarten Fichte und Tanne wurde Gleichung (1) entwickelt [2, Tab. F1]. Die Gleichung berechnet den Erwartungswert der Biegefestigkeit ($f_{m,p}$ in N/mm²) von

Nadel-schnittholz in Übereinstimmung mit jener in DIN EN 408 [11]. Sie ist das Ergebnis einer Regressionsanalyse mit etwa 400 Beobachtungen. Der Korrelationskoeffizient und die Standardabweichung der Fehler betragen 0,729 bzw. 9,32 N/mm².

$$f_{m,p} = 13,4 - 0,0132b - 0,0449h - 0,0414\rho_{\text{brutto}} + 0,00454E_{\text{dyn}} \quad (1)$$

$$\rho_{\text{brutto}} = m/(bh\ell) \quad E_{\text{dyn}} = (2f_0\ell)^2\rho_{\text{brutto}}$$

Gleichung (1) gilt für als S10+ sortierte Bretter bzw. Bohlen mit Breiten von 100–220 mm und Dicken von 20–48 mm, ebenso wie für als S10+ sortierte Kanthölzer mit Breiten von 50–80 mm und Höhen von 100–240 mm. Erklärende Variablen für den Erwartungswert sind die Querschnittsbreite (b in mm), Querschnittshöhe/-dicke (h in mm), Brutto-rohdichte (ρ_{brutto} in kg/m³) aus Masse (m) und der dynamische Elastizitätsmodul (E_{dyn} in N/mm²), berechnet mit der Frequenz einer Längsschwingung erster Ordnung (f_0). Für den neuen Anwendungsbereich des E_{dyn} -Verfahrens wird von jedem individuell berechneten Erwartungswert das 1,65-Fache der Standardabweichung der Fehler abgezogen, siehe Gleichung (2), sodass im Vergleich mit der individuellen charakteristischen Biegefestigkeit ($f_{m,k,in}$ in N/mm²) die Unterschreitungswahrscheinlichkeit für die wahre unbekannte Biegefestigkeit 5 % beträgt.

$$f_{m,k,in} = f_{m,p} - 1,65 \cdot 9,32 = f_{m,p} - 15,4 \quad (2)$$

Dieses Vorgehen ist methodisch vergleichbar mit der Rohdichtebestimmung nach [12]. Bei jenem Verfahren wird mit vier Eindringversuchen z. B. ein statistisch abgesicherter Wert für die individuelle Rohdichte eines Nadelholzes ermittelt.

2 Material und Methoden

2.1 Herkunft

Für die Validierung bzw. Erprobung des E_{dyn} -Verfahrens wurde Nadelholz aus drei Bauwerken verwendet: einem Siedlungshaus in Karlsruhe, einem Wohnriegel in Frankfurt am Main und einem denkmalgeschützten Gebäude in Karlsruhe (Tabelle 1).

Tab. 1 Ausgangsmaterial für die Validierung bzw. Erprobung des E_{dyn} -Verfahrens

Herkunft	Bj.	Bauteile	$b/h/\ell$ in m	Stück	Validierung	Erprobung
Siedlungshaus	1932	Dachbalken (Db 2 und 5)	0,12/0,19/8,6	2	✓	
		Kellerbalken (Kb 2)	0,12/0,23/7,4	1	✓	
Wohnriegel	1964	Sparrenabschnitte (Spa)	0,065/0,15/2,55	7	✓	
		Sparren	0,065/0,15/5,6	80		✓
KIT-Gebäude	1969	Konstruktionshölzer	0,06/0,08/1,1–2,44	23		✓

Das Siedlungshaus war ein Wohngebäude im Karlsruher Ortsteil Neureut-Kirchfeld mit Stockwerksbauweise im 1. Obergeschoss. Dach-, Decken- und Kellerbalken waren als Zweifeldträger in Nadelholz ausgeführt. Das Haus wurde im September 2023 selektiv abgebrochen. Während des Abbruchs ließen sich für validierende Biegeprüfungen zwei Dach- und ein Kellerbalken mit Längen von 8,6 m bzw. 7,4 m schonend bergen (Abbildung 1). Ein Dach- und der Kellerbalken lagen in der Gebäudeachse 2, der zweite Dachbalken in Achse 5. Dementsprechend sind die Balken bezeichnet. Zunächst war vorgesehen, den jahrzehntelang auf Biegung beanspruchten Bereich über der Zwischenstützung zu prüfen. Eine solche Biegeprüfung schied jedoch aus, da Löcher für etwa 30 mm dicke Dollen den Querschnitt schwächten. Die Balken wurden daher in der Mitte für jeweils zwei Biegeprüfungen halbiert.

Das zweite Bauwerk war ein Wohnriegel in Frankfurt a. M., der seinerzeit ein Kehlbalckendach von etwa 65 m Länge mit rund 95 Gespärren erhielt (Abbildung 2). Sparren und Kehlbalcken waren über jeweils genagelte Laschen und Knaggen miteinander verbunden, vgl. [13, S. 230]. Im Juni 2024 wurden zunächst sieben Sparrenabschnitte vor Ort zugeschnitten und für validierende Biegeprüfungen ans Karlsruher Institut für Technologie (KIT) transportiert. Im August wurden weitere 80 Sparren in nahezu ursprünglicher Länge für die Erprobung [14] abgeholt (Abbildung 3).



Abb. 1 Siedlungshaus in Karlsruhe mit auskragenden Dachbalken (links) und bauseits aufbereitetem Balken (rechts)



Abb. 2 Wohnriegel in Frankfurt a. M. während der Aufstockung (links) und Gespärre vor der Demontage (rechts)

Das dritte Bauwerk schließlich war das denkmalgeschützte KIT-Gebäude 10.40 (Abbildung 4 links). Bei der Rückführung des Flures im Erdgeschoss in ein früheres Erscheinungsbild wurden Konstruktionshölzer der nachträglich eingebauten Zwischendecke demontiert. 23 der als Einfeldträger verbauten Hölzer (Abbildung 4 rechts) in Längen bis 2,44 m ließen sich für die Erprobung bergen.

2.2 Methoden

2.2.1 Zerstörungsfreie Prüfungen

Der nächste Schritt bestand in der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) der Balkenhälften, Sparrenabschnitte, Sparren und Konstruktionshölzer der drei Bauwerke. Hierfür wurden die Bauteile nach DIN 4074-1 sortiert, an den Enden – soweit erforderlich – gekappt, hinsichtlich der Holzfeuchte überprüft, gewogen, vermessen und zur Messung der Eigenfrequenz in eine Längsschwingung 1. Ordnung versetzt. Der Ablauf des E_{dyn} -Verfahrens ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Holzfeuchte wurde nach dem Prinzip des elektrischen Widerstands gemessen, z.B. mit dem Gerät Gann Hydromette BL H 40 (Abbildung 6 links). Die Messung der Eigenfrequenz erfolgte mit dem



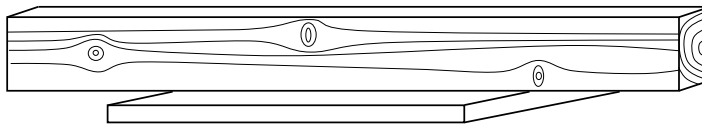
Abb. 3 Sparrenabschnitte des Wohnriegels für Validierung (links) und Sparren für Erprobung (rechts)



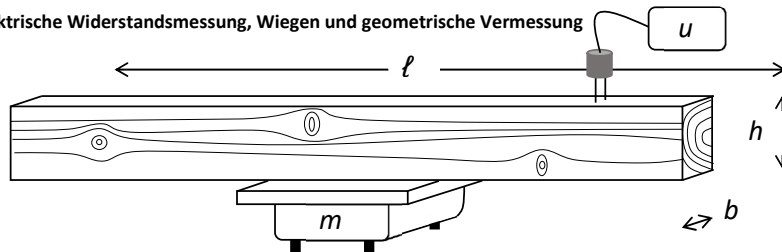
Abb. 4 KIT-Gebäude (links) und Konstruktionsholz der Zwischendecke (rechts)

GrindoSonic MK7 (Abbildung 6 rechts). Hierzu wird das Holz im Schwerpunkt – dem Schwingungsknoten – gelagert und am Hirnholzende mit einem Schlag angeregt. Ein piezoelektrischer Taster gibt die Information der harmonischen Schwingung für die Analyse an das Gerät weiter, woraufhin die Eigenfrequenz nach dem Abklingen der Schwingung sofort in der Anzeige des Geräts erscheint [15–17]. Daraufhin wurden die Brutorohdichte, der dynamische Elastizitätsmodul und die individuelle charakteristische Biegefestigkeit nach Gleichung (2) berechnet.

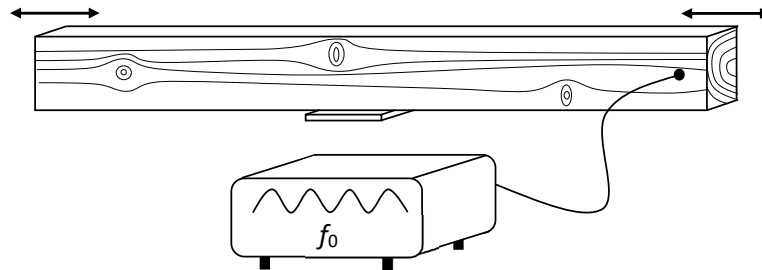
1. Visuelle Sortierung des Nadelnschittholzes nach DIN 4074-1



2. Elektrische Widerstandsmessung, Wiegen und geometrische Vermessung



3. Anregung der Längsschwingung 1. Ordnung und Messung der Eigenfrequenz



4. Zusammenfassung der strukturellen, physikalischen, geometrischen und mechanischen Eigenschaften

Abb. 5 Ablauf des E_{dyn} -Verfahrens



Abb. 6 Gann Hydromette BL H 40 (links) und GrindoSonic MK7 (rechts)

2.2.2 Validierende Biegeprüfungen

Für diese Prüfungen wurden nur die geteilten Dach- und Kellerbalken und die Sparrenabschnitte herangezogen, vgl. Tabelle 1. Alle validierenden Biegeprüfungen wurden nach DIN EN 408 hochkant mit einer Stützweite von $15 h$ und einem querkräftfreien Bereich von $6 h$ durchgeführt. Die Untersuchung der geteilten Dachbalken (Db 2.1, 2.2, 5.1, 5.2) erfolgte auf zwei verschiedene Weisen: Bei der einen Hälfte wurde die ehemalige Biegezugzone beibehalten, bei der anderen Hälfte wurde sie in die Druckzone gedreht, siehe Abbildung 7. Mit den Kellerbalken (Kb 2.1, 2.2) verfuhr man ebenso. Die Sparrenabschnitte wurden im räumlichen Bezug auf das Originalgespärre so herausgetrennt, dass der durch den Kehlbalken gestützte Bereich – und insbesondere die Nagellöcher der Knaggen – in der Biegezugzone des querkräftfreien Bereichs lagen (Abbildung 8). Abbildung 9 zeigt einen Versuch bei fortgeschrittener Durchbiegung (o. l.) und drei Formen des Biegeversagens.

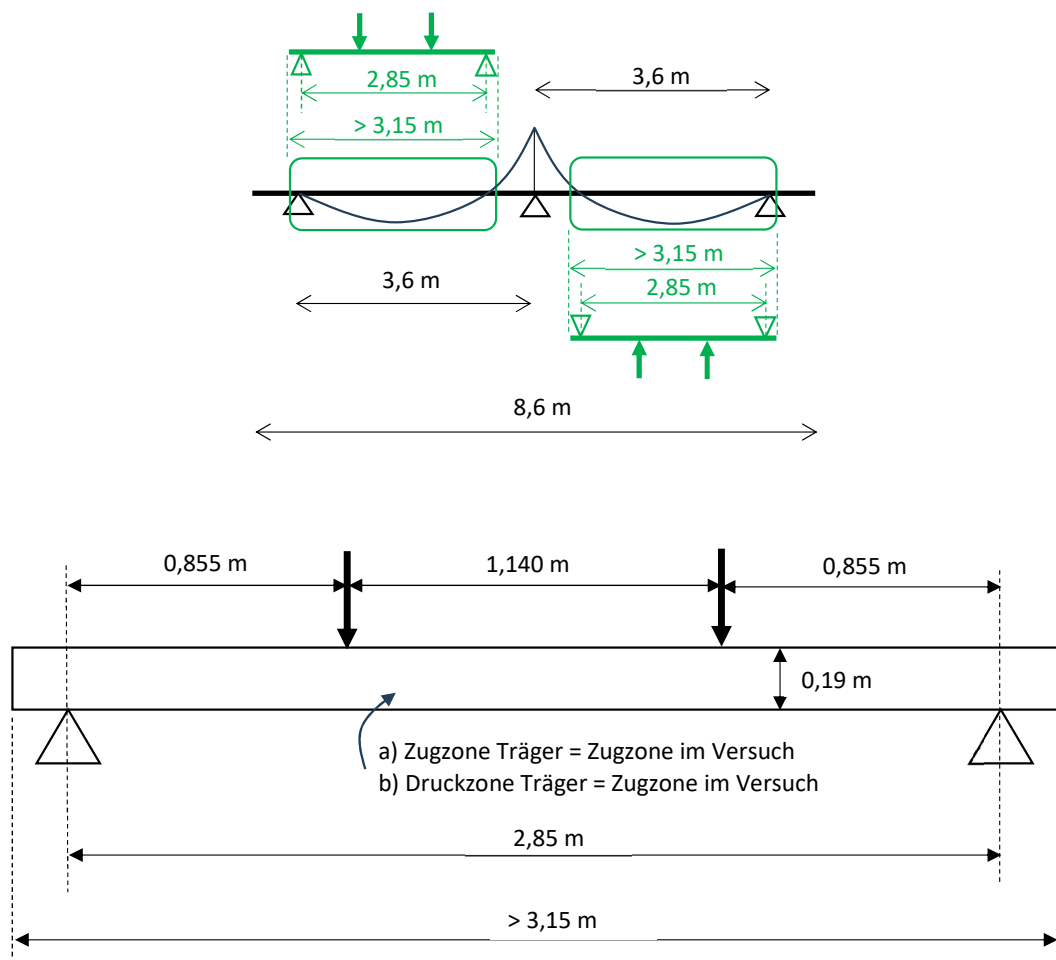


Abb. 7 Prüfbereiche (grün markiert) im Dachbalken und Biegeprüfung mit Lage der ehemaligen Zug- bzw. Druckzone

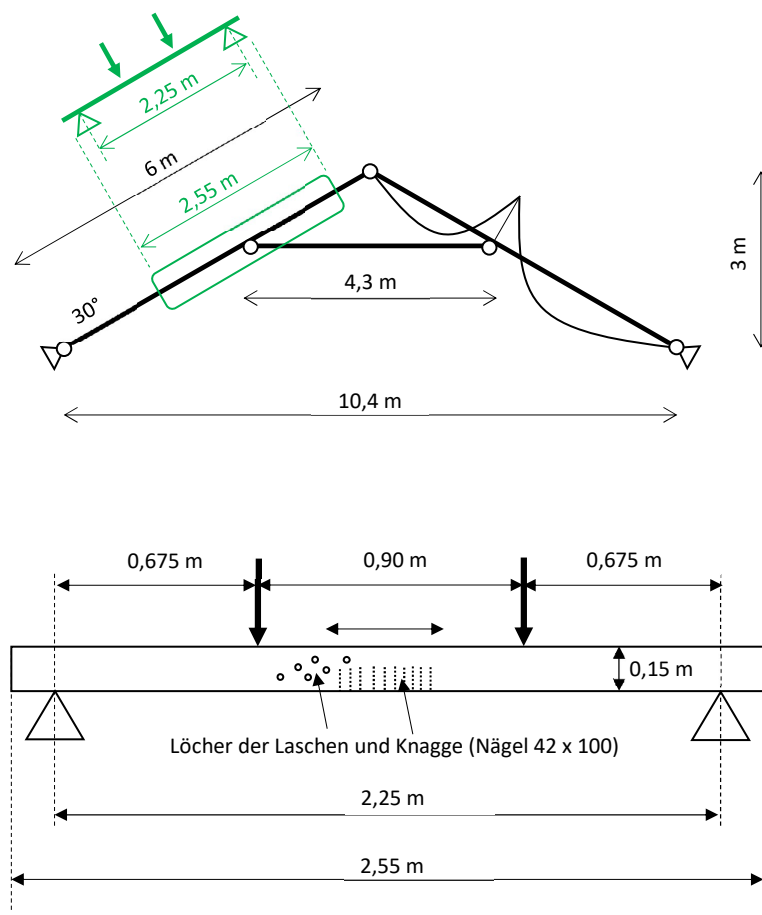


Abb. 8 Prüfbereiche (grün markiert) im Originalgespärre und Biegeprüfung mit Nagellöchern in der Biegezugzone

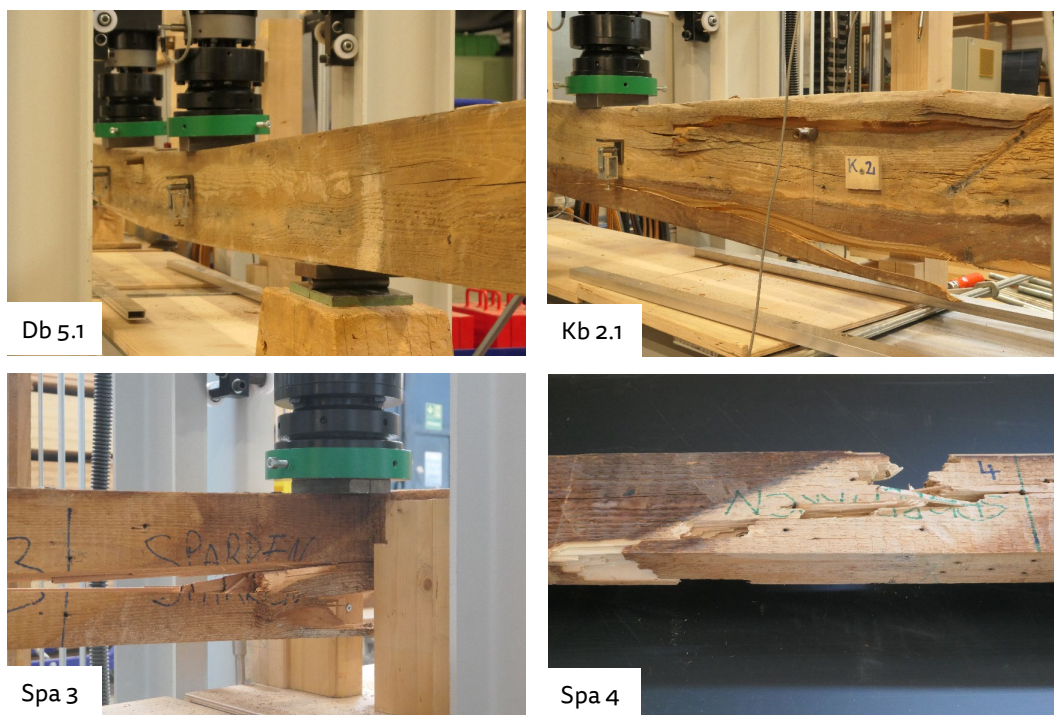


Abb. 9 Biegeprüfkörper vor dem Biegebruch (Db 5.1) bzw. danach (Kb 2.1, Spa 3, Spa 4)

3 Ergebnisse

3.1 Prognose und validierende Biegeprüfungen

Die Ergebnisse der zerstörungsfreien Prüfungen an den Balken und Sparrenabschnitten sowie die jeweiligen Biegefestigkeiten sind in Tabelle 2 gelistet. 12 der 13 Prüfstücke erfüllen die Anforderungen an S10+ und damit die Voraussetzung für die Prognose mit Gleichung (2). Da vier Sparrenabschnitte augenscheinlich aus Lärchenholz waren, hat die für Fichte/Tanne gültige Gleichung (2) einen indikativen Charakter für Lärche. In der 7. und 8. Spalte der Tabelle sind die Biegefestigkeiten der Prüfkörper gegenübergestellt: links die individuellen charakteristischen Werte auf Basis des E_{dyn} -Verfahrens; rechts die tatsächlichen Werte aus den Prüfungen. Im Mittel betragen die individuellen Werte 65 % bzw. 78 % von den Versuchswerten. In zehn Fällen sind die individuellen Werte deutlich kleiner als die Versuchswerte, während sie bei Kb 2.2 nahezu gleich sind. Bei Spa 4 ist die Prognose deutlich größer als der Versuchswert, wobei eine wahre Festigkeit von 34,8 N/mm² für ein Kantholz erwartungsgemäß ist.

Tab. 2 Maße und Eigenschaften der Biegeprüfkörper

Prüfkörper	b mm	h mm	Klasse	ρ_{brutto} kg/m ³	E_{dyn} N/mm ²	$f_{m,k,in}$ N/mm ²		f_m N/mm ²
Dach- und Kellerbalkenhälften^a								
Db 2.1	118	192	S10	415	10580	18,7	<<	32,0
Db 2.2	118	192	S10	380	10440	19,5	<<	30,1
Db 5.1	117	192	S13	415	11610	23,4	<<	41,2
Db 5.2	117	191	S10	409	10440	18,4	<<	29,1
Kb 2.1	115	229	S13	475	12230	22,1	<<	42,1
Kb 2.2	115	229	S13	462	13810	29,8	>	29,6
						MW = 22,0		MW = 34,0
Sparrenabschnitte								
Spa 1	65	150	S13	527	19560	57,4	<	^c 60,4
Spa 2	65	150	S7	388	9730	^d 18,5	<<	^d 29,8
Spa 3 ^b	65	150	S13	515	14330	34,2	<<	57,9
Spa 4	65	150	S10	551	17680	47,9	>>	^e 34,8
Spa 5 ^b	65	150	S10	560	13420	28,2	<<	53,6
Spa 6 ^b	65	150	S10	581	13920	29,6	<	32,0
Spa 7 ^b	65	150	S13	624	18930	50,5	<<	80,3
						MW = 41,3		MW = 53,2

^a Über diese Versuche wurde erstmals in [18] berichtet; ^b Lärchenholz; ^c rechnerische Biegespannung beim Eintritt eines Schubversagens; ^d nicht im MW berücksichtigt; ^e ausgesprochen kurzfasriger Bruch, vgl. Abb. 9

3.2 Erprobung des E_{dyn} -Verfahrens

Von den 80 Sparren lassen sich 45 zur Holzart Fichte/Tanne zählen und 35 dem Augenschein nach zur Holzart Lärche. 40 Sparren aus Fichte/Tanne und 33 aus Lärche gelangen in eine Sortierklasse der DIN 4074-1. Mehr als drei Viertel der Sparren aus Fichte/Tanne und Lärche erfüllen jeweils S10+ (Abbildung 10 links und Mitte). 22 der 23 Konstruktionshölzer gelangen in eine Sortierklasse der DIN 4074-1. Etwas mehr als die Hälfte erfüllt S10+ (Abbildung 10 rechts). Die Mittelwerte der Rohdichte und des dynamischen Elastizitätsmoduls der 45, 35 und 23 Stücke (jeweils Test) sind in Tabelle 3 den Mittelwerten von neuem Holz (Kontrolle) gegenübergestellt. Die Werte von neuem Nadelholz (Fichte/Tanne) sind aus [2, Tab. B1] für die dort bezeichneten Stichproben „KG“ + „KN“ und „KD“ + „KM“ entnommen. Die jeweilige Gruppierung berücksichtigt eine Vergleichbarkeit hinsichtlich der vorliegenden Querschnittsmaße zwischen Test und Kontrolle. Für die Lärche, mutmaßlich europäisch, ließ sich für das Querschnittsmaß kein Kontrollwert finden. Bei den Sparren und Konstruktionshölzern beträgt der dynamische Elastizitätsmodul der Kontrollgruppe unter Berücksichtigung der Rohdichte $439/471 \cdot 12680 \approx 11820 \text{ N/mm}^2$ bzw. $463/428 \cdot 11190 \approx 12110 \text{ N/mm}^2$. Beide Vergleiche belegen, dass der dynamische Elastizitätsmodul auch nach über 60 bzw. 55 Jahren nahezu unverändert ist.

Tab. 3 Vergleich der geprüften Sparren und Konstruktionshölzer mit neuem Holz hinsichtlich Rohdichte und dynamischem Elastizitätsmodul

Gruppe	Anzahl	Holzart	Alter a	MW ρ_{brutto} kg/m ³	MW E_{dyn} N/mm ²
Test	45 Sparren	Fichte/Tanne	> 60	439	11790
Kontrolle	144 Kanthölzer	Fichte/Tanne	< 1–2	471	12680
Test	35 Sparren	Lärche	> 60	528	12610
Kontrolle	k. A.				
Test	23 Konstruktionshölzer	Fichte/Tanne	> 55	463	12190
Kontrolle	113 Kanthölzer	Fichte/Tanne	< 1–2	428	11190

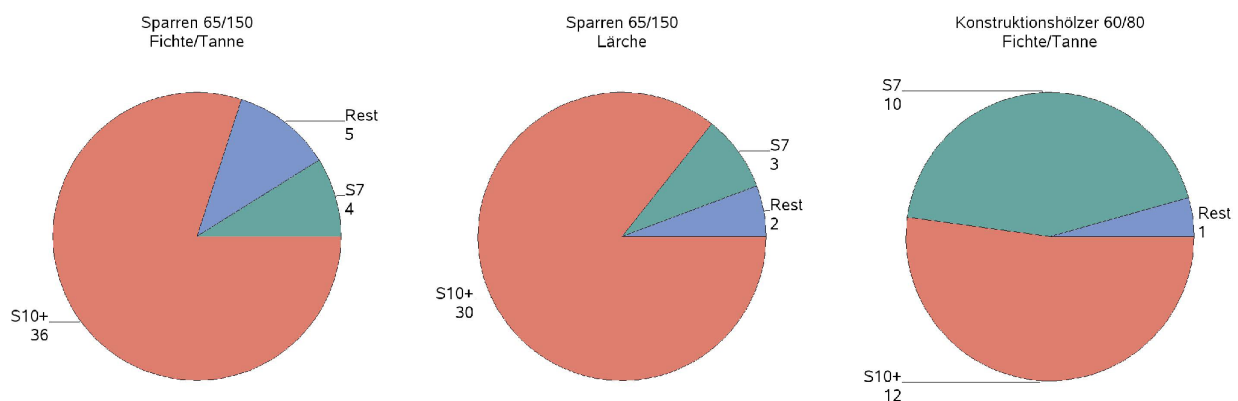


Abb. 10 Sortiererergebnisse gemäß DIN 4074-1 für die geprüften Sparren und Konstruktionshölzer, differenziert nach Holzart und Querschnittsmaß

Für folgende Prüfkörper kann die individuelle charakteristische Biegefestigkeit nach Gleichung (2) berechnet werden: 36 Sparren aus Fichte/Tanne, 30 aus Lärche und 12 Konstruktionshölzer. Die diskreten Wahrscheinlichkeitsverteilungen der jeweiligen Werte sind in Abbildung 11 dargestellt. In den Diagrammen sind linearisierte Normalverteilungen mit den Parametern der Stichproben ergänzt. Die drei Wahrscheinlichkeitsverteilungen belegen individuelle charakteristische Biegefestigkeiten zwischen 10–42, 13–50 bzw. 22–46 N/mm².

4 Diskussion

4.1 Bemessung

Die Einzelwerte der Verteilungen (Abbildung 11) ermöglichen eine differenzierte Bestimmung der charakteristischen Biegefestigkeit der Stücke, die für Bemessungszwecke relevant ist. Teile mit niedriger Festigkeit können ihrem Potenzial entsprechend nur gering beansprucht werden, solche mit hoher Festigkeit hingegen wesentlich stärker, sofern keine relevanten tragfähigkeitsmindernden Einflüsse infolge von Bearbeitung, Demontage o.Ä. vorliegen. In der Wahrscheinlichkeitsverteilung in Abbildung 11 links beträgt beispielsweise das Minimum 10 N/mm², das Mittel 24,7 N/mm² und das Maximum 42 N/mm². Möchte man von hohen individuellen charakteristischen Werten profitieren, muss man dafür auch kleine in Kauf nehmen. Alternativ ließe sich das Kollektiv der 36 Sparren in Gänze – weiterhin ohne Anwendung des E_{dyn} -Verfahrens – nach S10 als C24 klassifizieren. Hier dürfen ebenfalls keine relevanten tragfähigkeitsmindernden Einflüsse aufgrund von Bearbeitung, Demontageschäden o.Ä. vorliegen. Da Gleichung (2) nur für Nadelschnittholz gilt, erfordert die Abschätzung der individuellen charakteristischen Biegefestigkeit von Eichenholz einen anderen Ansatz: eine Schwingungsanalyse zur Ermittlung des dynamischen Elastizitätsmoduls in Kombination mit der grafischen Beziehung aus [15, S. 48]. Durchbiegungsnachweise verlangen nach einem statischen Äquivalent (E_{stat}) zum dynamischen

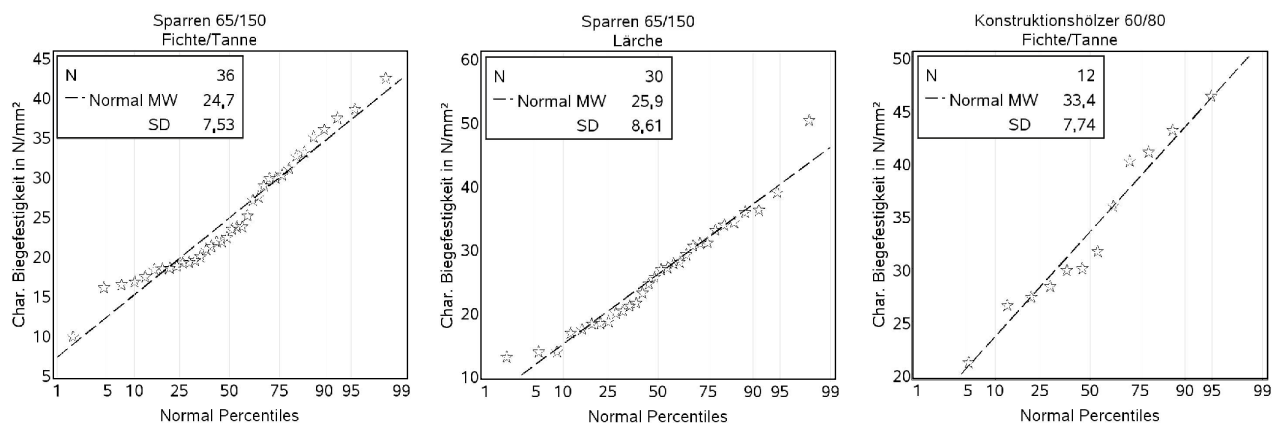


Abb. 11 Wahrscheinlichkeitsverteilungen der individuellen charakteristischen Biegefestigkeiten

Elastizitätsmodul. Laut [2, Bild C12–C14] wird eine Umrechnung nach Gleichung (3) nur für Brettquerschnitte unter Zugbeanspruchung empfohlen.

$$E_{\text{stat}} = 0,95 \cdot E_{\text{dyn}} \quad (3)$$

4.2 Denkmalpflegerische Praxis

Spätestens mit der Formulierung der Anforderungen zur Schadenskartierung im konstruktiven Holzbau [19] hat sich in der Denkmalpflege Baden-Württemberg ein Standard entwickelt, der nicht nur den Bestand dokumentiert, sondern auch zwischen Schadensphänomenen differenziert. Bei statisch relevanten Fragestellungen wird ausgehend von der Bestandsdokumentation das Bestandstragwerk modellbasiert bemessen. In die Rechnung fließt die tatsächliche Geometrie der Bauteile ein, doch für den Elastizitätsmodul und die Festigkeiten werden standardisierte Tabellenwerte verwendet, was eventuell vorhandenes Potenzial ungenutzt lässt. Hier ermöglicht das E_{dyn} -Verfahren, nahezu zerstörungsfrei, realistische Werte am Bestand zu erzielen, die als Grundwerte in die dann realitätsnähere Bemessung einfließen können.

Aus denkmalfachlicher Perspektive ist die Anwendung dieses Verfahrens abzuwägen, da zwar der Holzbalken an sich zerstörungsfrei untersucht wird, jedoch sein Ausbau Verluste mit sich bringen kann. Das Verfahren eignet sich vor allem für Deckenbalken und Unterzugskonstruktionen. Es gibt durchaus Objekte, bei denen über die Zeit erhaltungswürdige Bodenbeläge, unterseitige Decken oder auch Zwischenfüllungen (Lehmwickel, Schüttungen usw.) bereits entfernt wurden. Bei anderen, vollständiger erhaltenen Gebäuden ist zu diskutieren, wann der Ausbau die notwendigen Eingriffe rechtfertigt.

Für eine Untersuchung werden die Bauteile einzeln ausgebaut (mit entsprechender Zwischenabstützung), vor Ort analysiert und direkt wieder eingebaut. Auf der Tragwerksebene bleibt somit der authentische Ortsbezug weitestgehend erhalten, während eine aufwändige Dokumentation für den Wiedereinbau, beispielsweise nach einer Untersuchung im Labor, entfällt. Voraussetzung für diese Vorgehensweise ist eine frühzeitige Einbindung der beteiligten Tragwerksplanung. Weiterhin sollte die Planung die Untersuchung nicht nur begleiten, sondern idealerweise bereits im Vorfeld kritische Werte benennen, die bei der Untersuchung zu erreichen sind, damit das Bauteil weiterhin als Teil des Tragwerks funktionieren und somit wiedereingebaut werden kann. Bei Nichterreichen der Kennwerte wären im Vorfeld bzw. zeitnah Verstärkungsdetails oder ein Ersatz auszuloten.

4.3 Ausblick

Die Durchführung des E_{dyn} -Verfahrens erfordert eine visuelle Sortierung des Schnittholzes sowie Kenntnis vierer Parameter: Holzfeuchte, Bruttorechtholzdichte, dynamischer

Elastizitätsmodul und individuelle charakteristische Biegefestigkeit. Auf dieser Basis lässt sich nicht nur die technische Integrität des Holzes präzise quantifizieren, sondern die resultierenden Werte sind auch oft höher als bei einer rein visuellen Sortierung (Abbildung 12).

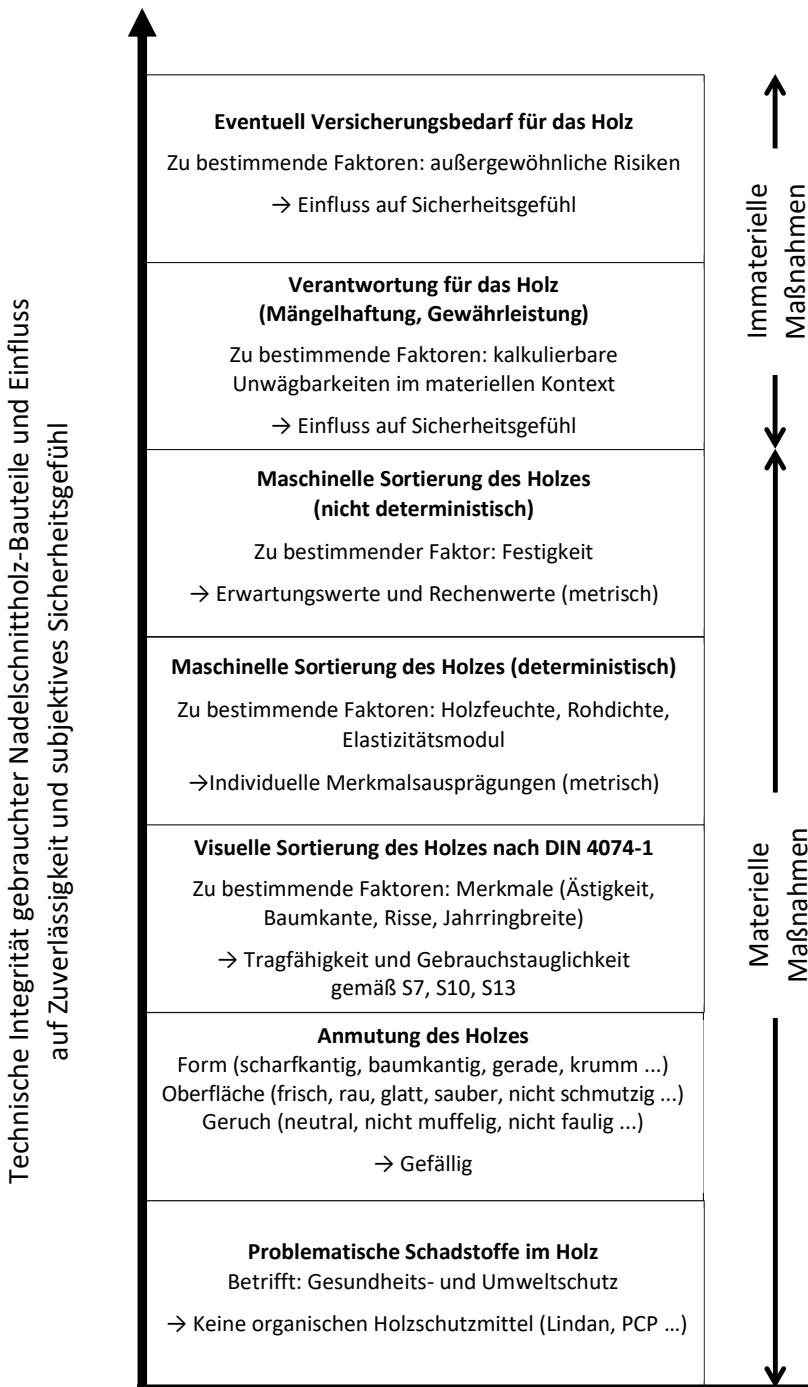


Abb. 12 Faktoren für die technische Integrität, die Zuverlässigkeit und das Sicherheitsgefühl

Abbildung 12 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen der technischen Integrität gebrauchter Nadel-schnittholz-Bauteile einerseits und ihrem Einfluss auf die Zuverlässigkeit und das subjektive Sicherheitsempfinden andererseits. Zunächst ermöglichen materielle Messverfahren (im unteren Bereich der Abbildung) eine erweiterte und objektive Bewertung im Hinblick auf die Zuverlässigkeit des Holzes. Dazu gehören die Untersuchung auf problematische Schadstoffe sowie eine allgemeine Beurteilung von Form, Oberfläche und Geruch. Weitere materielle Maßnahmen sind die visuelle Sortierung nach DIN 4074-1, um die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit des Holzes zu bestimmen, ebenso wie die maschinelle Sortierung. Während die deterministische Sortierung Faktoren wie Holzfeuchte, Rohdichte und Elastizitätsmodul erfasst, bestimmt die nicht deterministische Sortierung die Festigkeit. Um das subjektive Sicherheitsgefühl im Umgang mit den Bauteilen zusätzlich zu stärken, sollten materielle Risiken – sowohl kalkulierbare als auch nicht vorhersehbare – durch immaterielle Maßnahmen aufgefangen werden (im oberen Bereich der Abbildung). Hierzu zählen insbesondere die Übernahme von Verantwortung in Form von Gewährleistung und Mängelhaftung sowie der Abschluss geeigneter Versicherungen.

5 Zusammenfassung

Der Paradigmenwechsel im Bauwesen verlangt nach Ressourcenschonung. Die technische Integrität von Holz aus dem selektiven Rückbau kann mit einer Schwingungsanalyse sehr differenziert quantifiziert werden. Wie bei einer maschinellen Festigkeitssortierung eröffnet sich die Chance, nicht nur die Spreu vom Weizen zu trennen, sondern auch die Diversität innerhalb eines heterogenen Schnittholzkollektivs objektiv erfahrbar zu machen. Das kann dazu beitragen, Holz aus dem Rückbau einen individuellen Wert beizumessen und durch eine möglichst hochwertige Verwendung zu erhalten. Auch das entspricht im weiteren Sinne einem *Bewahren durch Erkunden*. Es wäre wünschenswert, dass die Schwingungsanalyse mit ihren Vor- und Nachteilen im Bauwesen und in der denkmalpflegerischen Praxis als Angebot für geeignete Einsatzzwecke wahrgenommen wird und sich immer einmal wieder beweisen kann.

Förderhinweis

Der vorliegende Text berichtet über Arbeiten, die in der Bachelorarbeit [14] erbracht und aus Eigenmitteln finanziert wurden. Sie waren in ein Forschungsprojekt eingebettet, das in die Schaffung des Leitfadens [3] mündete. Das Projekt wurde vom Ministerium für Landesentwicklung und Wohnen Baden-Württemberg beauftragt sowie finanziert. Der Wohnungs- und Entwicklungsgesellschaft Nassauische Heimstätte wird für das Überlassen von 4,5 m³ Sparren zur Erprobung gedankt.

Literaturverzeichnis

- [1] Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN): *DIN 4074-1:1989-09 Sortierung von Nadelholz nach der Tragfähigkeit; Nadel-schnittholz*. Berlin: Beuth Verlag, 1989.
- [2] Blass, Hans Joachim / Frese, Matthias: *Entwicklung eines Sortierverfahrens für die kombinierte maschinelle und visuelle Festigkeitssortierung* (Forschungsbericht). Karlsruhe: Universität Karlsruhe, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Abt. Ingenieurholzbau, 2002.

- [3] Dietsch, Philipp / Müller, Matthias / Frese, Matthias / Ehrenlechner, Christoph / Mensinger, Martin / Winter, Stefan / Ummenhofer, Thomas: *Leitfaden zur Wiederverwendung tragender Bauteile*. Ministerium für Landesentwicklung und Wohnen Baden-Württemberg (Hrsg.). Stuttgart: 2025.
- [4] Thumm Martin: „Zur Belastung auf die Probe gestellt“. In: Vereinigung der Landesdenkmalpfleger in der BRD (Hrsg.): *Arbeitshefte des Arbeitskreises Bautechnik*, Heft 4 (1998), S. 44–47.
- [5] Wenzel, Fritz: „Fruchtkasten Heidenheim – Zustandserhebung, Standsicherheitsuntersuchung und Instandsetzungsplanung“. In: *Konzeptionen – Möglichkeiten und Grenzen denkmalpflegerischer Maßnahmen* (20. Kolloquium des SFB 315), Heft 9 (1989), S. 113–120.
- [6] Görlacher, Rainer: *Historische Holztragwerke – Untersuchen, Berechnen und Instandsetzen*. Mit Beiträgen von Volker Claus Falk und Hannes Eckert. Hrsg. von Fritz Wenzel und Joachim Kleinmanns. Karlsruhe: SFB 315 „Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke“, 1999.
- [7] Loebjinski, Maria / Pasternak, Hartmut / Rug, Wolfgang: „Zuverlässigkeitsbewertung von Holzbauteilen im Bestand“. In: *Bauingenieur*, 92 (2017), S. 65–73.
- [8] Linke, Gunter / Rug, Wolfgang / Pasternak, Hartmut: „Festigkeitsortierung von Bauholz in historischen Gebäuden – Bericht zum Stand der Technik“. In: *Bauingenieur*, 92 (2017), S. 229–236.
- [9] Loebjinski, Maria / Linke, Gunter / Rug, Wolfgang: „Instandsetzung einer denkmalgeschützten Dachkonstruktion in Holzbauweise“. In: *Bauingenieur*, 94 (2019), S. 378–385.
- [10] Nocetti, Michela / Aminti, Giovanni / Vicario, Margherita / Brunetti, Michele: „Mechanical properties of ancient wood structural elements assessed by visual and machine strength grading“. In: *Construction and Building Materials*, 411 (2024), S. 1–12.
- [11] Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN): *DIN EN 408:2012-10 Holzbauwerke – Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften*. Berlin: Beuth Verlag, 2012.
- [12] Görlacher, Rainer: „Zerstörungsfreie Prüfung von Holz: Ein ‚in situ‘-Verfahren zur Bestimmung der Rohdichte“. In: *Holz als Roh- und Werkstoff*, 45 (1987), S. 273–278.
- [13] von Halász, Robert (Hrsg.): *Holzbau-Taschenbuch*. 6. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn, 1963.
- [14] Meid, Lennart: *Untersuchung und Reklassifikation 60 Jahre alter Sparren aus Rückbau und Vorschläge für ihre konstruktive Weiterverwendung*. Bachelorarbeit, KIT Holzbau und Baukonstruktion. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie, 2025.
- [15] Görlacher, Rainer: „Ein neues Messverfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Holz“. In: *Holz als Roh- und Werkstoff*, 42 (1984), S. 219–222.
- [16] Görlacher, Rainer: *Klassifizierung von Brettschichtholzlamellen durch Messung von Longitudinalschwingungen*. Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen. Karlsruhe: Universität Karlsruhe, 1990.
- [17] GrindoSonic BV: *Benutzerhandbuch GrindoSonic MK7 – Messverfahren für Qualitätskontrolle und Materialforschung*. Leuven, Belgien: 2025.
- [18] Frese, Matthias / Herrmann, Judith / Dietsch, Philipp: „Pragmatische Ansätze für eine Wiederverwendung von tragenden Holzbauteilen aus selektivem Rückbau“. In: Sandhaas, Carmen (Hrsg.): *Karlsruher Tage 2024 – Holzbau: Forschung für die Praxis*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2024, S. 71–87.
- [19] Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart (Hrsg.): *Leitfaden zur Dokumentation im konstruktiven Holzbau*. Esslingen am Neckar, 2020.

Abbildungsverzeichnis

Alle Abbildungen stammen von den Verfasser:innen des Beitrags.

Cornelia Marinowitz

RESTAURATORISCHE UNTERSUCHUNGEN

Die Bedeutung eines Schweinchen-Graffitis für die Bauforschung

DOI: 10.60628/9783738810493-215

Der Beitrag zeigt mithilfe eines Fallbeispiels, dass die historische Bauforschung allein nur begrenzte Aussagen zur Baugeschichte treffen kann und daher durch restauratorische Untersuchungen entscheidend ergänzt werden muss. Anhand eines Raums in Schloss Blumenfeld (Hegau) wird dargelegt, wie eine systematische Analyse von Oberflächenstratigrafien, die über das einfache Abstreppen von Farbschichten mit dem Skalpell weit hinausgeht, wichtige Informationen erschließt. Dadurch lassen sich bislang verborgene Zusammenhänge zwischen baulichen Veränderungen offenlegen und Bauphasen präziser datieren. Die Kombination aus detaillierter Schichtendokumentation und genauer Datierung vertieft das Verständnis der Bauentwicklung und unterstreicht die essenzielle Rolle restauratorischer Untersuchungen in der Bauwerkserkundung.

1 Einführung

Die Bauforschung nimmt in der Bauwerkserkundung und -aufnahme einen bedeutenden Platz ein. Sie kann jedoch häufig nur einen Teil der baugeschichtlichen Fragen beantworten, etwa zu Materialeinsatz oder Bauphasen. Restauratorische Untersuchungen sind deshalb ein wichtiger Bestandteil dieser Arbeit. Sie beschränken sich längst nicht mehr auf das Erstellen von Schichtentreppen, also das mechanische Abtreppen einzelner Tüncheschichten mithilfe eines Skalpells, sondern umfassen heute eine systematische Analyse der Oberflächenstratigrafie, einschließlich Einbettungen und Querschliffe. Am Beispiel eines mit einem Gewölbe ausgestatteten Raums in Schloss Blumenfeld im Hegau werden in dem vorliegenden Beitrag die Bandbreite, Arbeitsweise und Bedeutung restauratorischer Bestandsaufnahmen aufgezeigt: Der Raum war bislang als Kapelle interpretiert worden, doch jüngste Untersuchungen haben diese Annahme widerlegt. Sie ermöglichten es, die vielen, zum Teil mit Maleriefragmenten versehenen Schichten des Raums neu zu bewerten und mit der Baugeschichte in einen zeitlichen ebenso wie funktionalen Zusammenhang zu bringen.

2 Geschichte von Schloss Blumenfeld

Schloss Blumenfeld (Abbildung 1) liegt im gleichnamigen Ortsteil der Stadt Tengen im Hegau, im Süden Baden-Württembergs. Es wurde auf den Grundmauern einer mittelalterlichen Burg aus dem 13. Jahrhundert errichtet. Nach den Wirren des Schwabenkriegs (1499) wurde das Schloss im 16. Jahrhundert durch die römisch-katholische Rittergemeinschaft des Deutschen Ordens in mehreren Etappen wieder aufgebaut. In der Folgezeit erhielt es allmählich sein heutiges Erscheinungsbild, das von Einflüssen der Renaissance und des Barocks geprägt ist.

Die Säkularisation von 1806 beendete die Ordensherrschaft. Das Schloss diente daraufhin nacheinander z.B. als Verwaltungsbau, Schule und Pflegeeinrichtung, begleitet von tiefgreifenden funktionalen Anpassungen. In den 1950er- und 1960er-Jahren



Abb. 1
Schloss Blumenfeld in
Tengen im Sommer 2025

verschärften sich die baulichen und hygienischen Anforderungen an Pflegeeinrichtungen, die das Schloss bald nicht mehr erfüllen konnte. Aus wirtschaftlichen Gründen war sogar ein Abriss im Gespräch. Doch die Pläne stießen auf heftigen Widerstand sowohl in der Bevölkerung als auch in der Denkmalpflege, die sich für den Erhalt des Schlosses einsetzten. Angesichts dieser Proteste und des zunehmenden öffentlichen Interesses am Kulturerhalt erfolgte in den 1970er- und 1980er-Jahren eine umfassende Sanierung und Restaurierung. Die Maßnahmen erscheinen unter modernen denkmalpflegerischen Aspekten kritisch, sicherten damals aber den Fortbestand des Schlosses, wenngleich die Räume teils bis heute in einem „unfertigen“ Zustand sind. Es folgte der Betrieb als Pflegeheim, das allerdings 2017 aufgegeben werden musste. Seit 2024 wird das Schloss von der Zukunftsart Schloss Blumenfeld GmbH geleitet. Heute ist es nicht nur ein historisches Denkmal, sondern auch ein beliebter Veranstaltungsort.

3 Bauforschung und Befunduntersuchung im Schloss

2024 wurde die Bestandsaufnahme in Schloss Blumenfeld wieder aufgenommen. Die Aufgabe liegt nun in den Händen des Berliner Büros für Bauforschung und Baukultur Winterfuchs von Dr.-Ing. Christian Fuchs und Dipl.-Ing. Tanja Winter. Angestoßen wurde dies auch durch die von Christian Fuchs geleiteten Seminare für Architekt:innen an der Hochschule Konstanz für Technik, Wirtschaft und Gestaltung (HTWG). Bereits 2022 verschaffte sich eine Gruppe Studierender im Schloss zum ersten Mal ein Bild davon, was Bauforschung überhaupt bedeutet – stellte selbst in den Räumen Erkundungen an und dokumentierte diese. 2024 wurde das Seminar durch eine Einführung in die Praxis der restauratorischen Untersuchung ergänzt. Damit bot es jetzt auch einen Einblick in die Arbeit von Restaurator:innen und in die Bedeutung historischer Oberflächen innerhalb der Bauforschung. Es war bemerkenswert zu sehen, wie diese neuen Informationen in die praktischen Beobachtungen der Studierenden im Schloss einfließen. Dass Oberflächen wichtige baugeschichtliche Informationen liefern können, hat die Sichtweise der Seminarteilnehmenden maßgeblich beeinflusst und auch zu ganz neuen Erkenntnissen geführt, etwa als sich aus der Betrachtung unscheinbarer Putzübergänge Hinweise auf eine frühere Raumtrennung ergaben.

Seit 2024 stellt das Büro Winterfuchs in einem neuen bauforscherischen Untersuchungsprojekt außerdem erstmals umfangreiche Archivrecherchen zur Bau- und Restaurierungsgeschichte des Schlosses an, sowohl im Generallandesarchiv Karlsruhe als auch im Archiv des Landesdenkmalamts am Regierungspräsidium Freiburg. Weiterhin bewertet das Büro die bestehenden Grundrisspläne neu und ergänzt sie durch aktuelle Vermessungen. Dendrochronologische Bohrungen im Schloss lieferten ebenfalls neue Ergebnisse, die für die Beurteilung der Farbstratigrafien zusätzliche Datierungshinweise gaben.

4 Untersuchung der Oberflächen in Raum 1.04

Ende 2024 erstellte der Restaurator Robert Lung (Reichenau) in Schloss Blumenfeld eine erste Bestandsaufnahme der bemalten Oberflächen und ihres Zustands. Damit schuf er eine Grundlage für weitere Untersuchungen und Vergleiche sowie für Konservierungsmaßnahmen. 2025 ging die Verfasserin dieses Beitrags mit einer feinstratigraphischen Untersuchung der Oberflächen den nächsten Schritt. Dafür konzentrierte sie sich zunächst auf den Raum 1.04, ein Gewölbe im 1. Obergeschoss des Südflügels des Schlosses (Abbildungen 2 und 3). Beurteilt wurden jetzt nicht mehr nur die sichtbaren Schichten des Raums, sondern auch die Schichten, die man lediglich in Querbrüchen oder -schliffen unter dem Mikroskop sieht. Diese Analysen lohnen sich z.B. dann, wenn Oberflächen eine große Schichtendichte oder ein hohes Alter besitzen oder wenn schriftliche Quellen keinen Aufschluss über Veränderungen der Oberfläche, etwa durch Umbauten oder Renovierungen, geben. Den bauforscherischen



Abb. 2 u. 3

Raum 1.04 in Schloss Blumenfeld – oben Blick in Richtung Fenster (Winterfuchs, Berlin); unten Blick in Richtung Türlaibung und umliegende Wände, mit Bemalungsfragmenten aus dem 17. Jahrhundert (Thomas Blennemann, Blumenfeld)

Erkenntnissen von Winterfuchs zufolge wurde der Raum in dem nach den Kriegswirren neu errichteten Südflügel nachträglich eingebaut, wohl in der ersten Hälfte des 16. Jahrhunderts. Wie sich heute in zwei Ausbrüchen im Putz zeigt, wurden dabei auch ältere Bauteile wiederverwendet, darunter zwei behauene Spolien.

Die ursprüngliche Funktion des Raums liegt bisher im Dunklen. Wollte man einfach einen kühlen Vorratsraum schaffen oder aber, nach den Bränden und Plünderungen, einen feuersicheren Tresorraum, wie er selbst in bürgerlichen Häusern des Mittelalters oft vorhanden war? Es bestand auch die Annahme (weiter unten erläutert), dass es sich um eine Kapelle gehandelt haben könnte.

Sicher ist jedoch, dass der Raum, wie die Untersuchung der Putze ergab, anfangs keinen Deckputz hatte und lediglich an einigen Stellen gekalkt war. Der Fugenputz – ein leicht gelblich-rötlicher Kalkmörtel mit sehr feinem Zuschlag – wurde an den Fugen über die Steine verstrichen und blieb so für eine lange Zeit bestehen, vielleicht sogar unter einer Vertäfelung. Der Kalkstein der Region ist ein Muschelkalk von gelblich-rötlicher Farbe mit zahlreichen fossilen Einschlüssen. Es liegt also nahe, dass daraus der Kalk für den Bau des Gewölbes gebrannt wurde. Auch der Zuschlag im Mörtel ist eher hell (Abbildung 4) und könnte folglich aus dem nahegelegenen Bachbett stammen. Der Sichtputz, der heute das Gewölbe bedeckt, hat dagegen eine ganz andere Zusammensetzung. Hier handelt es sich um einen fast weißen Kalkmörtel, ebenfalls mit sehr feinkörnigem Zuschlag, jedoch durchsetzt mit vielen schwarzen Sandkörnchen (Abbildung 5). Er wurde also sicherlich aus einem anderen Kalkstein gebrannt und auch der Zuschlag stammt aller Wahrscheinlichkeit nach aus einer anderen Quelle.

Auf dem Deckputz haben sich zahlreiche Farbschichten erhalten, darunter einige mit Malereifragmenten. Durch die feinstratigrafische Untersuchung der Verfasserin war es nun möglich, diese Fragmente chronologisch zu ordnen und zu datieren, um so einen Anhaltspunkt zu gewinnen, wann das Gewölbe mit dem Deckputz versehen wurde.



Abb. 4 Mikroskopische Ansicht des Mauer- und Fugenmörtels im Gewölbe, datiert auf die erste Hälfte des 16. Jahrhunderts



Abb. 5 Mikroskopische Ansicht des Deckputzes im Gewölbe, datiert auf die zweite Hälfte des 16. Jahrhunderts

5 Die Malereifragmente in Raum 1.04

In Raum 1.04 waren bereits vor der restauratorischen Untersuchung verschiedene Malereifragmente zu sehen gewesen. Diese waren bis dahin jedoch weder dokumentiert noch datiert worden. Durch die Untersuchung ließen sie sich jetzt in verschiedene Epochen einordnen, vom späten 16. bis zum frühen 18. Jahrhundert. Im Folgenden werden die Fragmente in chronologischer Abfolge beschrieben und analysiert.

5.1 Zweite Hälfte des 16. Jahrhunderts: Erste Ausmalungsphase

Auf dem gekalkten Deckputz am Beginn der Wölbung haben sich drei sehr fein gemalte Fragmente erhalten, die ehemals vermutlich Teil eines größeren Bildprogramms waren. Auf der einen Seite sieht man eine kleine Wiege mit einem Wickelkind sowie rechts davon einen stehenden Mann mit Pluderhose und Federhut (Abbildungen 6 und 7), auf der gegenüberliegenden Seite einen grünen Hügel mit einer Pflanze. Die Fragmente werden durch sehr feine schwarze Linien begleitet und getragen, von denen nur wenige Reste erhalten sind. Die Farbigkeit ist verloren; heute sieht man bloß noch die schwarze Vorzeichnung und die gelbliche Grundierung. Lediglich die Pflanze auf dem Hügel weist Farbreste auf und der Hügel ist nach wie vor grün. Das Bindemittel der gelblichen Grundierung wurde bisher nicht analysiert. Das Grün des Hügels und das Gelb der Grundierung sind jedoch erstaunlich stabil und fest mit der Tünche verbunden.



Abb. 6 u. 7 Malereifragmente in Raum 1.04, datiert auf die zweite Hälfte des 16. Jahrhunderts – links eine Wiege mit Wickelkind, rechts ein Mann mit Pluderhose und Federhut

Das Bild des Mannes macht es sehr wahrscheinlich, dass die drei Malereien in der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts entstanden sind, da seine Kleidung deutliche Parallelen zur Mode von Männern der damaligen Zeit aufweist. Dies belegt etwa das in Abbildung 8 ausschnittsweise dargestellte höfische Ölgemälde eines unbekannten Meisters um 1581/82.

5.2 Zweite Hälfte des 16. Jahrhunderts: Das Schweinchen-Graffiti

Unter der ersten Malerieebene hat sich eine kleine und sehr private Kohle- oder vielleicht sogar Bleistiftzeichnung erhalten. Dieses sogenannte Graffiti befindet sich auf der Tonne links oberhalb der Lichtnische (Abbildung 9). Es war schon seit langer Zeit sichtbar gewesen, aber, da hinter einem Schrank versteckt, niemandem aufgefallen. Angesichts der Tatsache, dass es unter der ersten Malerieebene liegt, muss es ebenfalls in die zweite Hälfte des 16. Jahrhunderts datieren. Zu sehen sind zwei kleine, sitzende Schweine, versetzt übereinander angeordnet. Das untere Schwein ist durch die grüne Farbe der ersten Ausmalung etwas schwerer zu erkennen. Es hat eine tropfende Schnauze und sitzt vor einem kleinen Fäkalhaufen (Abbildung 10).

Im 16. Jahrhundert waren Schweine beliebte Illustrationsdetails und dabei in ihrer Symbolik sehr vielschichtig. So konnten sie einerseits Glück und Reichtum verkünden, andererseits jedoch auch für Völlerei und einen unsteten Lebenswandel stehen.



Abb. 8
Ausschnitt aus einem höfischen Ölgemälde
um 1581/82, zu sehen im Musée du
Louvre in Paris, Frankreich [1, S. 201]

Solche skatologischen Eskapaden, wie man sie hier sieht, tauchen in zahlreichen Buchillustrationen auf, oft nur als frivole Details am Rand. Der bekannte Nürnberger Zeichner und Grafiker Peter Flötner (c. 1490–1546), der im 16. Jahrhundert ganze Musterbücher mit Arabesken füllte, entwarf beispielsweise eine Gestaltung des berühmten und symbolträchtigen Kartenspiels „Karnöffel“, die unter anderem Schweine mit Fäkalhaufen darstellte. Abbildung 11 zeigt die entsprechenden Karten aus einer modernen, im Handel erhältlichen Nachbildung des Spiels. Die Art und Weise dieser Darstellungen trifft nicht mehr ganz den heutigen Humor, beschreibt aber genau das, was man in Blumenfeld findet.

Warum die Schweine im Schloss so dargestellt wurden, wissen wir nicht. Wir wissen auch nicht, ob sie einen Tag oder einen Monat vor Beginn der ersten Ausmalung des Gewölbes gezeichnet wurden. Wir können nur sagen, dass der oder die Zeichner:in



Abb. 9

Lokalisierung des Graffiti „Die Schweinchen von Schloss Blumenfeld“ im Gewölbe links von der Lichtnische (rote Pfeile), zum Teil unter grünem Malschichtfragment verborgen



Abb. 10

Das Graffiti „Die Schweinchen von Schloss Blumenfeld“, datiert auf die zweite Hälfte des 16. Jahrhunderts

mit der Schweinesymbolik vertraut war und damit vermutlich ein kleines Zeichen setzen wollte. Für die Untersuchung der Oberflächen in Raum 1.04 war der Fund des Graffitis von besonderer Bedeutung: Diese unscheinbare Skizze, die nach oberflächlicher Betrachtung anfangs als Kritzelei aus der Anstaltszeit des Schlosses angesehen wurde, gibt einen wichtigen Hinweis darauf, dass der getünchte Putz in die zweite Hälfte des 16. Jahrhunderts datiert werden kann – und stützt so zusätzlich die Datierung der ersten Malereiebene darüber.

5.3 Ab 1600: Zweite Ausmalungsphase

Rund um die Tür von Raum 1.04 und in der Laibung haben sich ebenfalls gelbe Maleriefragmente erhalten. Auf den ersten Blick mag man denken, dass diese Malereien mit den kleinen auf der Tonne zusammenhängen. Sie sind jedoch großformatiger, ohne schwarze Konturen, in einer Leimtechnik ausgeführt und mit einem breiten Pinsel gemalt. Dabei wurde anscheinend schluderig gearbeitet, sodass die Farbe nach allen Seiten gespritzt hat und viele gelbe Tropfen zu sehen sind. Die Malereien fassen das Türgewände ein und zeigen Voluten, Vögel (Haubentaucher), Blüten, Pyramiden mit Kugeln und Blumenvasen. Auch sie scheinen im Original farbige Akzente enthalten zu haben, von denen an der rechten Seite der Laibung noch ein paar Reste zu sehen sind.

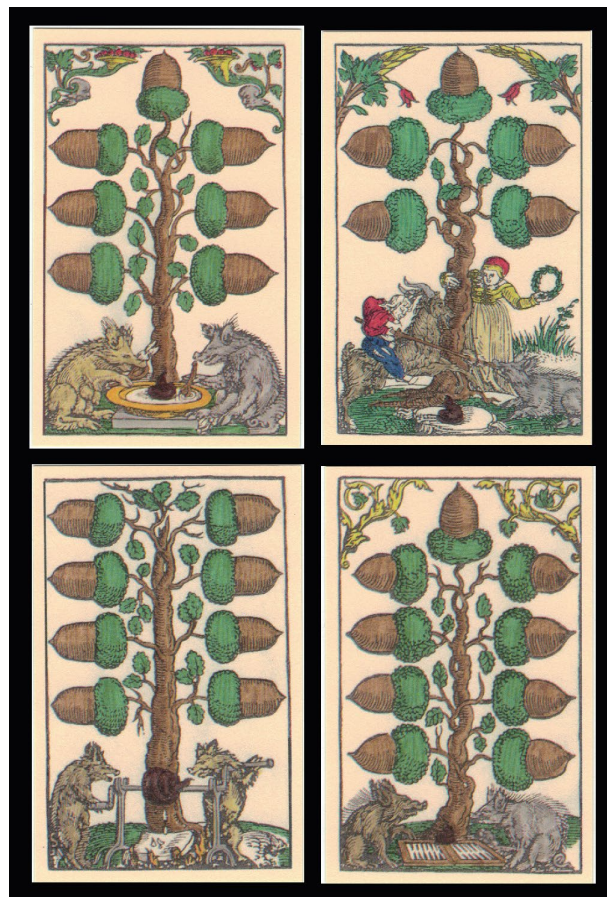


Abb. 11

Vier Karten mit Schweinemotiven aus einer Nachbildung des Kartenspiels „Karnöffel“, entworfen von Peter Flötner im Jahr 1545; Original zu sehen im Britischen Museum in London, England (Thomas Falke – Der Hoflieferant, Köthen)

Derzeit lässt sich nicht sagen, ob die Ausmalung um die Tür ein Pendant um das Fenster hatte. Ebenso ist unklar, ob sie damals gleichzeitig mit der ersten Ausmalung der Tonne zu sehen war oder ob Letztere hierzu bereits übertüncht worden war. Dafür in der Stratigrafie der zahlreichen Kalktünchen einen Beleg zu finden, ist schwierig, da die beiden Malereifragmente nicht direkt nebeneinander liegen. Doch die Untersuchungen sind noch nicht abgeschlossen und werden eines Tages vielleicht eine Antwort auf diese Frage liefern.

5.4 Um 1700: Eine weitere Malerei

Das nächste Fragment, das sich auf der Tonne in Raum 1.04 erhalten hat, ist eine laienhaft mit roten Linien gemalte Kartusche (Abbildung 12). Sie war nie farbig angelegt; hier gibt es tatsächlich nur die roten Linien. Die Kartusche ist mit drei Elementen ausgefüllt. Bekrönt wird sie von einem sogenannten Doppelkreuz, auch bekannt als Patriarchenkreuz, Crux Apostolica oder Päpstliches Kreuz. Es handelt sich um ein Kreuz mit zwei Querbalken, von denen der obere üblicherweise kürzer ist als der untere. Darunter befindet sich das Christusmonogramm „IHS“. Dieses leitet sich von den ersten drei Buchstaben der griechischen Bezeichnung für „Jesus“ ab, wobei es volksetymologisch auch als Abkürzung für den lateinischen Ausdruck „Iesus Hominum Salvator“ („Jesus, der Retter der Menschen“) gedeutet wird. Unten in der Kartusche schließlich sind die drei Buchstaben „HRD“ zu sehen.



Abb. 12

Kartusche mit Doppelkreuz und den zwei Monogrammen „IHS“ und „HRD“, datiert auf die Übergangszeit vom 17. zum 18. Jahrhundert

Sowohl das IHS-Monogramm als auch das Doppelkreuz sind sehr alte christliche Symbole. Im 17. Jahrhundert wurde das Doppelkreuz zudem in der Heraldik und Politik als Sinnbild für Autorität, Legitimität und das Konzept der Nation gebraucht. Daher hat die Kartusche zu der Annahme geführt, bei Raum 1.04 habe es sich früher um eine Kapelle gehandelt – ähnlich wie z. B. Weihekreuze vor allem in der römisch-katholischen Kirche die Konsekration von Gebäuden oder Gegenständen ausdrücken. Es ist anzunehmen, dass die Person, welche die Kartusche an die Wand gemalt hat, eine tiefe religiöse Verbundenheit empfunden hat.

Allerdings war der oder die Zeichner:in mit der Verwendung religiöser Symbolik wohl nicht ganz vertraut, denn die Darstellung enthält zwei Fehler. So steht im IHS-Symbol das Kreuz neben (statt wie üblich über) dem Buchstaben H, während im Doppelkreuz der untere Balken kürzer (statt länger) ist als der obere. Es handelt sich also nicht um die Kennzeichnung einer geweihten Raumfunktion, wie man es von Weihekreuzen her kennt, sondern um eine private Zeichnung. Vielleicht stellen die Buchstaben HRD ein Monogramm dar oder weisen auf ein besonderes Ereignis hin.

Die Kartusche lässt sich anhand der stilistischen Details gut in die Übergangszeit vom 17. zum 18. Jahrhundert datieren, besonders durch die schildähnliche Umrissform und das geknotete Tuch, das die Kartusche umrahmt. Für die Datierung der Kartusche gibt es noch einen weiteren Hinweis: Sie wurde wahrscheinlich vor 1700 gemalt, spätestens aber bis zum ersten Viertel des 18. Jahrhunderts, da die erste Übermalung mit einem blauen Pigment gemischt wurde, bei dem es sich vermutlich um das sogenannte Berliner Blau handelt. Dieses Pigment wurde erst 1704 entdeckt [2] und gibt somit bei Untersuchungen immer ein gutes Indiz für die Datierung einer Farbschicht.

6 Einfarbige Anstriche: Eine vielschichtige Stratigrafie aus drei Jahrhunderten

Bisher ging es bei der Betrachtung der Stratigrafie in Raum 1.04 vor allem um die bereits sichtbaren Malereifragmente und ihre Zuordnung zur Baugeschichte. Darüber haben sich aber viele Lagen einfarbiger Tünchen und Anstriche erhalten, deren Anzahl sich nicht ohne Weiteres ermitteln lässt und die bisher noch nicht bewertet wurden. Zudem wurden die Wände ab dem 19. Jahrhundert – bei der Einrichtung der Pflegeanstalt im Schloss – mit Öl- oder Harzölfarbe gestrichen. Hier über das Anlegen einer Schichtentreppe eine Stratigrafie zu ermitteln, ist aussichtslos. Die Verfasserin hat bei ihren Untersuchungen deshalb an verschiedenen Stellen der Wände kleine Schichtenpakete abgenommen und im Querbruch oder -schliff unter dem Mikroskop betrachtet. Es wurde eine Vielzahl von Schichten sichtbar; drei davon traten in den Proben immer wieder auf. Dazu gehörte auch die hellblaue Schicht, wie sie auf der rot gemalten Kartusche als erste Übermalung zu finden ist.

Ebenfalls bemerkenswert war ein Befund auf dem Türgewände. Das sehr umfangreiche Schichtenpaket hier enthielt in der untersten Schicht, direkt auf dem Sandstein,

wenige Partikel einer tief dunkelroten Fassung (Abbildung 13). Diese Fragmente einer wohl sehr alten Fassung des Gewändes lassen sich derzeit noch nicht in die chronologische Stratigrafie der gesamten Raumschale einordnen.

Es zeigte sich auch, dass das Schichtenpaket auf dem Gewölbe größer ist als das auf den Seitenwänden. Dies lässt darauf schließen, dass die Seitenwände nicht immer mitgestrichen wurden, da sie möglicherweise schon frühzeitig mit einem Täfer verkleidet oder verstellt waren. Die Mehrzahl der Schichten sind einfache Kalktünchen, manche mit deutlichem Schmutzhorizont. Sie variieren nur in der Färbung des Kalkes und wirken mal gelblicher, mal grauer.

Auffällig ist die in fast allen Proben auffindbare dünne hellblaue Schicht. Sie kommt auch in einer Probe vor, die unter einer Lichtnische an der Seitenwand entnommen wurde, und liegt hier auf einem getünchten, mit Tierhaaren armierten Ausbesserungsmörtel. Obwohl noch keine Pigmentanalyse der blauen Schicht vorliegt, gibt es berechtigte Hinweise darauf, dass es sich um Berliner Blau handelt, was für eine Datierung in das frühe 18. Jahrhundert sprechen würde: Einzelne, zum Teil recht große Pigmentpartikel zeigen die typische tief dunkelblaue Farbigekeit dieses Pigments, das dann als Farbgemisch hellblau wird. Ein Indiz für diese Zeitstellung ist auch der Mörtel, auf dem die Farbschicht in dieser Probe liegt und der mit Tierhaaren armiert wurde (Abbildungen 14 und 15).

Das Berliner Blau, auch Pariser oder Preußisch Blau genannt, wurde 1704 von dem deutschen Farbenhersteller Johann Jacob (oder Heinrich?) Diesbach durch Zufall entdeckt [2]. Als das erste synthetisch hergestellte Blaupigment machte es diese Farbe allgemein erschwinglich. Es entstand ein regelrechter Boom und Hellblau wurde zu einer „Trendfarbe“ des 18. Jahrhunderts. Hellblaue Anstriche waren zu Beginn dieses Jahrhunderts so beliebt, dass sie bei fast allen Untersuchungen von Bauwerken aus der Zeit gefunden werden. Es gibt viele prominente Beispiele dafür, seien es die

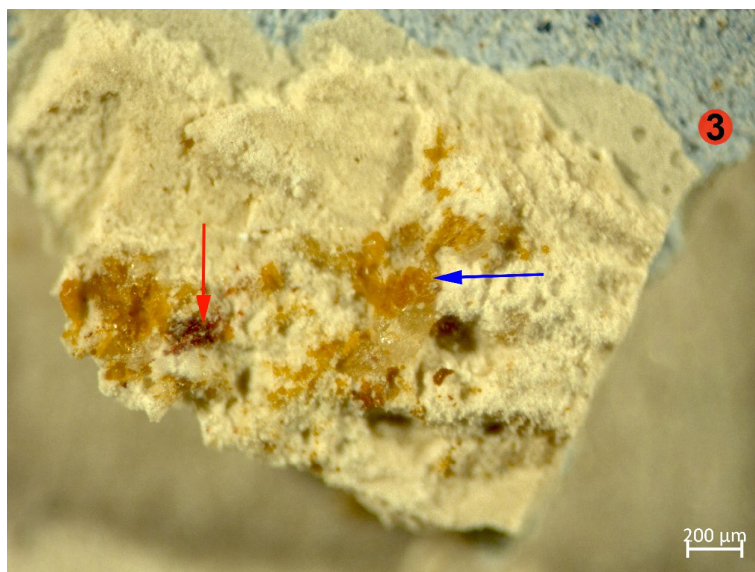


Abb. 13
Rückseite des Fassungspakets auf der Türleibung mit sehr kleinen Fragmenten einer ersten roten Fassung (roter Pfeil links), eingebettet in ein Bindemittel (blauer Pfeil mittig). Im Bruch ist auch die hellblaue Schicht zu sehen (roter Punkt 3 rechts).

mittelalterlichen Stuben des Humpis-Quartiers in Ravensburg, die Stuben von Bürgerhäusern in Überlingen oder das Kommandantenhaus in Flawil im Schweizer Kanton St. Gallen. An Schloss Blumenfeld ging dieser Trend offensichtlich nicht vorbei – und auch in Proben anderer Räume des Schlosses taucht die hellblaue Schicht auf.

Interessant sind in diesem Zusammenhang die Ergebnisse der neuen dendrochronologischen Beprobungen des Büros Winterfuchs. Zum ersten Mal wurden Hölzer datiert, die Umbauten im Schloss um das Jahr 1736 nahelegen. Mit diesem Geschehen könnte auch der hellblaue Anstrich aus den Proben von Raum 1.04 in Verbindung stehen. Somit wäre zudem erstmals für das 18. Jahrhundert eine farbige Gestaltung des Raums nachgewiesen, die sich möglicherweise in anderen Räumen des Schlosses wiederfinden lässt.

Abb. 14
Fassungspaket aus dem Gewölbe mit ca. 19 Schichten. Die Schicht 3 (hellblau) findet sich in fast allen Proben. Auch die Schichten 12 (hellgrau) und 15 (olivgrün) finden sich in vielen Proben im Gewölbe.

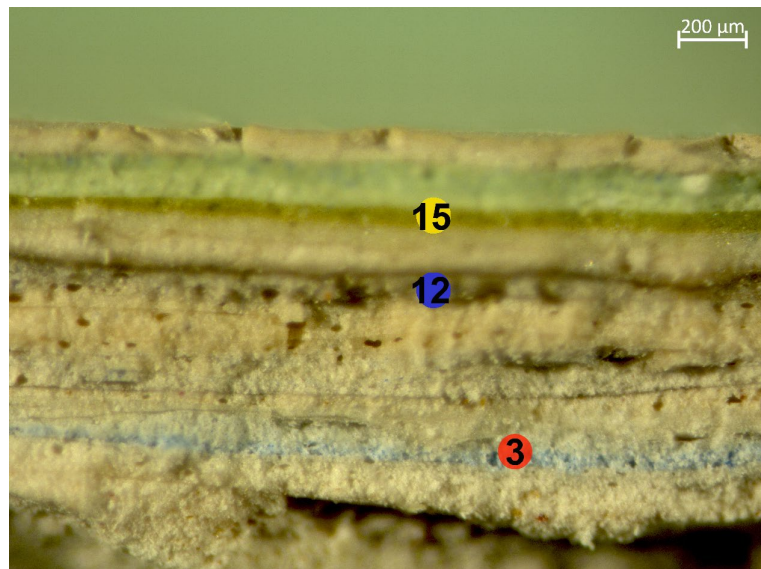


Abb. 15
Fassungspaket der Seitenwände unter der Lichtnische mit deutlich weniger Schichten (ca. 5 Schichten). Hier liegt das Hellblau (Schicht 3) auf Ausbesserungsmörtel mit Haarmarmierung.



7 Zusammenfassung und Ausblick

Der gewölbte Raum 1.04 mit dem Schweinchen-Graffiti in Schloss Blumenfeld hat durch feinstratigrafische restauratorische Untersuchungen ein Gesicht bekommen. War am Anfang durch die Bauforschung nur klar, wann der Raum entstanden ist, kann nun auch eine Aussage zu seiner wechsellvollen Gestaltung getroffen werden. Dabei bleiben Fragen offen, z. B. das Aussehen des Raums unmittelbar nach dem Bau. Spätestens aber für die Zeit ab der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts hat man jetzt eine gute Vorstellung davon. Der Raum war nachweislich lange Zeit ausgemalt. Diese Ausmalungen verschwanden im Laufe der Zeit unter zahlreichen Kalktüncheschichten. Das zeigt, dass der Raum genutzt und auch gepflegt wurde. Für den Beginn des 18. Jahrhunderts lässt sich der damalige Trend einheitlicher hellblauer Anstriche nachweisen – und für die Zeit der Nutzung des Schlosses als Anstalt wurden die Wände mit Öl- und Harzölfarben gestrichen, meist in Grün, was sicherlich einen hygienebedingten Grund hatte.

Die Untersuchungen des Raums 1.04 und des gesamten Schlosses sind noch nicht abgeschlossen. Für den Befund der blauen Farbe steht die Analyse aus, ebenso wie für die opake gelbliche Grundierung der ersten Ausmalung. Die Entdeckungen können jedoch auch als Grundlage für die Befundung anderer Räume des Schlosses dienen und somit die Erkenntnisse der Bauforschung zur Baugeschichte weiter ergänzen.

Literaturverzeichnis

- [1] Thiel, Erika: *Geschichte des Kostüms: Die europäische Mode von den Anfängen bis zur Gegenwart*. Berlin: Henschel Verlag, 1985, S. 201.
- [2] Jones, William Jervis: *Historisches Lexikon deutscher Farbbezeichnungen*. Berlin: Akademie Verlag, 2013, S. 344.

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1 Winterfuchs – Büro für Bauforschung, Denkmalpflege und Baukultur, Berlin
- Abb. 2 Thomas Blennemann, Blumenfeld
- Abb. 8 [1]
- Abb. 11 Nachbildung eines Kartenspiels von Peter Flötner (1545), erhältlich auf <https://www.hoflieferant.eu>, Artikelnummer 4008, Impressumsangabe: Thomas Falke – Der Hoflieferant, Köthen (Anhalt)

Alle weiteren Abbildungen stammen von der Verfasserin des Beitrags.

Helene Winker

BEFUNDUNTERSUCHUNGEN ALS GRUNDLAGE FÜR KALKSPATZENMÖRTEL

Praxisbeispiele aus der Denkmalpflege

DOI: 10.60628/9783738810493-229

Historische Putze sind zentrale Zeugnisse handwerklicher Baukultur. Ihre sorgfältige Untersuchung und Reproduktion ist daher entscheidend für denkmalgerechte Restaurierungsmaßnahmen. Dieser Beitrag erläutert den Prozess von der Analyse des Bestandsputzes bis hin zur Konzeption einer am Bestand orientierten Mörtelmischung. Der Fokus liegt dabei auf dem sogenannten Kalkspatzenmörtel – einer Mischung, die sich aufgrund ihrer hohen Beständigkeit an zahlreichen historischen Bauwerken erhalten hat. Das methodische Vorgehen wird anschließend anhand von fünf Denkmälern aus verschiedenen Epochen konkreter veranschaulicht. Diese Anwendungsbeispiele zeigen, wie individuell auf das jeweilige Gebäude abgestimmte Mörtelmischungen zum langfristigen Erhalt der Bausubstanz beitragen können.

1 Einleitung

Historische Putze stellen zentrale Belege handwerklicher Baukultur über die Jahrhunderte dar. Ihre Zusammensetzung, Schichtfolge und Bearbeitung liefern wertvolle Hinweise auf Bauphasen, Techniken und Materialtraditionen. Eine sorgfältige Untersuchung sowie eine möglichst genaue Reproduktion sind daher entscheidend für denkmalgerechte Restaurierungsmaßnahmen. Eine spezielle Mischung, die sich dank ihrer Beständigkeit an zahlreichen historischen Bauwerken erhalten hat, ist der sogenannte Kalkspatzenmörtel. Er entsteht durch die „trockenlöschende“ Herstellung von Branntkalk mit Sand und ist durch die enthaltenen Kalkknöllchen charakterisiert, die auch als „Kalkspatzen“ bezeichnet werden. Um historische Bausubstanz zu erhalten und zu erneuern, sind moderne Versionen des Putzes nach historischem Vorbild zu erstellen. Dieser Beitrag beschreibt das methodische Vorgehen zur Erfassung und Reproduktion des Bestandsputzes, das anschließend anhand von Praxisbeispielen veranschaulicht wird.

2 Erfassung und Analyse des historischen Putzbestands

Die erfolgreiche Aufnahme und Bewertung des historischen Putzbestands erfordert mehrere Schritte mit jeweils spezifischen Techniken. Nach ersten Quellenrecherchen wird der Bestand vor Ort untersucht und kartiert. Die Ergebnisse werden dokumentiert, um davon ausgehend ein Maßnahmenkonzept zu entwickeln und umzusetzen. Dies bildet die Grundlage für eine Analyse des Putzes am Objekt, eventuell unterstützt durch Laboruntersuchungen. Die einzelnen Schritte werden nachfolgend erläutert.

2.1 Recherchen

Informationen zum Putzbestand eines Gebäudes lassen sich aus verschiedenen Quellen gewinnen. Erste Erkenntnisse können sich durch die Sichtung von Archivalien und die Literaturrecherche ergeben: Unterlagen zur Bau-, Umbau- und Restaurierungsgeschichte lassen Rückschlüsse darauf zu, an welchen Gebäudeflächen oder -teilen welche Putzphasen vorliegen sollten. Konkretere Hinweise zu Material, Erscheinungsbild und Technik bieten gegebenenfalls historische Abbildungen oder Aufnahmen, Abrechnungen von Handwerksleistungen, Zeitungsartikel oder Korrespondenzen. Auch Dokumente zur Region können von Interesse sein, etwa bezüglich Kalkstein- und Sandvorkommen und deren historischen Abbaugebieten.

Sollten über das Gebäude selbst keine Unterlagen vorliegen, lassen sich seine Putzmaterialien und -techniken durch den historischen Zusammenhang eingrenzen. Beispielsweise können allgemeine Informationen zur historischen Mörtelherstellung, etwa aus Abbildungen, gegebenenfalls auf das Objekt übertragen werden.

2.3 Kartierung

Im nächsten Schritt der Erfassung des Putzbestands wird durch Kartierungen zeichnerisch festgehalten, welche Putzphasen in welchen Bereichen der Fassade vorkommen. Kartiert und beschrieben werden dabei neben dem Bestand selbst auch der Zustand und die Schäden (Abbildung 2). Dies fließt in die Entwicklung eines Maßnahmenkonzepts ein und wird während der Arbeiten um die Maßnahmenkartierung erweitert. Mit digitalen Kartierungen auf entzerrten, maßstabsgetreuen Bildplänen lassen sich die Themen detailliert darstellen und präzise verorten.

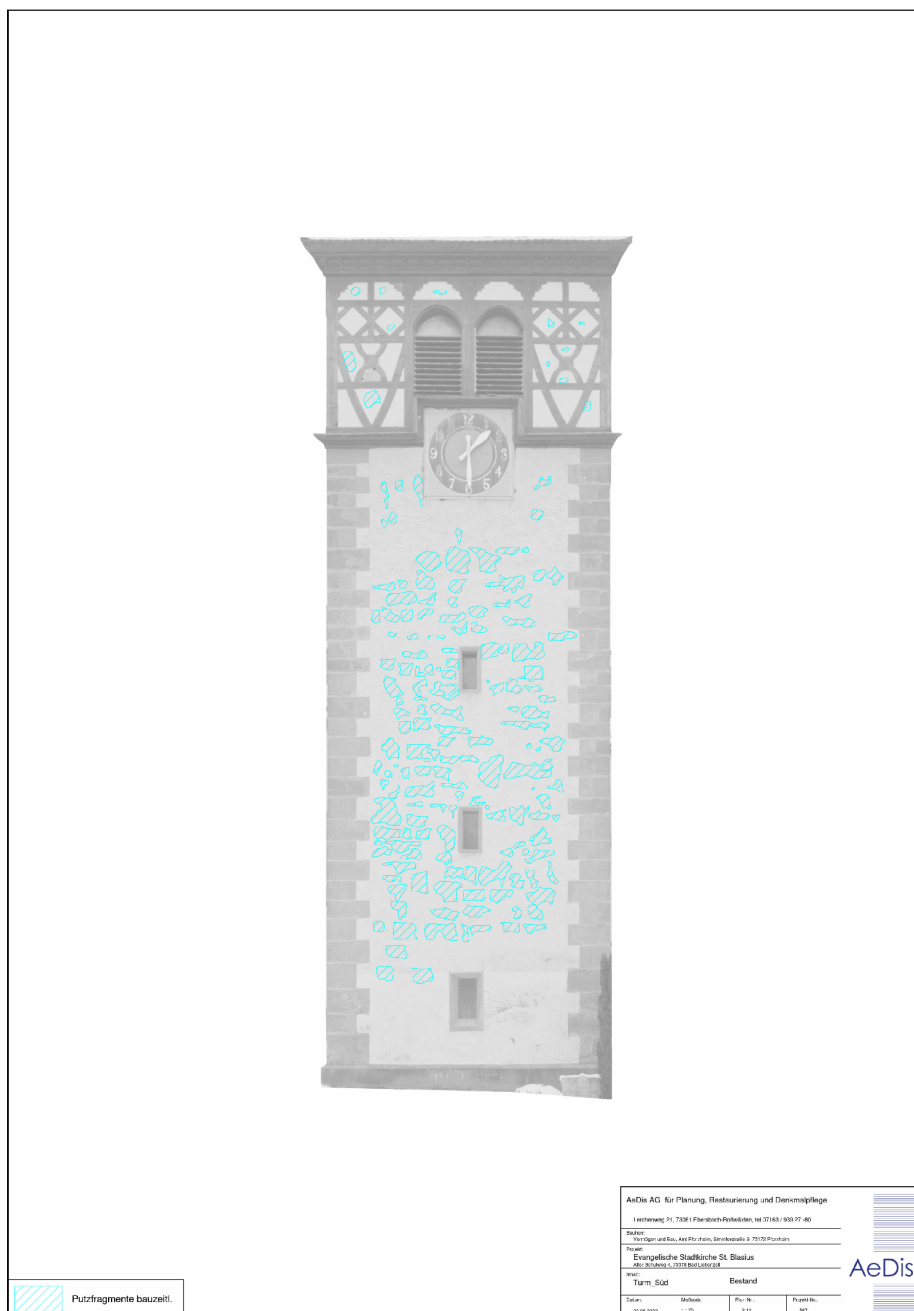


Abb. 2 Kartierung der bauzeitlichen Putzfragmente des Südturms der Kirche St. Blasius in Bad Liebenzell, als Teil des Maßnahmenberichts 2022 (AeDis AG)

2.4 Dokumentation

Ausgehend von den Erkenntnissen der oben beschriebenen Recherchen, Befunduntersuchungen und Kartierungen zum Putzbestand wird ein Maßnahmenkonzept entwickelt und umgesetzt. Im Anschluss werden die gewonnenen Erkenntnisse, das Konzept und die ausgeführten Maßnahmen in Berichten festgehalten. Diese bilden wiederum die Basis für zukünftige Instandhaltungs-, Restaurierungs- oder Bauforschungsprojekte am Gebäude. So können etwa Fotos und Kartierungen als Referenz für das Monitoring dienen. Gleichzeitig verhindert die genaue Erfassung von Art und Lage der historischen Putze oder Putzfragmente die Gefahr ihrer zukünftigen Zerstörung aus Unwissenheit. Weiterhin unterstützt die Niederschrift der verwendeten Techniken, Materialien und Rezepturen kommende Generationen beim Umgang mit den neueren Putzen, da bewährte Maßnahmen anhand der Beschreibungen wiederholt werden können.

2.5 Analyse vor Ort

Einige Methoden zur Putzanalyse lassen sich direkt am Objekt durchführen. Die gerundeten Kalkklümpchen etwa, die charakteristisch für einen Kalkspatzenmörtel sind, lassen sich mit bloßem Auge identifizieren (Abbildung 3). Auch weitere Parameter sind oft ohne weitere Hilfsmittel erkennbar, z. B. Korn- und Bindemittelfarbigkeiten, Korngrößen und -formen oder Zusätze wie Ziegelsplitt, Kohlestückchen und Fasern.



Abb. 3
Kalkspatzen in abgekelitem
Fassadenputz – Geislingen an der Steige,
Siechenkapelle, 2017 (AeDis AG)

Hilfsmittel unterstützen die Analyse vor Ort. So erleichtert Streiflicht die Ablesbarkeit der Oberflächenstruktur. Für eine bessere Vergleichbarkeit werden die Farbtöne in einem gängigen Farbsystem bezeichnet; sie lassen sich durch einen Farbfächer oder manchmal auch durch einen Farbscanner ermitteln. Zur genaueren Betrachtung können auf der Baustelle auch mobile Mikroskope eingesetzt werden, z. B. digitale USB-Mikroskope. Für UV-Licht-Aufnahmen stehen portable Geräte zur Verfügung, die Materialunterschiede, insbesondere organische Materialien, sichtbar machen. Der Einsatz der Geräte muss für gute Ergebnisse bei Dunkelheit erfolgen, im Baustellen-szenario also nachts.

Bestimmte Methoden erlauben es, die Eigenschaften des Putzes direkt am Objekt zu überprüfen. Die Härte eines Putzes oder Fugenmörtels kann durch den Ritztest abgeschätzt werden, wobei die Mohs'sche Härteskala als Orientierungshilfe dient. Um Kalk im Putz nachzuweisen, wird verdünnte Salzsäure auf eine kleine Stelle gegeben. Falls eine chemische Reaktion in Form von Aufbrausen bzw. Schaumbildung erfolgt, liegt Kalk vor. Je nach Kalksorte sind Besonderheiten zu beobachten oder die Methode kommt an ihre Grenzen, etwa bei Bindemittelmischungen oder wenn Kalk auch als Zuschlag – als Sandbestandteil – verwendet wurde. Dies ist bei der Ergebnisinterpretation miteinzubeziehen.

Die Bestimmung des quantitativen Kalkanteils erfordert die Entnahme einer Putzprobe. Die Probe ist vor und nach der Zugabe von verdünnter Salzsäure zu wiegen. Nachdem der Kalk vollständig aufgelöst wurde, wiegt man das verbleibende Festmaterial erneut. Handelt es sich – wie in den hier beschriebenen Beispielen – um reinen Kalkmörtel, dann hat sich das Bindemittel in der Regel zersetzt. Zurück bleiben der Sandzuschlag und gegebenenfalls Zusätze (Abbildung 4). Wenn die Stoffe von dem Bindemittel befreit sind, können die Erkenntnisse darüber vertieft werden. Beispielsweise sind Farbigkeit und Form der Körnung nun besser erkennbar.

Zusätzlich kann eine Sieblinie erstellt werden: Aussieben ermöglicht es, Kornfraktionen voneinander zu trennen und ihre mengenmäßige Verteilung festzustellen. Die einzelnen Kornfraktionen lassen sich wiederum in ihren Eigenschaften beschreiben (Abbildung 5).

2.6 Analyse im Fachlabor

Je nach Fragestellung ist es sinnvoll, neben der Putzuntersuchung auf der Baustelle auch Analysen in einem spezialisierten Fachlabor durchführen zu lassen und ergänzend zu berücksichtigen. Dies erweitert die diagnostischen Möglichkeiten und liefert präzisere, tiefgreifendere Erkenntnisse zu den Putzproben.

Zunächst einmal werden Untersuchungen in einem Labor unter kontrollierten Bedingungen ausgeführt, was die Reproduzierbarkeit und Genauigkeit der Ergebnisse verbessert. Darüber hinaus stehen Laboren erweiterte technische Möglichkeiten zur



Abb. 4
Zuschlag des Bestandsputzes nach
Auflösung des Kalkbindemittels (oben)
und Sandmuster für Neuputz (unten) –
Schwäbisch Hall, OT Steinbach,
St. Johannes Baptist, 2023 (AeDis AG)



Abb. 5
Kornfraktionen (links) und Putz-
proben (rechts) – Wasewitz,
evangelische Kirche, 2022

Verfügung. Beispielsweise lassen sich mit UV-Licht-Untersuchungen bestimmte organische Substanzen und Bindemittel besser identifizieren. Mikroskopische Analysen mit optischen Licht- oder Polarisationsmikroskopen erlauben eine höhere Vergrößerung und detaillierte Betrachtung des Probenmaterials (Abbildungen 6 und 7). Für besonders feine Strukturanalysen kann man Proben in Epoxidharz oder Cyclododecan einbetten und anschließend Anschliffe oder Dünnschliffe erstellen.



Abb. 6
Kornfraktion mit Holzstückchen,
Mikroskopaufnahme, 2022



Abb. 7
Putzprobe mit Kalkspatzen,
Mikroskopaufnahme mit Keyence-
Digitalmikroskop (Panoramafunktion),
2022

Weiterhin können Labore durch chemische Extraktionen bestimmte Bestandteile identifizieren, die auf der Baustelle schwer nachweisbar sind, etwa organische und silikatische Komponenten. Zusätzlich lassen sich mithilfe der Rasterelektronenmikroskopie (REM) und der energiedispersiven Röntgenspektroskopie (Energy Dispersive Spectroscopy, EDS) die Elementzusammensetzung einer Probe bestimmen und darstellen (Abbildung 8). Neu hergestellte Mörtelmuster können als Gegenprobe ebenfalls mit den beschriebenen Methoden analysiert werden.

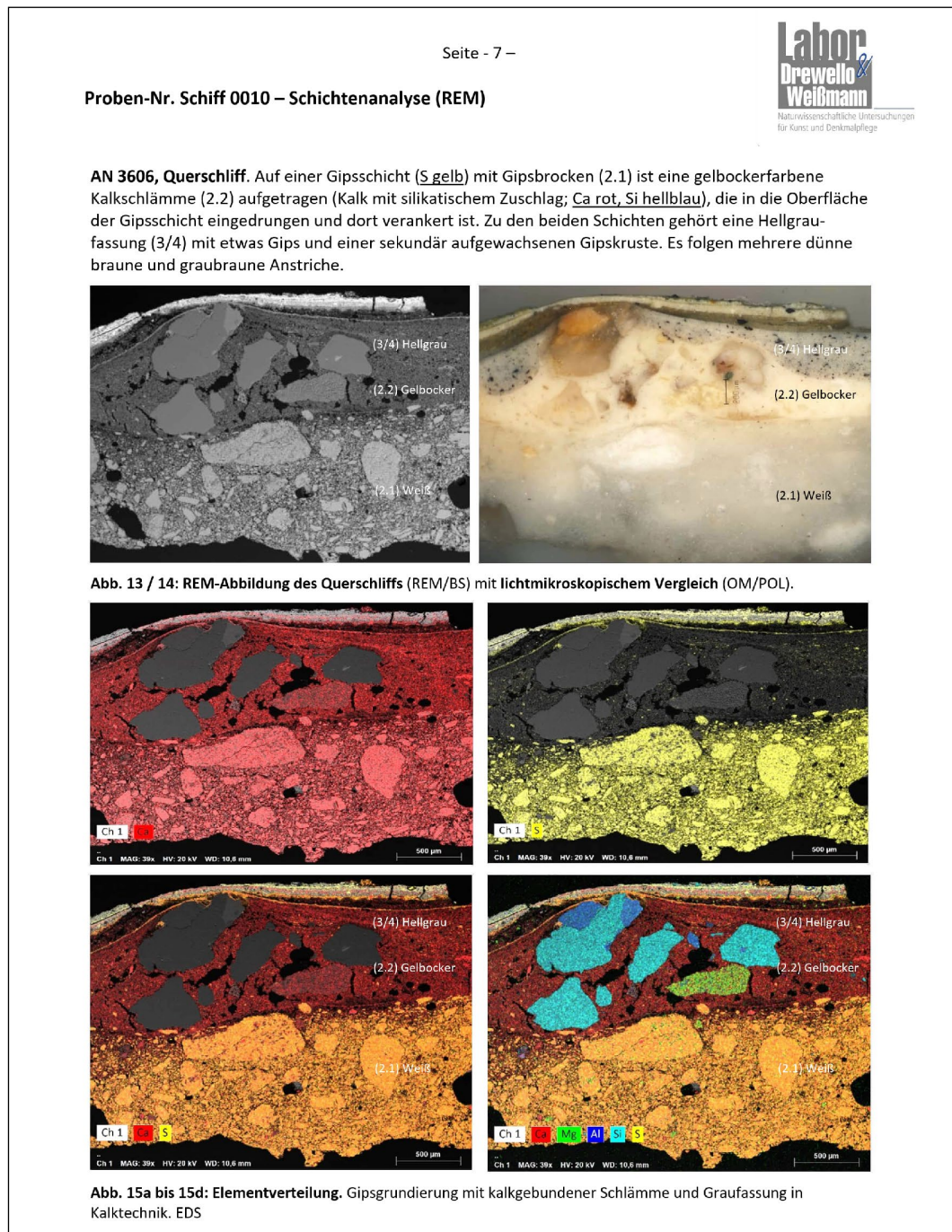


Abb. 8 Ausschnitt aus dem Analysebericht zu St. Johannes Baptist, Schwäbisch Hall, OT Steinbach, 2021 [1]

3 Konzipierung des am Bestand orientierten Kalkspatzenmörtels

Die Analyse des historischen Putzbestands ermöglicht es, einen daran orientierten Kalkspatzenmörtel zu entwickeln. Seine Grundbestandteile sind Sand und gebrannter Kalk in Form von Stückkalk. Für die Auswahl geeigneter Materialien und die Zusammensetzung des Mörtels gibt es einige Faustregeln. Als Basis sollte gewaschener Sand verwendet werden, um zu vermeiden, dass in der Mischung z.B. Salze oder tonige Anteile enthalten sind, die sich negativ auf die Haltbarkeit oder die technischen Eigenschaften des Putzes auswirken. Kleine Mengen tonhaltiger Sande können jedoch gegebenenfalls aus Gründen der Farbgebung hinzugefügt werden. Für ein stabiles Gefüge sind Sande mit gerundeter Körnung und gemischten Korngrößen empfehlenswert.

Für Kalkspatzenputze mit einer Schichtdicke von 2 bis 3 cm eignen sich aus technischer Sicht erfahrungsgemäß Sande mit einem Größtkorn von 2 bis 4 mm. Die Putzkörnung beeinflusst auch die Gestaltungsmöglichkeiten für die Oberflächenbearbeitung. Wird eine größere Körnung gewählt, gibt der Durchmesser des Größtkorns die kleinstmögliche Putzschichtdicke vor. Beispiel: Für eine angestrebte Putzschichtdicke von 2 cm muss ein Sand gewählt werden, dessen Größtkorn im Durchmesser 2 cm oder kleiner ist.

Das Mischungsverhältnis von Sand zu Stückkalk liegt grob bei 15 bis 18 Gewichtsanteilen Sand auf 1 Gewichtsanteil Stückkalk, kann aber je nach Aufgabenstellung stark variieren. Auf der Baustelle fällt die Arbeit in Raumteilen oft leichter: 10 bis 12 Raumteile Sand zu 1 Raumteil Stückkalk. Das Verhältnis von Gewicht zu Volumen hängt von der Größe der Kalkstücke ab, die je nach Bezugsquelle, aber auch je nach Charge variieren kann. In den hier vorgestellten Beispielen wurde der Stückkalk über den „Kalk-Laden Kenter“ in Güglingen bezogen [2].

Ein Putz oder Fugenmörtel sollte weicher als das vermauerte Gestein sein. Werden mehrere Schichten aufgebracht, sollte deren Härte identisch sein oder zum Deckputz hin abnehmend. Zur Modifizierung der Mörtелеigenschaften können weitere Zusätze beigelegt werden. So dienen z.B. Hanffasern als Rissarmierung und verbessern das Wasserrückhaltevermögen, während Ziegelmehl oder Ziegelsplitt eine hydraulische und farbgebende Wirkung haben können. Über das Mischungsverhältnis von Bindemittel und Zuschlägen wird die Härte des Putzes gesteuert und somit bedarfsgerecht auf die Härte des Bestandputzes bzw. des Mauerwerks abgestimmt.

Durch die vorangegangene Analyse des Bestandputzes liegen die Parameter für die Auswahl des Sandes vor. Sandproben werden mit den gleichen Methoden analysiert wie die Bestandputzproben, wobei die Ergebnisse einander gegenübergestellt werden. Der verwendete Sand sollte in seiner mineralischen Zusammensetzung sowie in den Kornformen, -farben und -größen mit dem Sand des Bestandputzes übereinstimmen. Der historisch verwendete Sand ist womöglich nur unter großem Aufwand oder gar nicht mehr zu beschaffen. Als Startpunkt für die Suche dient die Annahme,

dass das Material tendenziell aus der Region kam, um die Transportwege kurz zu halten. Archivrecherchen erschließen eventuell den Ort historischer Abbaustätten. Für die Mörtelherstellung sind aus den genannten Gründen vor allem Flusssande relevant.

Lässt sich der historische Sand nicht mehr beziehen, müssen eventuell mehrere Sande kombiniert werden, um sich dem Vorbild anzunähern. Die Kombination erfolgt entsprechend der Analyse. Ebenso verfahren wird mit Zusätzen wie Ziegelsplitt oder Fasern, die auch historisch gesehen nicht Bestandteil des Sandes waren, sondern erst später beigemischt wurden.

Der gebrannte Kalk variiert in der chemischen Zusammensetzung und Qualität. Dies ist abhängig von Faktoren wie dem verwendeten Kalkstein sowie der Brenntechnik und -temperatur. Wie beim Sand ist es unwahrscheinlich, dass ein Stückkalk bezogen werden kann, der präzise zu den Werten des analysierten Bestands passt. Dementsprechend sind bei der neuen Rezeptur gegebenenfalls mehrere Komponenten zu kombinieren, um die gewünschten Eigenschaften zu erhalten. Ein gängiges Beispiel ist die Beigabe eines kleinen Prozentanteils natürlich hydraulischen Kalkes.

Um die Verarbeitbarkeit, die technischen Eigenschaften und das optische Erscheinungsbild verschiedener Mischungen zu prüfen, werden sie in Probekörpern oder Musterflächen getestet (Abbildungen 9 und 10).



Abb. 9
Musterflächen mit unterschiedlichen Farbtönen bei gleicher Oberflächenbearbeitung – Geislingen an der Steige, Siechenkapelle, 2017 (AeDis AG)



Abb. 10
Musterflächen mit unterschiedlichen Oberflächenstrukturen bei gleicher Mörtelmischung – Schwäbisch Hall, OT Steinbach, St. Johannes Baptist, 2023 (AeDis AG)

Lagen in der Bestandserfassung Hinweise auf die historische Oberflächenbearbeitung vor, muss für die Nachbildung eine entsprechende Technik gefunden werden. Das Ergebnis hängt von mehreren Faktoren ab: der Struktur des Mörtels, den verwendeten Werkzeugen und der Technik sowie dem Zeitpunkt der Bearbeitung (Abbildung 10). Erfahrene Handwerker:innen erkennen, wie historische Oberflächen hergestellt wurden, und können diese nachbilden. Nicht selten ist die historische Putzoberfläche verloren. In diesem Fall wird die Wahl der Oberflächenbearbeitung für den Neuputz maßgeblich durch technische oder ästhetische Gründe beeinflusst.

4 Praxisbeispiele

Die vorigen Kapitel haben die Analyse von historischem Putzbestand erläutert und, darauf aufbauend, die Konzipierung des am Bestand orientierten Kalkspatzenmörtels. Dies wird anhand von fünf Praxisbeispielen konkreter illustriert.

St. Johannes Baptist in Schwäbisch Hall, OT Steinbach

Objekt	– Geweiht: 1156
	– Sakristei-Anbau: 1632
	– Bestandsputz wurde bei einer „Re-romanisierung“ im Jahr 1965 bis auf wenige Fragmente entfernt [3]
	– Zu Beginn der Maßnahme im Jahr 2023 vollkommen unverputzt

Ausführungsjahr	2023
-----------------	------

Maßnahmen und Methoden	– Ausbau des zementär gebundenen und salzbelasteten Fugenmaterials im Sockelbereich
	– Analyse des darunterliegenden Bestandsmörtels
	– Salzsäureauszug an einer Materialprobe zur Trennung von Bindemittel und Sand
	– Überarbeitung und Ergänzung der Fugen am Langhaus und Neuputz an der Sakristei, beides mit Kalkspatzenmörtel
	– Oberfläche nach Vorbild der Bestandsputzfragmente



Sakristei (Anbau links) mit neuem Fassadenputz, St. Johannes Baptist, Schwäbisch Hall, OT Steinbach, 2023 (AeDis AG)

Turm von St. Blasius in Bad Liebenzell

Objekt	– Mittelalterliche Bauteile: Chor, Sakristei, unterer Turmabschnitt
	– Oberer Turmabschnitt: 17. Jahrhundert
	– Langhaus und Oberflächen: 1891 stark überarbeitet
	– Letzte große Maßnahme: 1976 [4]

Ausführungsjahr 2020

Maßnahmen und Methoden	– Abnahme der schadhaften jüngeren Überputzung unter Berücksichtigung der darunterliegenden Reste historischer Putze
	– Zeichnerische und fotografische Dokumentation der älteren Putzphasen
	– Befunduntersuchungen
	– Neuputz mit Kalkspatzenmörtel (gefilzt, nicht gestrichen)



Turm mit neuem Fassadenputz, St. Blasius, Bad Liebenzell, 2020 (AeDis AG)

Siechenkapelle in Geislingen an der Steige

Objekt	– Ursprünge mindestens im späten Mittelalter
	– 1877: Entdeckung mittelalterlicher Wandmalereien im Innenraum [5]
	– 2017: Fassade war unverputzt

Ausführungsjahr 2017

Maßnahmen und Methoden	– Untersuchung des Bestandsmörtels unter der zementären Überarbeitung
	– Feststellung der Korngrößen, -rundung und -farbigkeiten vor Ort durch Ausmessen, Aussieben und Inaugenscheinnahme
	– Abstimmung des Mörtels auf das stark feuchte- und salzbelastete Objekt
	– Erprobung über Musterfelder
	– Vorverfugung mit Kalkspatzenmörtel
	– Salzreduzierungsmaßnahme am Mauerwerk
	– Flächiger Putz mit Kalkspatzenmörtel, abgekehlte Oberfläche, putzsichtig



Siechenkapelle mit neuem Fassadenputz nach einigen Monaten Standzeit, Geislingen an der Steige, 2017 (AeDis AG)

Münster in Rheinmünster, OT Schwarzach

Objekt

- Spätes Beispiel für Hirsauer Bauschule
- Entstanden zwischen 1140 und 1190 [6]

Ausführungsjahr 2024

Maßnahmen und Methoden

- Konservierung der Westfassade (Ziegel, Naturstein, Fugen)
- Zurückarbeitung jüngerer zementärer Fugen
- Entwicklung eines passenden Ersatzmaterials für die Ergänzungen, orientiert am darunterliegenden Bestandsmörtel
- Überarbeitung der Bestandsfugen im Ziegelmauerwerk des Giebfelds
- Ergänzung von Fehlstellen im Fugenbild der Sandsteinfassade



Münster mit eingerüsteter Westfassade, Rheinmünster, OT Schwarzach, 2024 (AeDis AG)

Kloster (Herrendorment und Kalefaktorium) in Maulbronn

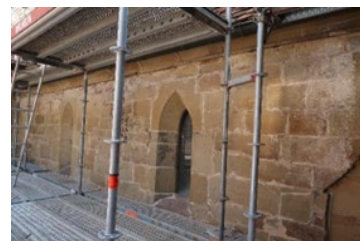
Objekt

- 1138–1147 vom Zisterzienserorden gegründet
- Seit 1993 UNESCO-Weltkulturerbe

Ausführungsjahr 2017–2019

Maßnahmen und Methoden

- Mörtelentwicklung auf Grundlage von (Archiv-)Recherchen, Befunduntersuchungen und Laboranalysen durch Restauratorin Alexandra Winkels [7]
- Ergänzung von Fehlstellen im Fugenbild mit Kalkspatzenmörtel, besonders in der Tiefenverfugung und bei breiteren Fugen



Kalefaktorium des Klosters Maulbronn mit ergänzten Fugen, 2019 (AeDis AG)

5 Fazit

Die gründliche Erfassung und Analyse von Bestandsbauten ermöglicht die Entwicklung eines passenden Restaurierungskonzepts. Fällt die Entscheidung auf die Verwendung eines Kalkspatzenmörtels nach historischem Vorbild, helfen die in diesem Bericht genannten Methoden dabei, die zur Entwicklung des Mörtels notwendigen Daten zu gewinnen. In der Praxis zeigt sich, dass viele Fragen direkt am Objekt und mit relativ einfachen Mitteln beantwortet werden können. Dabei lohnt sich eine sorgfältige Analyse, denn sie stellt sicher, dass der Neuputz den Charakter des Gebäudes nicht zu stark verändert. Gleichzeitig verhindert es Schäden, die durch Materialien mit ungeeigneten physikalischen oder chemischen Eigenschaften entstehen können. Das Resultat sind Kalkspatzenmörtel, deren technische und ästhetische Eigenschaften genau auf das jeweilige Gebäude abgestimmt sind. In der Nachbetrachtung der beschriebenen Projekte zeigt sich, dass sich diese Mörtel bewähren und so zum langfristigen Erhalt der Gebäude beitragen. Mit den digitalen und technischen Weiterentwicklungen lassen sich in Zukunft wahrscheinlich weitere Untersuchungsmethoden mobil nutzen und dadurch Prozesse vereinfachen sowie die Ergebnisse verbessern.

Literaturverzeichnis

- [1] Labor Drewello & Weißmann GmbH: Analysebericht AN 3606. Schwäbisch Hall, OT Steinbach, St. Johannes Baptist, Bamberg, 2021.
- [2] Kenter, Wolfgang: <https://stuck-kalk.de> und <https://www.kalk-laden.de/Beschreibungen-und-Anleitungen>.
- [3] Bückner, Steffen: SHA-Steinbach, Pfarrkirche St. Johannes Baptist, Vorprojekt zur Konservierung der Fassade Maßnahmenempfehlungen zu Stein, Putz und Fassungen, Teil 1: Fassade außer Turm, Stuttgart, 2020, S. 4.
- [4] Schorer, Fabian: Bad Liebenzell, Kreis Calw, ev. St. Blasiuskirche. Fassaden, Putzflächen, Fachwerk. Restauratorischer Befundüberblick. Restauratorisches Konzept für die Bearbeitung, Kusterdingen, 2015, S. 3–4.
- [5] Leonhardt, Hendrik: Kurzgutachten Bauforschung. Regierungspräsidium Stuttgart, Landkreis Göppingen. Geislingen, Stuttgarter Straße 352. Ehem. Siechenkapelle, Göppingen, 2012, S. 1.
- [6] Vermögen und Bau Baden-Württemberg, Amt Pforzheim: Leistungsbeschreibung RHM-Schwarzach, kath. Kirche, Pforzheim, 2024, S. 3.
- [7] Winkels, Alexandra: Kloster Maulbronn. Die Konservierung der Putze und Fassungen an der Ostfassade des Herrendorments, Freiburg, 2014.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1, 2, 3, 4, 9, 10 und Abb. in den Tabellen

AeDis AG für Planung, Restaurierung und Denkmalpflege, Ebersbach-Roßwälden

Abb. 8 [1]

Alle weiteren Abbildungen stammen von der Verfasserin des Beitrags.

Dorothea Roos und Christoph Duppel

DAS BAUHAUSGEBÄUDE IN DESSAU

Ein Denkmal der Moderne
erforschen und erkunden

DOI: 10.60628/9783738810493-245

Das Bauhausgebäude in Dessau zählt zu den bedeutendsten Bauten der Moderne. 1925/26 durch das Baubüro von Walter Gropius geplant und realisiert, gilt es als „gebautes Manifest der Bauhaus-Idee“. Es wurde 1996 von der UNESCO als erstes Denkmal der Moderne in die Liste der Welterbestätten aufgenommen. Im Rahmen eines Forschungsprojekts erfolgt derzeit eine ganzheitliche Erkundung und bautechnische Bewertung des Werkstattflügels dieses ikonischen Gebäudes. Der Beitrag beschreibt die methodischen Ansätze und ersten Ergebnisse der Erkundung der Massivbauteile sowie der Glasfassade. Er zeigt, dass das Projekt auf einer interdisziplinären Verzahnung von Wissenschaft und Praxis basiert und damit als ganzheitliche Modellstudie zum denkmalgerechten Umgang mit herausragenden Baudenkmälern der Moderne verstanden werden kann.

1 Zum Werkstattflügel des Bauhausgebäudes

Der Werkstattflügel ist im Südwesten des Bauhausgebäudes gelegen (Abbildung 1). Seine Abmessungen im Grundriss betragen ca. 46×15 m. Über einem Sockel- und einem erhöhten Erdgeschoss befinden sich zwei Obergeschosse. Das Gebäude ist in Mischbauweise ausgeführt; die wesentlichen Materialien sind Beton, Metall und Glas [1–4]. Die Tragstruktur ist eine Skelettkonstruktion aus Stahlbeton (zur Zeit der Erbauung noch „Eisenbeton“ genannt), mit Ausfachungen aus Ziegelmauerwerk. Das Haupttragwerk über dem Erdgeschoss und den beiden Obergeschossen wird durch Rahmentragwerke gebildet (Achsmaß 5 m): Rahmenriegel spannen in Gebäudequerrichtung und lagern auf zwei eingerückten Fassadenstützen sowie einer Mittelstütze (Abbildung 2). Die Verbindung des Riegels mit den Rahmenstützen ist monolithisch ausgeführt und gevoutet. Zwischen den eingerückten Fassadenstützen und der Fassadenebene kragen in Verlängerung des Rahmenriegels Betonkonsolen aus. Die Massivdecken spannen zwischen den Rahmenriegel in Gebäudelängsrichtung und sind als „Steineisendecken“ (Betonrippendecken mit Ziegelhohlkörpern, System Ackermann) ausgeführt [1, S. 15]. Über dem Sockelgeschoss befindet sich eine Pilzdecke.

Das Eisenbetontragwerk und die „Steineisendecken“ von 1925/26 sind größtenteils erhalten geblieben. Allerdings erfolgten nach 1945 verschiedene, zum Teil erhebliche Eingriffe in die Substanz. Dies betraf auch das herausragendste Element des Werkstattflügels: die an drei Seiten vorhandene und über drei Geschosse reichende Glasfassade. Sie bestand ursprünglich aus Stahl mit vertikalen Tragprofilen, die am Attikabalken „aufgehängt“ und vor den Geschossdecken verankert waren. Die Verwendung von Kristallspiegelglas ermöglichte eine klare und verzerrungsfreie Durchsicht. Gleichzeitig versprachen die im Vergleich zu üblicher Einfachverglasung dickeren Scheiben einen gewissen Schall- und Wärmeschutz.



Abb. 1
Werkstattflügel des
Bauhausgebäudes

Die Vorhangsfassade konnte nach einem Kriegsschaden nicht gehalten werden. Die heute existierende Glasfassade stellt eine Rekonstruktion von 1975/76 dar. Sie besteht aus Aluminium mit einer Einfachverglasung aus Floatglas. Die tragenden Elemente der Fassade sind U-Profile aus Stahl und T-Profile aus Aluminium. Jeweils sieben T-Profile sind zu einem Segment zusammengefasst und links und rechts von einem U-Profil angeordnet. Der Rasterabstand zwischen den T-Profilen beträgt ca. 61 cm. Die Glasflächen haben dementsprechend Abmessungen von ca. 61 × 33,5 cm.

2 Zum Forschungsprojekt

Die Fassade des Werkstattflügels weist heute baukonstruktive Defizite auf. Die Verformungen und Risschäden an den angrenzenden Betonbauteilen wurden zunächst ingenieurtechnisch überwacht, doch es zeigte sich die Notwendigkeit einer fundierten Erkundung. Daher ist der Werkstattflügel derzeit Gegenstand eines durch die Stiftung Bauhaus Dessau und die Wüstenrot Stiftung ausgelobten und geförderten „Forschungsprojekts zum denkmalgerechten Umgang mit dem Werkstattflügel des Bauhausgebäudes in Dessau“. Ziel des Projekts ist es, für das Gebäude Nutzungs- und Sanierungslösungen zu entwickeln, die sowohl denkmalpflegerische als auch ökonomische, ökologische und soziale Anforderungen erfüllen. Die Prämisse dabei lautet, nicht das Gebäude an eine gewünschte zukünftige Nutzung anzupassen, sondern seine Nutzung an den baulichen Gegebenheiten und denkmalpflegerischen Anforderungen auszurichten.

Dieser Prozess verlangt sowohl eine stufenweise Herangehensweise als auch, damit verbunden, einen direkten interdisziplinären Austausch zwischen allen relevanten Fachdisziplinen. Entscheidend bei dem stufenweisen Vorgehen ist die Definition thematischer Zwischenschritte, die das Projektteam regelmäßig bespricht, überprüft und

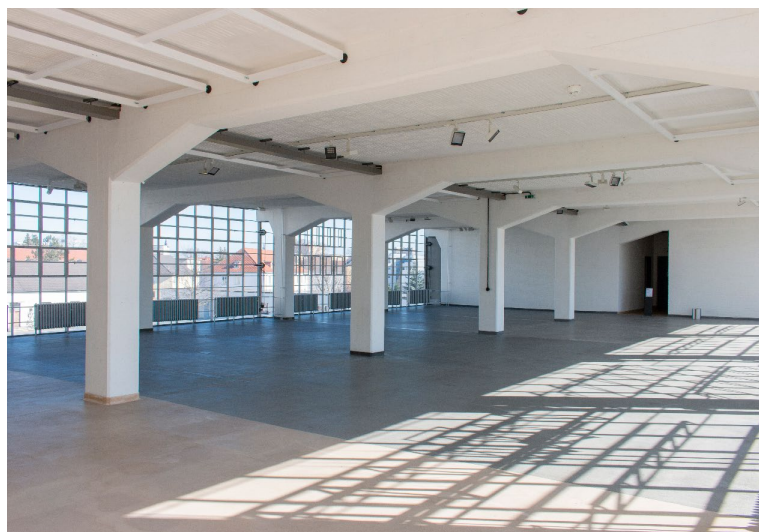


Abb. 2
Blick in den Werkstattflügel, mit Rahmenriegeln in Gebäudequerrichtung (1. Obergeschoss)
(Stiftung Bauhaus Dessau)

gegebenenfalls anpasst. Die Reflexion der Methoden und Zwischenergebnisse sowie die gezielte Erarbeitung und eventuell Anpassung der folgenden Schritte – all dies ist grundlegend für eine denkmalgerechte, fokussierte und damit auch wirtschaftliche Projektdurchführung. Der enge und unmittelbare Austausch aller Projektbeteiligten wiederum gewährleistet die gewünschte Verzahnung von wissenschaftlichen Forschungen einerseits und den Ergebnissen praktischer Erkundungen vor Ort andererseits. Weiterhin entsteht durch das gezielte Zusammenführen vorhandener und neuer Erkenntnisse ein ganzheitliches Bild des Werkstattflügels.

Während die beschriebene Herangehensweise im wissenschaftlichen Kontext durchaus üblich ist, erweist sie sich im praktischen Umgang mit Baudenkmalern oft als schwieriger. Gerade bei Denkmälern in der Verwaltung der öffentlichen Hand ist eine – auch zeitlich – flexible, situative Anpassung von Leistungen eher nicht vorgesehen. Da Aufträge vergaberechtlich auf im Vorfeld festgesetzten Leistungsbeschreibungen (und daraus abgeleiteten Auftragswertschätzungen) basieren, sind Abweichungen hiervon nur begrenzt möglich. Im Allgemeinen steht jede beauftragte Einzelleistung für sich allein. Ein interdisziplinärer Diskurs und eine von Befunden geleitete Vorgehensweise, bei der auch kurzfristig erforderliche weitere Fachkompetenzen hinzugezogen werden können, ist durch die Auftraggeber:innen zu moderieren.

Beim Werkstattflügelprojekt wird diese Vorgehensweise durch die Partnerschaft mit der gemeinnützig tätigen Wüstenrot Stiftung möglich. Eine Stärkung der HOAI-Leistungsphasen 0 und 1 ist für die Erhaltung historischer Baubestände essenziell, da eine genaue und forschungsbasierte Kenntnis des Objekts eine ökonomische Investition in dessen Zukunft ist.

3 Grundlagenermittlung und Bestandsbewertung

Auch wenn das Werkstattflügelprojekt spezifische Charakteristika und Rahmenbedingungen aufweist, kann es als Modellstudie zum Umgang mit vergleichbaren Baudenkmalern verstanden werden. Die folgende Darlegung der Herangehensweise und einiger Inhalte lassen sich durchaus auf eine Vielzahl von Bauten der Moderne übertragen. Ein historisches Bauwerk umfassend zu kennen und zu verstehen, bildet die Voraussetzung für einen angemessenen und denkmalgerechten Umgang damit. Dieser Prozess wird oft in drei grundlegende Schritte unterteilt [5–6]:

- Informationen *über* das Bauwerk;
- Beobachtungen *am* Bauwerk;
- Eingriffe *in* das Bauwerk.

3.1 Informationen über das Bauwerk

Der erste Schritt, um ein historisches Bauwerk zu erfassen, besteht darin, Informationen darüber zu sammeln – über seine Konstruktionsweise, Materialien und Bau- und

Nutzungsgeschichte. Die Quellen hierfür können aus unterschiedlichen Phasen des Objektlebenszyklus stammen und in Schrift- oder Bildform vorliegen, etwa Dokumentationen, Planunterlagen oder Fotos. Die Erkenntnisse sind zu erfassen, zu ordnen, miteinander zu verknüpfen, kritisch zu bewerten und zu dokumentieren.

Die Archivbestände für das Bauhausgebäude sind umfangreich, jedoch für manche Zeitabschnitte lückenhaft. Grund ist zum einen die herausragende Bedeutung des Objekts, zum anderen seine wechselvolle Geschichte. Die zentrale Herausforderung bei der Archivarbeit liegt deshalb darin, die verschiedenen Bestände alle zu sichten und die Informationen zu einem ganzheitlichen Bild zusammenzufügen.

3.2 Beobachtungen am Bauwerk

Parallel dazu erschließen genaue Beobachtungen das Bauwerk selbst als Informationsquelle. In diesem Zuge wurde eine vollständige formgetreue Bauaufnahme des Werkstattflügels angefertigt (Maßstab 1:50). Sie ergänzt die vorhandenen Planunterlagen sowie Aufnahmen und ist Grundlage für die weitere Dokumentation und Planung. Eine konstruktive Baubeschreibung dient der fachlichen und begrifflichen Erfassung des vorgefundenen Zustands. Auf Grundlage der Ergebnisse der Archivrecherche und der Bauaufnahme, kombiniert mit ergänzenden Erkundungen, werden die baulichen Merkmale des Werkstattflügels – d.h. Konstruktion, Bautechnik und Materialität – umfänglich beschrieben.

3.3 Eingriffe in das Bauwerk

Durch punktuelle Eingriffe in das Bauwerk können weitere Fragen zum Bau- und Materialgefüge beantwortet werden. In Bezug auf den Werkstattflügel geht es einerseits um die Erfassung des materiell-konstruktiven Gefüges (z.B. der Deckenaufbauten), andererseits um eine zeitliche Einordnung der aus unterschiedlichen Bau- bzw. Sanierungsphasen stammenden Bauteile.

Bei der Wahl der Methoden für entsprechende Eingriffe ist zwischen Substanzverlust und Erkenntnisgewinn abzuwägen. Eine Minimierung der Eingriffe wird durch ein Vorgehen in kleinen Arbeitsschritten und eine sorgfältige, umfassende Vorbereitung möglich. So ließen sich etwa bei der Erkundung der Fassadenanschlüsse im Werkstattflügel die an den Massivbauteilen erforderlichen Fassadenöffnungen von acht geplanten auf eine reduzieren. Auf das ursprünglich angedachte Lösen der Verbindungsmittel konnte in der Folge ganz verzichtet werden.

Die dreistufige Bauwerkserfassung – Recherchen, Erkundung, Eingriffe – erlaubt eine fundierte Bestandsbewertung. Im Falle des Werkstattflügels konnten die Ursachen der vorhandenen Schäden dargestellt werden, insbesondere aber die bautechnischen Möglichkeiten und Grenzen in Bezug auf Tragfähigkeit, Bauphysik und Brandschutz.

4 Erkundung der Fassade: Erste Ergebnisse

Die gläserne Vorhangfassade des Werkstattflügels ist zweifelsohne das herausragende gestalterische Element des Bauhausgebäudes (Abbildung 1). Wie bereits in Kapitel 1 dargelegt, handelt es sich bei der heutigen Fassade um eine Rekonstruktion aus dem Jahr 1975/76. Rissbildungen an den Konsolen des Massivbaus (Abbildung 3) geben Grund zur Annahme, dass im Anschlussbereich zwischen Vorhangfassade und Massivbau Kräfte auftreten, die zu einer Spannungsüberschreitung führen. Die Ermittlung und Beseitigung der Ursache dieser Überschreitung ist ein maßgebliches Thema des Forschungsprojekts.

In Anlehnung an die beschriebene stufenweise Herangehensweise zur Grundlagenermittlung und Bestandsbewertung wurden folgende Schritte ausgeführt:

Schritt 1: Informationen über das Bauwerk

- Sichtung der Planunterlagen aus dem Jahr 1976: Der nahezu vollständige Plansatz aus der Zeit der Fassadenrekonstruktion gab wichtige Hinweise zu der damals vorgesehenen Ausführung der Anschlussdetails (Abbildung 4).
- Recherche zu den verwendeten Materialien: Die erlangten Kenntnisse ermöglichten eine Bewertung der Fassade hinsichtlich der Parameter Wärmedehnung und Tragfähigkeit.

Schritt 2: Beobachtungen am Bauwerk

- Durchführung eines Rissmonitorings: Hierbei ergaben sich Hinweise zu den Bewegungen der Fassade in Abhängigkeit von den herrschenden Temperaturen.



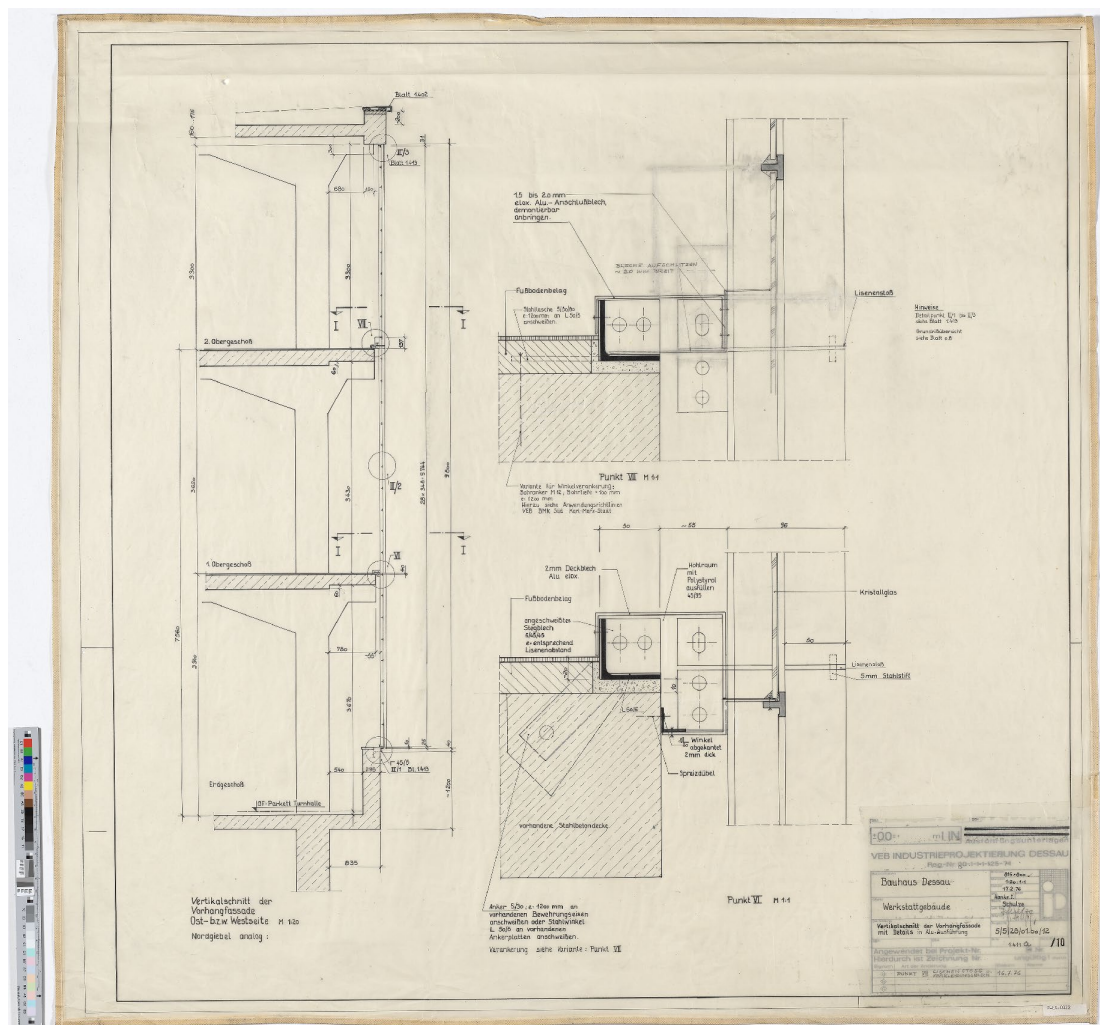
Abb. 3
Rissbildung an
den Konsolen im
Anschlussbereich der
Vorhangfassade

Abb. 4 Vertikalschnitt der Vorhangsfassade mit Anschlussdetails an den Massivbau, VEB Industrieprojektierung Dessau, Stand 16.07.1976 (Stiftung Bauhaus Dessau)

- Optische Bewertung aller Anschlusspunkte: Dabei zeigte sich, dass – anders als in den Planunterlagen vorgesehen – viele unterschiedliche Detailvarianten ausgeführt wurden (Abbildung 5).
- Zerstörungsfreie geophysikalische Erkundungen des Anschlussbereichs Fassade-Massivbau: Dies erlaubte gesicherte Aussagen zur konstruktiven Ausbildung der Anschlusssituation und der bewehrungstechnischen Ausbildung des Deckenrands.

Schritt 3: Eingriffe in das Bauwerk

- Herstellung einer Fassadenöffnung: Mithilfe eines Gerüsts wurde die Verglasung an einer repräsentativen Stelle temporär entnommen, um unmittelbare Einsicht in den Anschlussbereich zu erlangen (Abbildung 6).



Durch die genannten Erkundungen und folgenden Bewertungen ließ sich die Ursache der Rissbildungen zweifelsfrei ermitteln: Das als Werkstoff für die Fassadenprofile im Jahr 1976 eingesetzte Aluminium besitzt einen wesentlich höheren Wärme-dehnungskoeffizienten als die bauzeitlichen Stahlprofile. Verschiebliche Anschlüsse an den Deckenrändern zur Aufnahme der Temperaturdehnungen wurden zwar planerisch vorgesehen, kamen jedoch nicht zur Ausführung. Maßtoleranzen am Massivbau führten dazu, dass nahezu jeder Anschlusspunkt an die örtliche Situation angepasst und eine Verschieblichkeit in den wenigsten Fällen gegeben war. Aus der nicht gegebenen Beweglichkeit resultierten Zwangskräfte und das beschriebene Rissbild.

Bemerkenswert bei der Erkundung der Fassade waren weniger die einzelnen Methoden als die übergreifende Herangehensweise. Diese war geprägt durch den unmittelbaren, interdisziplinären Austausch aller Beteiligten, die Expertise der konsultierten Firmen und Handwerker:innen und das Vorgehen in kleinen Untersuchungsschritten, die an die jeweilige Situation und den gewünschten Erkenntnisgewinn angepasst waren. In Summe wurde dadurch ein zieladäquates und wirtschaftliches Ergebnis erreicht.



Abb. 5
Fassadenanschlüsse
in unterschiedlichen
Ausführungen

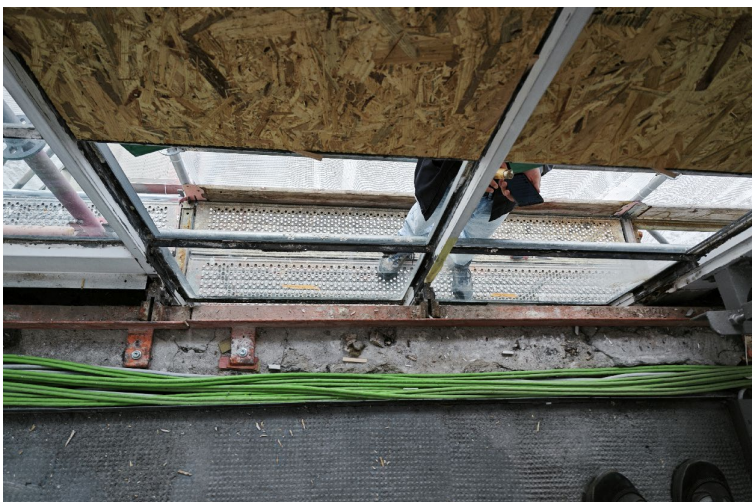


Abb. 6
Öffnung der Glasfassade
im Anschlussbereich
zum Massivbau (Stiftung
Bauhaus Dessau)

5 Erkundung der Massivbauteile: Erste Ergebnisse

Die Erkundung der „Steineisendecken“ und der Stahlbetonstützen wurde ebenfalls in interdisziplinärer Zusammenarbeit aller Planungsbeteiligten ausgeführt. Neben der Sichtung der Bestandsunterlagen aus den Archiven der Stiftung Bauhaus Dessau erfolgte die Bauteilerkundung durch eine Kombination aus zerstörenden Methoden – in Form von Erkundungsöffnungen – und zerstörungsfreien geophysikalischen Verfahren. Letztere wurden in Zusammenarbeit mit der Gesellschaft für Geophysikalische Untersuchungen (GGU) in Karlsruhe realisiert und beschränkten sich im Wesentlichen auf die beiden Methoden Radar und Ultraschall:

- Für die Radarmessungen kam die hochauflösende Georadarapparatur „GSSI Sir-4000“ zum Einsatz. Bei der Radarantenne handelte es sich um einen hochfrequenten 2-GHz-Sensor (Abbildung 7).
- Die Ultraschall-Transmissionsmessung wurde mit dem Gerät „Proceq Pundit PL-200“ durchgeführt (Abbildung 8).



Abb. 7
Radarmessung an den
Massivdecken des
Werkstattflügels



Abb. 8
Ultraschallmessung an
einer Massivstütze des
Werkstattflügels

5.1 Erkundung der Geschossdecken mittels Radar

Bei den Massivdecken des Werkstattflügels handelt es sich um 1925/26 eingebrachte Rippendecken mit Hohlkörpern („Steineisendecken“) nach dem System Ackermann (Abbildung 9) [7, S. 111, Taf. 41]. Die genauen Aufbauhöhen waren zunächst unbekannt. Zur Bestimmung der aktuellen Tragfähigkeit galt es, diese und den Grad sowie Verlauf der Bewehrung zu erkunden. Unter Einsatz des hochauflösenden 2-GHz-Sensors wurden mehrere Messprofile – sowohl quer zur Deckenspannrichtung (A-A', B-B') als auch parallel dazu (C-C') – erstellt und in Form sogenannter Radargramme grafisch aufbereitet (Abbildung 10).

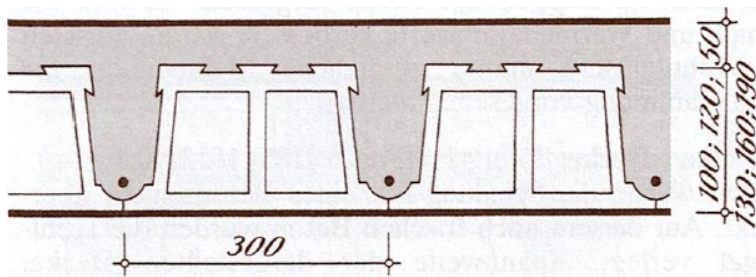


Abb. 9
Prinzipskizze der
Ackermann-Decke
[7, S. 111, Taf. 41]

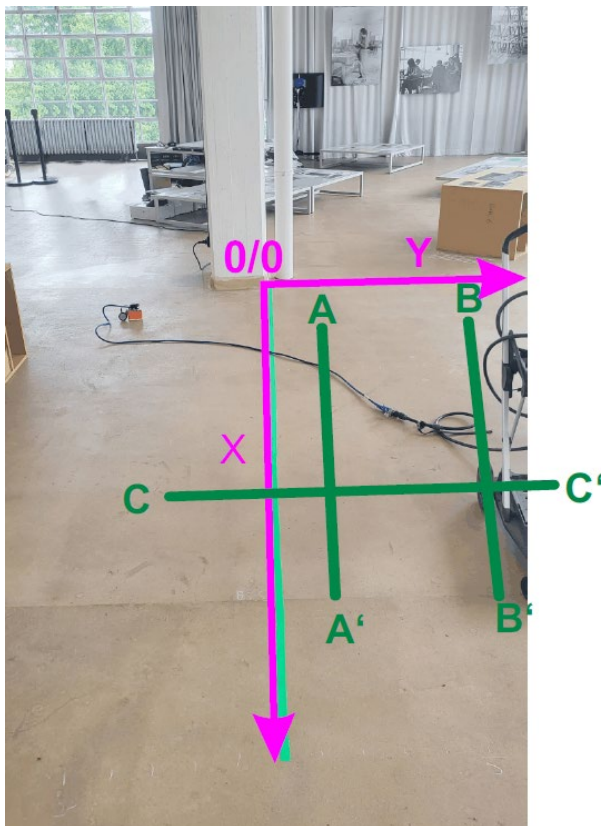


Abb. 10 Bauradarmessung zur Bestimmung von Struktur und Bewehrungsverlauf der Geschossdecken – Messbereich mit Lage der Beispielradargramme ist markiert (GGU, Karlsruhe)

Die wichtigsten Erkenntnisse der Radarmessungen an den Massivdecken lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Der Verlauf der Bewehrung in Deckenspannrichtung konnte eindeutig bestimmt werden (Abbildung 11 (1)). Die Radardaten zeigten die typischen Diffraktionshyperbeln, wie sie durch Reflexion an Bewehrungsstäben entstehen. Jeweils im Scheitel einer Hyperbel liegt ein Eisen. Die redundante Messung ermöglichte es, den Verlauf der einzelnen Eisen zu rekonstruieren. Es stellte sich heraus, dass jedes zweite Eisen der Deckenhauptbewehrung aufgebogen ist.
- Die Radarmessungen in Spannrichtung der Decke zeigten die erwarteten Strukturen wie aufgebogene Eisen oder die Deckenunterseite (Abbildung 11 (2)). Es ergaben sich jedoch keine Hinweise auf eine in der Druckplatte angeordnete Querbewehrung.
- Die Messungen erbrachten außerdem Informationen zur Geometrie der verwendeten Hohlkörper und zur Gesamtdeckenstärke.

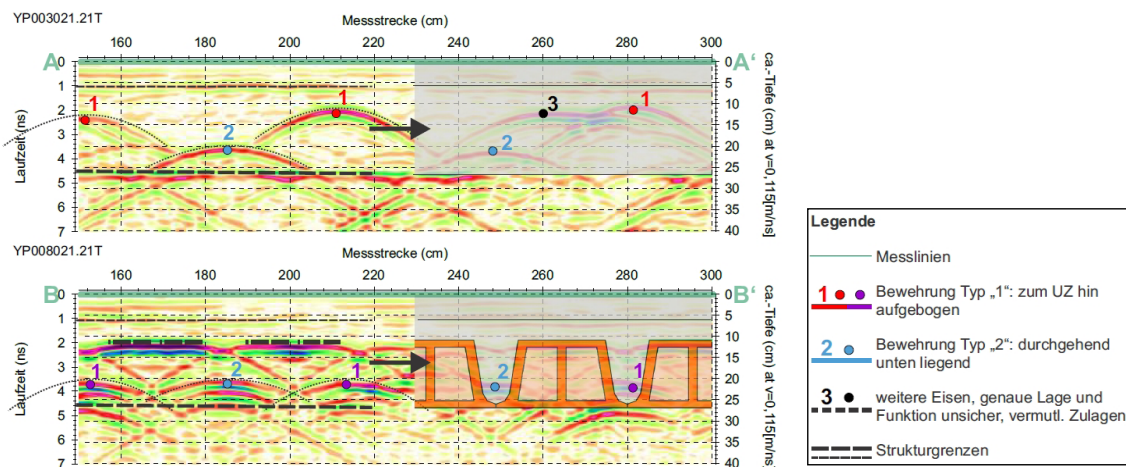


Abb. 11 (1): Radargramme A-A' (oben) und B-B' (unten): Messstrecke quer zur Deckenspannrichtung

Legende zur Interpretation der Radargramme

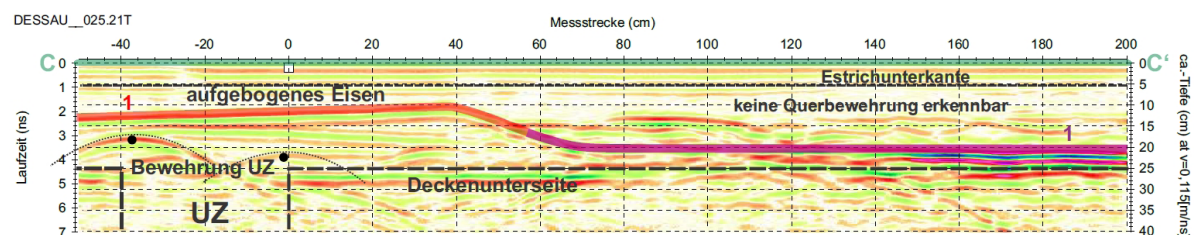


Abb. 11 (2): Radargramm C-C': Messstrecke parallel zur Deckenspannrichtung

Abb. 11 Beispielradargramme zur Bestimmung von Struktur und Bewehrungsverlauf der Geschossdecken (GGU, Karlsruhe)

Wichtig für die Aussagekraft zerstörungsfreier Messungen ist die Messwertkalibrierung durch direkte Messungen. Dies war durch die Ausführung weniger Erkundungsöffnungen an der Deckenunterseite und die zeitgleich durchgeführten Reparaturen am Steinholzestrich gegeben (Abbildungen 12 und 13).

5.2 Erkundung der Stützen mittels Radar und Ultraschall

Die 1925/26 gefertigten Betonstützen des Werkstattflügels (Abbildung 2) wurden im Zuge einer Sanierungsmaßnahme im Jahr 2005 teilweise ersetzt. Die heute existierenden Stützen stammen somit aus unterschiedlichen Bauzeiten. Diesbezüglich stellten sich mehrere Fragen, insbesondere, ob sich die Sanierungsmaßnahme durch Einsatz zerstörungsfreier Methoden bestätigen lässt, welche materialtechnischen Unterschiede bestehen und in welchem Umfang ein Materialersatz stattfand.



Abb. 12
Kalibrierungsöffnung an
der Deckenunterseite ...



Abb. 13
... und Erkundung der
Deckenoberseite wäh-
rend Reparaturarbeiten
am Steinholzestrich
(Stiftung Bauhaus Dessau)

Im Folgenden die wichtigsten Erkenntnisse der Radar- und Ultraschallmessungen an den Stützen:

- Die Radardaten der Originalstütze (Abbildung 14, links) unterscheiden sich deutlich von den Daten der erneuerten Stütze (Abbildung 14, rechts). Als maßgebliche Unterscheidungskriterien sind der Bügelabstand (bauzeitliche Stütze: 20 cm; erneuerte Stütze: 12 cm) und die Rückseitenreflexion (bauzeitliche Stütze: sichtbar; erneuerte Stütze: nicht sichtbar) zu benennen.
- Die Ultraschalldaten der Originalstütze (Abbildung 15, rot) unterscheiden sich deutlich von den Daten der erneuerten Stütze (Abbildung 15, grün). Als Charakteristikum für die Materialeigenschaften der unterschiedlichen Bauphasen sind sowohl die Signalform (bauzeitliche Stütze: starke Dämpfung; erneuerte Stütze: geringe Dämpfung) als auch die aus den Laufzeiten bestimmte mittlere Wellengeschwindigkeit (bauzeitliche Stütze: ca. 2.200 m/s; erneuerte Stütze: ca. 3.500 m/s) zu benennen.

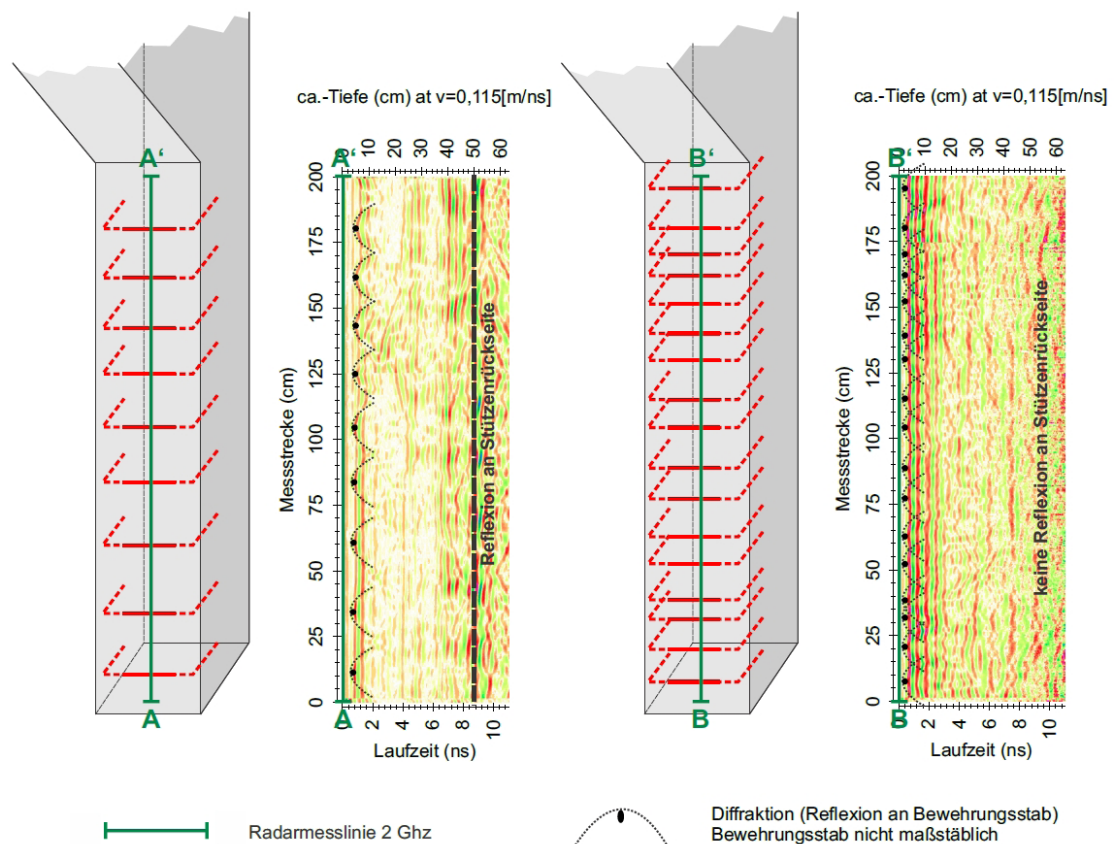


Abb. 14 Bauradarmessungen zur Identifizierung verschiedener Stützentypen – links die Originalstütze, rechts die erneuerte Stütze (GGU, Karlsruhe)

Fazit: Die bei der Sanierung ausgetauschten Stützen sind sowohl mit Radar als auch mit Ultraschall eindeutig identifizierbar. Wie dargelegt, besitzen die erneuerten Stützen eine enger liegende Bügelbewehrung sowie eine – mit der Wellengeschwindigkeit einhergehende – höhere Betonfestigkeit.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Forschungsprojekt zum denkmalgerechten Umgang mit dem Werkstattflügel des Bauhausgebäudes basiert auf einer interdisziplinären Verzahnung von Wissenschaft und Praxis. Durch ein erstes Arbeitspaket zur Grundlagenermittlung und Bestandsbewertung wurde ein umfängliches Bild des Bestands und Zustands von Fassade und Massivbau erlangt. Die schrittweise Herangehensweise und die kontinuierliche Reflexion der Methoden und Zwischenergebnisse halfen dabei, zerstörende Eingriffe in den Bestand zu minimieren. Die nun anstehenden Variantenstudien und der Entwurf von Sanierungskonzepten werden in Anlehnung an die beschriebene Vorgehensweise erfolgen. Insofern ist das Bauhausgebäude als Modellstudie zum angemessenen Erhalt herausragender Baudenkmäler der Moderne zu verstehen.

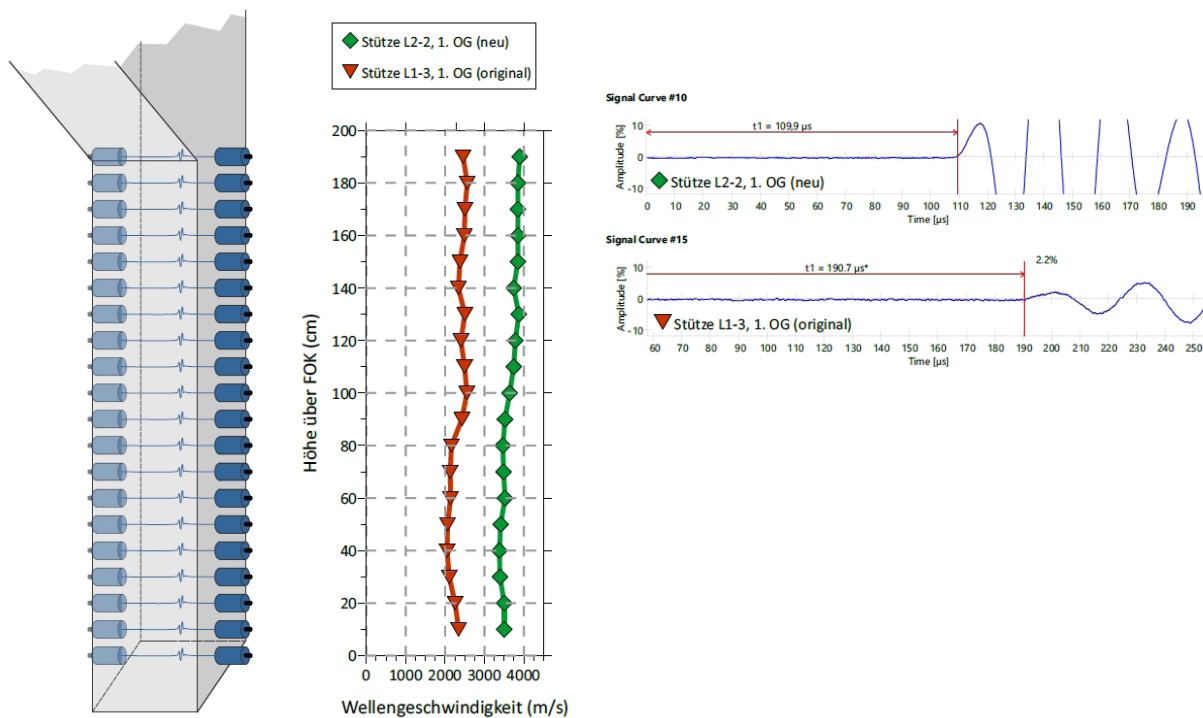


Abb. 15 Ultraschalltransmissionsmessungen zur Identifizierung verschiedener Stützentypen – links die beiden Stützen (rot: Originalstütze; grün: erneuerte Stütze), rechts ein typisches Wellenbild (GGU, Karlsruhe)

Team des Werkstattflügelprojekts

Stiftung Bauhaus Dessau; Wüstenrot Stiftung mit Projektsteuerung durch Büro Knappheide Bautechnische Beratung für die Stiftungen: Prof. Dr.-Ing. Christoph Duppel, Hochschule RheinMain; Planungsgemeinschaft IngenieurGruppe Bauen PartG mbB in Mannheim/Berlin mit ZHN Gesellschaft von Architekten mbH in Berlin; Professur für Ingenieurhochbau der Hochschule Anhalt (Dessau) mit Institut für Angewandte Geoinformatik und Raumanalysen e. V. (Agira); Professur für Denkmalpflege und Baugeschichte, Heritage-Zentrum und Sammlung für Architektur, Ingenieurbau, Kunst und Design der Bauhaus-Universität Weimar

Literaturverzeichnis

- [1] Gropius, Walter: *Bauhausbauten Dessau*. Band 1 der Bauhausbücher. München: Albert Langen, 1930.
- [2] Markgraf, Monika (Hrsg.): *Archäologie der Moderne: Sanierung Bauhaus Dessau*. Berlin: Jovis Verlag, 2006.
- [3] Markgraf, Monika (Hrsg.): *Archäologie der Moderne: Denkmalpflege Bauhaus Dessau*. Berlin: Jovis Verlag, 2021.
- [4] Rehm, Robin: *Das Bauhausgebäude in Dessau: Die ästhetischen Kategorien: Zweck – Form – Inhalt*. Berlin: Gebr. Mann Verlag, 2005.
- [5] Eckert, Hannes / Kleinmanns, Joachim / Reimers, Holger: *Denkmalpflege und Bauforschung: Aufgaben, Ziele, Methoden*. Reihe: *Empfehlungen für die Praxis*, hrsg. vom Sonderforschungsbereich 315 „Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke“ der Universität Karlsruhe (TH). 2000.
- [6] Wüstenrot Stiftung (Hrsg.): *Denkmalpflege der Moderne: Konzeption für ein junges Architektur-erbe*. Ludwigsburg & Stuttgart: Wüstenrot Stiftung & Karl Krämer Verlag, 2011.
- [7] Ahnert, Rudolf / Krause, Karl-Heinz: *Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960*. Band 2. 7. Auflage. Berlin: DIN Media, 2009.

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 2 Stiftung Bauhaus Dessau / © (Gropius, Walter) VG Bild-Kunst, Bonn 2025 / Foto: Tenschert, Yvonne, 2022
- Abb. 4 Stiftung Bauhaus Dessau Inv.-Nr. 80916 / © (Gropius, Walter) VG Bild-Kunst, Bonn 2025 / © Schulze / © Hanke
- Abb. 6, 13 Stiftung Bauhaus Dessau, 2024
- Abb. 9 [7, S. 111, Taf. 41]
- Abb. 10, 11, 14, 15 Gesellschaft für Geophysikalische Untersuchungen (GGU) mbH, Karlsruhe, Markus Hübner

Alle weiteren Abbildungen stammen von der Verfasserin Dorothea Roos (Abb. 1) und dem Verfasser Christoph Duppel (Abb. 3, 5, 7, 8, 12).

Nikolaus Koch und Christoph Duppel

BETONBAUWERKE DER HOCHMODERNE

Bauaufnahme und Erforschung

DOI: 10.60628/9783738810493-261

Die behutsame Instandsetzung von Betonbauwerken der Hochmoderne bildet seit einigen Jahren eine der großen denkmalpflegerischen und konstruktiven Herausforderungen. Besondere Bedeutung besitzen dabei die präzise Bauaufnahme, die strukturelle Bauwerkserkundung und das Wissen über Planungs- und Ausführungsprozesse. Diese Faktoren ermöglichen es, einen maximalen Anteil der originalen Substanz zu erhalten und das bauzeitliche Erscheinungsbild mit Oberflächenstrukturen und Werkspuren zu wahren. Der Aufsatz zeichnet am Beispiel dreier denkmalgeschützter Betonbauwerke aus unterschiedlichen Bauzeiten ein Bild ihrer Konstruktion und Konstruktionsgeschichte. Ergänzend werden Wege aufgezeigt, um die beschriebenen Herangehensweisen und Methoden auf vergleichbare Betonbauwerke zu übertragen.

1 Einleitung

Die Baugeschichte der Moderne wurde maßgeblich geprägt durch den Werkstoff Beton. Hergestellt aus regional verfügbaren Materialien, stand Architekt:innen und Ingenieur:innen ab dem endenden 19. Jahrhundert ein form- und hochbelastbares Baumaterial zur Verfügung, das bis dahin ungeahnte konstruktive Möglichkeiten eröffnete. Beton war in den Folgejahren der Werkstoff herausragender Ingenieurbauwerke, Ausdruck einer architektonischen Formensprache und – aufgrund seiner Wirtschaftlichkeit – *das* Baumaterial des Wiederaufbaus nach den Zerstörungen durch den Zweiten Weltkrieg.

Unzureichendes Wissen über Schadensmechanismen und die Haltbarkeit von Betonkonstruktionen führten jedoch dazu, dass die Instandsetzung bestehender Betonbauten heute eine enorme Herausforderung darstellt – nicht nur in quantitativer Hinsicht. Neben der Sicherstellung der Trag- und Gebrauchsfähigkeit liegt insbesondere bei denkmalgeschützten Betonbauten der Fokus einer behutsamen Instandsetzung auf dem maximalen Erhalt der bauzeitlichen Oberflächen und Werkspuren.

Die Hochschule RheinMain hat sich im Rahmen des Teilprojekts B3 „Gealterte Hochmoderne im Stahlbetonbau“ intensiv mit der Bestands- und Zustandserfassung diverser denkmalgeschützter Betonbauwerke befasst. Das Projekt ist Bestandteil des Schwerpunktprogramms „Kulturerbe Konstruktion“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG). Die Methoden der historischen Bauforschung, angewendet auf Betonbauwerke und -oberflächen, bildeten hierbei einen innovativen Ansatz, um – in Kombination



Abb. 1

Der Turm des Senders „Europe 1“ in Überherrn-Berus (Rückbau des Gerüsts, August 2021)

mit hochpräzisen Bauaufnahmemethoden und zerstörungsfreien Erkundungsverfahren – umfassende Erkenntnisse zum Zustand der Betonstruktur selbst zu erlangen, aber auch zu den bauzeitlichen Planungs- und Ausführungsprozessen.

Der Beitrag veranschaulicht am Beispiel dreier Betonbauten aus der Zeit zwischen 1879 und 1968 verschiedene Aspekte der Bestandserfassung und -erkundung und illustriert mögliche Herangehensweisen sowie Methoden.

2 Bauaufnahme am Sendeturm „Europe 1“ in Überherrn-Berus

2.1 Baugeschichte

Der im Jahr 1954 errichtete Sendeturm des Senders „Europe 1“ in Überherrn-Berus zählt zu einem der ersten Fernsehtürme Deutschlands. Das avantgardistisch anmutende Objekt befindet sich unmittelbar neben der als Wahrzeichen der Ingenieurbaukunst ausgezeichneten Sendehalle [1–2]. Die ca. 35 m hohe Stahlbetonkonstruktion besteht aus drei gleichmäßig im Dreieck angeordneten Betonpfeilern mit variablen und trapezförmigen Querschnitten (Abbildung 1). Der elegante Entwurf mit seinem schlanken Erscheinungsbild stammt von dem chinesischen Ingenieur Tseng Ou aus dem Pariser Büro C.A.P.E.M. von Bernard Laffaile. Die Ausführung der Betonkonstruktion oblag der Saar-Bauindustrie AG Saarlouis für die Société Sarroise de Télévision.

2.2 Bauaufnahme

An den Pfeilern und der Plattform des Turms finden sich typische, durch Bewehrungskorrosion hervorgerufene Betonschäden in Form von Rissbildungen und Abplatzungen (Abbildung 2). Erste Sanierungsarbeiten erfolgten im Rahmen der Installation einer neuen Sendeantenne im Jahr 2021, beschränkten sich jedoch auf die Betonplattform und den oberen Bereich der Turmkonstruktion.



Abb. 2
Betonschäden an dem
Sendeturm (Pfeiler P1,
Gerüstebene 8), horizon-
tale Betonierfuge und
Schalbrettstoß

Im Rahmen des genannten Forschungsprojekts wurden unterschiedliche Methoden der Bauwerkserfassung angewendet, um ein ganzheitliches Bild der Betonkonstruktion zu erlangen – sowohl hinsichtlich ihres Zustands als auch ihrer Bau- und Konstruktionsgeschichte. Methoden und Erkenntnisse sind in [3–5] umfassend dargelegt. An dieser Stelle sei zusammengefasst:

- Eine erste Bauaufnahme der drei Betonpfeiler fand im eingerüsteten Zustand statt [1]. Dafür wurde eine Methode entwickelt, die ein Tachymeteraufmaß mit Structure from Motion (SfM) kombinierte. Ziel war es, eine Plangrundlage der Betonoberflächen sowie der Schäden und Werkspuren zu erhalten, die Aufschluss über den Entstehungsprozess der Konstruktion geben (Abbildung 3-1).
- Auf Grundlage zusammengesetzter Renderings erfolgte die genaue Umzeichnung mit Hervorhebung der noch originalen Oberflächen, bauzeitlichen Reparaturen, Schalbrettabdrücke und aller Ausbruchstellen (Abbildung 3-2).
- Nach Rückbau des Gerüsts wurde mittels Drohne und SfM ein 3D-Modell des freistehenden Turms erstellt, woraus neue Bildpläne generiert wurden (Abbildung 3-3).
- In der daraus erstellten CAD-Zeichnung sind Schadensarten und Befunde zur Konstruktionsgeschichte eingetragen. Im Sinne eines Monitorings konnte in dem Plan zudem der Zustand des Pfeilers fortgeschrieben werden (Abbildung 3-4).

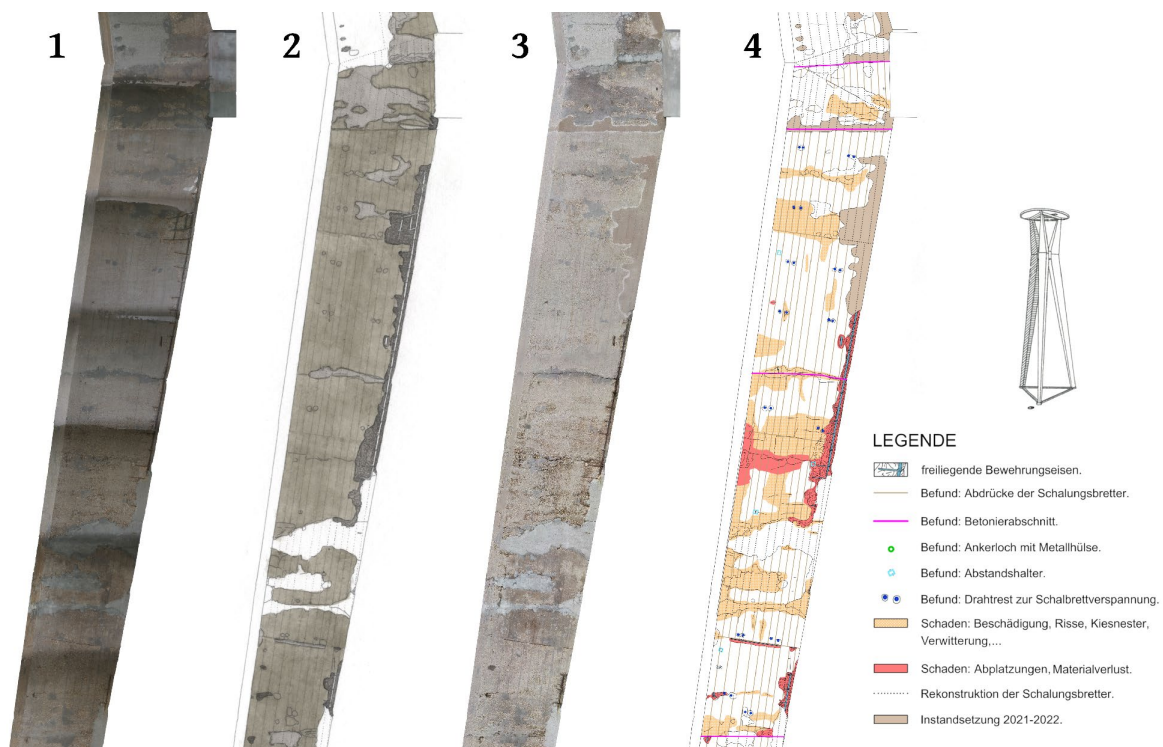


Abb. 3 Bauaufnahme und Kartierung des Pfeilers P2 des Sendeturms (nördliche Flanke) in vier verschiedenen Zuständen

3 Untersuchungen an den Betonglasfenstern der St. Mauritiuskirche in Wiesbaden

3.1 Baugeschichte

Die katholische Kirche St. Mauritius im Norden von Wiesbaden ist ein künstlerisch gestaltetes Sichtbetonbauwerk (Abbildung 4), das in der Zeit von 1959 bis 1968 in zwei Bauabschnitten errichtet wurde.

Im Jahr 1958 gewann der Entwurf des Architekten Martin Braunstorfinger (1899–1996) einen beschränkten Architekturwettbewerb. Er sah ein Sockelgeschoss mit Unterkirche und angrenzenden Gemeinderäumen vor, das um einen großen Hof angeordnet ist und über dessen nördlichen Flügel sich das Kirchenschiff mit großen, regelmäßig gegliederten Betonglasfenstern erhebt (Abbildung 5).

Das Sockelgeschoss mit Unterkirche wurde im September 1960 fertiggestellt, doch erst im Januar 1967 wurde mit dem Bau des großen Kirchenraums fortgefahren. Ein veränderter Entwurf der Architekten Jürgen Jüchser (1929–2019) und Peter Ressel (*1939) zielte auf eine weitaus stärkere plastische sowie künstlerische Ausgestaltung des Kirchenschiffs (Abbildung 6). Dafür wurden der Bildhauer Otto Herbert Hajek



Abb. 4
Die Mauritiuskirche
in Wiesbaden, Blick
von Südwesten

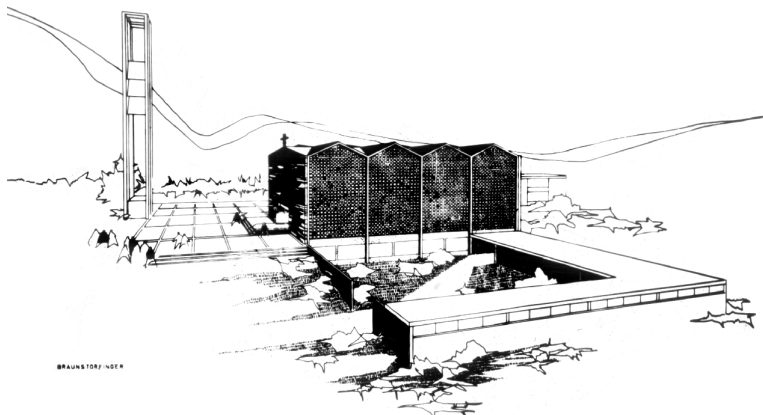


Abb. 5
Martin Braunstorfingers
Wettbewerbsentwurf
für die Mauritiuskirche,
1958 (Kirchenarchiv
St. Mauritius, Wiesbaden)

(1927–2005) und der Glaskünstler und Maler Hans-Georg Schleifer (1940–2017) hinzugezogen. Hajek gestaltete den Innenraum sowie die Kirchengestaltung und entwarf abstrakte Betonfriese, die sowohl Innen- als auch Außenraum zieren. Er gestaltete zudem das Erscheinungsbild des freistehenden Glockenturms, der nun über eine Sichtbetonwand stärker mit dem sakralen Hauptbaukörper verbunden war. Schleifer seinerseits entwarf die Betonglasfenster.

Das große südliche Fensterband zieht sich von Westen her als kleines Band auf die Südfassade herum. Dort weitet es sich ab der ersten Hallenpfeiler im zweiten Joch nach Osten hin zunächst nach unten und schließlich im vierten Joch trapezförmig nach oben. So werden das Schiff und der Altarraum von in Rot-, Blau- und Weißstein gehaltenen Fenstern belichtet.

Das Chorfenster befindet sich nördlich des Altars auf der Westwand zwischen dem neu errichteten Pfarrhaus. Dort wurden hauptsächlich grüne, gelbe und violette Farbtöne verwendet. Je nach Sonnenstand werden im Innenraum unterschiedliche Lichteindrücke erzeugt. Bewusst verstärkt oder partiell abgeschwächt wird der Effekt durch die besondere Tiefenstaffelung der Betonelemente von außen. Diese tragen die Handschrift Hajeks.

Pünktlich zum Patronatsfest am 22.09.1968 wurde der zweite Bauabschnitt vollendet und eingeweiht. Der Bau besticht mit Klarheit und Modernität – zwei Dimensionen, die durch die intensive Zusammenarbeit von Architekt:innen und Künstler:innen verknüpft wurden und die Entwicklung der Dallglasbetonfenster in einer bisher nicht dagewesenen Komplexität umsetzten.

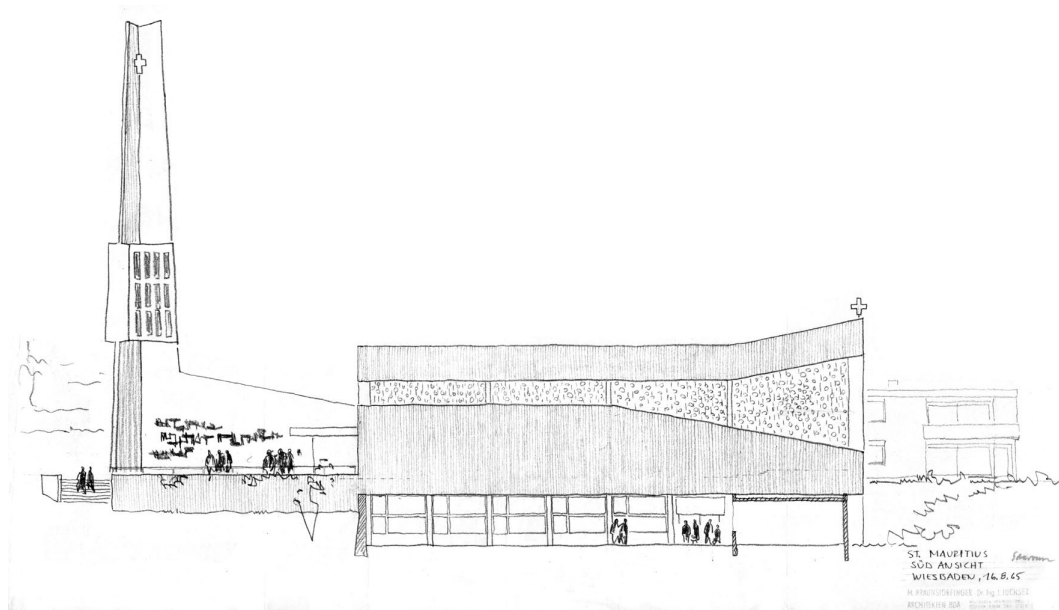


Abb. 6 Jürgen Jüchser's Entwurf für die Mauritiuskirche, 1965 (Kirchenarchiv St. Mauritius, Wiesbaden)

3.2 Durchgeführte Untersuchungen

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden zur Erfassung und Erforschung der Kirche nachfolgende Methoden angewandt. Der Fokus lag dabei auf der Dokumentation und dem Herstellungsprozess der Betonglasfenster.

- Tachymetrische Erfassung des Kirchengrundrisses sowie der Umrisse von Süd- und Westseite (Abbildung 7)
- Erstellung von Orthobildern der Fensterbänder auf Grundlage einer Drohnenbefliegung und der SfM-Methode (Abbildungen 8 und 9)
- Auswertung und Umzeichnung der Bauaufnahmen unter besonderer Berücksichtigung möglicher Werkspuren
- Zerstörungsfreie geophysikalische Untersuchungen zur Betonqualität und dem Bewehrungsverlauf in den Fensterbändern

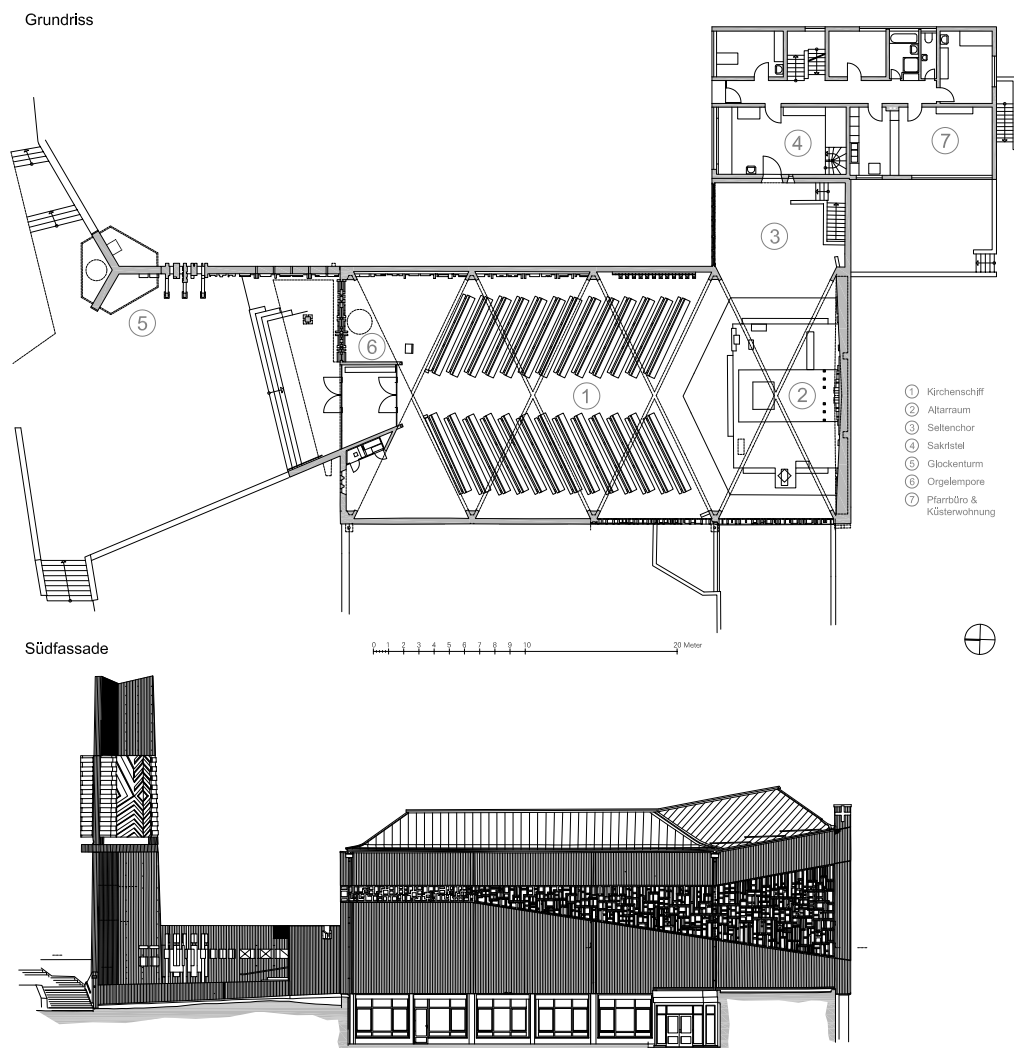


Abb. 7 Bauaufnahme der Mauritiuskirche – Grundriss (oben) und Südfassade (unten)

- Sichtung des Kirchenarchivs mit Auswertung der verfügbaren bauzeitlichen Abrechnungen
- Fachgespräch mit dem Zeitzeugen Herrn Reiner Keller, dessen Firma aus Höhr-Grenzhausen im Jahr 1968 mit der Erstellung der Betonglasfenster beauftragt war

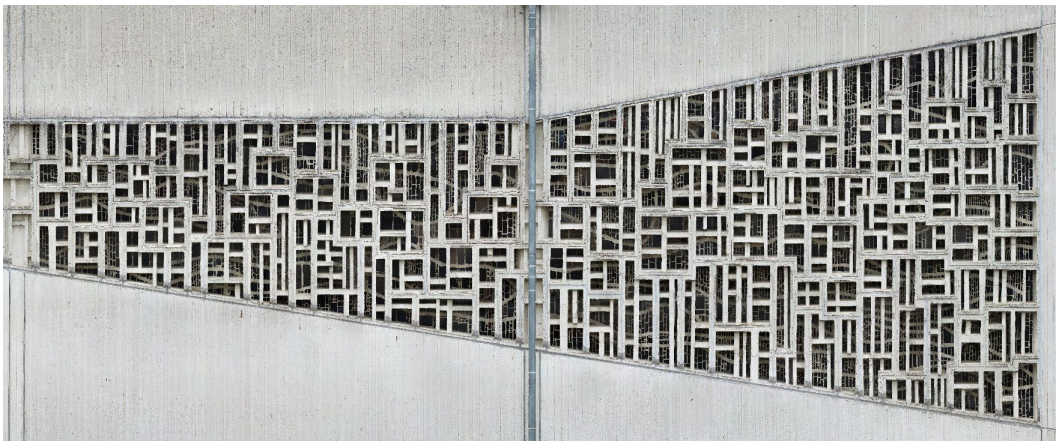


Abb. 8 Orthobild (SfM) der Südfassade der Mauritiuskirche (Labor für Bauforschung der Hochschule RheinMain, Wiesbaden)

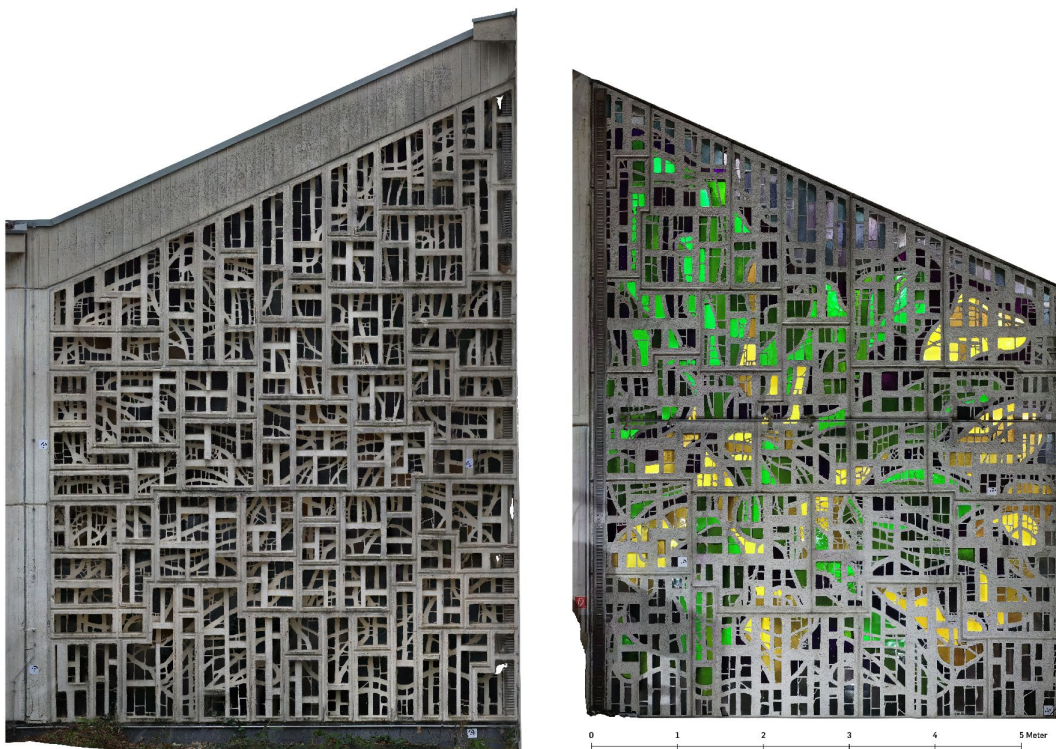
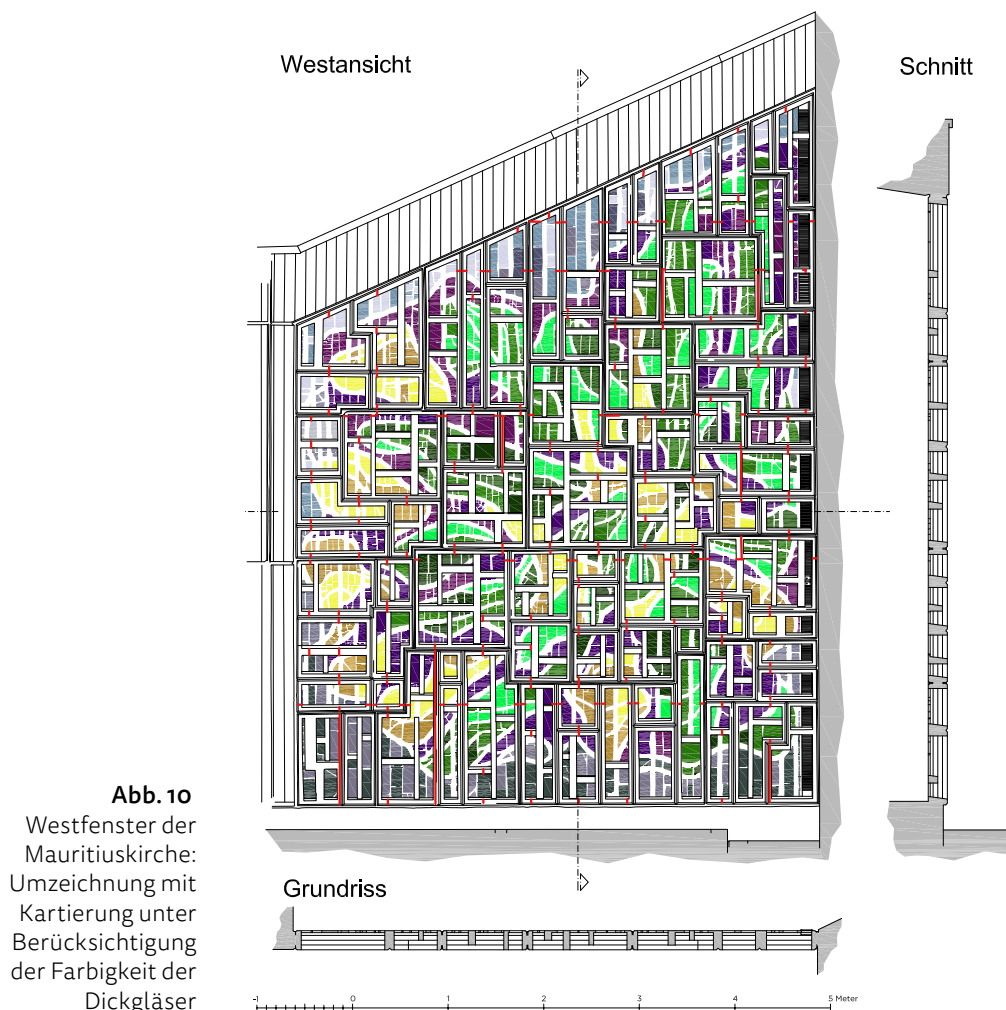


Abb. 9 Orthobild (SfM) der Westfassade der Mauritiuskirche – Außenraum (links) und Innenraum (rechts)

3.3 Bauaufnahme der Betonglasfenster

Die erwähnte SfM-Methode kommt zur Erstellung einer Bauaufnahme mittlerweile häufiger zum Einsatz. So elegant – und wirtschaftlich – diese Methode in Kombination mit einer Drohnenbefliegung auch ist, gibt es bei der Anwendung auch Grenzen, wie es sich gut bei den Betonfensterbändern der Mauritiuskirche zeigt. Mit ihren vielen, teils sehr schlanken Vertiefungen zwischen den Stegen konnten sie nicht in allen Bereichen fehlerfrei aufgenommen werden. Die Software füllte Bereiche mit zu geringen Abständen zu Nachbarelementen unter Umständen auf oder projizierte die Texturen fehlerhaft auf das Mesh. Spiegelnde Oberflächen der Gläser und die sehr dünnen Betonstege zwischen den Scheiben führten ebenfalls zu Darstellungsschwierigkeiten. Für ein optimales Ergebnis wird daher eine Umzeichnung als Strichlinien mithilfe der einzelnen Drohnenfotos empfohlen (Abbildung 10). So werden Texturfehler trotz plausiblen Aussehens aufgedeckt. Die CAD-Zeichnung kann darüber hinaus für eine genaue Schadenskartierung herangezogen werden.

Während die Glasplättchen von außen betrachtet weitestgehend als schwarz schimmernde Flächen erscheinen, tauchen sie den Innenraum in unterschiedliche Farben



(Abbildung 9). Unter guten Lichtverhältnissen reizt diese bewusste Wahl den phänomenologischen Überraschungseffekt beim Betreten der Kirche aus. Die Farben der Gläser lassen sich allerdings schwerlich von außen bestimmen. Ein Orthobildplan der Innenseiten ermöglichte es, jedem verbauten Glas seine bei Licht einfallende Farbe zu geben, was wiederum zeichnerisch in die Bauaufnahme der Fassade übertragen werden konnte. Diese Bauaufnahme als Plan (Abbildung 10 und später Abbildung 14) hat hier mehr Informationsgehalt als das Orthobild.

3.4 Werkspuren am Bauwerk

Neben den Bauakten zur Mauritiuskirche erschließen die Methoden der historischen Bauforschung anhand von Werkspuren einige Details zum Herstellungsprozess der Fassade. Herrn Keller zufolge wurden die Elemente der Fensterbänder vor Ort – im Kirchenschiff liegend – geschalt. Hiervon zeugen viele kleine Winkelabweichungen in den Elementen des Südfensters, die sich jeweils im benachbarten Block fortsetzen. Durch die verformungsgerechte Bauaufnahme mittels Drohnenbefliegung und SfM-Methode können solche kleinen Abweichungen erkannt und bestimmt werden.

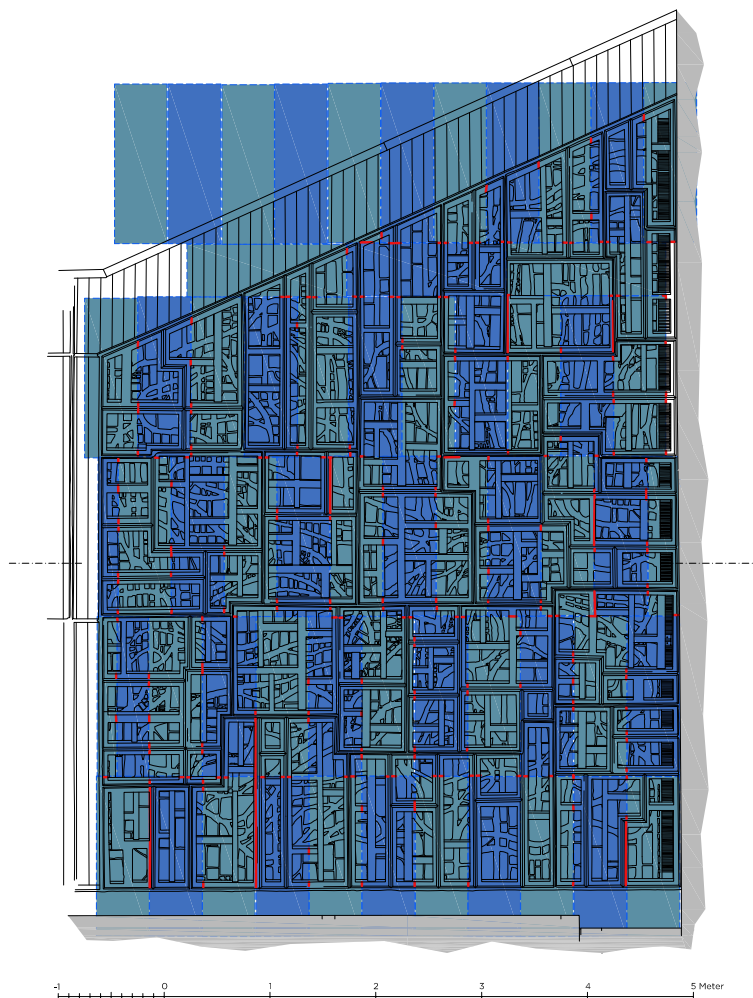


Abb. 11

Rekonstruktion des Reißbodens in der Mauritiuskirche anhand der Werkspuren. Dargestellt sind Lage und Abmessungen der Schaltafeln.

Teilweise wiederkehrende vertikale ebenso wie horizontale Spuren auf den bündigen Stegen der Fensterelemente deuten auf das Auslaufen des Betonleims hin – ein typisches Erscheinungsbild bei Schalbrettstößen. Da die zu gießenden Betonglasfenster auf dem Boden des Kirchenschiffs lagen, handelt es sich offensichtlich um den Abdruck des Reißbodens bzw. des Planums für den Fertigungsprozess. Verbindet man die vorgefundenen Liniensegmente, so ergibt sich ein recht klares Bild: Der Boden wurde mit Schaltafeln (ca. $1,50 \times 0,50$ m) ausgelegt, die – deutlich zu sehen am Westfenster – nicht nur in Reihe, sondern auch versetzt oder um 90 Grad gedreht ausgerichtet waren (Abbildung 11). Am Südfenster finden sich die gleichen Tafelformate.

3.5 Bautechnische Umsetzung der Betonglasfenster

Die Fensterbänder wurden in weißem Beton und aus ca. 2 cm dicken Dallglas- bzw. Dickglasscheiben erstellt. Die praktische Umsetzung erfolgte durch die Firma Reiner Keller aus Höhr-Grenzhausen. Erhalten hat sich der Vertrag der „Arbeitsgemeinschaft Schleifer-Keller, federführend Hans-Georg Schleifer“ zur Herstellung der drei Betonglasfenster, mit gemeinsamer Honorarsumme von 105.000 D-Mark. Schleifer erhielt 26.000 D-Mark und Keller für die Umsetzung 79.000 D-Mark. Das „Hauptfenster“ (Süden) sollte bis zum 31.01.1968 fertiggestellt werden, das „Nebfenster“ bis zum 31.03.1968. Die Beschaffung der Gläser – ca. 7.500 kg Glas waren errechnet – wurde Ende September 1967 in Angriff genommen, nachdem Keller einen Vorschuss von 30.000 D-Mark angefordert hatte. Benötigt wurden Boussoirglas (25 % des Glasanteils; 22 mm Stärke), Dallglasziegel (15 %; 50–90 mm) und Dallglas (60 %; 22–25 mm).

Nach der Fertigstellung des Rohbaus des Kirchenschiffs im November 1967 (Abbildung 12) wurden darin für die Fertigung in Ortbeton mehrere Wochen lang hölzerne Schalungen mit Styroporeinlagen und Bewehrungseisen vorbereitet. Die Pläne dafür



Abb. 12

Historische Aufnahme des Rohbaus der Mauritiuskirche; Fensterbänder sind eingesetzt (Kirchenarchiv St. Mauritius, Wiesbaden)

sind leider nicht erhalten. In den Bauakten finden sich Hinweise auf gelieferte Zeichnungen im Maßstab 1:10 und 1:1 sowie Musterstücke.

Im Februar 1968 wurden die Betonglasfenster unter Beimischung von Titanoxid (für das weiße Erscheinungsbild der Oberfläche) schrittweise ausgegossen und die farbigen Glasstücke eingelegt (Abbildung 13). Dabei zeigt die Innenseite nach oben, wie an der rauen Oberfläche erkennbar ist. Der Vorgang umfasste insgesamt sechs Schritte: 1. Schalung mit Dreikantleisten und Styroporeinlagen; 2. Einlegen der Bewehrung zwischen die Styroporplatten; 3. Ausgießen mit Beton bis zur Oberkante des Styropors; 4. Einlegen der verschiedenfarbigen Dickgläser nach 1:1-Zeichnungen; 5. Einlegen von Draht und Ausgießen der Zwischenräume der Gläser; 6. Ausschalen und Umdrehen der Elemente.

Das große Fensterband an der Südseite ist ca. 32,50m lang und besteht aus zahlreichen 35cm starken Elementen, die individuell gestaltet sind (Abbildung 14). Die einzelnen Bauteile greifen auf verschiedenen Seiten ineinander und ergeben ein einzigartiges Gesamtbild mit vielen Vor- und Rücksprüngen an der Außenseite. Diese haben drei Tiefenebenen, die aus den hauptsächlich verwendeten 5cm starken Styroporplatten resultieren. Die am weitesten nach hinten versetzten Stege stehen ab der Vorderkante 10cm zurück. Alle horizontalen Stege und die untere Sohlbank jedes Elements weist eine Neigung von ca. 10 Grad auf, damit Niederschlagswasser abfließen kann (Abbildung 15).

Nach 33 cm setzt die Schicht der Gläser ein. Die Außenkanten zeigen durch in die Schalung eingelegte Dreikantleisten eine Fase, sodass die Elemente beim Versetzen keinen Schaden nehmen. Die Betonelemente weisen drei hintereinanderliegende, umlaufende Bewehrungsbügel auf, die der Form der Elemente folgen. Die Bügel sind an

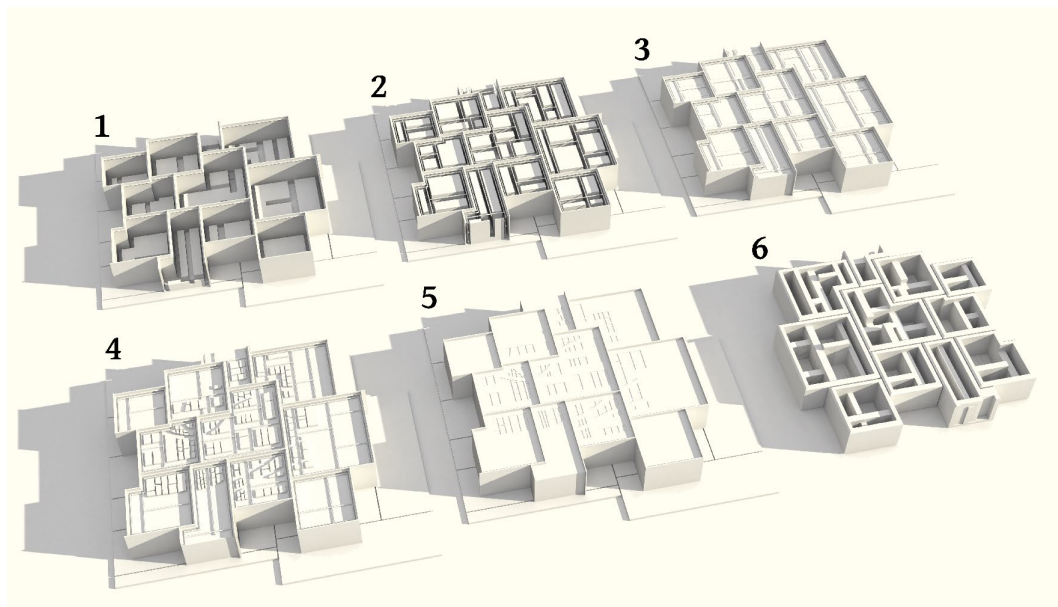


Abb. 13 Visualisierung und Rekonstruktion des Gussvorgangs des Südfensters der Mauritiuskirche in sechs Schritten

einigen Stellen mit senkrechten Eisenstäben verbunden und halten diese auf Abstand. Die Georadaruntersuchung zeigte auch, dass zwischen den Glassteinen dünne Bewehrungsstäbe eingelegt sind.

Um eine Mindestüberdeckung der Bewehrung zu gewährleisten, wurden vereinzelt Abstandshalter aus Kunststoff eingebaut. Aufgrund einer zu geringen Betondeckung (teilweise $< 1\text{ cm}$) sind einzelne Fensterelemente durch Korrosion und Abplatzungen geschädigt. Die nach innen versetzten Stege der Binnenteilung enthalten keine Eisen.

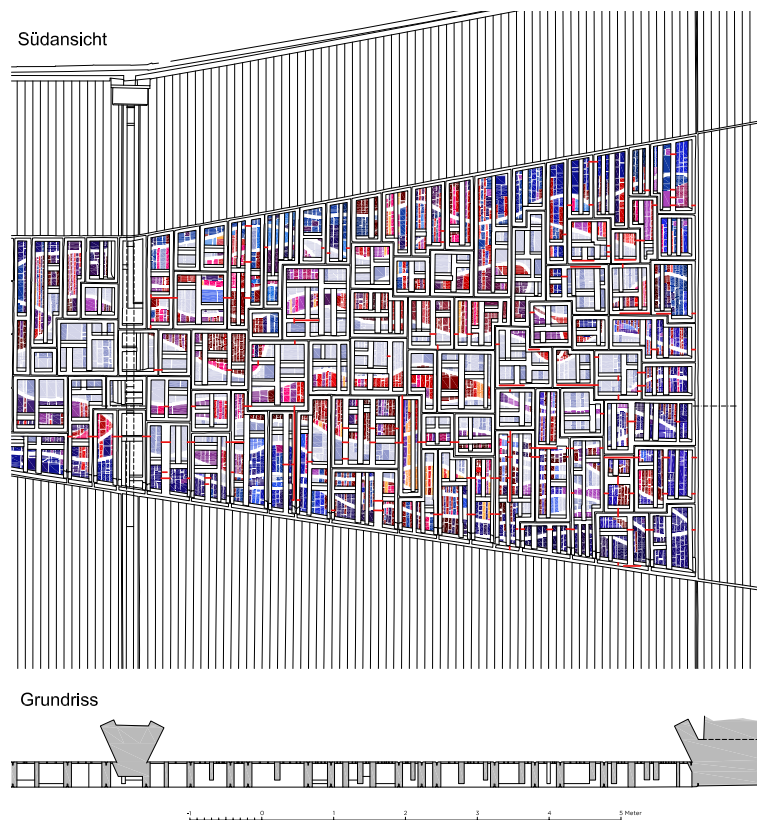


Abb. 14
Ausschnitt aus dem
Südfenster der
Mauritiuskirche:
Umzeichnung mit
Kartierung unter
Berücksichtigung
der Farbigkeit der
Dickgläser



Abb. 15
Südfassade der
Mauritiuskirche mit
Herstellungsspuren.
Die Abdrücke der
Styroporschalung
treten deutlich hervor.
Unregelmäßige „Ent-
mischungskanten“
kommen bei fast
allen Elementen der
Südseite vor.

Bemerkenswert ist, dass die erste Lage an Betonglaselementen in dem schräglaufenden Abschnitt keine Schäden durch Absprengung vorweisen. Hier sind auch keine freiliegenden Bewehrungseisen zu entdecken. Der Grund dafür ist die 5 cm breite Rinne zur Ableitung von Wasser, für die alle auftreffenden Stege durch eine Schräge ca. 10 cm abgefast sind. Entsprechend wurde die Bewehrung in diesen Bereichen tiefer verlegt und weist daher eine ausreichende Betondeckung auf.

Das Fensterband trägt sich aufgrund der breiten Aufstandsfläche und der Verzahnung über das Eigengewicht, weshalb keine Dollen zwischen den Elementen vorhanden sind. Das Eigengewicht des Südfensters beträgt laut Ausführungsplänen 500 kg/m^2 (Westfenster: 300 kg/m^2). Der Anteil der Betonglaselemente wird auf 45 % geschätzt.

Das Chorfenster im Nordwesten ist mit ca. 20 cm Stärke wesentlich dünner. Auch hier kam eine Schalung mit Styroporplatten zur Anwendung, allerdings wurden bei ihrem Bau Elemente zu größeren Einheiten zusammengefasst.

4 Zerstörungsfreie Erkundung der Betonmodelle in Offenbach

4.1 Baugeschichte

Zu den ältesten Betonbauwerken in Deutschland zählen die Betonmodelle im Dreieichpark der Stadt Offenbach am Main. Als Teil der Hessischen Gewerbeausstellung 1879 erstellte die ortsansässige „Cementfabrik Feege und Gotthardt“ einen Pavillon mit angrenzender Plattform und ein über rund 16 m spannendes Bogenbauwerk (Abbildung 16). Die Betonmodelle dienten einzig als Ausstellungsstücke und demonstrierten die gestalterischen sowie bautechnischen Möglichkeiten des damals noch jungen Baustoffs Beton.



Abb. 16
Die zur Hessischen Gewerbeausstellung 1879 erstellten Betonmodelle in Offenbach am Main (Stadt Offenbach)

Trotz verschiedener Sicherungs- und Sanierungsmaßnahmen weisen die Betonmodelle heute erhebliche Schäden auf. Die unbewehrte Konstruktion ist zwar nicht von den für spätere Eisen- bzw. Stahlbetonbauwerke üblichen Korrosionsschäden betroffen, zeigt jedoch aufgrund der geringen Zugfestigkeit des Werkstoffs Beton erhebliche Risschäden in zugbeanspruchten Bereichen. Derzeit sind die Modelle durch temporäre Stützkonstruktionen gesichert (Abbildung 17).

4.2 Durchführung der Erkundungen

Im Rahmen des Forschungsprojekts und in Vorbereitung einer denkmalgerechten Sanierung wurden die Betonmodelle einer umfassenden und detaillierten Bauaufnahme unterzogen. Ein vollständiges verformungstreues Aufmaß erfolgte unter Einsatz der SfM-Methode, sei an dieser Stelle aber nicht vertieft.

Zur Bewertung der Möglichkeiten und Grenzen zerstörungsfreier geophysikalischer Messungen kamen die Methoden Radar (Abbildung 18) und Ultraschall zum Einsatz. Die Messungen wurden in Zusammenarbeit mit der Gesellschaft für Geophysikalische



Abb. 17
Pavillon mit temporärer
Stützkonstruktion



Abb. 18
Radarmessung an der
Kuppel des Pavillons

Untersuchungen (GGU) aus Karlsruhe durchgeführt. Die Radarmessungen erfolgten mit hochauflösender Georadarapparatur (GSSI Sir-4000). Bei der eingesetzten Radarantenne handelte es sich um einen hochfrequenten 2.000-MHz-Sensor. Die Ultraschallmessungen erfolgten mit einem 50-kHz-P-Wellen-Sensor.

4.3 Messergebnisse

Erkundung des Bogenbauwerks mittels Radar

Die Erkenntnisse aus der Radarmessung lassen sich wie folgt zusammenfassen (Abbildung 19):

- Der Bogen ist – wie erwartet – vollständig unbewehrt. Weder die Radargramme (A) noch die Zeitscheiben (B+C) weisen auf eine Bewehrung hin.
- Einzig der Scheitelpunkt des Bogens bildet eine Ausnahme: Bei einer früheren Sanierungsmaßnahme wurde der bauzeitliche Beton über eine Länge von ca. 1 m ausgetauscht. Dieser Bereich ist in zwei Ebenen kreuzweise bewehrt. Die heute sichtbaren Horizontalrisse im ausgebesserten Scheitelpunkt deuten auf eine Korrosion der Bewehrung hin.

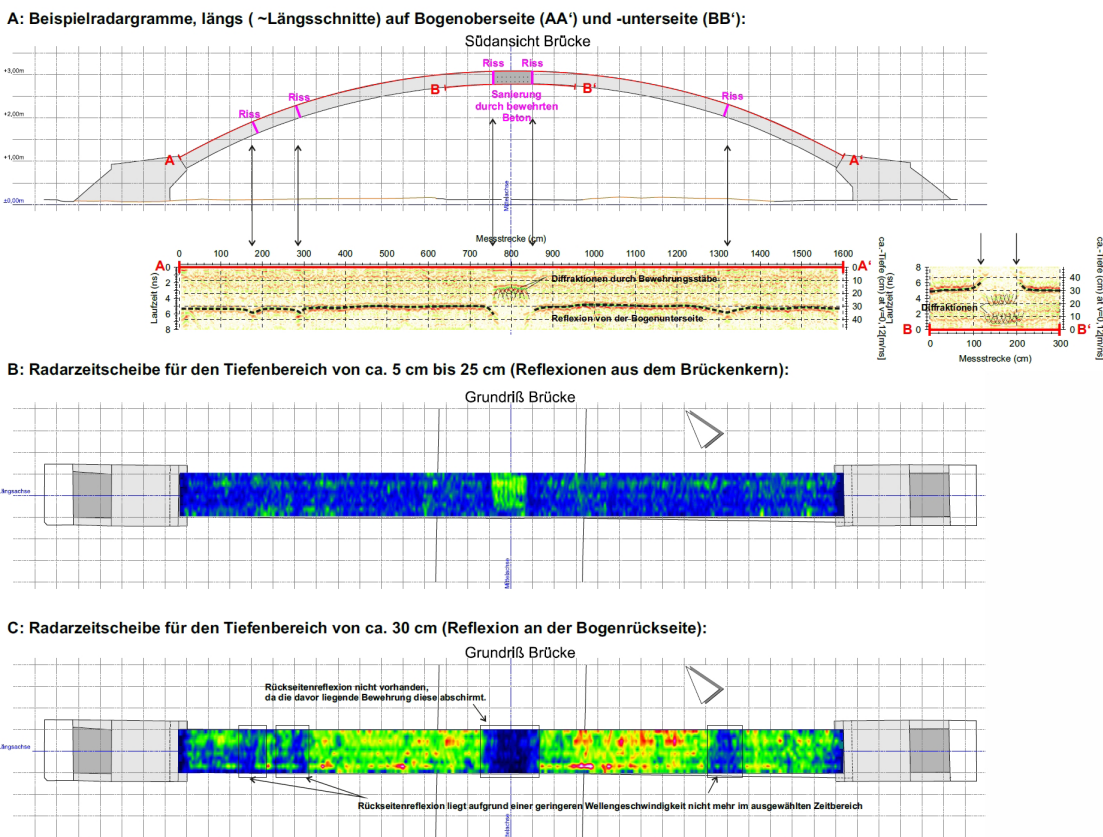


Abb. 19 Radargramm (A) und Radarzeitscheiben (B+C) als Ergebnis der Radarmessungen am Bogenbauwerk (GGU, Karlsruhe)

- Im Beispielradargramm AA' zeichnet sich eine Variation der Tiefenlage der Bogenrückseitenreflexion von ca. ± 3 cm ab. Tatsächlich ist der Bogen jedoch mit einer konstanten Dicke von 30 cm ausgeführt. Die Ursache für diese *scheinbare* Dickenvariation ist die Variation der Wellengeschwindigkeit aufgrund eines lokal unterschiedlichen Feuchtegehalts im Beton. Die Bereiche mit scheinbar größerer Bogenstärke (bei 2 m, 3 m und 13 m) weisen sichtbare Risse auf. Die hier eindringende Feuchtigkeit verringert die Wellengeschwindigkeit. Bauradarmessungen decken somit qualitative Feuchteunterschiede auf.

Erkundung des Bogenbauwerks mittels Ultraschall

Die Erkenntnisse aus der Ultraschall-Transmissionsmessung lassen sich wie folgt zusammenfassen (Abbildung 20):

- Aus den gemessenen Transmissionslaufzeiten wurde die Kompressionswellengeschwindigkeit errechnet. Sie variiert in den ungestörten Bereichen zwischen ca. 4.000 m/s und 4.500 m/s und liegt damit im Rahmen 'üblicher' Wellengeschwindigkeiten von Beton. Die Variation der Wellengeschwindigkeit ist gering und liegt innerhalb der erwartbaren Variationen für Betonfestigkeit und Messfehler.
- Im Bereich sichtbarer Risse ist die Wellengeschwindigkeit geringer. Eine signifikante Abweichung ist im Bereich des östlichen Risses (Stelle 3) zu beobachten. Die Wellengeschwindigkeit von ca. 3.250 m/s deutet auf eine beginnende Entfestigung des Betons hin.

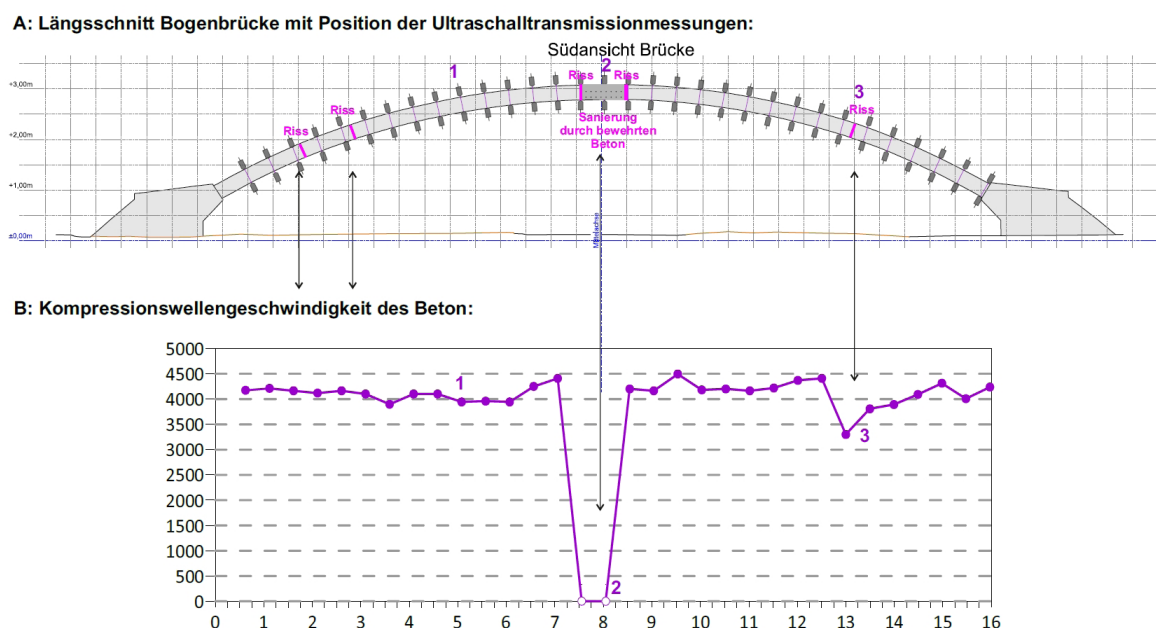


Abb. 20 Ergebnisse der Ultraschall-Transmissionsmessung am Bogenbauwerk (GGU, Karlsruhe)

- Im sanierten Scheitelbereich (Stelle 2) ist eine Transmission nicht mehr möglich. Der Wellenweg ist aufgrund der vorhandenen horizontalen Rissbildung unterbrochen (siehe hierzu auch die Ergebnisse der Radarmessungen, Abbildung 19).

Erkundung der Kuppel über dem Pavillon mittels Radar

Die wichtigsten Erkenntnisse der Radarmessungen an der Kuppel lassen sich wie folgt zusammenfassen (Abbildung 21):

- Erwartungsgemäß ist die Kuppel unbewehrt; es zeigen sich keine Hinweise auf metallische Einlagerungen.
- Die Kuppelschale ist 10 cm dick. Auf der Ostseite (siehe Radargramm BB') verdickt sich die Kuppel unsymmetrisch auf ca. 15 cm. Es ist zu prüfen, ob es sich hierbei um eine „echte“ Verdickung handelt oder um eine „scheinbare“ als Folge eindringender Feuchte (vgl. die Erläuterungen zu Abbildung 19).
- Teilweise sind innerhalb des Betons schwache Reflexionsebenen zu erkennen (siehe z. B. Radargramm CC'). Diese bilden sich an Grenzschichten, die durch den lageweisen Einbau des Betons entstehen.

Als bemerkenswert erweist sich die zerstörungsfreie radartechnische Erkundung der vier Pavillonpfeiler: Die Daten lassen darauf schließen, dass es sich bei den verputzten Bauteilen nicht um eine Beton-, sondern um eine Mauerwerkskonstruktion handelt.

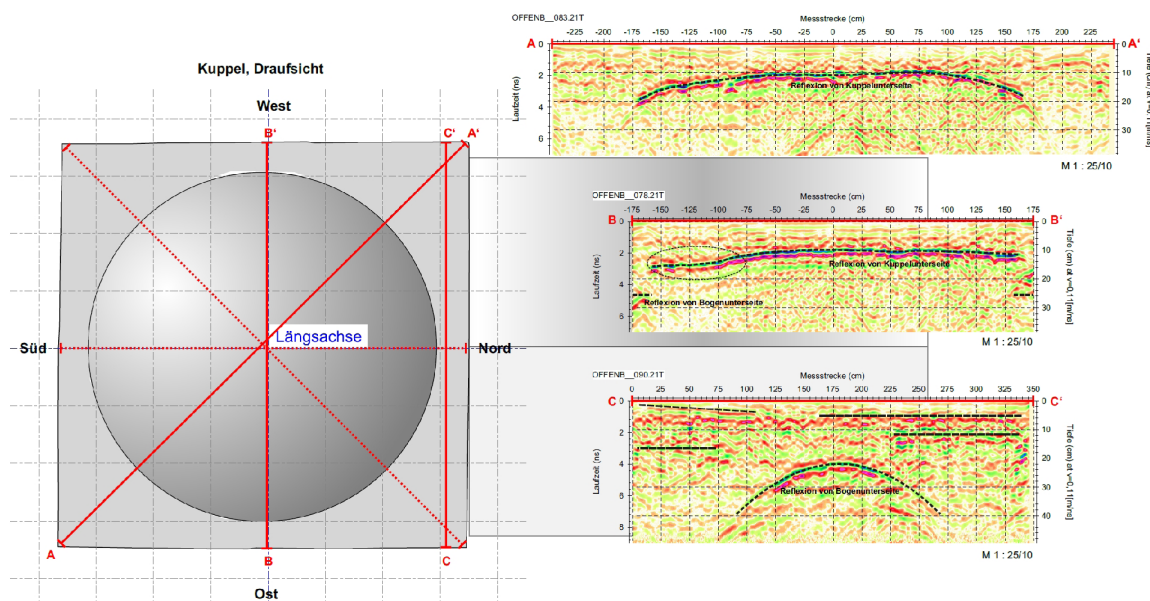


Abb. 21 Ergebnisse der Georadarmessungen an der Kuppelschale (GGU, Karlsruhe)

5 Zusammenfassung und Danksagung

Betonbauten der Hochmoderne markieren einen wesentlichen Teil der jüngeren Baugeschichte. Manche dieser Ingenieurbauwerke oder Architekturen sind bau- bzw. konstruktionsgeschichtlich bedeutend und stehen unter Denkmalschutz. Bei der Instandsetzung der Objekte und ihrer Sichtbetonoberflächen sind die Erfassung und Dokumentation der bauzeitlichen Struktur zentral, um die denkmalpflegerisch gewünschte Authentizität und Integrität des Bauwerks sicherzustellen. Hierzu stehen verschiedene Methoden der Bauaufnahme und Strukturerkundung zur Verfügung, deren Einsatz individuell geplant werden muss. Der Aufsatz zeigt aber auch, dass die Methoden der historischen Bauforschung – angewendet auf Betonbauten – und ein „genaues Hinsehen“ wesentlich zum Verständnis der individuellen Bau- und Konstruktionsgeschichte beitragen können.

Der Beitrag entstand im Rahmen des Teilprojekts B3 „Gealterte Hochmoderne in Architektur und Denkmalpflege. Analyse von Konstruktion und Material, Entwicklung von Erhaltungsstrategien und Instandsetzungsmaterialien für Stahlbetonbauwerke unter ingenieurwissenschaftlichen und denkmalpflegerischen Aspekten“ des SPP 2255 „Kulturerbe Konstruktion“ der DFG.

Literaturverzeichnis

- [1] Deutscher Werkbund Saarland: „Das Europe 1-Sendezentrum im Saarland Berus Überherrn“. In: Deutscher Werkbund Saarland (Hrsg.): *Resonanzen: Architektur im Aufbruch zu Europa 1945–1965* (Band 2). Saarbrücken, 2020.
- [2] Lorenz, W. / Espion, B.: „Die Sendehalle von Radio Europe 1 in Berus“. In: Bundesingenieurkammer (Hrsg.): *Historische Wahrzeichen der Ingenieurbaukunst in Deutschland* (Band 28). Berlin, 2021.
- [3] Koch, N. / Duppel, C.: „Der Fernsehturm des Senders Berus in Überherrn – Bauforschung an einem Ingenieurbauwerk der Hochmoderne“. In: *Bautechnik*, 101 (2024), 5, S. 287–298.
- [4] Koch, N. / Duppel, C.: „Ein avantgardistischer Fernsehturm“. In: *Industriekultur* (Heft 1.24), S. 8–9.
- [5] Koch, N. / Duppel, C.: „Die geometrische Erfassung von Betonstrukturen – Grenzen und Möglichkeiten am Beispiel des Sendeturms ‚Europe 1‘ in Überherrn-Berus“. In: *Betoninstandhaltung am Baudenkmal* (IFS-Bericht Nr. 65). 2023, S. 25–34.
- [6] St. Mauritius-Gemeinde in Wiesbaden: *St. Mauritius, 29. September 1968* (Broschüre zur Einweihung der Kirche nach Fertigstellung). 1968.
- [7] Katholische Pfarrei St. Bonifatius in Wiesbaden: *1968–2018, 50 Jahre St. Mauritius* (Broschüre). 2018.

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 5, 6, 12 Kirchenarchiv St. Mauritius, Wiesbaden
- Abb. 8 Labor für Bauforschung der Hochschule RheinMain, Wiesbaden, Jens Jost
- Abb. 16 Bereitgestellt von der Stadt Offenbach
- Abb. 19, 20, 21 Gesellschaft für Geophysikalische Untersuchungen mbH (GGU), Karlsruhe, Markus Hübner

Alle weiteren Abbildungen stammen von den Verfassern des Beitrags.

Cleo Reihl, Ludwig Wenzel und Matthias Jagfeld

DIE HISTORISCHEN PORTALE DES HAUPTBAHNHOF'S FRANKFURT

Untersuchungen für
ein Instandsetzungskonzept

DOI: 10.60628/9783738810493-281

Die ehemalige Schalterhalle des Hauptbahnhofs in Frankfurt am Main wird von zwei eindrucksvollen Portalen begrenzt, die auf den ersten Blick wie massive Bogenkonstruktionen erscheinen. Aufgrund geplanter Baumaßnahmen wünschte die DB InfraGO AG, ein Tochterunternehmen der Deutschen Bahn, die Untersuchung und Nachrechnung der Portale sowie die Entwicklung eines Instandsetzungskonzepts im Hinblick auf zukünftige baugrundinduzierte Verformungen. Der Auftrag wurde an die beiden Ingenieurbüros TFI-Jagfeld und Kayser+Böttges | Barthel+Maus (KB+BM) vergeben, als Nachunternehmer der Schmidt & Pütz Planungsgesellschaft mbH. Die Arbeiten umfassten die Auswertung historischer Pläne, handnahe Untersuchungen, Erkundungsöffnungen und statische Nachrechnungen mit ANSYS.

1 Einleitung

Zwischen dem Dach der Empfangshalle des Frankfurter Hauptbahnhofs und der für Reisende sichtbaren Rauminnenschale befindet sich ein begehbare Zwischenraum. In diesem Dachzwischenraum eröffnet sich beim Blick zum stadtseitigen Ostportal der Anblick einer Ziegelmauer – dargestellt in Abbildung 1 unten. Bei genauerem Hinsehen erkennt man bogenförmige, in den Regelverband integrierte Strukturen, die Köpfe eiserner Schlaudern und einen Bogen aus Sandsteinwerksteinen. Jedoch erschließt sich das Tragwerk nicht auf den ersten Blick. Besteht der Hauptbogen des Ostportals aus einer massiv durchgemauerten Ziegelstruktur, der an der Außenfassade lediglich eine Schicht von Werksteinen vorgeblendet ist? Dies erscheint unwahrscheinlich angesichts der Struktur, wie sie am zweiten Portal der Empfangshalle – dem Westportal in Richtung Gleishalle – nahezu offen zutage tritt. Dort zeigt der Dachzwischenraum keinen massiven Querschnitt, sondern über- und hintereinander gestaffelte, aufgelöste Strukturen aus Naturstein, Ziegelmauerwerk und einem eisernen Fachwerkträger. Wie also ist die innere Struktur bzw. das Tragwerk des Ostportals konstruiert?



Abb. 1

Ansicht des stadtseitigen Ostportals des Hauptbahnhofs in Frankfurt am Main – vom Vorplatz aus (oben) und im Dachzwischenraum mit Blick in Richtung Vorplatz (unten)

Für ein besseres Verständnis der Untersuchungen am Ostportal werden vorab der allgemeine Aufbau der beiden Portale und das Tragsystem des Westportals vorgestellt.

2 Aufbau der Portale

Das gleishallenseitige Westportal wurde 1885 errichtet. Das Ostportal am stadtseitigen Ende der Empfangshalle entstand rund ein Jahr später und bildet das zentrale Element der Bahnhofsfassade. Beide Portale setzen sich aus mehreren Bauteilen zusammen. Der sogenannte „Hauptbogen“ bildet in Längsachse der Empfangshalle jeweils den räumlichen Abschluss und tritt als Außenfassade in Erscheinung. Innerhalb der Empfangshalle schließt jeweils eine „Kassettendecke“ an (Abbildungen 2 und 3).

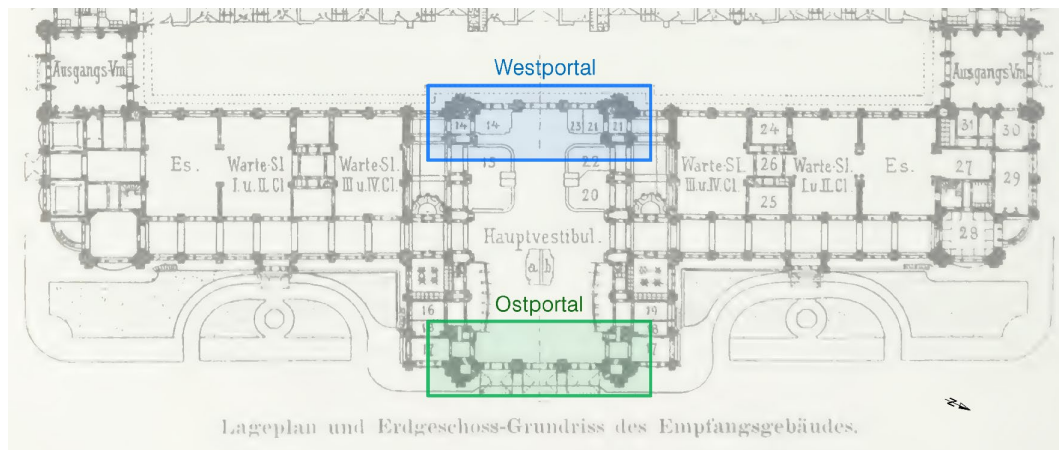


Abb. 2 Ausschnitt aus dem bauzeitlichen Grundriss mit Markierung der beiden Portale [1]

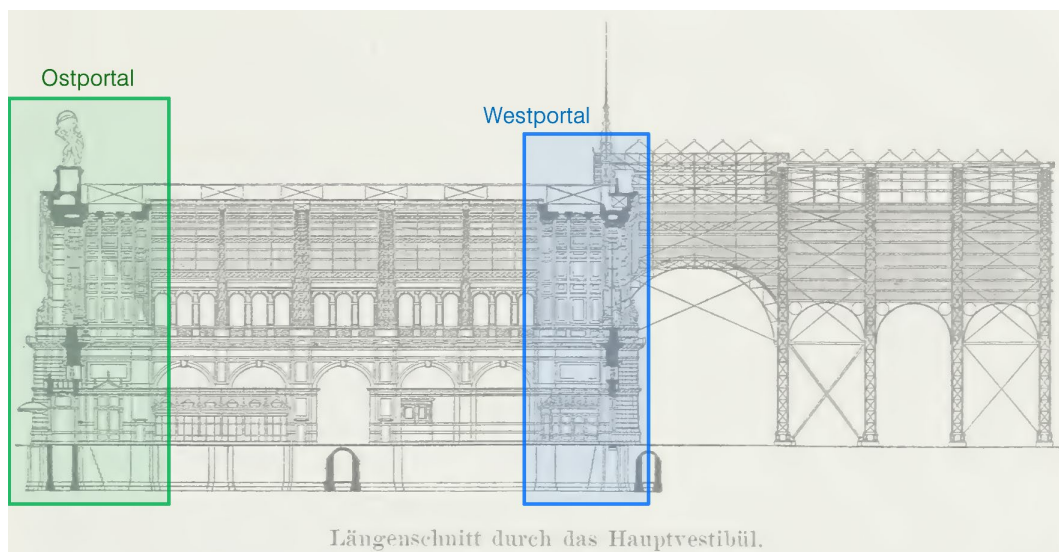


Abb. 3 Bauzeitlicher Längsschnitt durch die Empfangshalle (quer zur Längsachse der Portale) mit Markierung der beiden Portale [1]

3 Kassettendecken

Bei den Kassettendecken handelt es sich jeweils um ein ellipsoid gewölbtes Tonnengewölbe aus Ziegelmauerwerk. Namensgebend bilden die Rippen in Umfangs- und Hallenlängsrichtung eine kassettierte Untersicht. An einzelnen Längsrippen des Westportals wurden mittels Bauteilöffnungen eiserne Zuganker befundet. Mithilfe von Bauradaruntersuchungen des Ingenieurbüros Dr. Gabriele Patitz (IGP) an allen 16 Längsrippen je Gewölbe konnte belegt werden, dass die im Grundriss mittig liegenden 10 Längsrippen mit Zugankern versehen sind.

4 Hauptbogen Westportal

Am Westportal sind die einzelnen Tragwerksbestandteile im Wesentlichen gut ablesbar. Im Querschnitt betrachtet ist der Hauptbogen des Portals im unteren Bereich als U-förmiger, tragender und im Verband gemauerter Bogen hergestellt (Abbildung 4). Die beiden Schenkel des U-Querschnitts sind durch elf „fliegende Streben“ miteinander verbunden (Abbildung 5, Foto unten). Mit eisernen Schlaudern versehen, koppeln sie druck- und zugfest den Hauptbogen und die Kassettendecke. Alle über dem U-förmigen Querschnitt befindlichen Steinquerschnitte sind nicht Teil des tragenden Mauerwerksquerschnitts, sondern werden durch einen räumlichen Fachwerkträger aus Eisenprofilen getragen.

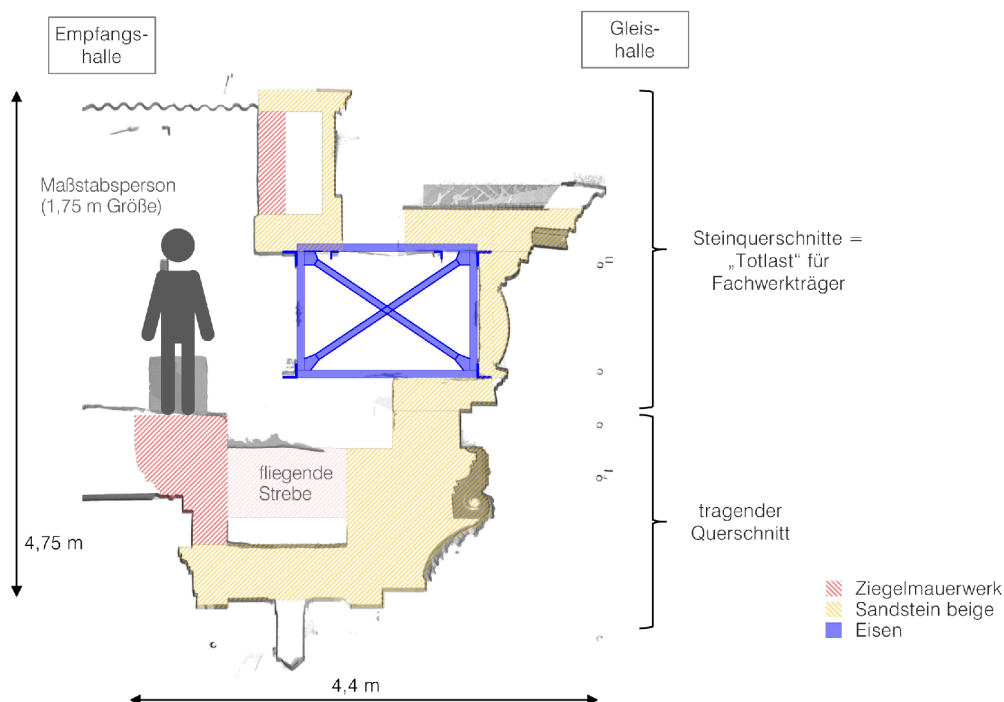


Abb. 4 Schnitt durch den Hauptbogen Westportal mit Blick in Richtung Süden. Die Kassettendecke ist hier nicht dargestellt.

5 Hauptbogen Ostportal

5.1 Strukturerkundung

Eine wichtige Grundlage für die Untersuchung des ostseitigen Hauptbogens bestand – wie beim Westportal – in den bauzeitlichen Steinschnittplänen für die Werksteinpartien des Bogens [2]. In einem ersten Schritt erfolgte ein Vergleich dieser Pläne mit dem Bestand. Die Pläne zeigen allerdings lediglich einen Teil des Bogenquerschnitts. Alle Querschnittsbereiche, die nicht aus Werkstein bestehen, sind nur andeutungsweise dargestellt. Für eine bessere Übersicht über die Bestandsstruktur wurde –



Abb. 5

Ansicht des Hauptbogens Westportal im Dachzwischenraum. Im oberen Foto ist vorn die Oberseite der Kassettendecke zu sehen. Im unteren Foto ist zur besseren Verständlichkeit eine der fliegenden Streben markiert.

ergänzend zu den vorhandenen Orthofotos aus Laserscans – eine farbige fotogrammetrische Abwicklung der im Dachzwischenraum sichtbaren Wand angefertigt.

Im direkten Vergleich zwischen bauzeitlichem Plan und Fotogrammetrie (Abbildung 6) lässt sich als Erstes der im Steinschnittplan rot markierte Bogen identifizieren. In der Wandansicht ist dieser Sandsteinbogen (im Folgenden „Entlastungsbogen“) in seinem Scheitelbereich zu sehen, bevor er kämpferseitig hinter dem Gurtbogen der Kassettendecke weitergeht. Außerdem sind immer dort, wo sich vor Ort eiserne Schlauderköpfe befinden, im Steinschnittplan zwei parallele vertikale Striche eingezeichnet. Diese Beobachtungen deuten auf wandartige Strukturen hin. In der Vergangenheit wurde etwas südlich des Scheitels, genau zwischen zwei dieser wandartigen Strukturen, eine Bauteilöffnung in der Wand erstellt (Abbildung 7). Die Ziegelmauer ist dort erkennbar etwa 65 cm stark. Dahinter zeigt sich ein rund 2,5 m tiefer Hohlraum, an dessen hinterem Ende Werksteine sichtbar sind. Ein kleines Tonnengewölbe schließt den Hohlraum oberseitig ab. In der Wandansicht finden sich Stirnseiten solcher Tonnengewölbe regelmäßig zwischen allen Eisenschlaudern, also zwischen den wandartigen Strukturen.

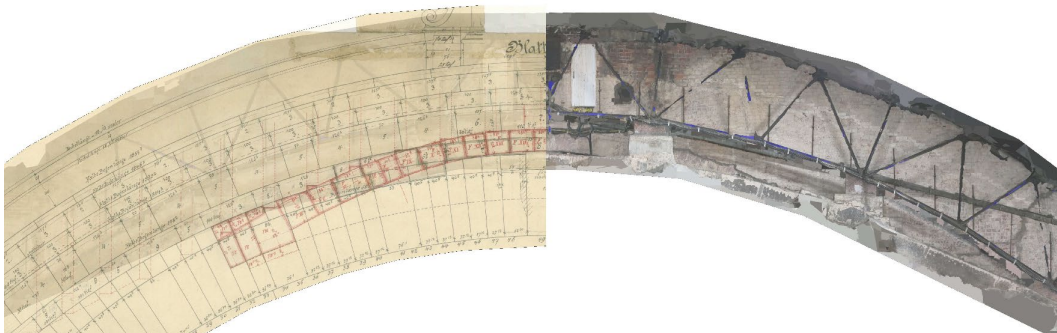


Abb. 6 Überlagerung des bauzeitlichen Steinschnittplans [2] mit der fotogrammetrischen Wandansicht des Ostportals; Blick vom Dachzwischenraum in Richtung Stadt bzw. Vorplatz (o. M.)

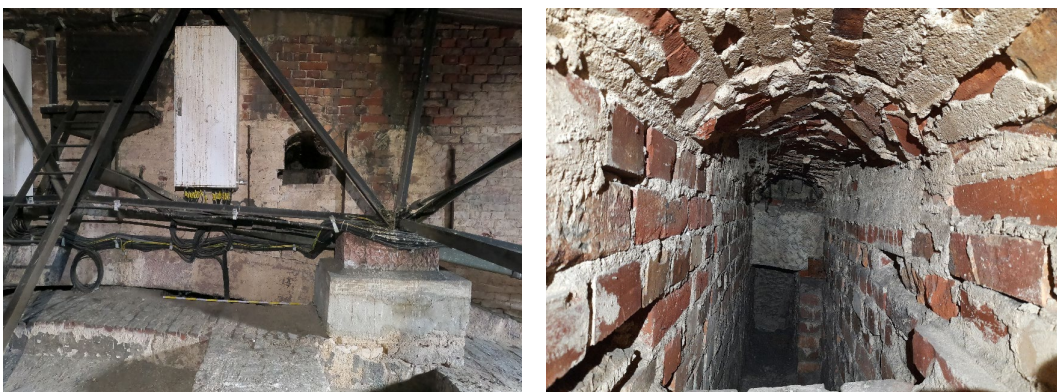


Abb. 7 Bauteilöffnung in der Ziegelwand des Ostportals; in der rechten Abbildung oben das Tonnengewölbe und mittig die Werksteine

Um zu prüfen, ob es sich tatsächlich um eine regelhafte Struktur mit vielen nebeneinander liegenden Hohlräumen handelt, erfolgte eine stichprobenhafte Untersuchung von Bauteilen. Hierfür wurden 20-mm-Bohrungen erstellt und endoskopiert. Dies erlaubte nicht nur die Erkundung der Hohlräume, sondern auch des weiteren Aufbaus, beispielsweise oberhalb der Trennwände zwischen den Hohlräumen (Abbildung 8 links).

Weitere Erkenntnisse aus dem bauzeitlichen Steinschnittplan lieferte die Analyse des Schnitts durch den Scheitel des Hauptbogens (Abbildung 8 rechts). Der Plan zeigt nicht den gesamten Querschnitt, sondern nur die Werksteinpartien im unteren Teil. Trotzdem wird deutlich, dass auch am Ostportal eine aufgelöste Struktur vorhanden ist. Ähnlich wie am Westportal besteht der untere Querschnittsteil aus einer durch fliegende Streben verbundenen U-Form. Der rot markierte Baukörper oberhalb der fliegenden Streben stellt den zuvor genannten Entlastungsbogen dar.

In der Gesamtschau mit weiteren, hier nicht erläuterten Erkenntnisschritten ergibt sich nun folgendes Konstruktionsprinzip: Nur die kämpfernahen Bogensegmente sind durchgehend massiv ausgebildet. Zwischen den beiden Drittelpunkten besteht der Bogen aus mehreren Bauteilen (Abbildung 9). Der untere Abschluss des Bogenquerschnitts ist U-förmig ausgeführt. Er setzt sich an der Unterseite und in Richtung Vorplatz aus beigem Sandstein zusammen, in Richtung Halle hingegen aus Ziegelmauerwerk. Im Bereich des Scheitels liegt darüber der Entlastungsbogen aus rotem Sandstein. Der Raum zwischen dem U-förmigen unteren Bogen und dem Entlastungsbogen weitet sich Richtung Scheitel auf. In diesem Raum verlaufen sieben fliegende Streben, wie auch am Westportal mit eingelegten Eisenschlaudern.

In Richtung Vorplatz liegen über dem Entlastungsbogen die oberen Gesimsebenen auf. Diese gehören zu dem vom Platz her sichtbaren Bogenaufbau aus beigem Sandstein. Als Gegenstück dazu befindet sich in Richtung Halle die zuvor schon beschriebene Ziegelwand, nachfolgend „Schildwand“ genannt, mit nahezu identischem

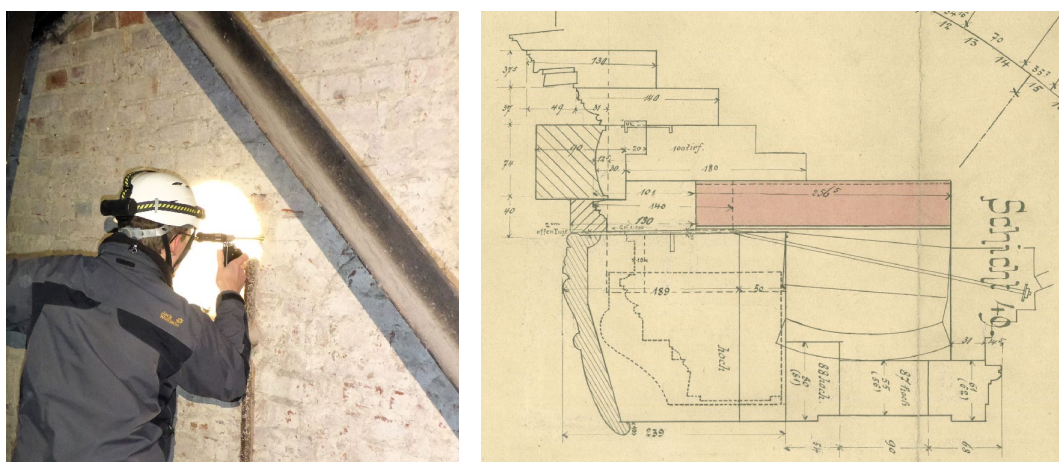


Abb. 8 Linke Abbildung: minimalinvasive Untersuchung mittels Endoskopie
Rechte Abbildung: Schnitt durch Scheitel des Bogens, Ausschnitt aus bauzeitlichem Steinschnittplan (o. M.) [2]

Querschnittsvolumen. Der Raum zwischen diesen Bauteilen wird durch eine aussteifende Hohlkammerkonstruktion ausgefüllt, deren Struktur der eines Aquädukts ähnelt (Abbildung 10). Die in der Regel etwa 25 cm starken Ziegelmauern sind in Längsrichtung mit eisernen Zugelementen durchzogen, durch Tonnengewölbe verbunden und begrenzen insgesamt 24 einzelne Kammern. Die Zwickel zwischen den

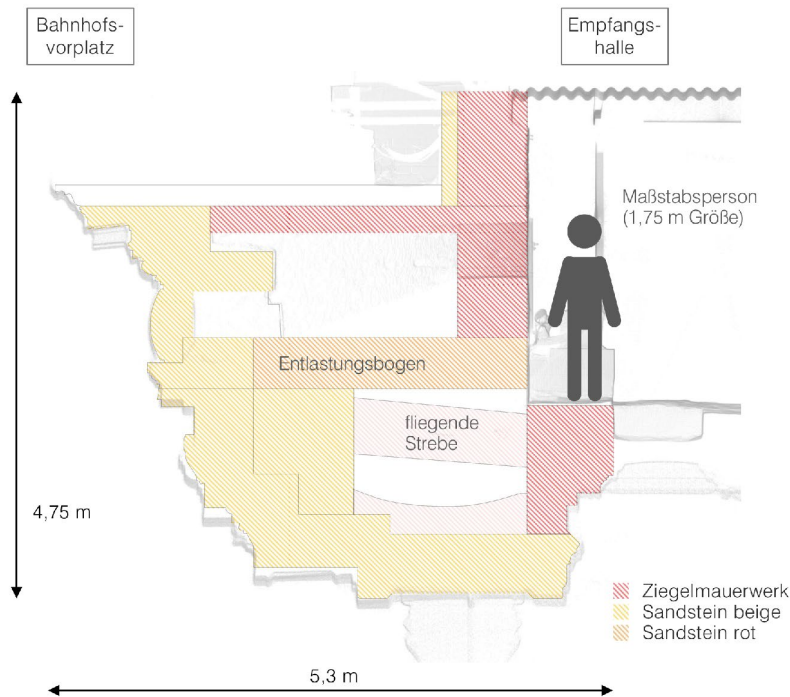


Abb. 9 Schnitt durch den Hauptbogen des Ostportals mit Blick in Richtung Süden; Kassetten-
decke hier nur andeutungsweise dargestellt

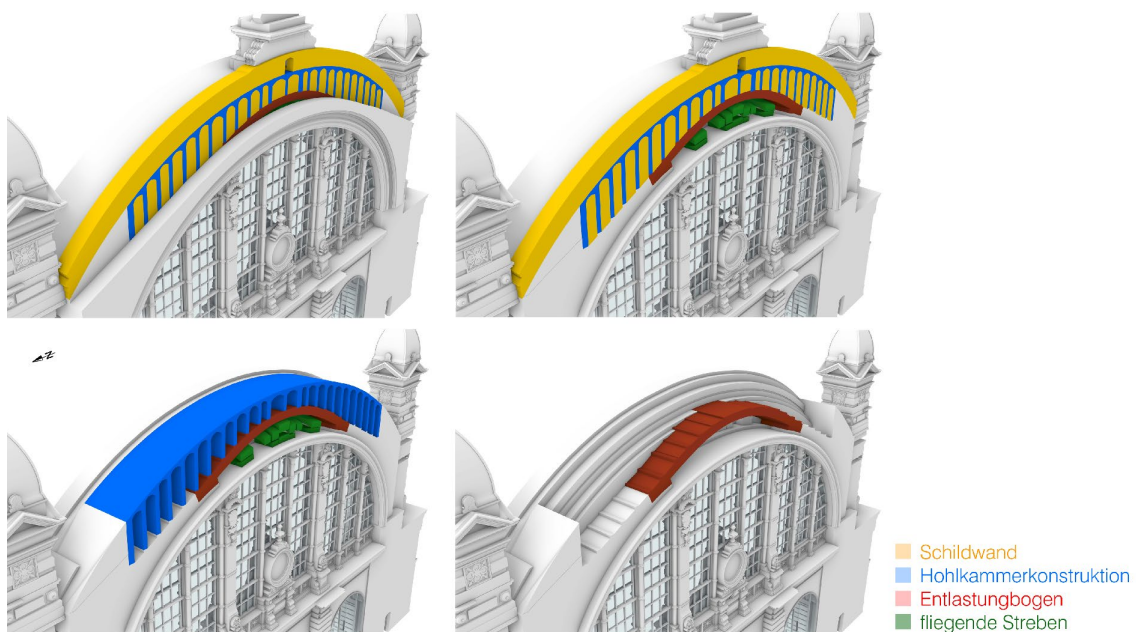


Abb. 10 3D-Modell der inneren Struktur des Hauptbogens Ostportal

Tonnengewölben sind augenscheinlich ausgemauert und bilden zusammen mit den Gewölbeflächen eine Mauerwerksscheibe.

Während der Entlastungsbogen nur den Bereich nahe des Scheitels bis etwas außerhalb der beiden Hauptstützen der Windschürze überspannt, ist die aussteifende Hohlkammerkonstruktion bis in die Drittelpunkte des Bogens gezogen. Zwischen den Drittelpunkten und den Bogenkämpfern besteht jeweils ein massiver Querschnitt aus Sandstein und Ziegelmauerwerk. Im Scheitel ist dem Bogen eine Firstbekrönung in Form einer kupfernen Atlasfigur auf einem Massivsockel aufgesetzt.

Im nächsten Schritt wurde anhand des bauzeitlichen Steinschnittplans und der Vor-Ort-Erkundungen ein schematisches, dreidimensionales Teilmodell der einzelnen Werksteine erstellt. Ausschnitte davon sind in Abbildung 11 zu sehen. Dabei zeigte sich noch einmal die enorme Komplexität der Struktur, vor allem in den ingenieurtechnischen Details. Erst auf dieser Stufe konnten einzelne Aspekte des Bogenaufbaus und damit relevante Fragestellungen des Lastabtrags ermittelt werden.

5.2 Tragwerksbestimmung durch Schadensanalyse

Aus der Kenntnis der Struktur des Hauptbogens allein erschließt sich nicht, welche Bestandteile davon auch Teil des Tragwerks sind – oder wie genau der Lastabtrag funktioniert. Erste Erkenntnisse zur Beantwortung dieser Fragen ergaben sich aus der Untersuchung der Schäden.

Im Rahmen einer Fassadensanierung 2013 waren die Oberflächen des Hauptbogens überarbeitet worden. Die vormals vorhandenen Schäden lassen sich daher heute erst nach genauer und handnaher Untersuchung erkennen. Um sie zu rekonstruieren, wurde eine aktuelle Schadensdokumentation mit Fotografien aus den 1990er-Jahren sowie aus der Zeit vor der Fassadensanierung 2013 kombiniert, was das nachfolgende Schadensbild am Hauptbogen Ostportal ergab. Sowohl Risse als auch geöffnete Fugen werden dabei vereinfacht als „Risse“ bezeichnet.

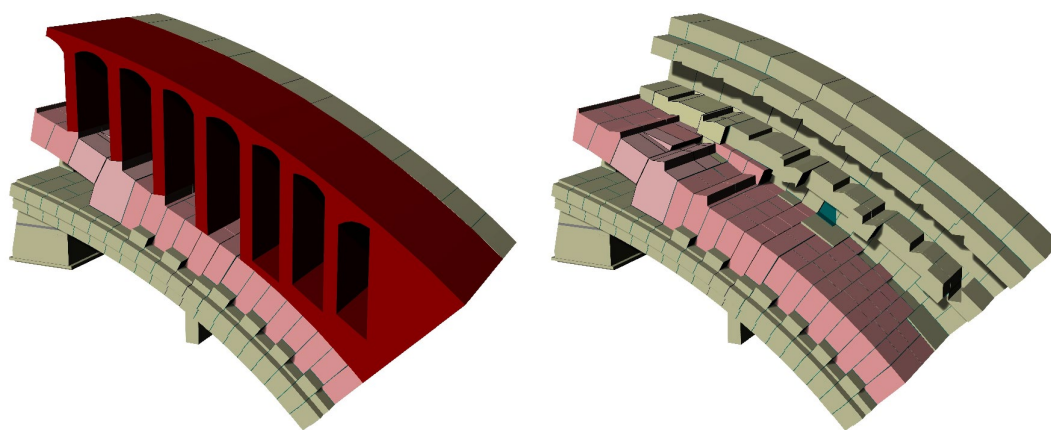


Abb. 11 Ausschnitte des steingenauen 3D-Modells mit Darstellung der einzelnen Werksteine

Die am Scheitel aufgelöste Struktur des Hauptbogens ist anhand entsprechender tangentialer Trennrisse ablesbar: Bewegen sich die Auflager des Bogens auseinander, reagieren die übereinander gestaffelten Teilbögen am Scheitel aufgrund ihrer unterschiedlich steilen Geometrie mit jeweils unterschiedlichen Verformungen ((1) und (2) in Abbildung 12). Es haben sich die für ein Bogentragwerk üblichen Risse gebildet – unterseitig am Scheitel sowie oberseitig an den Drittelpunkten ((3) und (4) in Abbildung 12).

Dieses Rissbild wird mit Schäden überlagert, die sich infolge des Ablegens des Hauptbogens auf die Stützen der Windschürze ergaben. Jeweils oberhalb der Stützen haben sich radiale bis vertikale Risse auf der Oberseite gebildet, da die Stützen als Zwangspunkte eine freie Verformung des Bogens verhindern ((5) bis (9) in Abbildung 12). Wenn sich der Außenpfeiler vertikal weiter nach unten bewegt, als es die Stütze der Windschürze zulässt, öffnen sich die Radialfugen ((10) in Abbildung 12).

Wahrscheinlicher Grund für die Risse und geöffneten Fugen ist der Bau der S- und U-Bahn in unmittelbarer Nähe des Portals in den 1970er-Jahren. In Konsequenz dieser Baumaßnahmen hat sich mindestens ein Pfeiler schiefgestellt und/oder nach außen bewegt. Bereits während der Maßnahmen wurden am Ostportal geöffnete Fugen festgestellt und Verpressarbeiten durchgeführt. Ende der 1990er-Jahre hielten offizielle Akten erneut Schäden am Ostportal fest. Ob es sich um nicht reparierte, alte Schäden aus den 1970er-Jahren oder um zeitverzögert aufgetretene Schäden handelte, lässt sich nach aktuellem Kenntnisstand nicht abschließend beurteilen. Seinerzeit entdeckte man, dass sich der Hauptbogen auf die Stützen der Windschürze abgesetzt hatte. Für die statische Instandsetzung des Bogens wurden die Stützenköpfe der Windschürze freigeschnitten und vorgespannte Zuganker auf Kämpferhöhe eingezogen.

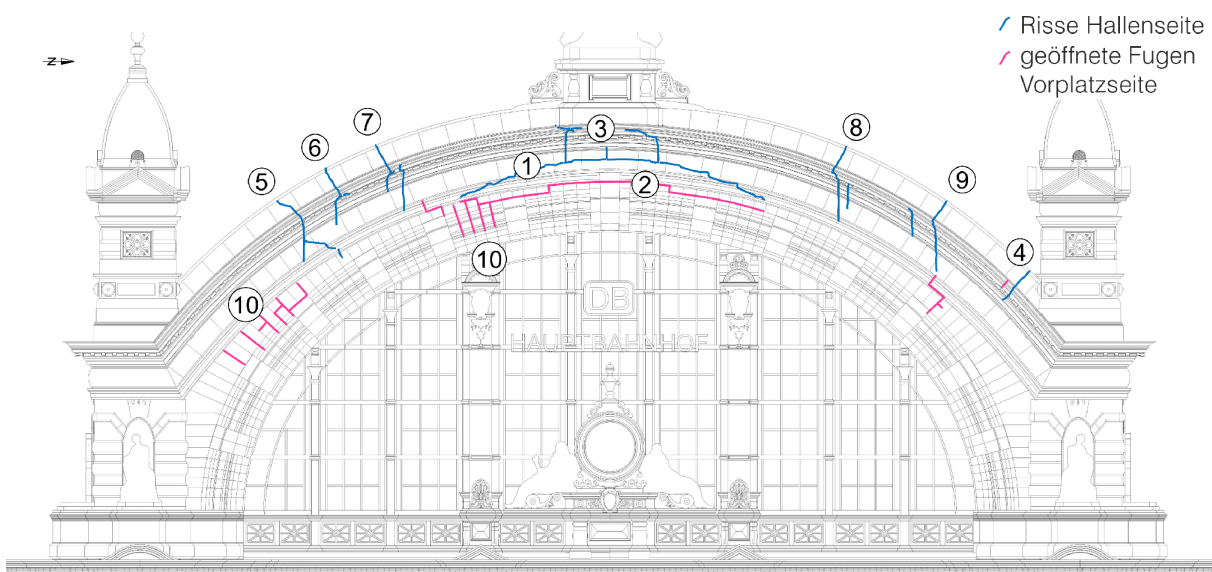


Abb. 12 Schematische Darstellung des Rissbilds am Hauptbogen Ostportal

Anhand des Rissbilds kann festgehalten werden, dass sich zwar eine globale Bogen-tragwirkung herausgebildet hat, der Hauptbogen jedoch Zwischenauflager in Form der Windschürzenstützen erhalten hatte. Außerdem ablesbar ist, dass auf der Hallenseite im Bereich des Scheitels auch obere Querschnittsbereiche zum Lastabtrag beitragen und sich hier ein Bogen ausgebildet hat. Indiz dafür sind die Intradosrisse ((3) in Abbildung 12), die sich dort bis kurz unter den Atlassockel hinaufziehen. Auf der Vorplatzseite ist dies nicht der Fall. Hier sind die oberen Querschnittsteile reine Auflast für die darunterliegenden Querschnitte.

Vermutlich waren auch am Ostportal nur der untere U-förmige Querschnitt und der Entlastungsbogen als tragend intendiert. Spätestens jedoch seit den Auflagerverformungen in der Vergangenheit sind am Lastabtrag auch die hallenseitige Schildwand, Teile der Hohlkammerkonstruktion und der Sockel der Atlasfigur beteiligt.

5.3 Tragwerksbestimmung durch statische Nachrechnung

Die Analyse der in der Vergangenheit aufgetretenen Schäden lässt erahnen, welche Bogenbestandteile zum Tragsystem gehören. Doch erst im Rahmen der statischen Nachrechnungen konnte ein plausibles, statisches System nachgewiesen werden. Um das iterativ und anhand von Parameterstudien entwickelte statische Modell auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM) zu validieren, erfolgte ein Vergleich des rechnerisch ermittelten Rissbilds mit den realen Rissen und geöffneten Fugen. Zeigte das Modell ein abweichendes Rissbild, wurde deutlich, dass die Verteilung der Steifigkeiten im Modell nicht derjenigen am realen Bogen entsprach und sich daher eine andere Verformungsfigur einstellt. Wird beispielsweise zwar die Schildwand, nicht aber der Atlassockel, im Modell für den Lastabtrag berücksichtigt, treten die Intradosrisse in der Schildwand zu nah am Scheitel auf. Statt der drei in Abbildung 12 zu sehenden Risse bei der Nummer (3) bildet sich nur ein einzelner Riss in der Mitte.

Für die Nachrechnung wurden beide Portalbögen und Kassettendecken als dreidimensionale Modelle mit der Simulationssoftware ANSYS (Ansys Mechanical, Release 2024 R2) erstellt. Berücksichtigte Faktoren umfassten das Eigengewicht und setzungsinduzierte Verformungen infolge vergangener ebenso wie geplanter Baumaßnahmen im Bereich der Empfangshalle. Auch Temperaturwirkungen flossen in die Untersuchung ein. Beim Ostportal wurden zudem Wind- und Schneelasten angesetzt.

Die gemauerten Bögen und die Kassettendecken wurden im Rechenmodell in einzelne Blöcke zerlegt. Gemäß dem Tragverhalten von Mauerwerkskonstruktionen können zwischen den Blöcken Druckkräfte und durch Reibung auch Schubkräfte übertragen werden, aber keine Zugkräfte. Innerhalb der Blöcke kam ein linear-elastisches Materialmodell zum Einsatz.

Aus Gründen der Rechenzeit konnte das FE-Netz im Gesamtmodell nicht so fein gewählt werden, wie es für eine ausreichend genaue Spannungsermittlung erforderlich

gewesen wäre. Um die Spannungen der maßgebenden Schnitte nahe dem Scheitel und an den Drittelpunkten nachzuweisen, wurden daher separate Teilmodelle mit feinerer Vernetzung erstellt (Submodeling; hier nicht abgebildet).

Die Verformungsbilder in Abbildung 13 zeigen deutlich das Ablegen des Bogens auf die beiden Hauptstützen der Windschürze. Außerdem erkennbar ist eine gute Übereinstimmung mit dem in Abbildung 12 dargestellten Rissbild am realen Bogen. Die Nummern weisen auf die entsprechenden dort beschriebenen Phänomene hin.

Die Simulationen haben gezeigt, dass beide Hauptbögen im unverformten Zustand ein niedriges Spannungsniveau aufweisen, jedoch empfindlich auf Verformungen der Auflager reagieren. Grund dafür ist die große Steifigkeit der Bögen, bedingt durch den sehr großen Querschnitt und durch die Tatsache, dass die Bögen hauptsächlich aus Werksteinmauerwerk mit geringem Fugenanteil errichtet wurden. Außerdem entspricht die Form der Bögen nicht der Form der Stützlinie. Letztere verläuft stattdessen

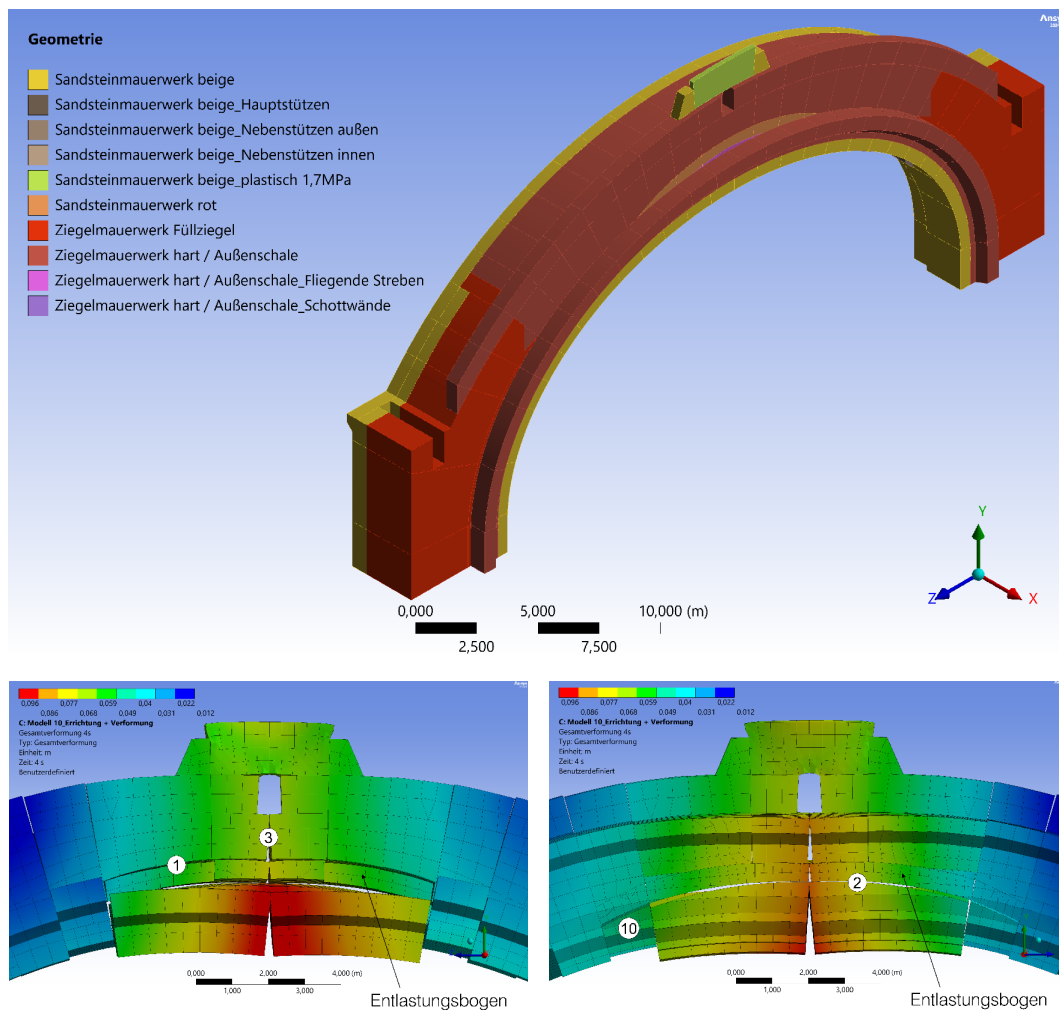


Abb. 13 Nachrechnung des Hauptbogens Ostportal. In der Abbildung oben ist der Modellaufbau zu sehen, in den Abbildungen unten die zehnfach überhöhte Verformung unter Eigen-gewicht, Wind-Schnee-Lasten sowie den im Bestand angenommenen Auflagerverfor-mungen – links Ansicht Hallenseite, rechts Ansicht Vorplatzseite.

durch einen größeren Querschnitt. Die Fähigkeit der Bögen, sich bei Verschiebung der Auflagerpunkte in eine für den Lastabtrag günstige Verformungsfigur zu begeben, ist daher begrenzt. Die Verformungen konzentrieren sich in wenigen Fugen, an denen sich die benachbarten Bogenteile verhältnismäßig stark gegeneinander verdrehen. Diese Blöcke stellen sich dabei „auf Kante“: Es entsteht eine Engstelle für die Kraft.

Das Resultat sind lokal hohe Spannungen. Übersteigen diese Spannungen die Mauerwerksfestigkeit, werden die äußersten Kanten abgesprengt – so am Ostportal in der Vergangenheit geschehen. Dieser Schadensmechanismus führt bei den hier untersuchten Tragwerken in Teilen zu einem günstigeren Tragverhalten, wenn Zwangspunkte abgebaut werden und sich ein für die Stützlinie besseres Verformungsbild einstellt. Dies konnte durch gesonderte, hier nicht dargestellte Berechnungen nachvollzogen werden. Die Auswertung dieser Berechnungen, zusammen mit der Bewertung der Schadensgeschichte, lässt auf eine Robustheit der Tragwerke schließen.

Die Nachrechnungen haben bestätigt, dass auch Bauteile, die ursprünglich wohl nicht als tragend intendiert waren, am Lastabtrag beteiligt sind – so wie die hallenseitige Schildwand, Teile der Hohlkammerkonstruktion und der Atlassockel. Die vorplatzseitigen oberen Querschnittsteile legen sich im Wesentlichen auf den Entlastungsbogen ab, ohne dass sich hier ein Bogen ausbildet. Daher entsteht auf der Vorplatzseite oberhalb des Entlastungsbogens – anders als auf der Hallenseite ((1) in Abbildung 13) – keine tangentielle Fuge. Die Steine verkanten sich lediglich etwas gegeneinander.

6 Instandsetzung

An den untersuchten Portalen besteht zwar Instandsetzungsbedarf, doch bis zur Durchführung dieser Arbeiten gibt es nach aktuellem Kenntnisstand zum Tragwerkszustand keine Zweifel an ausreichender Restsicherheit. Die geplanten Maßnahmen werden hier kurz beschrieben; auf eine ausführliche Darstellung wird verzichtet.

Kernziel der Instandsetzungsarbeiten ist es, weitere Verformungen der Auflager im Rahmen zukünftiger Baumaßnahmen auszuschließen bzw. auf ein sehr geringes Maß zu beschränken. Dazu sind unter anderem folgende Schritte vorgesehen:

Durch den Einbau ergänzender vorgespannter horizontaler Zuganker wird verhindert, dass die Pfeiler weiter nach außen ausweichen. Zusätzliche setzungsinduzierte, vertikale Verformungen der Auflager werden durch den Bauablauf und die Art und Weise der zukünftigen Fundamentarbeiten so gering wie möglich gehalten. Lokale Ertüchtigungsmaßnahmen, beispielsweise am Fachwerkträger und den Kassettendecken, erlauben Spannungsumlagerungen.

Die offenen Fugen werden kraftschlüssig mit an den Bestand angepasstem Mörtel injiziert. Damit wird die Robustheit der Tragwerke enorm erhöht: Bricht wider Erwarten aufgrund unvorhergesehener, baugrundinduzierter Verformungen eine Kante wegen

zu hoher Spannungskonzentration ab, steht direkt wieder ein großer Querschnitt zur Verfügung, der die Kräfte aufnehmen kann, ohne dass sich die Spannungen in den Randbereichen konzentrieren. Dabei ist das Schadenszenario „Kantenabbruch“ nur unter kontrollierten Baustellenbedingungen denkbar und somit ohne Auswirkung auf die öffentliche Verkehrssicherheit.

7 Zusammenfassung

Der Hauptbogen des ostseitigen Eingangsportals der Empfangshalle im Frankfurter Hauptbahnhof weist eine ausgeklügelte Struktur aus ineinandergreifenden Tragwerksbestandteilen auf. Zu sehen ist diese jedoch zunächst weder vom Vorplatz noch vom Dachzwischenraum aus. Es gibt nur einzelne Hinweise auf die vorhandenen Bauteile.

Erst nach einem detaillierten Studium der vorhandenen bauzeitlichen Pläne für die Werksteinpartien und einem genauen Abgleich der Planunterlagen mit den vor Ort einsehbaren Teilen des Hauptbogens ließ sich der grundlegende Aufbau ermitteln. Durch minimalinvasive Bauteilöffnungen und die Untersuchung mittels Endoskop wurden die Erkenntnisse aus den Planunterlagen stichprobenhaft bestätigt oder ergänzt.

Abschließend lässt sich für die zwei Portale folgendes Konstruktionsprinzip feststellen: Ein von außen massiv wirkender Mauerquerschnitt ist durch zum Teil verschlossene, zum Teil einsehbare Hohlräume aufgelöst, um Material und Gewicht zu sparen. Übereinander gestaffelte Bogentragwerke ermöglichen die enorme Querschnittshöhe der Hauptbögen. Die Sichtseiten sind zwar jeweils in der Regel aus Sandsteinelementen gebildet, doch die innenliegenden oder nicht sichtbaren Strukturen bestehen im Wesentlichen aus Ziegelmauerwerk.

Die lastabtragenden Bauteile wurden durch eine Analyse der vorhandenen Schäden sowie über die statische Nachrechnung mittels FEM in ANSYS ermittelt. Um das im Zuge der Nachrechnung iterativ entwickelte Modell zu validieren, wurde das rechnerische ermittelte Rissbild mit demjenigen am realen Bogen verglichen. Erst bei ausreichend genauer Übereinstimmung konnte davon ausgegangen werden, dass alle tragenden Bauteile enthalten und korrekt erfasst waren.

Das Ergebnis dieser detaillierten Herangehensweise war ein realistisches statisches Modell, mit dem sich der aktuelle Tragwerkszustand der beiden Portale der Empfangshalle im Hauptbahnhof Frankfurt zuverlässig abschätzen ließ. Ausgehend davon konnte ein behutsames Instandsetzungskonzept entwickelt werden, um diese einzigartigen Bauwerke zu erhalten.

Literaturverzeichnis

- [1] Eggert, Hermann / Frantz, Hermann: „Die Anlagen des neuen Centralbahnhofes: Das Hauptgebäude“. In: Architekten- und Ingenieur-Verein (Hrsg.): *Frankfurt am Main und seine Bauten*. Frankfurt a. M.: Selbstverlag des Vereins, 1886, S. 461–472 (in Kapitel „5.5 Eisenbahnbauten“ von O. Riese).
- [2] „Bogen am Hauptvestibüle, Vorderfaçade, Blatt III, F. 10, S8-8-30/44“. In: Institut für Stadtgeschichte (Hrsg.): *Bauzeitlicher Steinschnittplan*. Frankfurt a. M., genaues Datum unbekannt.

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 2 [1, S. 462]
- Abb. 3 [1, S. 467]
- Abb. 5 KB+BM auf Basis von 3D-Punktwolken der DB InfraGO AG, Frankfurt am Main
- Abb. 6 Linke Abbildung: [2]
- Abb. 8 Rechte Abbildung: [2]
- Abb. 9 KB+BM auf Basis von 3D-Punktwolken der DB InfraGO AG, Frankfurt am Main
- Abb. 10 KB+BM auf Basis eines 3D-Modells der DB InfraGO AG, Frankfurt am Main, erstellt durch Schmidt & Pütz Planungsgesellschaft mbH, Berlin
- Abb. 12 KB+BM auf Basis eines 3D-Modells der DB InfraGO AG, Frankfurt am Main, erstellt durch Schmidt & Pütz Planungsgesellschaft mbH, Berlin
- Abb. 13 KB+BM mit ANSYS Mechanical, Release 2024 R2

Alle weiteren Abbildungen stammen von Kayser + Böttges | Barthel + Maus: Ingenieure und Architekten GmbH, München.

Prof. Dr.-Ing. Ralf W. **Arndt**

Fachhochschule Erfurt
Altonaer Straße 25, 99085 Erfurt
ralf.arndt@fh-erfurt.de

Eva **Baldauf**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe
eva.baldauf@kit.edu

Dr.-Ing. Torsten **Bark**

BTU Cottbus-Senftenberg
Lipezker Straße 47, 03048 Cottbus
torsten.bark@b-tu.de

Mark **Böttges**

Kayser+Böttges | Barthel+Maus
Ingenieure und Architekten GmbH
Infanteriestraße 11a, 80797 München
m.boettges@kb-bm.de

Andreas **Bewer**

Bewer Ingenieure
W.-Siemens-Straße 7, 73765 Neuhausen a. d. F.
info@bewer.de

Prof. Dr.-Ing. Clemens **Brünenberg**

TU Darmstadt
El-Lissitzky-Straße 1, 64287 Darmstadt
clemens.bruenenberg@tu-darmstadt.de

Dr.-Ing. Andreas **Bruschke**

IMANI GmbH
Gnomenstieg 18, 01156 Dresden
andreas.bruschke@messbildstelle.de

Annina **De Carli-Lanfranconi**

Netzwerk Bau & Forschung
Gütliweg 2, CH-8280 Kreuzlingen
annina.decarli@hotmail.de

Prof. Dr.-Ing. Christoph **Duppel**

Hochschule RheinMain
Kurt-Schumacher-Ring 18, 65197 Wiesbaden
christoph.duppel@hs-rm.de

Dr.-Ing. Eric **Ewert**

Bau-Consult Hermsdorf Gesellschaft
beratender Ingenieure mbH
Linderbacher Weg 30 D, 99099 Erfurt
e.ewert@bauconsult-hdf.de

Dr.-Ing. Matthias **Frese**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe
matthias.frese@kit.edu

Dr. des. Jürgen **Giese**

Otto-Friedrich-Universität Bamberg
Am Zwinger 4, 96047 Bamberg
juergen.giese@uni-bamberg.de

Anna **Graff**

LVR-Amt für Denkmalpflege im Rheinland
Ehrenfriedstraße 19, 50250 Pulheim
anna.graff@lvr.de

Judith **Herrmann**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe
judith.herrmann@kit.edu

Markus **Hübner**

bzfp Büro für Zerstörungsfreie Prüfungen
Gewigstraße 22, 76131 Karlsruhe
mail@bzfp.de

Prof. Dr.-Ing. Matthias **Jagfeld**

TFI-Jagfeld
Brennerstraße 87, 82194 Gröbenzell,
info@tfi-jagfeld.de

Dr.-Ing. Nikolaus **Koch**

Hochschule RheinMain
Kurt-Schumacher-Ring 18, 65197 Wiesbaden
nikolaus.koch@hs-rm.de

Sebastian **Krück**

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
Fraunhoferstraße 10, 83626 Valley
sebastian.krueck@ibp.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Sabine **Kuban**

Landesamt für Denkmalpflege
im RP Stuttgart
Berliner Straße 12, 73728 Esslingen (Neckar)
sabine.kuban@rps.bwl.de

Michaela **Kuhn**

AriInfoWare GmbH
Innstraße 69b, 94032 Passau
michaela.kuhn@ariinfoware.de

Dr.-Ing. Andrea **Lilienthal**

BTU Cottbus-Senftenberg
Lipezker Straße 47, 03048 Cottbus
andrea.lilienthal@ibbgt.de

Anna **Luib**

strebewerk. Architekten GmbH
Reinsburgstraße 95, 70197 Stuttgart
anna.luib@strebewerk.de

Dipl.-Restauratorin Cornelia **Marinowitz**

Netzwerk Bau & Forschung
Ludwig-Gerer-Straße 27, 78250 Tengen
Marinowitz@hotmail.de

Prof. Dr.-Ing. Steffen **Marx**

Technische Universität Dresden
August-Bebel-Straße 30/30 a, 01062 Dresden
steffen.marx1@tu-dresden.de

Lennart **Meid**

Rettigheimer Straße 9, 69242 Mühlhausen
lennartmeido2@gmail.com

Dr.-Ing. Gabriele **Patitz**

IGP Ingenieurbüro für Bauwerksdiagnostik
und Schadensgutachten
Alter Brauhof 11, 76137 Karlsruhe
mail@gabrielepatitz.de

Cleo **Reihl**

Kayser+Böttges | Barthel+Maus
Ingenieure und Architekten GmbH
Infanteriestraße 11a, 80797 München
c.reihl@kb-bm.de

Dr.-Ing. Dorothea **Roos**

Stiftung Bauhaus Dessau
Gropiusallee 38, 06846 Dessau-Roßlau
roos@bauhaus-dessau.de

Dr. Alexander **Stenzer**

AriInfoWare GmbH
Innstraße 69 b, 94032 Passau
alexander.stenzer@ariinfoware.de

Timo **Vössing**

TU Darmstadt
El-Lissitzky-Straße 1, 64287 Darmstadt
timo.christopher.voessing@web.de

Prof. Dr.-Ing. David **Wendland**

BTU Cottbus-Senftenberg
Platz der Deutschen Einheit 1, 03046 Cottbus
david.wendland@b-tu.de

Ludwig **Wenzel**

Kayser+Böttges | Barthel+Maus
Ingenieure und Architekten GmbH
Infanteriestraße 11a, 80797 München
l.wenzel@kb-bm.de

Helene **Winker**

AeDis AG
Lerchenweg 21, 73061 Ebersbach-Roßwälden
h.winker@aedis-denkmal.de

