

Praktische Untersuchungen an Kulturgütern und Verkehrsbauten in der Baudenkmalpflege

Andreas HASENSTAB, Augsburg
Hans-Hermann NEUMANN, Hamburg
Christiane MAIERHOFER, Berlin
Ralf ARNDT, McLean, USA
Jan BLUHM, Nürnberg

Kurzfassung. Es werden Untersuchungen mittels unterschiedlicher zerstörungsfreier Prüfverfahren an Kulturgütern und Verkehrsbauten vorgestellt und gezeigt, dass wichtige Informationen über das jeweilige Bauwerk erzielt werden können. Es konnten Sanierungs- und Nutzungskonzepte optimiert und damit kostengünstiger gestaltet sowie die weitere Nutzung von Bauwerken sichergestellt werden. Mittels Feuchte- und Salzanalytik sowie Probeentnahme wurden eine Barockkirche und ein expressionistischer Klinker-/Stahlbetonbau untersucht. Radar, aktive Thermografie und Endoskopie werden bei Untersuchungen des Bodenaufbaus des Tassenkopfzimmers am Neuen Palais in Potsdam vorgestellt. Daten für eine erneute statische Berechnung einer Natursteinbrücke wurden mit Ultraschallecho- und Radarmessungen erzielt. Nicht visuell überprüfbare Fragestellungen, wie innere Fäule bei einer Bongossivollholzbrücke und durch Nagelplatten verdeckte Risse in einem Brettschichtholzbinder einer Kirche konnten mit Ultraschallecho lokalisiert werden bzw. es konnte gezeigt werden, dass keine Schäden vorhanden sind.

1 Einführung

Die Untersuchung von Bestandsbauten ist für alle Beteiligte eine anspruchsvolle Aufgabe. Besonders wenn keine oder nur unvollständige Pläne über das Bauwerk vorhanden sind oder Schäden vermutet werden, müssen möglichst viele Informationen durch Untersuchungen erlangt werden. Hierzu stehen eine Reihe zerstörungssarmer und zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Verfügung, wobei diese Verfahren größtenteils ursprünglich an Betonbauwerken bzw. in der Geophysik angewendet wurden.

In dem folgenden Artikel werden praktische Untersuchungen an historischen Kulturgütern wie einer Barockkirche in Süddeutschland, dem expressionistischen Krematorium Hamburg-Ohlsdorf, dem Spindlerboden des Tassenkopfzimmers des Neuen Palais Potsdam, einer Natursteinbogenbrücke sowie zweier Bauwerke neueren Datums, einer Brettschichtholzkirche bei München und einer Bongossibrücke bei Wuppertal beschrieben. Daneben werden die verschiedenen angewendeten Untersuchungsarten und -methoden beschrieben und es wird dargestellt, welche Vorteile die Untersuchungen für den Nutzer / Betreiber des Bauwerkes haben.

2 Untersuchungen an einer Barockkirche in Süddeutschland

2.1 Situation am Objekt und Aufgabenstellung

Die katholische Pfarrkirche wurde 1784 bis 1788 erbaut, die letzte Innenrenovierung mit einem Einbau einer Fußboden- und Warmluftheizung wurde 1975 bis 1982 durchgeführt, die letzte Außenrenovierung erfolgte 1994 bis 1997.

Trotz genannter Renovierungen waren an den Innen- und Außenwänden der Kirche Feuchtigkeitsränder bzw. Salzausblühungen sichtbar. Zum Beheben dieser unansehnlichen Schäden war eine dauerhafte Sanierung der Kirche geplant. Mittels Voruntersuchungen sollten möglichst viele Daten über das Bauwerk gesammelt werden, um die Bereiche der erforderlichen Sanierung zu optimieren und so Kosten zu sparen. Für die Planung der Untersuchungen spielte ein künstlerisch wertvoller Kreuzweg aus Gips eine besondere Rolle, da die Befürchtung bestand, dass es bei einer zu hohen Feuchte zu einer Schädigung des Gipses kommen kann. Die Wandstärke betrug ca. 0,8 m (die Untersuchungen ergaben, dass der Wandaufbau wie folgt ist: ca. 20 cm Naturstein, 40 cm Schüttung und 20 cm Naturstein)



Abbildung 1: Katholische Barockkirche in Süddeutschland, Außenansicht (links); Darstellung eines Höhenprofils zur Salzgehalt- und Feuchtebestimmung (rechts)

2.2 Untersuchungsmethoden

Zunächst erfolgte eine visuelle Begutachtung der Schäden und ein Vergleich mit den vorhandenen Plänen. Weiter wurde an ausgewählten Stellen

- die Feuchte mittels Darmmethode,
- der Salzgehalt aus Bohrmehlproben und
- die Wasseraufnahme der Oberflächen bestimmt.

Eine genaue Erläuterung der einzelnen Verfahren kann [16] entnommen werden.

Die **Feuchtebestimmung** erfolgte mittels Darmmethode an entnommenem Bohrmehl. Gegenüber der Entnahme von Bohrkernen ist die Entnahme von Bohrmehl weit weniger aufwändig und hat den Vorteil, dass die Pulverisierung von Stückproben zur Salzbestimmung entfällt. Nach Messungen verschiedener Institute werden bei der thermogravimetrischen Feuchtebestimmung an Bohrkernen und an Bohrmehl annähernd

die gleichen Werte erzielt. Voraussetzung ist, dass bei der Bohrmehlentnahme darauf geachtet wird, dass der Bohrer nicht so heiß wird, dass Wasser beim Bohren verdampft. Auch die hygroskopische Feuchteaufnahme wird an Bohrmehlproben bestimmt, mit dem Vorteil, dass die Einstellung der Gleichgewichtsfeuchte sehr viel schneller erfolgt.

Die **Analytik der bauschädlichen Salze** wurde für die Kationen Calcium und Magnesium und die Anionen und mit Hilfe eines wässrigen Auszugs, einer quantitativen Komplexbildung und der quantitativen Erfassung mittels Photometer durchgeführt. Natrium und Kalium wurden mittels Atom-Absorptions-Spektroskopie (AAS) bestimmt.

Die **Prüfung der Wasseraufnahme** wurde an unterschiedlichen Stellen der Wand mittels Wassereindringprüfer nach Karsten vorgenommen. Die Messungen wurden in den Zeitintervallen 1, 5, 10 und 15 Minuten durchgeführt.

Um das **Einbinden des Fundamentes** in den Boden besser beurteilen zu können, wurden einmal an der Nordwand und einmal an der Südwand **Schürfe** bis in eine Tiefe von ca. 0,9 m angelegt.

2.3 Ergebnisse der Untersuchungen

Folgend werden die Ergebnisse der Untersuchungen knapp beschrieben und exemplarisch nur einige Auffälligkeiten dargestellt.

Die visuellen Begutachtung der Schäden

ergab, dass sich die Schäden nicht an allen Außen- und Innenwänden gleichmäßig darstellten. Durch ein Unterteilen der Schäden in Salzausblühungen, Wasserränder, Abplatzungen und Bereiche ohne jegliche Schäden und dem Einzeichnen dieser Merkmale in Pläne konnte eine erste Systematik der Schäden erkannt werden.

Die Feuchteuntersuchungen aus Bohrmehlproben

an den Wänden ergaben, dass es sich um eine Kombination von Oberflächenfeuchte und echter aufsteigender Feuchte handelt. Die aufsteigende Feuchte drückt sich durch eine Zunahme der Feuchte zum Kern hin aus.

Wenn Feuchteuntersuchungen durchgeführt werden muss immer beachtet werden, ob die gemessenen Ergebnisse auch die bauphysikalische Wirklichkeit widerspiegeln. Beispielsweise kann eine hohe Oberflächenfeuchte an der Innenseite der Nordwand der Kirche im Bereich des Kreuzweges daran liegen, dass zum Zeitpunkt der Untersuchungen eine hohe Außentemperatur vorherrschte und die warme, wasserdampfgesättigte Luft an der Oberfläche der kalten Kirchenwand kondensierte und so eine hohe Oberflächenfeuchte zur Folge hat. Die sich daraus ergebende Schimmelgefahr ist zwar theoretisch möglich, aber eine Inaugenscheinnahme der Oberfläche ergab keine Anzeichen von Schimmel, was bedeutet, dass die hohe Oberflächenfeuchte im Bereich des Kreuzganges nicht weiter betrachtet werden muss und auch keine teure Sanierung für diesen Bereich erforderlich ist.

Weiter können die hohen Oberflächenfeuchten im Bereich des Sockels an der nördlichen Außenwand durch Schlagregen der starken Regenfälle der vergangenen Tage hervorgerufen worden sein, so dass erst die Feuchte aus der Tiefe von einigen Zentimetern für die Sanierungsempfehlung berücksichtigt werden sollte.

Die Salzuntersuchungen aus Bohrmehlproben

ergaben, dass es sich vorwiegend um Salze handelt, die Gips zugeordnet werden können. Dies ist nicht verwunderlich, da im Bereich des Kreuzganges ein Gipsputz verwendet wurde. Da nur bei einer Messung etwas erhöhte Nitratwerte bestimmt wurden und diese

Nitratbelastung nach dem WTA-Merkblatt nur als gering einzustufen ist, kann auf eine weitere Behandlung des Nitrates verzichtet werden.

Bei den sichtbaren Ausblühungen am Boden (Marmorplatten) handelt es sich nur um Kalk, der durch Feuchtigkeit aus dem Marmor gelöst wird.

Die Prüfung der Wasseraufnahme vor Ort

ergab, dass an der Außenwand der Kirche nur im Sockelbereich eine starke Wasseraufnahme vorhanden ist, die anderen Bereiche hydrophob eingestellt sind.

Die Schürfungen/Öffnungen

ergaben, dass das Fundament aus Bruchsandstein besteht und keinerlei Feuchteschutz vorhanden ist. Sowohl das Erdreich im Bereich des Fundamentes als auch die Steine des Fundamentes waren sehr nass und so ist immer ausreichend Feuchte zum Durchfeuchten der Wand vorhanden.

2.4 Instandsetzungskonzept

Aus den detaillierten Untersuchungen ergab sich ein Konzept, dass sich mit dem Problem der aufsteigenden Feuchte besonders beschäftigt, d. h. praktisch muss versucht werden, dass möglichst wenig Wasser in das Mauerwerk bzw. das Fundament eindringen kann und so kein Wasser mehr aufsteigen kann. Ziel ist es somit, das Fundament gegen Wasser zu schützen und eine Horizontalsperre gegen die aufsteigende Feuchte einzubringen. Konzepte zu einer chemischen bzw. mechanischen Sperre wurden erarbeitet.

Unabhängig von einer intakten Horizontalsperre muss die restliche, noch vorhandene Feuchtigkeit im Mauerwerk beachtet werden, da es noch zu weiteren Abplatzungen und Salzrändern kommen kann. Es wurden verschiedene Lösungskonzepte erarbeitet, die sich sowohl in der Ausdehnung der unterschiedlichen Putze wie auch zwischen einem Opferputz der obersten Schicht bzw. einem tiefergehenden Austausch aller Putzschichten unterschieden.

3 Untersuchungen an dem expressionistischen Krematorium in Hamburg-Ohlsdorf

Um zu zeigen, dass die unter Abschnitt 2 angewendeten Untersuchungsmethoden nicht nur an sehr alten Konstruktionen wie Barockkirchen, sondern auch bei Konstruktionen aus Stahlbeton angewendet werden können, werden im folgenden Abschnitt Untersuchungen am expressionistischen Krematoriums Hamburg-Ohlsdorf vorgestellt.

3.1 Situation am Objekt und Aufgabenstellung

Das Krematorium auf dem Hauptfriedhof Ohlsdorf der Freien und Hansestadt Hamburg wurde 1933 fertiggestellt und ist der letzte Bau von Fritz Schuhmacher, der lange Jahre durch seine Entwürfe das Stadtbild in seiner Funktion als Oberbaudirektor geprägt hat.

Das Krematorium besteht aus einer zentralen Haupthalle und zwei Nebenhallen.

Der Ursprungsbau steht noch nicht unter Denkmalschutz, ist aber z. B. aufgrund seines expressionistischen Mosaiks in der Haupthalle und der vielen in das Sichtmauerwerk integrierten Formsteine und keramischen Reliefs denkmalwürdig.

Das Krematorium ist derzeit aufgrund von Emissionsvorgaben nicht in Betrieb, soll aber Instand gesetzt und gemäß planerischem Konzept integraler Bestandteil eines Bestattungsforums werden. Um den Zustand des Bauwerks und die Möglichkeiten für eine

weitere Nutzung und Umnutzbarkeit abschätzen zu können wurde eine Bauzustandsanalyse durchgeführt.

Bei dem Objekt handelt es sich um eine Stahlbetonkonstruktion in Kombination mit Sichtmauerwerk, dessen Wetterschale aus Hartbranntklinkern besteht. In der Haupthalle bilden im Keller bzw. im Tiefkeller beginnende Stahlbetonspannen, die im Firstbereich aufeinander zulaufen, die Grundkonstruktion. Die Zwischenräume wurden ausgemauert. Die gesamte Außenfassade weist eine Hartbranntklinkerwetterschale auf. Im Dachbereich, der heute eine Kupfereindeckung besitzt, befinden sich zwischen den Stahlbetonspannen Stahlbetonplatten. Darauf befindet sich ein komplexer Abdichtungsaufbau und schließlich eine Hartbranntklinkerschicht. Die Kupfereindeckung erfolgte aufgrund von Undichtigkeiten in der steinsichtigen Dacheindeckung. In den Galeriegängen und Nebenhallen sind Stahlbetonringanker und Stahlbetondecken vorhanden.



Abbildung 2: Außenansicht des Krematoriums Hamburg-Ohlsdorf (links); Schädigung an tragender Stahlbetonstütze und nichttragender Raumteiwand (rechts): die Schädigung an der nichttragenden Raumteiwand erscheint zwar größer, ist aber von der Wertigkeit her der Schädigung an der tragenden Stahlbetonstütze nachzuordnen.

3.2 Untersuchungsmethoden

Der Untersuchungsansatz basiert auf einer visuellen Vorabinspektion. Sichtbare Schäden waren Salz- und Feuchteschäden in den Kellern und dem Untergeschoss im erdberührten Bereich sowie auf den Innenseiten infolge von Rissen im Mauerwerk, die konstruktionsabhängig auftraten. Hinzu kamen Schäden durch Bewuchs (Moos, Sträucher, kleine Bäume). Daraus ergaben sich nachfolgenden maßnahmenorientierte Untersuchungen:

- Schürfgaben und verschiedene Sondierungsöffnungen zur Ermittlung des Istzustandes relevanter Bauteilabmessungen (Fundamente, Stützenfüße, Abdichtungen),
- Bestimmung der Wasseraufnahme der Außenschale (Klinkermauerwerk) mittels Wassereindringprüfer nach Karsten bzw. Wasseraufnahme-Prüfplatte nach Franke,
- Bestimmung der Feuchte- und Salzgehalte mittels tiefensegmentierter Bohrmehlproben,
- Bohrkernentnahmen aus dem inneren und äußeren Mauerwerk zur Bestimmung der maximalen Wasseraufnahme, chemischen Putz-, Fugenmörtel- und

Mauermörtelzusammensetzung einschließlich Sieblinie sowie der lichtmikroskopischen Gefüge- und Mineralphasenuntersuchung,

- Bohrkernentnahmen aus Beton zur Ermittlung der Karbonatisierungstiefe, der Druckfestigkeit und des Bindemittelzuschlag-Verhältnisses,
- Entnahme von Stückproben aus Beton zur Bestimmung ihres Feuchtegehaltes, der maximalen Wasseraufnahme und der Karbonatisierungstiefe,
- Bestimmung des vorhandenen Pilzmycels um sicher zu sein, dass es sich um einen Kellerschwamm und nicht um einen Hausschwamm handelt (es war zum Glück überall nur Kellerschwamm vorhanden).

3.3 Ergebnisse der Untersuchungen

Die Salzbelastung ist auf Teilbereiche begrenzt. Die Durchfeuchtung hingegen ist sehr viel umfassender als die Salzbelastung und erfordert folgende Maßnahmen:

- Herstellen einer schlagregendichten Gebäudehülle,
- Abdichten der erdberührenden Bauteile und
- Sanierung der tragenden Stahlbetonkonstruktion.

Da die Schäden sowohl die Gebäudehülle als auch die Konstruktion betreffen, ist eine enge interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Fachleuten wie Bauchemiker, Restaurator, Architekt und Statiker dringend geboten. Im Fall von denkmalwürdigen Objekten und Denkmälern sind die Zielvorstellungen der Denkmalpflege zu berücksichtigen und gemeinsam die Authentizität des Bauwerks und die technischen Notwendigkeit für die weitere Nutzung gegeneinander abzuwägen. Am genannten Bauwerk ergaben die Untersuchungen wertvolle Ergebnisse, die eine weitere Planung der Räume, z. B. Trauerhalle oder Kühlräume, stark beeinflusste, da der künftige Sanierungs- und Umbauaufwand je nach Gebädetrakt sehr unterschiedlich war.

4 Untersuchung des Spindlerboden im Tassenkopfzimmer (Neues Palais Potsdam)

4.1 Situation am Objekt und Aufgabenstellung

Die Studienrichtung „Restaurierung von Holzobjekten“ der Fachhochschule Potsdam führt in Zusammenarbeit mit der Stiftung „Preußische Schlösser und Gärten Berlin-Brandenburg“ allgemeine Zustandsuntersuchungen an den Parkettfußböden des „Neuen Palais“ in Potsdam durch [15]. Im Rahmen der Untersuchung des Holzfußbodens des Tassenkopfzimmers ergaben sich Aufgabenstellungen, die mit Hilfe von zerstörungsfreien Prüfverfahren gelöst werden sollten. Daher wurde in dieser Phase auch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) mit eingebunden. Zur Bestimmung einer für den Besucherverkehr zulässigen Nutzlast sollte die Lage der Balken (Tragrichtung und Abstände der Balken) im Tassenkopfzimmer untersucht werden.



Abbildung 3: Außenansicht des Neuen Palais in Potsdam (links); Messung mit 1,5 GHz Antenne (GSSI) im Tassenkopfzimmer des Neuen Palais

4.2 Untersuchungsmethoden

Eine detaillierte Beschreibung der Verfahren kann [10] entnommen werden.

Als Verfahren wurde Radar, aktive Thermografie und Endoskopie erfolgreich eingesetzt, die Ergebnisse mit Ultraschallecho waren für die praktische Fragestellung nicht zielführend.

4.2.1 Radar

Das Radar-Verfahren (oder auch GPR: Ground Penetrating Radar) basiert auf der Ausbreitung sehr kurzer elektromagnetischer Impulse im Frequenzbereich bis oberhalb von 1 GHz, die in die zu untersuchende Struktur abgestrahlt werden. Diese Impulse werden an Grenzflächen innerhalb der Struktur reflektiert und von einer Empfangsantenne detektiert. Die Laufzeit der reflektierten Impulse sowie die Intensität der Reflexionen sind dabei von den dielektrischen Eigenschaften der jeweiligen Materialien abhängig. Reflexionen treten z. B. an Hohlstellen, metallischen Einschlüssen oder auch an der Rückseite des Bauteils auf.

Weitere Informationen zum Radarverfahren und die Anwendungsbereiche des Verfahrens können der Literatur entnommen werden [4]. Die Ortung von Holzbalken in Boden- und Deckenkonstruktionen wurde bereits erfolgreich von [13] durchgeführt.

Für die Untersuchungen am Tassenkopfzimmer wurden die Radarmessungen mit dem kommerziellen Radargerät SIR 20 von der Firma GSSI (USA) mit einer 1,5 GHz Antenne durchgeführt. Dabei wurden zur Untersuchung des Fußbodenaufbaus im Tassenkopfzimmer neun in Längsrichtung verlaufende Messspuren und zwölf quer dazu verlaufende Messspuren aufgenommen.

4.2.2 Thermografie

Ziel der passiven sowie der aktiven Thermografie, bei der durch zusätzliche Erwärmung ein instationärer Temperaturgradient und Wärmefluss erzeugt wird, ist der Nachweis und die quantitative Charakterisierung von Fehlstellen und Inhomogenitäten in der zu untersuchenden Struktur, die sich aufgrund unterschiedlicher thermischer Eigenschaften vom umgebenden Material unterscheiden.

Bei der aktiven Thermografie kann die Anregung - zeitlichen gesehen - stufenförmig, impulsartig (z. B. Impuls-Thermografie) oder periodisch (z. B. Lock-In-Thermografie)

erfolgen. Bei der im Folgenden angewendeten Impuls-Thermografie (IT) wird die Oberfläche des untersuchten Bauteils durch einen Wärmeimpuls erwärmt. Der anschließende Abkühlungsvorgang wird bildgebend mit einer Infrarot-Kamera aufgenommen. Die zeitliche Veränderung der Oberflächentemperatur wird als Abfolge von Thermogrammen digitalisiert und gespeichert (Sequenz).

Typischerweise erscheinen tiefere Defekte zu einem späteren Zeitpunkt und mit geringerem Temperaturkontrast.

Weitere Auswertungen der Sequenzen beinhalten deren Darstellung im Frequenzbereich (Puls-Phasen-Thermografie, PPT). Hierzu werden die Temperaturtransienten der einzelnen Pixel mittels Fourier-Transformation in den Frequenzbereich transformiert und als Amplituden- und Phasenbilder dargestellt. Dies ermöglicht eine kontrastreichere Darstellung der Fehlstellen sowie eine deutliche Reduzierung des Einflusses von Oberflächeneffekten, wie inhomogene Verteilungen der Emissivitäten oder inhomogene Erwärmung.

Bei der Untersuchung des Holzfußbodens wurden jeweils Messfelder mit einer Größe von ca. 1 m² untersucht. Die Messfelder wurden manuell 3 bis 5 Minuten lang mit einem elektrischen Heizlüfter vorsichtig erwärmt. Anschließend wurde die Abkühlung der Oberflächen über einen Zeitraum von jeweils 15 Minuten mit einer Infrarot-Kamera erfasst. Hierzu wurde die Infrarot-Kamera „ThermaCAM SC1000“ von Inframetrics (FLIR System GmbH) genutzt. Die Thermogramme wurden mit einer Bildwiederholrate von 10 Hz erfasst. Abbildung 4 zeigt ein Foto und ein Phasenbild eines Messfeldes. Im Phasenbild ist deutlich die Lage und Struktur der Holztafel unterhalb des Furniers sowie die Position von Verbindungselementen (Holzdübel) zu erkennen.

4.2.3 Endoskopie

Ein sehr gutes Verfahren zur Untersuchung von Bauwerken ist das allgemein bekannte Endoskop. Bei der Untersuchung im Tassenkopfzimmer war es an zwei Stellen möglich ohne neue Bohrungen in vorhandene Löcher das Endoskop einzuführen, um einen direkten, visuellen Eindruck zu bekommen.

4.3 Ergebnisse der Untersuchungen

Die **Radaruntersuchungen** ergaben, dass die Tragrichtung der Holzbalken nicht wie vermutet über den kürzeren Abstand sondern über die größere Breite verläuft. Zudem wurde ein Balkenabstand von etwa 50 cm und darunter bestimmt. Weitere stärkere Reflexionen sind in einer größeren Tiefe zu beobachten, die durch das sich unter dem Fußboden befindende Mauerwerksgewölbe verursacht werden. Mit den Messungen konnte daher die Tragrichtung der Balken und ungefähre Lage der Balken bestimmt werden, was für eine spätere statische Zulassung der Deckenlasten erforderlich war.

Die **Thermografiemessungen** ergaben, dass unter der Oberfläche verborgene Nägel, Schrauben oder Dübel lokalisiert werden können. Zudem können im Phasenbild die Fugen zweier Tafeln der tragenden Parkettkonstruktion klar beobachtet werden. Diese Tragrichtung der Dielen ist für einen etwaigen Ausbau der Parketttafeln und für die spätere statische Einschätzung von großer Bedeutung.

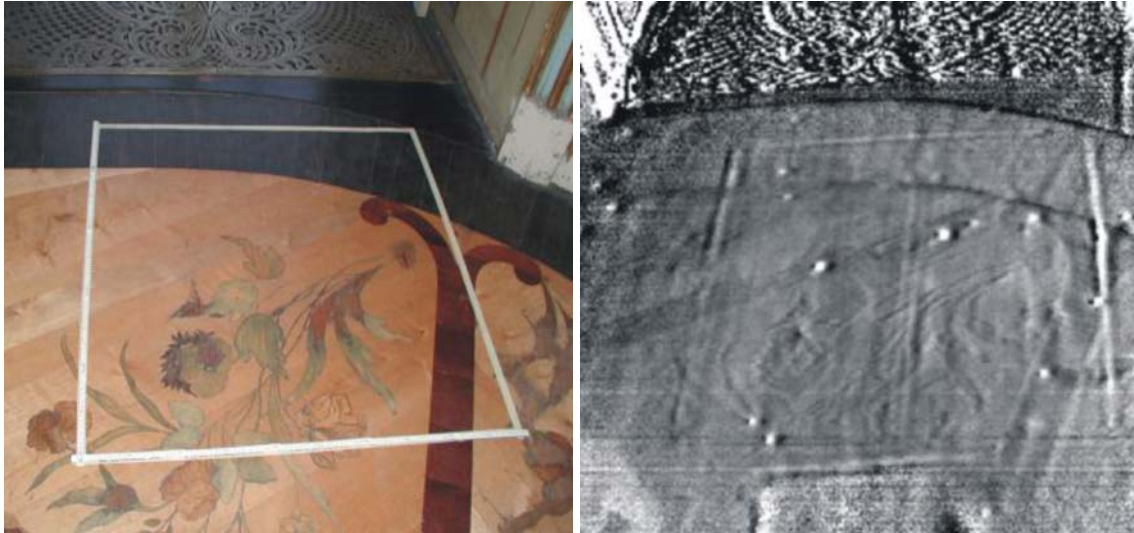


Abbildung 4: Links: Foto eines Messbereiches auf dem Holzfußboden. Rechts: Phasenbild des links dargestellten Bereiches

Die **Endoskopiemessungen** ergaben, dass grob die Abmessungen der Balken, die von den beiden Öffnungen zu sehen waren, bestimmt werden konnten. Zudem konnte der Aufbau des Bodens mit Fehlboden etc. bestimmt werden.

5 Kirche aus einem Brettschichtholz-Trägerrost

5.1 Situation am Objekt und Aufgabenstellung

Die folgend beschriebene Pfarrkirche wurde 1971 erbaut, hat einen quadratischen Grundriss und trägt die Deckenlasten über einen Trägerrost ab. Die paarweisen Träger des Trägerrostes sind über Metallbolzen verbunden, die die Kräfte über verstärkte Nagelplatten in die Binder einleiten. Da Risse in den Brettschichtholzbindern auffielen, wurden einige markante Risse mit Wegaufnehmern online überwacht. Die Messungen ergaben, dass sich die Risse mit den Jahreszeiten öffnen und schließen.

Aus der Statik ist bekannt, dass die Anzahl der Nägel genau berechnet ist, was bedeutet, dass nur wenige Nägel in den Rissen, d. h. nicht mehr kraftschlüssig sein dürfen.

Durch die Nagelplatten im Bereich der Knotenpunkte ist eine visuelle Prüfung der Brettschichtholzbinder auf der Innenseite nicht möglich. Daraus ergibt sich die Frage, ob auf der Rückseite der Binder (unter den Nagelplatten) Risse vorhanden sind oder nicht. Wenn die Nagelplatten von außen nach innen vernagelt wurden, ist dies nicht zu erwarten, aber aufgrund der Risse in den Bindern kann dies nicht ohne Untersuchungen vorausgesetzt werden.



Abbildung 5: Innenansicht der Kirche mit Brett-schichtholz-binder (links); Ansicht Brett-schichtholz-binder mit Riss während Ultraschallechomessung hier in Bereich ohne Nagelplatte, blauer Pfeil markiert Messspur (Mitte); Ergebnis der Messungen entlang Brett-schichtholz-binder, Echos an der Bauteilrückseite (schwarze Pfeile), breiter Riss von Oberflächen (schwarze dünne Linie zeigt Verbindung zwischen Riss in BSH-Binder und Messpunkt im Diagramm ohne Oberflächenwellen und Rückwandecho), Rückwandecho trotz Riss in Oberfläche (roter Pfeil) (rechts)

5.2 Untersuchungsmethoden

Im Rahmen der Untersuchungen wurden

- visuelle Untersuchungen
- Risstiefenbestimmungen und
- Ultraschallechomessungen durchgeführt.

Da die beiden erstgenannten Untersuchungsmethoden hinreichend bekannt sind, wird auf eine tiefere Erläuterung an dieser Stelle verzichtet.

Das **Ultraschallechoverfahren** beruht auf der Reflexion der ausgesendeten Schallwellen an Grenzflächen wie z. B. der Bauteilrückwand. Aus den empfangenen Signalen kann indirekt eine Aussage über den Bauteilzustand getroffen werden. Ist ein Echo vorhanden ist der Zustand des Bauteils gut, kann kein Echo empfangen werden, können innere Schäden wie Fäulnis, Kiesnester, Risse etc. vorhanden sein. Zudem kann aus bekannter Bauteilabmessung und gemessener Laufzeit die Geschwindigkeit einer Schallwelle bestimmt werden, mit welcher wiederum nach erfolgreicher Kalibrierung der Laufzeitmessungen die Bauteildicke als Ergebnis ausgegeben wird. Dies ermöglicht die Untersuchung der Gleichmäßigkeit der Dicke eines Bauteils, welches von nur einer Seite aus zugänglich ist (weitere Literatur [3]).

Zum Anregen der Ultraschallwellen wird eine Sende-Empfangseinheit bestehend aus 12 Punkt-kontakt-Prüfköpfen als Sender und 12 Prüfköpfen als Empfänger verwendet. Dieser Prüfkopf hat den Vorteil, dass kein Koppelmittel erforderlich und somit eine schnellere Messung ohne Verunreinigung der Messfläche durch Koppelmittel möglich ist. Umfangreiche Forschung und praktische Anwendung von der Ultraschallechomethode an Holz und Beton kann der Literatur entnommen werden [9, 17].

5.3 Ergebnisse der Untersuchungen

Mit den Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass mit dem Ultraschallechoverfahren an den Brett-schichtholzbindern Echosignale sowohl in den Bereichen ohne als auch mit

Nagelplatten empfangen werden können, was bedeutet, dass verdeckte Bereiche untersucht werden können.

Weiter konnte gezeigt werden, dass trotz Rissen auf der zugänglichen Seite deutliche Rückwändechos empfangen wurden, was bedeutet, dass es zu einem Schallübergang kommt und die nicht zugängliche Seite keine Risse aufweist.

Andererseits sind Messpunkte auffällig, an denen trotz intensiver Oberflächenwelle von der Rückseite kein Echo empfangen wurde, was basierend auf Erfahrungen aus anderen Messungen als Riss von der Bauteilrückseite gedeutet werden kann. Es muss also davon ausgegangen werden, dass sich bei einigen Brettschichtholzbindern auf der Rückseite unter den Nagelblechen Risse befinden und somit nicht alle Nägel als voll kraftschlüssig angesetzt werden können. Mit den Messungen konnten genaue Aussagen über den Zustand der Konstruktion getroffen werden, was in den Betrachtungen der Statik berücksichtigt wurde.

6 Historische Brücke aus Natursteinen

6.1 Situation am Objekt und Aufgabenstellung

An einer Nebenstraße fristete eine Bogenbrücke aus Naturstein ein ruhiges Dasein, bis im Zuge einer Sanierung einer Brücke einer überregionalen Straße der LKW-Verkehr über diese Brücke umgeleitet werden sollte. Um die zulässigen Belastungen zu definieren, musste eine Statik für die Brücke angefertigt werden. Die Angaben für die Berechnungen wurden mit einer visuellen Untersuchung beschafft, aber z. B. die Abmessungen der Steine und Hinterfüllung der Brücke waren unklar und so entschied man sich, mittels zerstörungsfreier Prüfung möglichst viele Daten über das Bauwerk zu erfassen.



Abbildung 6: Ansicht des Bogens und Auflagerwand mit unbekanntem Aufbau der Böschung und unbekannter Wandstärke (links), Radarmessung (Mittelfrequenz 1,6 GHz, GSSI) (rechts)

6.2 Untersuchungsmethoden

Es wurden die bereits detailliert beschriebenen Verfahren

- Ultraschallecho und
- Radar verwendet.

6.3 Ergebnisse der Untersuchungen

Mit Ultraschallecho wurde an Steinen mit bekannten Abmessungen die Schallgeschwindigkeit bestimmt (Kalibrierung). So war es möglich die Steinabmessungen nicht nur an den äußerlich sichtbaren Steinen, sondern auch der eingebauten Steinen zu bestimmen, was für einen statischen Nachweis wichtig ist.

Mit der hochfrequenten 1,6 GHz Radarantenne (GSSI) wurde der Aufbau und der Grad der Hinterfüllung der Stützwände untersucht und anstehendes Wasser lokalisiert und markiert. Weiter wurde von der Straße aus mit einer 400 MHz Radarantenne der Aufbau des Untergrundes untersucht. Dabei ergaben die Messungen, dass das Gewölbe im Inneren einen asymmetrischen Aufbau hat und unterschiedlich hinterfüllt ist. Mit den Ergebnissen der Messungen konnte eine neue Statik der Brücke berechnet, die Belastungsgrenzen bestimmt und so die Verkehrsumleitung durchgeführt werden.

7 Brücke aus Bongossi-Vollholz

In der Praxis ist es bei Begutachtungen von Holzbrücken wichtig, Fehlstellen und Materialinhomogenitäten im Inneren des Holzes zu finden. In den Fachkreisen ist allgemein bekannt, dass unerkannte Fäulnis (Innenfäule) oder Risse unter ungünstigen Bedingungen zu einem plötzlichem Systemversagen (d. h. Einsturz) führen können [14].

Im Zuge von Hallenprüfungen und Brückenprüfungen wurden viele Konstruktionen aus Fichten-Brettschichtholz untersucht [19], bei denen es sich zeigte, dass die Ultraschallechomethode für die Untersuchungen gut geeignet ist [8].

In der Praxis werden verschiedene Konstruktionen auch aus anderen Holzarten gebaut [5] und es stellt sich die Frage, ob auch bei anderen Holzarten Ultraschallecho möglich ist.

7.1 Situation am Objekt / Aufgabenstellung

Im Folgenden wird die Untersuchung einer Fußgängerbrücke in der Nähe von Düsseldorf, deren Längsträger aus verdübelten Bongossibalken bestehen, mit dem Ultraschallechoverfahren in Kombination mit Bohrwiderstandsuntersuchungen beschrieben. Ungekürzt kann der Text [11] entnommen werden.



Abbildung 7: Bongossibrücke bei Düsseldorf

7.2 Untersuchungsmethoden

Bei den Untersuchungen wird großflächig das Bauwerk mit Ultraschallecho untersucht. Im Falle einer Auffälligkeit, d. h. es wird kein deutliches Rückwandecho empfangen, wird der Bohrwiderstand erfasst. Hierfür wurde ein spezielles Bohrwiderstandsmessgerät von Prof. Dr. Mertens verwendet, welches trotz der hohen Dichte von Bongossi geschädigte und ungeschädigte Bereiche unterscheiden kann. Viele handelsübliche Bohrwiderstandsgeräte sind für eine Untersuchung von Bongossi nicht geeignet. Das verwendete **Ultraschallechoverfahren** wurde bereits in Abschnitt 5.2 beschrieben, weshalb hier auf eine erneute Beschreibung verzichtet wird.

Die **Bohrwiderstandsmessung** zählt zu den zerstörungsarmen Verfahren. Die am Schneidkopf nur 3 mm breite Bohrnadel hinterlässt kaum wahrnehmbare Löcher, so dass das Verfahren überall dort zum Einsatz kommt, wo es auf eine möglichst geringe Beeinträchtigung der Konstruktion, aber auch auf eine schnelle Aussage vor Ort ankommt. Es wird eine Bohrnadel ($d = 3 \text{ mm}$, d. h. winzige Löcher, keine Beeinträchtigung der Konstruktion) mit konstantem Vorschub in das zu untersuchende Holz gebohrt. Für den Vortrieb ist eine bestimmte Leistung des Antriebsmotors erforderlich, was bedeutet, dass bei hartem Holz die erforderliche Leistungsaufnahme hoch, bei weichem oder geschädigtem Holz niedrig ist. So ist es möglich, kerngeschädigte Hölzer mit großer Dicke, die durch eine Klopfprobe nicht mehr zuverlässig erfasst werden können, sowie bei verdeckten und nicht direkt zugänglichen Bauteilen Aussagen zum Bauzustand zu treffen. Eine detaillierte Beschreibung des Bohrwiderstandsverfahrens kann [2] sowie [6] entnommen werden.

7.3 Ergebnisse der Untersuchungen

Im Zuge der Untersuchungen wurden die Träger einzeln untersucht und teilweise Schädigungen bei den Durchdringungsbereichen Querträger/Längsträger festgestellt. Mit Ultraschallecho wurden die Durchdringungspunkte untersucht. Mit den Messungen konnte gezeigt werden, dass diese Innenfäule nur eine sehr geringe Ausbreitung hatte und so kein Standsicherheitsproblem darstellt.

Bei dem Ultraschallechoverfahren handelt es sich um ein „indirektes“ Verfahren. Die Genauigkeit und Qualität der Messergebnisse sind abhängig von den physikalischen Eigenschaften des zu beurteilenden Mediums. Weiter sind Messungenauigkeiten durch unbekannte Inhomogenitäten im Untersuchungsbereich und eine fehlerhafte Anwendung möglich. Da bei indirekten Prüfverfahren die o. g. Einschränkungen möglich sind, ist es immer zu empfehlen diese durch direkte Prüfungen (z. B. Bohrwiderstand) zu ergänzen.

8 Zusammenfassung

In dem Beitrag konnte anhand von Untersuchungen mittels unterschiedlicher zerstörungsfreier Prüfverfahren an Kulturgütern und Verkehrsbauten gezeigt werden, dass mit den Untersuchungen wichtige Informationen über die jeweiligen Bauwerke erzielt wurden. So konnten mit den Ergebnissen der Untersuchungen sowohl Sanierungs- und Nutzungskonzepte optimiert und damit kostengünstiger gestaltet werden, als auch die weitere Nutzung von Bauwerken sichergestellt werden. Die Bauzustandsanalyse einer Barockkirche und eines expressionistischen Klinker-/Stahlbetonbaus mit Feuchte- und Salzanalytik sowie Probeentnahme zeigen, dass die Untersuchungsmethoden unabhängig vom Alter und Aufbau des Objekts angewendet werden können. Die Untersuchungen mit Radar, aktiver Thermografie und Endoskopie am Neuen Palais in Potsdam zeigen den

Vorteil einer Kombination unterschiedlicher Verfahren zur Untersuchung des Bodenaufbaus des Tassenkopfzimmers mit Schmuckparkett. Ebenso konnten durch Ergebnisse der Ultraschallecho- und Radarmessungen Daten über das Naturstein-Brückenbauwerk für eine statische Berechnung beschafft werden. Mit Ultraschallecho konnten nicht visuell überprüfbare Fragestellungen, wie innere Fäule bei einer Bongossivollholz und durch Nagelplatten verdeckte Risse in einem Brettschichtholzbinder einer Kirche, lokalisiert werden bzw. gezeigt werden, dass kein Schaden vorhanden ist.

Referenzen

- [1] Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM): ZfPBau-Kompendium. <http://www.bam.de/zfpbau-kompendium.htm> (2004)
- [2] Baron, T.: Untersuchungen an ungeschädigten und durch Pilzbefall geschädigten Nadelholzbauteilen mit ausgewählten Prüfverfahren. Dissertation, Fakultät Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden / Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhausuniversität Weimar, 2009
- [3] Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP): Merkblatt für Ultraschall-Verfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung mineralischer Baustoffe und Bauteile (B4). Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e.V., Berlin (1999)
- [4] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V. (DGZfP): Merkblatt über das Radarverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen (B10). Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V., Berlin (2001)
- [5] Frühwald, K.: Laubholz im Bauwesen und seine Festigkeitssortierung, Sympóziu Drevu v Stavebných Konstrukciách, Kocovce, 2004
- [6] Görlacher, R., Hätrich, R.: Die Bohrwiderstandsmessung. Bauen mit Holz (1990), H. 6, S. 455-459
- [7] Hasenstab A.: Integritätsprüfung von Holz mit dem zerstörungsfreien Ultraschallechoverfahren. Dissertation TU Berlin (2005) / www.hasenstab.info
- [8] Hasenstab, A., Krause, M.: Ultraschall-Echotechnik zur Ortung von Minderdicken und Schäden in Holzbauteilen. Bauwerksdiagnose 23.-24. Februar 2006, Berlin (2006)
- [9] Hasenstab, A., Krause, M., Osterloh, K.: Testing Of Wooden Construction Elements with Ultrasonic Echo Technique and X-Ray. Beitrag zu einem Tagungsband: 9th European Conference on NDT, September 25-29, 2006, Berlin (Proceedings) Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. BB 103-CD Th.2.4.1
- [10] Hasenstab, A., Homburg, S., Maierhofer, C., Arndt, R.: Holzkonstruktionen mit Radar und Thermografie zerstörungsfrei untersuchen In: Tagungsband der DGZfP-Jahrestagung 2007, Poster 14, 14.-16.05.07 Fürth
- [11] Hasenstab, A.: Bestandsanalyse von Holzbrücken mit zerstörungsfreien und zerstörungsfreiarmer Prüfverfahren. Tagungsband des 15. Internationalen Holzbauforum 2009, Garmisch
- [12] Krause, M., Mielentz, M., Milmann, B., Wiggerhauser, H., Müller, W., Schmitz, V.: Ultrasonic image of concrete members using an array system. NDT & E International 34 (6) (2001) pp. 403-408
- [13] Lualdi, M., Zanzi, L., Binda, L.: Acquisition and processing requirements for high quality 3D reconstructions from GPR investigations. In: Proceedings of the International Symposium on Non-destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), 2003, DGZfP, Berlin
- [14] Mertens, M.: Zerstörungsfreie/zerstörungsfreiarmer Prüfung von Holzbrücken, Fallbeispiele; Erfahrungsaustausch Brückenprüfung 2009, 23.9.2009, München
- [15] Mikszas, K.: Untersuchung und Konzepterstellung eines Marketeriebodens von 1767/68 der Gebrüder Spindler aus dem Neuen Palais in Potsdam. Masterarbeit an der Fachhochschule Potsdam, 2006
- [16] Sneathlage, R.: Leitfaden Steinkonservierung - Planung von Untersuchungen und Maßnahmen zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein. Fraunhofer IRB Verlag 2005
- [17] Straußberger D., Hartmann I., Hasenstab A.: Straßenuntersuchungen mit Radar, Ultraschallecho und FWD. Bauwerksdiagnose Berlin, 21.-22.02.2008, Poster 13, Berlin
- [18] Wenzel, F., Kleinmanns, J.: Sonderforschungsbereich 315, Historische Holztragwerke, Untersuchungen, Berechnungen und Instandsetzen. Universität Karlsruhe (1999)
- [19] Winter, S.: Auch Tragwerke wollen gewartet und geprüft werden; Holz Zentralblatt 5.1.2007