

# Kirchen – zerstörungsfrei geprüft

Andreas HASENSTAB<sup>\*</sup>, Karl-Heinz GEBHARD<sup>\*\*</sup>, Katja FRÜHWALD<sup>\*\*\*</sup>  
<sup>\*</sup> Ingenieurbüro Dr. Hasenstab GmbH, Carron-du-Val-Str. 17, 86161 Augsburg,  
zfp@hasenstab.de

<sup>\*\*</sup> Dipl. Ing. Heinz & Karl-Heinz Gebhard GbR, Nußbaumweg 4, 82024 Taufkirchen,  
k.h.gebhard@t-online.de

<sup>\*\*\*</sup> Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Liebigstr. 87, 32657 Lemgo,  
katja.fruehwald@hs-owl.de

**Kurzfassung.** Im vorliegenden Artikel werden die Möglichkeiten und Grenzen der zerstörungsfreien Prüfung mit Ultraschallecho, Impact-Echo, Bohrwiderstand und Radar an Praxisbeispielen mehrerer Kirchen vorgestellt. Die Untersuchung des Bimsziegelsteingewölbes und hölzernen Dachstuhls der Kirche St. Cornelius in St. Tönis mit Ultraschallecho, Bohrwiderstand und Endoskopie wird beispielhaft detailliert dargestellt. Weiter wird die Untersuchung einer Brettschichtholzträgerrost-Kirche in Oberbayern mit Ultraschallecho, die Untersuchung von Holzstützen einer Kirche in Bad Tölz im Hinblick auf innenliegende Stahlträger mit Radar und Ultraschallecho sowie die Untersuchung des Gewölbes einer gotischen Kirche in Bayreuth mit Ultraschallecho und Impact-Echo beschrieben.

## Einführung

In der Literatur werden verschiedene zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Untersuchung von Bauwerken beschrieben, wobei es sich bei den Anwendungsbeispielen sehr oft um große Ingenieurbauwerke wie Hallen oder Brücken handelt. Diese Untersuchungen werden i. d. R. von Spezialisten der zerstörungsfreien Prüfung in Zusammenarbeit mit den Architekten und Ingenieuren durchgeführt. Dagegen wird die Planung und Koordinierung der Untersuchungen von Kulturgütern wie Kirchen oftmals Restauratoren überlassen. Da aber auch Kirchen anspruchsvolle Ingenieurbauwerke darstellen, sollten auch hier bei der Untersuchung zusätzlich zu den Restauratoren auch Architekten und Ingenieure beteiligt sein.

Ziele einer Anwendung der ZfPBau-Verfahren sind

- zerstörungsfreie Bauwerksuntersuchung
- frühes Erkennen und Eingrenzung von Schäden
- zerstörungsfreie Dokumentation und Integritätsprüfung des Bauteilzustandes
- Kostenabschätzung bei Instandsetzung

Im vorliegenden Artikel werden die zerstörungsfreien Untersuchungsmethoden Ultraschallecho, Impact-Echo, Bohrwiderstand und Radar kurz beschrieben (Kapitel 1). Diese Messungen erfolgen direkt am Bauwerk und werden teils von Hand, teils mit einem Scannersystem ausgeführt. Anschließend werden als Praxisbeispiele verschiedene Kirchen vorgestellt (Kapitel 2), bei denen die genannten Verfahren an den unterschiedlichen Werkstoffen Bimsziegelstein, Holz und Sandstein angewendet wurden.

## 1. Untersuchungsmethoden

Zur zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen werden unterschiedliche Verfahren eingesetzt, die in Tabelle 1 überblicksmäßig zusammengestellt sind; eine umfangreiche Liste der zFP-Bau-Verfahren kann [1-3] entnommen werden. Im Folgenden wird speziell auf die Messverfahren Ultraschallecho, Radar, Impact-Echo und Bohrwiderstand detailliert eingegangen.

**Tabelle 1:** Zerstörungsfreie Prüfverfahren im Bauwesen (ZfPBau) aus [4]:

Elektromagnetische Verfahren: <ul style="list-style-type: none"><li>• Radar</li><li>• Thermographie (passiv / aktiv)</li><li>• Röntgen /Durchstrahlung</li></ul>	Akustische Verfahren: <ul style="list-style-type: none"><li>• Ultraschallecho</li><li>• Impact Echo</li></ul>	Sonstige Verfahren: <ul style="list-style-type: none"><li>• Bohrwiderstand</li></ul>
--	---	--

### 1.1 Visuelle Sichtprüfung und mechanisches Abklopfen

Bei der visuellen Inaugenscheinnahme wird die Oberfläche der zu untersuchenden Struktur betrachtet und beschrieben. Hierbei werden Auffälligkeiten und Schäden dokumentiert. Ergänzt wird diese visuelle Sichtprüfung durch Abklopfen der Gewölbeoberfläche mit einem Hammer, was eine übliche Untersuchungsmethode bei der Prüfung von Brücken nach DIN 1076 darstellt.

### 1.2 Ultraschallechomethode

Das Ultraschallechoverfahren beruht auf der Reflexion von Schallwellen an Werkstoffinhomogenitäten wie der Bauteilrückwand oder an anderen Grenzflächen. Aus den empfangenen Signalen kann indirekt eine Aussage über den Bauteilzustand oder innere Schäden getroffen werden. Aufgrund vieler Untersuchungen kann z. B. bei Holz davon ausgegangen werden, dass beim Vorliegen eines Rückwandechos die untersuchte Struktur frei von Innenfäule, ausgeprägtem Insektenbefall oder ausgeprägten Rissen ist. Diese Aussage gründet physikalisch darauf, dass das ausgesendete Schallsignal eine ungestörte Struktur für die Schallleitung benötigt und für ein Echosignal von der Bauteilrückseite der Schall das Bauteil zweimal ungehindert durchlaufen muss. Ist dies möglich, d. h. wird ein Echosignal empfangen, ist die innere Struktur ungeschädigt. Wird dagegen bei sonst gleichbleibenden Randbedingungen kein Echosignal von der Bauteilrückseite empfangen, besteht ein Verdacht auf innere Schädigung. Details zur Ultraschallechomethode an Holz können [3; 5-6] und an Bimsziegeln [7] entnommen werden.

### 1.3 Impact-Echo-Verfahren

Beim Impact-Echo-Verfahren wird mit einem leichten Schlag durch eine Kugel oder einen Hammer eine Longitudinalwelle im Bauteil ausgelöst und das empfangene Signal über das Frequenzspektrum ausgewertet [8]. Das Impact-Echo-Verfahren war in der Vergangenheit dem Ultraschall-Echo-Verfahren überlegen, da es keine Koppelmittel benötigt. Durch neue und bessere Ultraschallprüfköpfe und eine schnellere, verständlichere Auswertung wird derzeit vorwiegend die Ultraschalltechnik für akustische Untersuchungen angewendet.

### 1.4 Bohrwiderstandsmethode

Beim Bohrwiderstandsverfahren wird eine Bohrnadel mit konstantem Vorschub in das zu untersuchende Holz gebohrt. Für den Vortrieb ist eine bestimmte Leistung des Antriebsmotors erforderlich. Bei hartem Laubholz ist die erforderliche Leistungsaufnahme

hoch, bei weichem Nadelholz oder pilzgeschädigtem Holz niedrig. Trifft die Bohrnadel auf Fehlstellen oder Risse, sinkt der Bohrwiderstand schlagartig ab und steigt nach Wiedereintritt in das Holz steil an. Bei pilzgeschädigtem Holz ist der Verlauf der Bohrkurve im Übergang vom gesunden zum geschädigten Bereich eher allmählich. Aus dem Stromverbrauch des Antriebsmotors bzw. aus dem Torsionsmoment wird die abgerufene Leistung gemessen und aufgezeichnet [u. a. 9].

Anwendungsbereiche der Bohrwiderstandsmethode sind die Bestimmung von Bauteilabmessungen (gleichmäßige Dicke, Aussparungen, Zapfenverbindungen) sowie die Ortung von inneren Schäden (Hohlstellen, breiten Rissen parallel zur Oberfläche, Fäulnis, ausgeprägtem Insektenbefall). Meist werden mit der punktwisen Bohrwiderstandsmessung Stellen überprüft, für die, z. B. nach der flächigen, zerstörungsfreien Ultraschallechomesung, ein Verdacht auf Schädigung besteht oder wenn eine Schädigung sicher ausgeschlossen werden soll. Bei Brücken- und Kirchenprüfungen erfolgt daher in der Praxis sehr häufig eine Kombination aus Ultraschallecho- und Bohrwiderstandsmethode (Abbildungen 2 und 3).

Die am Schneidkopf 3 mm breite Bohrnadel hinterlässt kaum wahrnehmbare Löcher. Jedoch werden nur punktuelle Messungen durchgeführt, so sind Aussagen nur für einen örtlich begrenzten Bereich möglich. Einer erkannten Schädigung kann i. d. R. jedoch nicht der Zerstörungsgrad exakt zugeordnet werden, insbesondere bei beginnendem Pilzbefall. Unter bestimmten Bedingungen und viel Erfahrung kann mit dem Bohrniveau die Rohdichte abgeschätzt werden, jedoch sind – insbesondere bei Laubhölzern – stärkere festigkeitsbestimmende Einflussfaktoren zu beobachten [10-11]. Daher lassen sich keine Festigkeitskennwerte des Bauteils ableiten.

### *1.5 Radar (Impulsradar, Georadar)*

Das Radarverfahren ist ein elektromagnetisches Verfahren. Hierbei wird von einem Sender eine elektromagnetische Welle abgestrahlt, die sich im Medium mit einer materialabhängigen Geschwindigkeit ausbreitet. Am Übergang zwischen zwei Medien mit unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften (→ Dielektrizität), wie z. B. Metallobjekten, Schichtgrenzen, Hohlräumen, Leitungen, wird das Radarsignal (teilweise) reflektiert und von einem Empfänger aufgenommen und ausgewertet. Ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen bekannt, kann aus der Laufzeit der reflektierten Wellen die Tiefenlage des sog. „Reflektors“ (der Grenzschicht) bestimmt werden. Bei der Messung werden mit einer Sende- und Empfangsantenne in kurzen Zeitabständen die Amplituden der empfangenen Signale in Abhängigkeit von der Laufzeit (d. h. der Tiefe) aufgezeichnet. Durch eine gleichzeitige Aufnahme des Messweges können die Radarsignale den Messpunkten zugeordnet werden (→ Radargramme) [12-15].

Für Radaruntersuchungen werden je nach Aufgabenstellung verschiedene Radarantennen mit unterschiedlichen Frequenzen verwendet. Um eine hohe Auflösung der Ergebnisse bei einer ausreichenden Untersuchungstiefe zu erreichen, muss ein Mittelweg zwischen hoher Auflösung (mit geringerer Untersuchungstiefe, z. B. Messfrequenz 1,6 GHz → Reichweite 0,6 m in Beton) und einer großen Untersuchungstiefe (mit einer geringeren Auflösung, z. B. Messfrequenz 200 MHz → Reichweite 8...9 m im Boden) gewählt werden. Eine Optimierung ist auch durch eine Kombination von unterschiedlichen Radarantennen möglich [13]. Die Anwendungsbereiche und die physikalischen Grenzen von Radar sind in [15] zusammengestellt.

## 2. Beispiele aus der Praxis

Im Folgenden werden die Möglichkeiten der zerstörungsfreien Prüfung an mehreren Kirchen vorgestellt. Die Untersuchung des Bimsziegelsteingewölbes und des hölzernen Dachstuhls der Kirche St. Cornelius in St. Tönis mit Ultraschallecho, Bohrwiderstand und Endoskopie wird dabei beispielhaft sehr detailliert beschrieben. Weiter wird die Untersuchung einer Brettschichtholzträgerrost-Kirche in Oberbayern mit Ultraschallecho, die Untersuchung von Holzstützen im Hinblick auf innenliegende Stahlträger mit Radar und Ultraschallecho sowie des Gewölbes einer gotischen Kirche in Bayreuth mit Ultraschallecho und Impact-Echo knapp beschrieben.

### 2.1 Untersuchung des Gewölbes und Dachstuhls von St. Cornelius in St. Tönis mit Ultraschallecho und Bohrwiderstand

Die Pfarrkirche St. Cornelius in St. Tönis besteht zu großen Teilen aus einem neugotischen Erweiterungsbau von 1885 bis 1904, einige Bereiche wurden nach dem Zweiten Weltkrieg im gleichen Stil wieder aufgebaut (Abbildung 1).



Abbildung 1. Pfarrkirche St. Cornelius in St. Tönis

In den im Krieg nicht eingestürzten Gewölben aus Bimsziegelstein befanden sich teilweise große, nur zum Teil visuell erkennbare Risse, weitere strukturelle Schäden wurden in allen Teilen der Gewölbe vermutet. Im Verlauf der Untersuchungen wurden Materialunterschiede z. B. hinsichtlich der Putzhärte, Putzoberfläche, Putzstärke und des Materials (Zement / Kalkmörtel) festgestellt. Üblicherweise würde die Untersuchung eines derartigen Gewölbes mittels visueller Sicht- und handnaher Prüfung in Verbindung mit Bohrkernentnahmen an einigen Messpunkten gelöst werden. Mit diesem Ansatz kann jedoch nur die Oberfläche und an einigen ausgewählten Messpunkten die Struktur des Gewölbes untersucht werden. Die durchgeführten Untersuchungen der Gewölbe hatten das Ziel, zerstörte Bereiche und nicht sichtbare Risse mittels Kombination von visueller Sichtprüfung, mechanischem Abklopfen und Ultraschallecho zu lokalisieren und das Ausmaß der Schäden im Bereich um die Risse zu bestimmen. Es konnte gezeigt werden, dass die Ultraschallechomessungen sowohl von der Unter- als auch von der Oberseite des Gewölbes erfolgen können und die 1947 erbauten Gewölbe (Bimsstein mit Zement als Bindemittel) von älteren Gewölben (Bimsstein mit Kalk als Bindemittel) unterschieden werden können. Weiter konnten mit Ultraschallecho visuell nicht sichtbare Risse erkannt werden, wobei die Risse unterschieden werden konnten in Risse aus dem 2. Weltkrieg (mit Strukturstörungen bis 40 cm um die Risse herum) und Risse aufgrund von Erdbeben in den

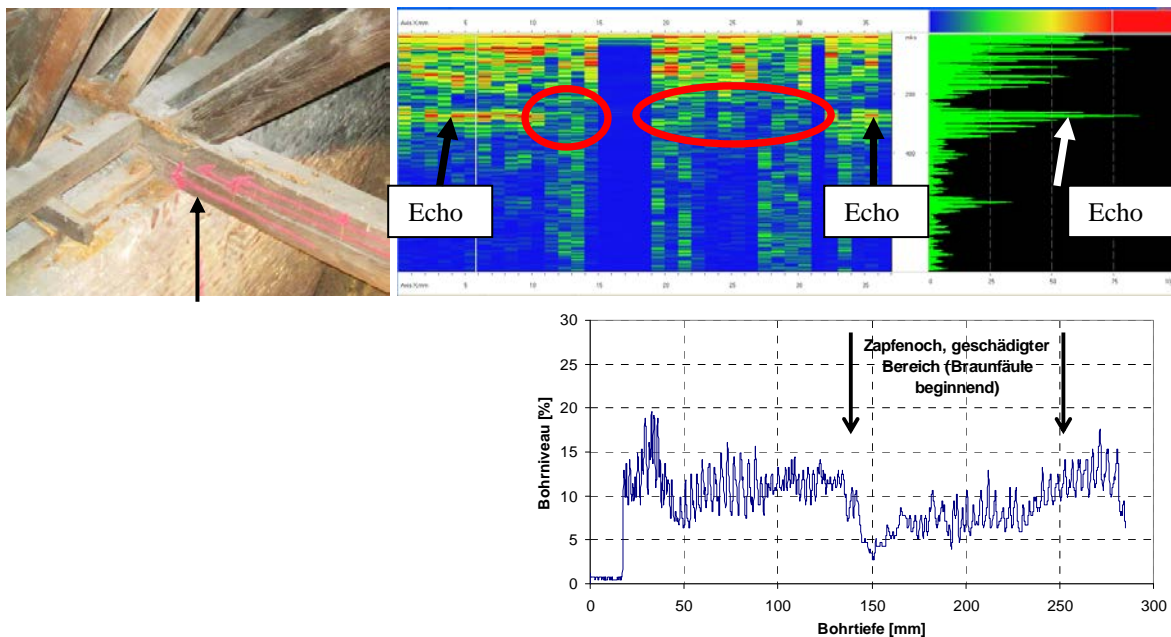
1990ern (ohne Strukturstörungen um die Risse). Endoskopische Untersuchungen der Gewölbe ergaben, dass sich die Gewölbe von der Längswand gelöst haben und statisch einen geänderten Kraftverlauf besitzen. In den 1970ern wurden viele Risse im Gewölbe saniert (und sind daher oberflächlich visuell nicht mehr erkennbar). Bei den Ultraschallechountersuchungen zeigte sich, dass oft kein Verbund zwischen dem neu angebrachten Zement (mit einem sehr hohen E-Modul) und dem Bimsstein (mit einem geringen E-Modul) vorhanden ist. Zudem fiel auf, dass unter sanierten Rissen die Struktur oft aufgelöst ist und sich der Zement nur auf „Bröseln“ befindet. Dies bedeutet, dass der Erfolg einer Sanierung mit Ultraschallecho überprüft werden kann. Die Ergebnisse der Untersuchungen wurden in den Plan eingetragen und für die Erarbeitung eines Maßnahmenplans verwendet, woraus wiederum eine Dringlichkeitsliste erstellt wurde (Johannig und Petermann Architekten GmbH, Lauterberg im Harz). Durch die genaue Untersuchung konnten ungeschädigte Bereiche eindeutig markiert werden, in denen keine weiteren Maßnahmen erforderlich sind. So können die vorhandenen Mittel effektiv eingesetzt und damit eine Kostenersparnis erzielt werden. Eine detaillierte Beschreibung der Sanierung kann [7] entnommen werden. Bei den beschriebenen Untersuchungen konnte auf umfangreiche Ultraschallechountersuchungen und genaue Materialanalysen an der Grabeskirche in Aachen aufgebaut werden.

Während der Gewölbeuntersuchungen fielen an das Gewölbe angrenzende bzw. sich über geschädigten Gewölbebereichen befindliche Holzbalken mit Schäden auf. Die Holzkonstruktion des Dachstuhls über dem untersuchten Gewölbe wurde vollflächig mit einer Kombination von visueller Sichtprüfung, Abklopfen (Abbildung 2, links) und in ausgewählten Bereichen Ultraschallechomessungen (Abbildung 2, Mitte) untersucht. Holzbalken, die nach der Sichtprüfung und dem Abklopfen, ggf. auch der Ultraschallechoprüfung, als gefährdet eingestuft waren, wurden mittels Bohrwiderstandsmessung (Abbildung 2, rechts) punktuell geprüft, insbesondere um im Bereich vom Statiker ausgewählter Knoten Restquerschnitte abschätzen zu können.

Partiell waren erhebliche Schäden durch Pilzbefall vorhanden, insbesondere traten diese gehäuft an der Fußpfette, an den Knoten der Sparrenfußpunkte, an den Sparren selbst sowie den Aufschieblingen auf der westlichen Traufseite des Nord- und Südschiffes sowie der Südseite der Apsis auf. Besonders komplex waren die Zerstörungen im Bereich der Sparrenfußpunkte, wo die angeschlossenen Deckenbalken besonders von oben zwischen Sparren und Aufschiebling bzw. im Bereich der Aussparung rund um den Sparren starke Schäden durch Braurfäule aufwiesen. Gemeinsam mit dem verantwortlichen Statiker (Dipl.-Ing. P. Kuhlmann von der Kempen Krause Ingenieurgesellschaft) wurden v. a. die Schäden an den Knoten als statisch relevant festgestellt. An der in Abbildung 3 links gezeigten Verbindung fielen visuell Schäden auf und mittels Ultraschallecho konnte die Ausdehnung der Schäden im Balken zerstörungsfrei bestimmt werden. In Abbildung 3 links sind die entsprechenden Ultraschall-Messspuren mittels roter Pfeile und in Abbildung 3 rechts oben dazugehörige B-Bilder dargestellt. Der erste Teil der Messung (linker Bereich im B-Bild) erfolgte in der Mitte des Balkens, der zweite Teil der Messung an der Oberkante des Balkens. Der letzte dritte kurze Teil der Messung wurde unten entlang des Balkens durchgeführt. Die Echos an der Bauteilrückseite sind mit Pfeilen markiert. Die Existenz dieses Echos zeugt von ungeschädigten Bereichen. Die roten Kreise markieren geschädigte Bereiche. Nach den Ultraschallechomessungen ist das obere Drittel des Balkens defekt und entlang der Mittelachse nur am Ende (im Bereich der Verbindung), im unteren Drittel des Balkens sind keine Schäden vorhanden. Diese Ergebnisse wurden durch die Ergebnisse der Bohrwiderstandsmessungen in Abbildung 3 rechts unten bestätigt.



**Abbildung 2.** links: Handnahe Sichtprüfung sowie Abklopfen der Holzkonstruktion; Mitte: Ultraschallechomessung an als gefährdet eingestuften Holzbalken; rechts: Bohrwiderstandsmessung



**Abbildung 3.** links: Untersucher Holz balken, rote Pfeile markieren Messspuren der Ultraschallechomessungen, schwarzer Pfeil markiert Lage der Bohrwiderstandsmessung; rechts oben: Ergebnis der Ultraschallechomessungen (links B-Bild, rechts A-Bild), rechts unten: Bohrwiderstandsmessung von der Unterseite

## 2.2 Untersuchung einer Kirche in Oberbayern aus einem Brettschichtholz-Trägerrost mit Ultraschallecho

Die Pfarrkirche von 1971 hat einen quadratischen Grundriss und trägt die Deckenlasten über einen Trägerrost ab (Abbildung 4). Die paarweisen Träger des Trägerrostes sind über Metallbolzen verbunden, die die Kräfte über verstärkte Nagelplatten in die Binder einleiten. Da Risse in den Brettschichtholzträgern auffielen, wurden einige markante Risse mit Wegaufnehmern online überwacht. Die Messungen ergaben, dass sich die Risse mit den Jahreszeiten öffnen und schließen. Gemäß Statik war die Anzahl der Nägel genau berechnet, weshalb nur wenige Nägel in den Rissen, d. h. nicht mehr kraftschlüssig, sein durften. Durch die Nagelplatten im Bereich der Knotenpunkte war eine visuelle Prüfung der Brettschichtholzträger auf der Innenseite nicht möglich. Daraus ergab sich die Frage, ob auf der Rückseite der Träger (unter den Nagelplatten) Risse vorhanden sind oder nicht.



**Abbildung 4.** Pfarrkirche in Oberbayern mit Brettschichtholz-Trägerrost

Im Rahmen der Untersuchungen erfolgte eine visuelle Untersuchung einschließlich Risstiefenbestimmung sowie Ultraschallechomessungen. Mit dem Ultraschallechoverfahren konnten an den Brettschichtholzträgern Echosignale sowohl in den Bereichen ohne als auch mit Nagelplatten empfangen werden, d. h. verdeckte Bereiche können mit Ultraschallecho untersucht werden. Trotz Rissen auf der zugänglichen Seite wurden deutliche Rückwandechos empfangen, d. h. es kam zu einem Schallübergang und die nicht zugängliche Seite wies keine Risse auf. An einigen Messpunkten konnte trotz intensiver Oberflächenwelle von der Rückseite kein Echo empfangen werden, was basierend auf Erfahrungen als Riss auf der Bauteilrückseite gedeutet werden kann. Es musste also davon ausgegangen werden, dass sich bei einigen Brettschichtholzträgern 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 der Statik berücksichtigt wurde.



**Abbildung 5.** Brettschichtholzträger (links Messung im Bereich der Nagelplatte, Mitte ohne Nagelplatte) mit Riss, blauer Pfeil markiert Ultraschallechomessspur; rechts: Ergebnisse, Echos an der Bauteilrückseite (schwarze Pfeile), breiter Riss an Oberflächen (schwarze dünne Linie verbindet Riss in Brettschichtholzträger und entsprechendem Messpunkt im Diagramm ohne Oberflächenwellen und Rückwandecho), Rückwandecho trotz Oberflächenriss (roter Pfeil)

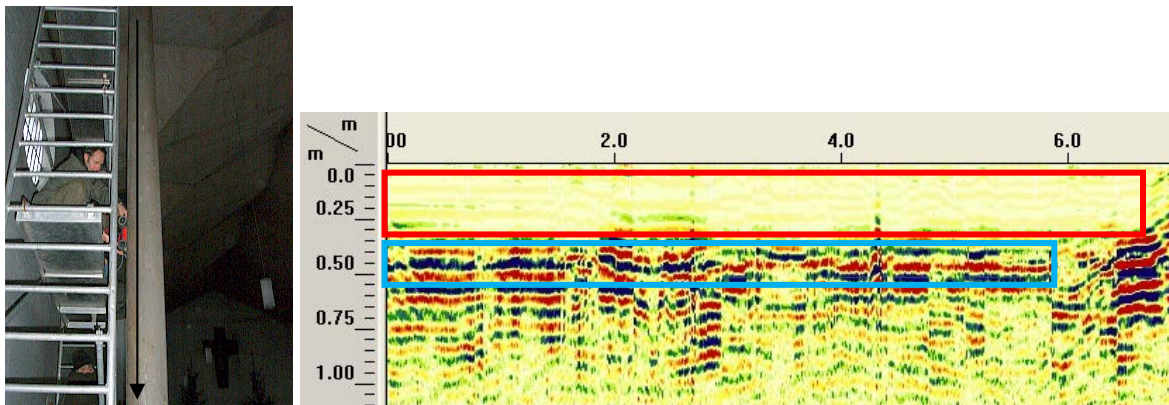
### 2.3 Untersuchung der Kirche „Heilige Familie“ in Bad Tölz mit Radar und Ultraschallecho

In Bad Tölz entstand nach dem zweiten Weltkrieg im Süden ein neuer Stadtteil, die „Karwendelsiedlung“, in der vor allem Flüchtlinge und Industriearbeiter Grundstücke für kleine Eigenheime bekamen. In der Mitte dieses neuen Stadtteils steht die vom Tölzer Architekten Fritz Strunz 1960 erbaute Kirche „Heilige Familie“.

Das Dach der Kirche liegt auf den Außenmauern und Rundstützen im Kircheninneren auf. Bei einer Begehung waren Risse in den Holzstützen auffällig, die daraufhin saniert wurden (Abbildung 6 rechts oben). Dabei stellte sich die Frage nach dem Aufbau der Stützen im Inneren, da visuell nur die runde Holzstütze und ein Stützenauflager aus Stahl auf dem Betonfundament zu sehen waren (Abbildung 6 rechts unten).



**Abbildung 6.** links: Innenansicht Kirche; rechts oben: Sanierung der Risse in einigen Holzstützen; rechts unten: Stützenauflager aus Stahl auf Betonfundament



**Abbildung 7.** links: Radarmessung entlang der zu untersuchenden Stütze (Messlinie mit schwarzem Pfeil markiert); rechts: Radargramm einer Radarmessung (Messfrequenz 1,6 GHz), mit Echo an Rückseite der Holzstütze (blauer Kasten), aber kein Anzeichen von Metall im Inneren der Stütze (roter Kasten)

Für die statische Neuberechnung (Klärung, ob in den lastabtragenden Holzstützen innenliegende Metallstützen vorhanden sind und ob die Holzstützen konstante Querschnitte aufweisen) wurden die Stützen zerstörungsfrei mit Radar und Ultraschallecho untersucht. Die Messungen mit Ultraschallecho ergaben, dass alle untersuchten Stützen im Inneren gleich aufgebaut sind (aus verklebten Segmenten bestehen und hohl sind). Mit Radar wurde an mehreren Stützen entlang der Stützenlänge gemessen, um die Lage der möglichen Stahlstütze zu bestimmen (Abbildung 7). In dem Radargramm in Abbildung 7 ist die Rückseite der Holzstütze blau markiert. Der Bereich des Stützeninneren ist rot markiert,



hier sind keine Reflexe an Metall zu erkennen. Dies bedeutet, dass sich keine Stahlstütze im Inneren der hohlen Holzstütze befindet, was in der statischen Nachrechnung berücksichtigt wurde.

#### *2.4 Untersuchung einer gotischen Kirche in Bayreuth mit Impact-Echo, Ultraschallecho und Bohrkernentnahme*

An einer gotischen Kirche in Bayreuth (Abbildung 8) wurden bei Untersuchungen Risse an Sandsteinrhomben festgestellt. Um eine kraftschlüssige Verbindung herzustellen wurden diese Risse verpresst. Der Erfolg dieser Rissverpressungen wurde mit Impact-Echo und Ultraschallecho überprüft. Zudem war bekannt, dass die Steine durch Brandschäden des Dachstuhls beschädigt waren und der Sandstein deshalb an der Oberseite geschädigt sein konnte.



**Abbildung 8.** Lage der Impact-Echo- und Ultraschallechomessungen in einer gotischen Kirche in Bayreuth

Die Untersuchungen ergaben, dass bei einer ebenen Bauteilrückseite die Struktur von der zugänglichen Unterseite untersucht werden kann. Jedoch führt eine schräge Schalleinleitung in Echomethode bei derartig geometrisch schwierigen Strukturen zu keinen brauchbaren Ergebnissen.

Weiter ergaben die Untersuchungen, dass in den Steinen mittels Echomessungen Risse erkannt werden können. Hingegen ist es sowohl mit Ultraschallecho wie auch mit Impact-Echo aus physikalischen Gründen nicht möglich, die Ebene einer langsam beginnenden Materialveränderung zu bestimmen, da für ein Echo einer akustischen Welle immer ein Impedanzsprung, d. h. Dichteunterschied bzw. Schallgeschwindigkeitsunterschied, notwendig ist. So wurde die Abbrandtiefe des Sandsteines mit einem Bohrkern bestimmt, wobei unter Berücksichtigung der statischen und denkmalpflegerischen Belange einen Bohrkerndurchmesser von 30 mm anstelle der üblichen 100 bis 150 mm verwendet wurde.

### **3. Schlussfolgerungen**

Die Untersuchung eines bestehenden Bauwerkes ist eine anspruchsvolle Aufgabe. Vor allem wenn keine oder nur unvollständige Pläne vom Bauwerk vorhanden sind oder Schäden vermutet werden, müssen möglichst viele Informationen über das Bauwerk erlangt werden. Vor jeder Bauwerksuntersuchung muss die Aufgabenstellung und das Untersuchungsziel detailliert abgeklärt und daraus eine geeignete Untersuchungsmethode

abgeleitet werden. Bei der Erfassung des Ist-Zustandes von Bauteilen ist ihre Zugänglichkeit häufig eingeschränkt, meist soll möglichst ohne Ausbau von Bauteilen eine Aussage zur Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit des Gesamtbauwerkes oder einzelner Bereiche davon erfolgen.

In den letzten Jahren gab es auf dem Gebiet der zerstörungsarmen und zerstörungsfreien Bauteilprüfung eine Reihe von neuen Entwicklungen. Einige dieser Prüfverfahren, wie z. B. die Untersuchungen mit Ultraschallecho oder Radar, sind unter anderem wegen hoher Investitionskosten, viel erforderlicher Erfahrung des Prüfindgenieurs und teilweise aufwändigen Auswertungen vergleichsweise kostenintensiv. Vor der Anwendung dieser Verfahren hat daher immer die handnaha Inaugenscheinnahme mit Rissmessung und Klopfprobe zu erfolgen. Jedoch können damit z. B. bei Holz innere, nicht sichtbare Schäden wie Innenfäule und Risse nur schwer bis gar nicht gefunden werden. Diese Schäden können jedoch unter ungünstigen Bedingungen zu einem plötzlichen Systemversagen (d. h. Einsturz) führen. Deshalb ist es Aufgabe eines prüfenden Ingenieurs vor Ort, diese Schäden mit speziell für die Prüfaufgabe angepassten aufwändigen Prüfverfahren zu finden, um anhand des Schadensbildes eine Aussage über einen Substanzverlust und Hinweise zur Resttragfähigkeit treffen zu können.

In der Praxis wird meist versucht, innere Schäden zerstörungsarm mit der Kombination aus Bohrkernentnahme und Endoskopie oder bei Holz mit der Bohrwiderstandsmethode zu untersuchen. Dabei handelt es sich jedoch nur um Punktmessungen, welche bei der Auswahl der Untersuchungsbereiche sowie der Interpretation der Messergebnisse sehr viel Erfahrung erfordern. Fast immer sind mehrere Messungen erforderlich. „Eine Hand voll“ Bohrungen kann bei einem großen Bauwerk aber (viel) zu wenig sein. Zudem muss immer bedacht werden, dass bei diesen Punktmessungen die Information nur lokal für diesen Messpunkt zur Verfügung steht und so oft mehrere bis sehr viele Bohrungen notwendig sind.

Beim zerstörungsfreien Ultraschallechoverfahren dauert die Einzelmessung nur wenige Sekunden und führt bei umfangreichen Prüfaufgaben zur erheblichen Zeitersparnis. Das Messergebnis vor Ort liefert ein Signalbild, das zwar Auffälligkeiten zeigt, die jedoch Interpretationsbedarf besitzen. Nicht jedes ausbleibende Rückwandecho bedeutet zwangsläufig eine Schädigung. Diese auffälligen Bereiche, wo trotz gleichbleibender physikalischer Randbedingungen kein Rückwandecho empfangen wird, werden markiert und i. d. R. zerstörungsarm an diesem Punkt / in diesem Bereich, bei Holz z. B. mit dem Bohrwiderstandsverfahren, genauer untersucht. So können die Vorteile verschiedener Verfahren vereint und der Zeitaufwand bei der Abarbeitung der Konstruktionsanalyse reduziert werden. Der Bauteilzustand kann so dokumentiert sowie Schäden frühzeitig erkannt und eingegrenzt werden. Dies führt bei einer ggf. erforderlichen Instandsetzung zu einer besseren Kostenabschätzung und häufig – aufgrund genauer Kenntnis über die geschädigten und nicht geschädigten Bereiche – zu einer deutlichen Reduzierung der Sanierungskosten.

Sämtliche Prüfverfahren können nur von geschulten Prüfindgenieuren angewendet werden. Dabei sollten Kenntnisse über verschiedene Verfahren vorhanden sein, um ein für die jeweilige Fragestellung optimales Verfahren auszuwählen.

Der operative Aufwand und die Dauer der Messung hängen von der Aufgabenstellung, insbesondere von der Genauigkeit der Messungen (der Weite des Messrasters) und der Größe des zu untersuchenden Bereiches/Objektes ab. Die Auswertung und Bewertung von Messdaten sollte unbedingt von den Prüfindgenieuren durchgeführt werden, da für eine sichere Interpretation der Messergebnisse i. d. R. viele Jahre Erfahrung notwendig sind. Daher ist eine Darstellung von Messwerten ohne Auswertung und Erläuterung nicht sinnvoll, die Messergebnisse sollten verständlich und nachvollziehbar dargestellt und in einem allgemein verständlichen, schriftlichen Bericht erläutert werden.

Die Kosten der Prüfverfahren für den Bauwerksprüfer müssen in Anschaffungskosten und Anwendungskosten unterschieden werden, am kostenintensivsten ist die Einarbeitung der Prüfindenieure in das Verfahren. Von einer Anschaffung der teilweise sehr komplexen Geräte ist abzuraten, wenn nicht die Auslastung und Rentabilität abzuschätzen ist. Die Untersuchungskosten für den Auftraggeber sind von der Aufgabenstellung, dem Ziel der Untersuchungen, den Randbedingungen und dem operativen Aufwand abhängig und kann nur im Einzelfall abgeschätzt werden. Ein generalisierter Kostenvergleich der einzelnen Prüfverfahren ist daher nicht möglich.

Viele Fragestellungen können mit unterschiedlichen Verfahren beantwortet werden. Wenn zwei physikalisch unabhängige Verfahren (z. B. das elektromagnetische Radarverfahren und das akustische Ultraschallechoverfahren) gleiche Ergebnisse liefern, kann so die Aussagesicherheit erhöht werden.

## Referenzen

- [1] Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM): ZfPBau-Kompodium. [http://www.bam.de/microsites/zfp\\_kompodium/welcome.html](http://www.bam.de/microsites/zfp_kompodium/welcome.html) (2004)
- [2] Walter, A.; Hasenstab, A.: Zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Bestimmung von Materialparametern im Stahl- und Spannbetonbau. In: Fouad N. (Hrsg.); Bauphysik-Kalender 2012, Berlin: Ernst und Sohn (2012)
- [3] Frühwald, K.; Peterson, Leif A.; Hasenstab, A.: Prüfverfahren zur Begutachtung der Materialeigenschaften von Holztragwerken. In: Fouad N. (Hrsg.); Bauphysik-Kalender 2012, Berlin: Ernst und Sohn (2012)
- [4] Hasenstab, A., Jost, G., Taffe, A., Wiggenhauser, H.: Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen – angewandte Forschung und Praxis. Tagungsband der DGZfP-Jahrestagung 2008, St. Gallen, 28.04.-30.04.2008
- [5] Hasenstab, A.: Integritätsprüfung von Holz mit dem zerstörungsfreien Ultraschallechoverfahren. Dissertation an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) und der Technischen Universität Berlin, Fakultät VI (2005)
- [6] Hasenstab, A., Krause, M., Rieck, C., Hillemeier, B.: Ultraschall-Echo-Messungen an Holz. Holz als Roh- und Werkstoff, 64(6), S. 475-481 (2006)
- [7] Hasenstab, A.; Hilbert, G.; Frühwald, K.: Untersuchungen von Bimsziegelstein mit Ultraschallecho: Ausbreitungsverhalten von Transversalwellen. Tagungsband der Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung DGZfP, 30.05.-01.06.2011, Bremen
- [8] Algernon, D.: Impact-Echo: Analyse akustischer Wellen in Beton. Dissertation an der Technischen Universität Berlin, Fakultät VI (2006)
- [9] Baron, T.: Untersuchungen an ungeschädigten und durch Pilzbefall geschädigten Nadelholzbauteilen mit ausgewählten Prüfverfahren, Dissertation an der Universität Weimar / F.A. Finger Institut (2009)
- [10] Frühwald, K.: Strength Grading of Hardwoods. Proceedings of the 14th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, Hannover, 02.-04.05.2005, S. 199-210
- [11] Frühwald, K.; Hasenstab, A.: Strength grading of hardwood with longitudinal ultrasonic waves and longitudinal vibration and locating defects in softwood and hardwood with low frequency ultrasonic echo technique. Economic and Technical aspects on quality control for wood and wood products, Proceedings of the Conference of Cost Action E53, Lissabon, 22.-23.10.2009
- [12] Hasenstab, A.; Homburg, S.; Maierhofer, C.; Arndt, R.: Holzkonstruktionen mit Radar und Thermografie zerstörungsfrei untersuchen. In: Tagungsband der DGZfP-Jahrestagung, Fürth, Poster 14, 14.-16.05.2007
- [13] Straußberger, D.; Hartmann, I.; Hasenstab, A.: Straßenuntersuchungen mit Radar, Ultraschallecho und FWD. In: Tagungsband zur Bauwerksdiagnose Berlin, 21.-22.02.2008
- [14] Merkblatt über das Radarverfahren zur zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen (B10), DGZfP Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, Berlin (2008)
- [15] [www.zfp-hasenstab.de](http://www.zfp-hasenstab.de)