

# Bauwerksdiagnose mit zerstörungsfreien Prüfverfahren: Was wurde erreicht? - Woran fehlt es?

Christian U. Große  
Technische Universität München Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm)  
Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung  
Baumbachstr. 7, 81245 München  
[grosse@tum.de](mailto:grosse@tum.de)

**Kurzfassung.** In den letzten Jahrzehnten hat die Mess- und Prüftechnik große Fortschritte gemacht, was auch die Verfahren der Bauwerksdiagnose voran gebracht hat. Der Beitrag beschreibt einige der wesentlichen Entwicklungen, stellt diese aber auch in den Kontext zukünftiger Entwicklungen. So ist die Zahl der Anwendungen moderner Prüftechniken im Baubereich im Vergleich zu anderen Industriezweigen gering und eher als sporadisch zu bezeichnen, was in Anbetracht der großen volkswirtschaftlichen Bedeutung des Bauwesens unangemessen ist. Die Gründe dafür werden diskutiert und es werden Wege aufgezeigt, hier Abhilfe zu schaffen.

## Einführung

In vielen Bereichen der Prüftechnik hat durch die stürmischen Entwicklungen in der Mikroelektronik, Informatik und Sensorik auch eine Weiterentwicklung der Prüfverfahren und -auswertetechniken stattgefunden. So lassen sich Abmessungen, Wege, Zeiten, Gewichte usw. heute nicht nur schneller und mit höherer Präzision messen als noch vor wenigen Jahren, sondern die Techniken sind auch einfacher zu handhaben und preiswerter. So überwacht beispielsweise in modernen Kraftfahrzeugen eine Vielzahl von Sensoren den Status der Betriebssysteme und die Umgebung. In vielen Bereichen ist zudem eine moderne und effiziente Qualitätssicherung im Rahmen eines ausgefeilten Qualitätsmanagements ohne zerstörungsfreie Prüftechnik nicht mehr denkbar. In aller Regel liegen diese Verfahren nicht nur in standardisierter und zertifizierter Form als Prüfanweisungen vor, sondern auch alle Prüfgeräte und Sensoren sowie das Prüfpersonal (bzw. dessen Ausbildung) unterliegen standardisierten Anforderungen. Selbst neue Entwicklungen wie der großflächige Einsatz von Faserverbundwerkstoffen im Automobilbau werden von intensiven Anstrengungen hinsichtlich der Qualifizierung von Verfahren, Geräten und Personal begleitet, die nicht nur die Qualitätssicherung in der Herstellungsphase betreffen, sondern auch die technische Überwachung während der Nutzungszeit in regelmäßigen Prüfintervallen (die sogenannte Hauptuntersuchung).

Demgegenüber verwundert es, dass die Bauwerksdiagnose nach wie vor in den Kinderschuhen steckt – vor allem, was die Anwendung von zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP) in der wiederkehrenden oder dauerhaften Überwachung von Bauwerken betrifft. Das ist u. a. deswegen erstaunlich, weil das Anlagevermögen von Ingenieurbauwerken in Deutschland (zu denen unter anderem Infrastrukturbauten gehören) das z. B. aller Fahrzeuge in Deutschland übertrifft. Dieser Beitrag zeigt in ausgewählten Beispielen auf, was in diesem Zusammenhang auf dem Gebiet der Bauwerksdiagnose erreicht wurde und woran es noch fehlt, um schließlich auch den Weg zu Beschreiben, um zu einem ähnlichen Status zu gelangen wie er in anderen Ingenieur Anwendungen bereits heute üblich ist.

## 1. Bauwerksdiagnose – was wurde erreicht?

Es in den letzten Jahren gelungen, robuste und an die harten Randbedingungen des Bauwesens angepasste Verfahren zu entwickeln, die für die Bauwerksdiagnose eingesetzt werden können. So lassen sich zerstörungsfreie Prüftechniken sowohl in der Bauerstellungsphase (beispielsweise bei der Qualitätssicherung) einsetzen, aber auch in der Betriebsphase zur Inspektion oder Schadensanalyse. Immer wichtiger wird der Bereich der Zustandsdauerüberwachung, der im Englischen oft mit dem Terminus *Structural Health Monitoring* beschrieben wird. Weitere Anwendungen liegen in der Begleitung von Rehabilitationsmaßnahmen oder dem Denkmalschutz. In all diesen Bereichen gibt es ZfP-Verfahren, die sich als effizient und aussagekräftig etabliert haben. Die Bauwerksdiagnose ist sehr stark von diesen Verfahren geprägt, zu denen beispielsweise die Ultraschalltechnik, RADAR, die Radiografie, Potentialfeldverfahren, die Infrarotthermografie oder die Schallemissions- bzw. Schwingungsanalyse gehören. Dazu kommen noch viele andere Verfahren, die noch nicht einmal erwähnt werden können.

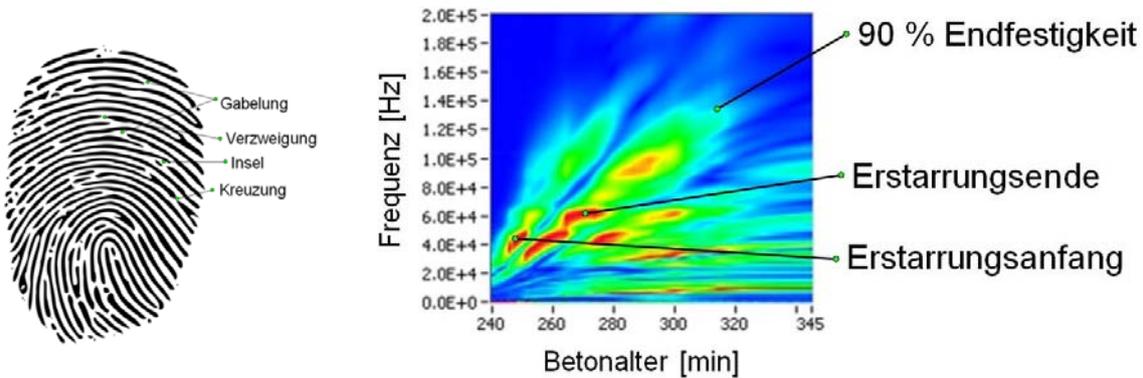
Eine wichtige Hilfe bei der Auswahl und dem Einsatz von Prüfverfahren leisten die in den vergangenen Jahren erschienen Publikationen [1-4] zum Thema ZfP im Bauwesen sowie die Merkblätter des Fachausschusses Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, DGZfP (siehe Literaturverzeichnis).

### 1.1 Qualitätssicherung in der Bauerstellungsphase

Die Pfeiler der Qualitätssicherung von Bauprodukten sind Normen, Zulassungen und Überwachungen. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen werden für solche Bauprodukte und Bauarten im Anwendungsbereich der Landesbauordnungen erteilt, für die es allgemein anerkannte Regeln der Technik, insbesondere Normen des Deutschen Instituts für Normung (DIN), nicht gibt oder die von diesen wesentlich abweichen. Sie stellen eine Beurteilung der Verwendbarkeit bzw. Anwendbarkeit der Bauprodukte und Bauarten im Hinblick auf bauliche Anforderungen dar. Ob tatsächlich nur zugelassene oder in den Normen beschriebene Materialien und Bauteile eingesetzt werden, ist Gegenstand der Eigen- oder Fremdüberwachung, die vor allem stichprobenhaft erfolgt. Dabei wirken Verfahren wie die Würfeldruckprüfung, der Vicatversuch oder das Ausbreitmaß und wie sie beispielsweise für die Festigkeitsprüfung von Zementen in der DIN EN 196 beschrieben sind antiquiert und ungeeignet für ein modernes Qualitätsmanagement.

Im Bereich des Betonbaus wäre es für die Qualitätssicherung beispielsweise hilfreich, eine Art Fingerabdruck einer Betonmischung generieren zu können (**Abb. 1**), an dem sich nicht nur die Zusammensetzung der Mischung ablesen lässt, sondern auch deren Eigenschaften. Ideal wäre ein Verfahren, wenn es auch die Dauerhaftigkeit und ggfs. Restlebensdauer eines Bauteils ermitteln könnte. Seit einigen Jahren wird an entsprechenden modernen Verfahren gearbeitet und unlängst wurde mit einer „Recommendation“ der RILEM-Organisation ein erster Vorschlag für eine Standardisierung gemacht [5]. Sicherlich

ist es noch nicht möglich, alle Eigenschaften einer Betonmischung mit ZfP-Verfahren abzubilden bzw. Vorherzusagen oder gar deren Dauerhaftigkeit insitu zu bestimmen. Jedoch ist ein Anfang gemacht in Richtung eines effizienten Baustoff- und Qualitätsmanagements und hin zu reproduzierbaren, dokumentierbaren und fachkundeunabhängigen Verfahren. Es wird abzuwarten sein, in wie weit die Baustoffindustrie diese Ansätze aufgreift.



**Abb. 1.** Biometrische Verfahren (links) und Fingerabdruck einer Betonmischung (rechts) mit ihren charakteristischen Eigenschaften (Verarbeitbarkeit, Frühfestigkeit).

Eine Ausnahme hinsichtlich der Qualitätssicherung von Beton- bzw. Stahlbetonbauwerken stellt die Überwachung der Dicke von Tunnelinnenschalen beim Bauprozess dar. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) wurde vor mehr als zehn Jahren von einer Expertenkommission unter Federführung der Bundesanstalt für das Straßenwesen (BASt) eine Prüfanweisung entwickelt, die verbindlich für die Eigenüberwachung hinsichtlich Minderdicken bei Tunnelinnenschalen ist [6]. Dabei kommt nach einem zertifizierten Prozess, der sowohl Prüfgerät als auch Prüfer umfasst, die Ultraschall- bzw. die Impakt-Echo-Methode zum Einsatz. Tatsächlich scheint es durch diese (von einem Bauherrn initiierte!) Qualitätssicherungsmaßnahme nur noch in seltenen Fällen zu Schäden durch Minderdicken zu kommen.

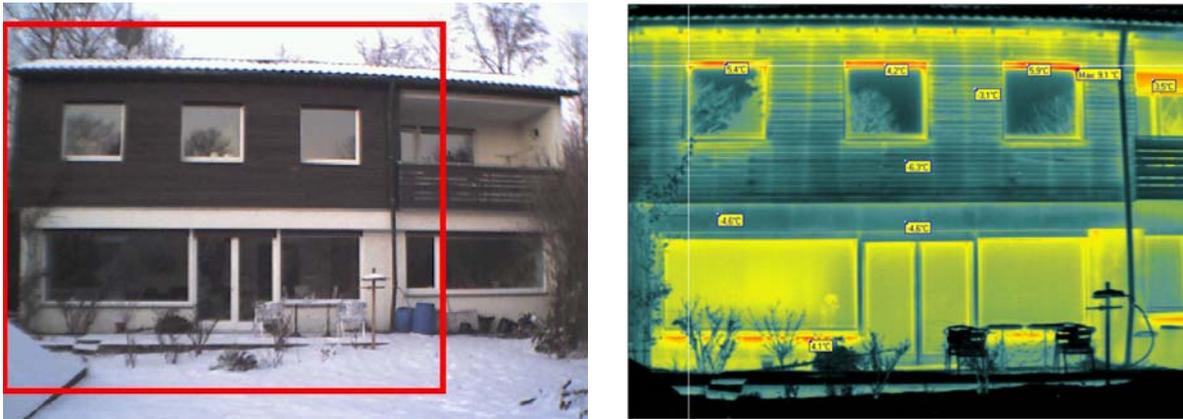
Das oben genannte Beispiel für Beton ist generell übertragbar auf andere Werkstoffe. Obwohl sie gegenüber Beton eine eher untergeordnete Rolle spielen, gilt auch hier, dass zwar eine ganze Reihe von ZfP-Verfahren existieren, die einsetzbar wären, um eine Sicherung der Qualität in der Herstellungsphase vornehmen zu können, allerdings ist generell auch dort das Niveau der eingesetzten Prüftechniken eher gering.

### 1.2 Inspektionsverfahren für die Bauwerksdiagnose

Ausgehend vom visuellen Befund helfen Inspektionsverfahren, den tatsächlichen Bauwerkszustand im Rahmen einer Bestandsaufnahme zu ermitteln. Insbesondere können zerstörungsfreie Prüfmethode in der Bauwerksdiagnose und bei der Schadensaufklärung eingesetzt werden. Zerstörungsfreie Prüfverfahren, die dabei heute häufig eingesetzt werden, sind die Ultraschall- und Impakt-Echo-Technik, RADAR und Mikrowellenmesstechnik, die Infrarot-Thermografie, Potentialfeldmessverfahren, induktive und kapazitive Verfahren sowie die Schwingungs- und Schallemissionsanalyse. Sie ergänzen die traditionellen Verfahren wie den Rückprallhammer, die Messung des elektrischen Widerstandes oder endoskopische Verfahren, wobei letztere jedoch bereits einen Eingriff ins Bauteil erfordern.

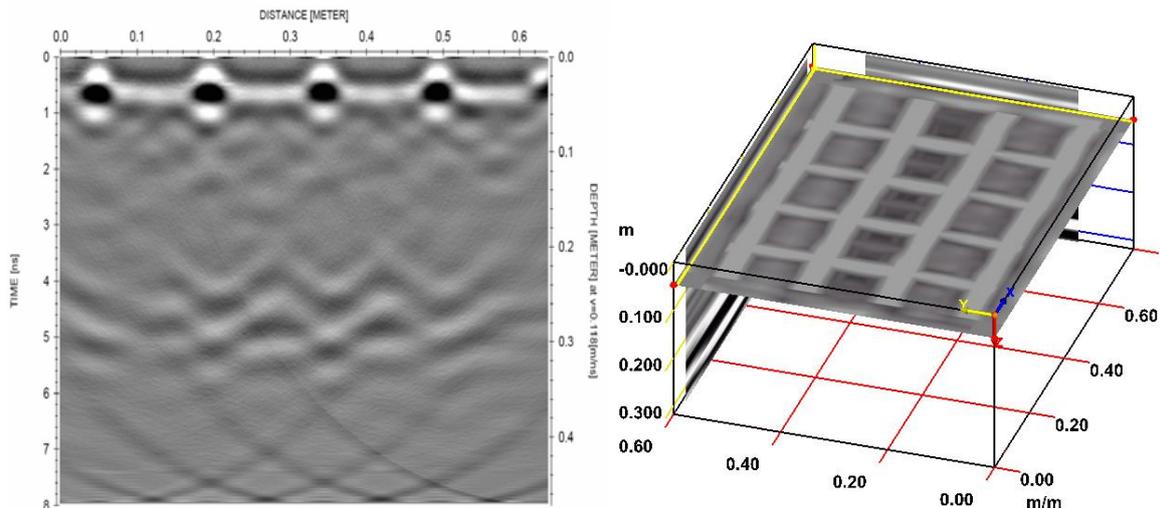
Einige ZfP-Messverfahren haben es aufgrund ihrer Robustheit bei Anwendungen zu einem Quasistandard gebracht. So ist die Infrarot-Thermografie heute ein Standardverfahren für die Bauwerksdiagnose hinsichtlich Wärmedämmung (**Abb. 2**) [7] im Rahmen der Energieeinsparverordnung (EnEV). Mit der Thermografie lässt sich allerdings keine

allumfassende Bauwerksdiagnose durchführen. Wenn der zu messende Temperaturkontrast bei diesem Verfahren nicht von außen erhöht wird, so ist die Eindringtiefe auf wenige Zentimeter beschränkt. Größere Eindringtiefen lassen sich über aktive Techniken erzielen, bei denen beispielsweise kontinuierlich oder gepulst Wärmewellen erzeugt werden und das Abkühl- oder Aufheizverhalten an der Oberfläche (Wärmefluss) beobachtet wird. Allerdings nimmt dadurch die Messgeschwindigkeit drastisch ab und es können im selben Zeitraum nur wesentlich kleinere Flächen untersucht werden. Obwohl die Handhabung der Wärmebildkameras heute benutzergeführt ist und schnell erlernt werden kann, sind für den professionellen Einsatz in jedem Fall fundierte Fachkenntnisse notwendig.



**Abb. 2.** Infrarot-Thermografie an einem Einfamilienhaus zur Detektion von Wärmebrücken.

Ähnlich wie die Thermografie stellt RADAR ein schnelles kontaktfreies und bildgebendes Verfahren dar, welches ebenfalls elektromagnetische Wellen verwendet. Damit lassen sich Messgeschwindigkeiten von mehreren Kilometern pro Stunde erreichen. Das Verfahren hat viel Potenzial hinsichtlich der Defektortung oder der Detektion und Lokalisierung von konstruktiven Details beispielsweise bei der Diagnose von Bauwerken aus Beton [8]. Dies ist sicherlich auch der Grund, warum mehrere Messgerätehersteller in letzter Zeit handliche Radarmessgeräte auf den Markt bringen, die keinerlei Kabel zu einer externen Stromversorgung mehr benötigen und eine dreidimensionale Abbildung des Inneren von Bauteilen ermöglichen. Es lassen sich besonders gut metallische Komponenten (Bewehrung) in Abhängigkeit von der verwendeten RADAR-Antenne (Frequenz) in größeren Betontiefen bis zu einem Meter auffinden (**Abb. 3**). Ein Nachteil ist die schwierige Interpretation der Messergebnisse bei dichter Bewehrung (Stahlbeton) oder mehreren Bewehrungslagen untereinander. Auch ein hoher Feuchtegehalt kann problematische Messergebnisse verursachen. Das Verfahren erfordert solide Grundkenntnisse in der Wellenausbreitung von elektromagnetischen Wellen sowie Erfahrung in der Interpretation der Messergebnisse. Ohne ausreichende Schulung oder zusätzliche (beispielsweise durch andere ZfP-Verfahren gewonnene) Informationen über das Messobjekt, sind Fehlinterpretationen oder fehlerhafte Anwendungen möglich. Um trotz dieser Nachteile sowie den verfahrensspezifischen Eigenheiten (Migration) eine sichere Interpretation der Ergebnisse zu gewährleisten, sind Simulationen hilfreich. Insbesondere bei komplexen Bauteilen kann eine Modellierung der RADAR-Messungen bei der Interpretation der Daten helfen; entsprechende Programme werden aber nicht von allen Geräteherstellern angeboten oder sind wenig anwenderfreundlich.



**Abb. 3.** Auswertungen von Radarmessungen an Stahlbeton als Tiefenschnitt mit typischen Artefakten am unteren Bildrand (links) und 3D-Darstellung (rechts).

Das Ultraschallverfahren ist beispielsweise in der Medizintechnik und der Schweißnahtprüfung etabliert und wird dort erfolgreich eingesetzt. Im Bauwesen spielte es jedoch – mit Ausnahme des Stahlbaus – lange Zeit eine untergeordnete Rolle, wofür im Wesentlichen zwei Umstände verantwortlich sind. Baustoffe wie Beton, Stahlbeton, Holz oder Mauerwerksteine sind meist so heterogen aufgebaut, dass die Dämpfung der Schallwellen groß im Verhältnis zu den Laufwegen ist, was die Detektionstiefe begrenzt. Diese Heterogenitäten limitieren zudem die Auflösung des Verfahrens, denn prinzipiell können mit Ultraschall nur Fehler oder Objekte detektiert werden, die größer als die größten Heterogenitäten (z. B. die Zuschläge; maximales Größtkorn) sind, durch die die Wellen laufen müssen. Der Einfluss von Inhomogenitäten und Dämpfung nimmt mit dem Laufweg zu, was noch kritischer durch den Umstand wird, dass die Zugänglichkeit zu Bauteilen oft nur einseitig gegeben ist. Bei Ultraschalltechniken, die dementsprechend in Reflexion arbeiten, beträgt der Laufweg also die doppelte Detektionstiefe. Heterogenitäten verursachen im Ultraschallbild ein Rauschen. Um dieses zu vermindern, sind viele und am besten redundante Einzelmessungen notwendig, beispielsweise aus unterschiedlichen Schallwinkeln [9]. Algorithmen, die aus vielen solcher Messungen durch Rekonstruktion ein Abbild des Bauteilinneren generieren, gibt es zwar seit einiger Zeit – sie wurden beispielsweise für die seismische Prospektion in der Geophysik (Erdölsuche) entwickelt –, jedoch scheiterte ihre Anwendung bislang an den immensen Datenmengen, die verarbeitet werden müssen, und an der zeitaufwändigen Ankopplung, die im Bauwesen (mit Strukturen von großen Dimensionen) hinderlich ist. Durch die fortdauernde Leistungssteigerung im Computerbereich konnte das Problem der Datenverarbeitung weitgehend gelöst werden. Zudem gibt es durch den Einsatz von koppelmittelfreien Ultraschallarrays erst seit kurzer Zeit Ansätze, das Ankopplungsproblem zu umgehen. Diese Arrays [10] besitzen eine Vielzahl von Sensoren (beispielsweise 12 sendende und 12 aufzeichnende Sensoren), die aus federnd gelagerten Punktkontaktprüfköpfen bestehen (**Abb. 4**). Damit sind schnelle handgeführte Ultraschallmessungen auch in Reflexion an größeren Bauteilabschnitten kosteneffizient durchführbar. Durch die Strahlbündelung der Arraysensoren können größere Eindringtiefen realisiert werden und damit ist die Ultraschalltechnik in der Lage, beispielsweise an Betonbauteilen zur Schadensdetektion in Tiefenbereichen von wenigen Zentimetern bis zu etwa einem Meter eingesetzt zu werden. Die integrierten Mikrocomputer sind so leistungsfähig, dass die Daten sofort visualisiert werden können.



**Abb. 4.** Scherwellen-Ultraschallarray mit federnd gelagerten Punktkontaktprüfköpfen.

Für die Diagnose an dickeren Bauteilen eignet sich das Impakt-Echo-Verfahren, welches in den achtziger Jahren in den USA entwickelt wurde. Statt eines Ultraschallimpulses aus einem oder mehreren Sendern wird zur Anregung ein Impakt verwendet, wie er beispielsweise durch rückprallhammerartige Geräte oder Stahlkugeln erzeugt werden kann. Obwohl dadurch i. d. R. die Objekt Oberfläche unbeschädigt bleibt, können im Vergleich zur klassischen Ultraschalltechnik Wellen höherer Energie erzeugt werden, was zu einer größeren Eindringtiefe führt. Die Auswertung erfolgt im Frequenzbereich nach mittlerweile standardisierten Algorithmen [11]. Typische Anwendungsbereiche sind die Messung der Dicke von Bauteilen wie Weiße Wannen oder Tunnelinnenschalen. Eine der Voraussetzungen ist jedoch der direkte Zugang zum Bauteil – Beschichtungen, schwimmende Estriche oder Dichtungsbahnen können den Einsatz der Impakt-Echo-Technik oder des Ultraschallverfahrens verhindern.

Zu weiteren Verfahren, die geeignet für die Bauwerksdiagnose sind, zählen die Radiografie, induktive und kapazitive Verfahren, Mikrowellenverfahren [12], elektrochemische und Potentialfeldmessverfahren [13] sowie vergleichsweise einfache Verfahren wie der Rückprallhammer, die Bohrwiderstandsmethode oder die Endoskopie (Videoendoskope). Auch hier gab es viele positive gerätetechnische und methodische Weiterentwicklungen in den letzten Jahren.

### *1.3 Dauerüberwachung zur Bauwerksdiagnose und Structural Health Monitoring*

Bei sicherheitskritischen Bauwerken oder solchen von hoher Bedeutung (z. B. denkmalgeschützte Bauten [14]) reicht oft eine wiederkehrende Inspektion beispielsweise alle drei oder sechs Jahre entsprechend der Brückenprüfung nach DIN 1076 [15] oder der Ril-804 der Deutschen Bahn AG nicht aus. Hier können automatisierte Überwachungstechniken eingesetzt werden, die die überwachenden Ingenieure unterstützen, in dem sie beispielsweise Abweichungen vom "normalen" Bauwerkszustand beobachten und melden. Die Dauerüberwachung wird in dem Maße wichtiger, wie das Alter von Ingenieurbauwerken wächst; sie wird aber auch anwendbarer je preiswerter und flexibler sie einsetzbar ist. Kabellose Überwachungstechniken [16] sind dabei aufgrund ihrer Flexibilität und Miniaturisierung besonders attraktiv. Mittlerweile sind für die meisten physikalischen Messparameter Miniatursensoren erhältlich, sogenannte Mikro-elektro-mechanischen Systeme (MEMS). Mit ihnen ist es möglich, intelligente kostengünstige und anwenderfreundliche Überwachungssysteme herzustellen, die den Anforderungen an eine moderne

Bauwerksdiagnose gerecht werden [17]. Im Vergleich zu drahtlosen Sensorknoten gibt es eine Reihe eher konventioneller Verfahren zur Bauwerksdauerüberwachung. Dazu zählt u. a. die Schallemissionsanalyse [18], die Schwingungs- und Modalanalyse oder die Faseroptische Messtechnik [19], auf die hier aber nicht näher eingegangen werden kann.

## 2. Bauwerksdiagnose – woran fehlt es?

Es ist nicht einfach, Vorschläge zu entwickeln, wie der Bereich der Bauwerksdiagnose zukünftig weiterentwickelt werden kann. Die folgenden Empfehlungen sind vor dem Hintergrund persönlicher Erfahrungen zu sehen.

Da traditionell die Seriengröße von Bauwerken klein ist im Vergleich zu anderen Produkten (Serienproduktion) und die materialspezifischen Randbedingungen stark variieren, ist die Anwendung von Diagnoseverfahren schwierig. Unter anderem deswegen war die Strategie bislang, Bauwerke mit genügend Sicherheit zu bauen. Diese Strategie ist aber vor dem Hintergrund immer schlanker Bauwerke und dem Einsatz von High-Tech-Werkstoffen (Leichtbau, Faserverbund) zu hinterfragen. Die folgenden Empfehlungen sind vor allem hinsichtlich Forderungen nach höherer materialwissenschaftlicher und finanzieller Effizienz zu sehen sowie hinsichtlich einer verbesserten Nachhaltigkeit des Bauprozesses und Dauerhaftigkeit der Bauprodukte bzw. Bauwerke.

### 2.1 Qualitätssicherung und Dauerüberwachung

In den letzten Jahren wurden verschiedene ZfP-Verfahren entwickelt, die für eine fortschrittliche Qualitätssicherung von Betonwaren und Bauwerken eingesetzt und mit denen das Qualitätsmanagement deutlich verbessert werden könnte, die aber im praktischen Bauprozess derzeit nicht eingesetzt werden. Hindernisse, die dieser Anwendung entgegenstehen, sollten deshalb in den nächsten Jahren ausgeräumt werden.



**Abb. 5.** Eine Bestandsaufnahme von Ingenieurbauwerken nach Vorbild der Hauptuntersuchung im Kraftfahrzeugbereich würde die Qualitätsstandards verbessern und helfen, eine „Geburtsurkunde“ für Bauwerke zu erstellen.

Insbesondere muss das Interesse der Auftraggeber (und späteren Besitzer) sowie der Ausführenden (also der Hersteller von Bauprodukten wie Baustoffzulieferer und Bauausführende) an einer Überwachung verstärkt werden. Hier gilt es einerseits einen Wissensmangel zu beseitigen beispielsweise durch eine verbesserte Ausbildung (s. u.). Andererseits ist die Bauindustrie zu veranlassen, diese Techniken auch einzusetzen – und sei

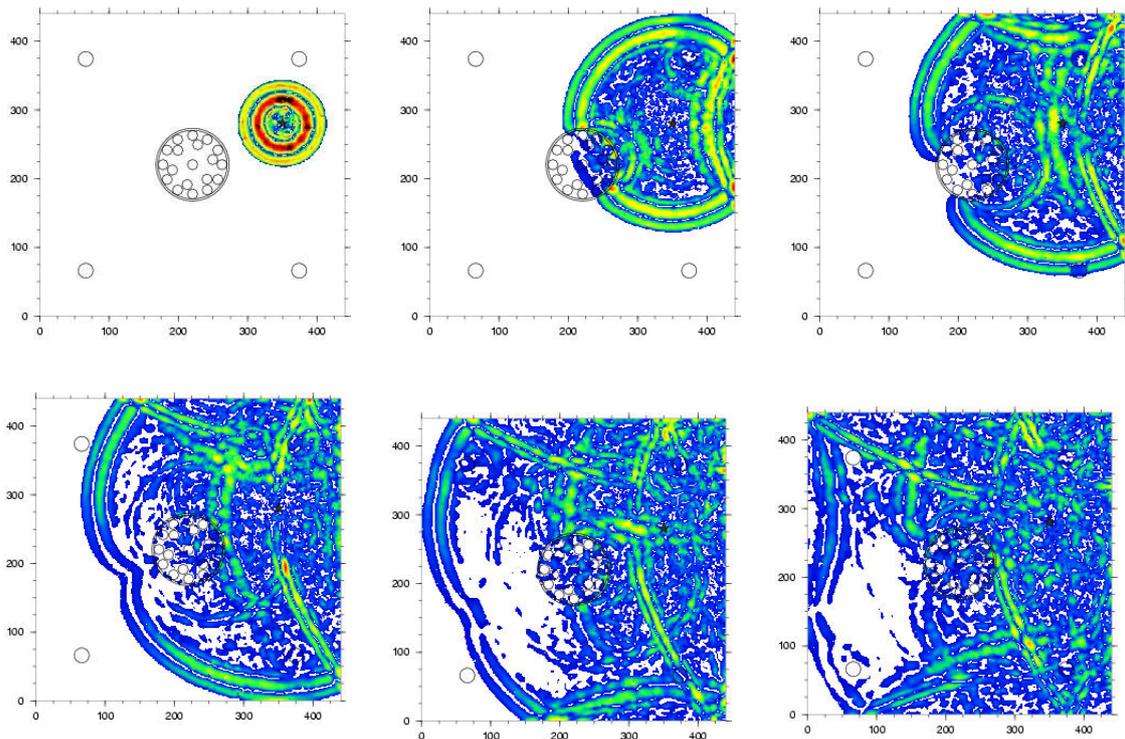
es durch die Etablierung von Richtlinien und Standards. Es ist der Öffentlichkeit immer schwerer vermittelbar, dass die Qualitätsstandards bei der Erstellung teurer Ingenieurbauwerke niedriger sein sollen, als für ein Kraftfahrzeug (**Abb. 5**), obwohl die Lebensdauer eines Bauwerks im Regelfall deutlich die von anderen Industrieprodukten übersteigt. Eine Bestandsaufnahme unmittelbar bei der Bauabnahme könnte zu einer Art „Geburtsurkunde“ führen. Dies würde nicht nur frühzeitig Mängel aufdecken, sondern auch spätere Überprüfungen stark vereinfachen, da dann nur noch Abweichungen von einem Erstzustand gemessen werden müssen, was einfacher ist, als jedes Mal eine neue Bestandsaufnahme durchzuführen.

In diesem Zusammenhang wäre auch die Verwendung der RFID-Technik (*radio-frequency identification*) interessant, wie sie heute Standard im Warenmanagement ist. So könnten elektronische Bauwerksbücher direkt am Bauwerk gespeichert und jederzeit (über einen Zugangskode) ausgelesen werden. Auf den Speicherchips ließen sich zudem die ZfP-Daten speichern ebenso wie alle Material- und Herstellungsdaten. Allerdings muss hier das Auslesen dieser elektronischen Daten auch noch nach Jahrzehnten sichergestellt sein, was an die elektronischen Komponenten und an die Datenformate hohe Anforderungen stellt.

## 2.2 Verbesserung der Prüftechnik

Wie oben dargestellt, wurden die Messgeräte und Prüfverfahren in den letzten Jahren ganz wesentlich verbessert und weiterentwickelt, so dass heute ein Portfolio an leistungsfähigen Verfahren vorhanden ist, mit dem sich viele Probleme der Bauwerksdiagnose lösen lassen. Trotzdem gibt es weiteres Verbesserungspotenzial. So ist es in der Regel wichtig, die Messaussage verschiedener ZfP-Verfahren miteinander zu kombinieren, um zutreffende Aussagen zu gewinnen. An Richtlinien für eine Verfahrenskombination und vor allem die Fusion der Messdaten muss zukünftig gearbeitet werden. Dazu erscheint es immer wichtiger, die individuellen Messbedingungen vor Ort in Bezug auf das Messsignal zu modellieren, um frühzeitig Eigenheiten einer Messaufgabe erkennen zu können. In den letzten Jahren wurden Algorithmen entwickelt, mit denen eine hochauflösende dreidimensionale Simulation der Wellenausbreitung sowohl von elastischen Wellen (**Abb. 6**) wie auch von elektromagnetischen Wellen (RADAR) in fast beliebig aufgebauten Konstruktionen möglich ist [20, 21]. So wäre generell eine Beurteilung der Messgrenzen mit heutigen Simulationsverfahren bereits denkbar. Algorithmen für eine Insitu-Beurteilung sowie beispielsweise für die Bestimmung der besten Sensorpositionen fehlen allerdings noch.

Um schließlich auch große Bauteile effizient untersuchen zu können, werden hinsichtlich der Gerätetechnik und ihrer Automatisierung große Anstrengungen unternommen. Zwar sind flächendeckende Bauteilmessungen vielfach nicht notwendig, da sich mit Ingenieurverstand die schadensrelevanten Bauwerksbereiche stark eingrenzen lassen. Jedoch wäre eine automatisierte (oder zumindest schnellere) Messung auch bei Untersuchungen von Bauwerksabschnitten hilfreich. Aktuelle vielversprechende Entwicklungen betreffen die oben beschriebenen Punktkontaktprüfköpfe (Abb. 4), die sich trocken ankoppeln lassen, oder luftgekoppelte Ultraschallsensoren, die sich für Bauwerksanwendungen noch in der Erprobungsphase befinden [23]. Um automatisiert über Robotersysteme Messungen an Bauwerken durchführen zu können, sind die Entwicklungen von Bauwerkscannern zu verfolgen [24], die nicht nur einen geringeren Personaleinsatz ermöglichen, sondern auch eine Kombination unterschiedlicher Verfahren in einem Messgang. Leider sind diese Systeme derzeit noch zu teuer und erfordern eine große Fachkompetenz hinsichtlich Praxiseinsatz und Datenanalyse.



**Abb. 6.** Simulation der Ausbreitung elastischer Wellen in einem Spannbetonbalken mit quadratischem Querschnitt (Kantenlänge 440 mm), Stahlbewehrung, PE-Hüllrohr und Litzen [22], zeitliche Darstellung in Zeitschritten von 15  $\mu$ s von links oben nach rechts unten.

### 2.3 Verbesserung der Ausbildung und Erhöhung des allgemeinen Wissensstandes

Für effiziente und vor allem aussagesichere Anwendungen zerstörungsfreier Prüfverfahren ist eine solide Ausbildung unabdingbar [25; 26]. Obwohl die Handhabung einiger Verfahren mittlerweile sehr einfach ist, ist deren Praxisanwendung insbesondere bei singulären Fragestellungen und komplexen Bauteilen kompliziert und fehleranfällig, da die Dateninterpretation nicht immer einfach ist. Die Messwerte sind oft mehrdeutig und mit einem unterschiedlich großen Fehler behaftet. Die Bewertung der Ergebnisse hängt deswegen nach wie vor von einem tieferen Verständnis des Messobjektes (Baumaterial, Bauteil, Konstruktion), von mehr als grundlegenden Kenntnissen verfahrenstechnischer Details (Wellenausbreitung, Signalformen, Frequenzen) wie auch der gerätetechnischen Möglichkeiten und Grenzen (Abtastung, Sensoren) ab. Sofern ZfP-Geräte nicht ausschließlich für einen speziellen und engdefinierten Anwendungsfall (z. B. Rückprallhammer) konzipiert wurden, ist von einem Einsatz durch Personal ohne spezifische ZfP-Ausbildung abzuraten. Dies gilt insbesondere für die Verfahren Ultraschall, Impakt-Echo, RADAR, Infrarot-Thermografie und Schallemissions- bzw. Schwingungsanalyse.

Die Komplexität der Aufgabenstellungen im Bauwesen bedingt meist die Verwendung von verschiedenen Verfahren. Deswegen ist es logisch, dass die Einweisung (z. B. durch einen Gerätehersteller) an nur einem Verfahren aus einem Anwender noch lange keinen Spezialisten in ZfP-Verfahren ausmacht. Die richtige Wahl des Prüfverfahrens mit den am besten geeigneten Sensoren und Auswertalgorithmen ist die Basis für eine erfolgreiche Prüfung – nach Analyse des Problems wird ein erfahrener Ingenieur ohnehin in aller Regel Verfahrenskombinationen vorschlagen. Leider gibt es in Deutschland viel zu wenig ausgebildete Fachkräfte auf diesem Gebiet. Die ZfP-Ausbildung von Ingenieurinnen und Ingenieuren im akademischen Bereich findet nur an wenigen Universitäten und

Hochschulen statt und umfasst i. d. R. auch nur wenige ausgewählte Verfahren. Im nicht-akademischen Bereich existiert derzeit keine zertifizierte Qualifizierung von Prüfpersonal nach dem Muster der Levelprüfungen. Es ist also notwendig, die Ausbildung auf dem Gebiet der Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen über den aktuellen Stand hinaus zu bringen. Es wäre allein schon hilfreich, wenn potenzielle Auftraggeber in die Lage versetzt würden, Prüfaufgaben besser zu spezifizieren und alle notwendigen Informationen vor Angebotserstellung zu liefern. Hier bieten die Merkblätter der DGZfP bereits in vielen Fällen eine gute Unterstützung mit Textbausteinen für Ausschreibungen. Die unterschiedlichen Materialien, die im Bauwesen verwendet werden (wie Beton, Stahl, Holz, Polymere) und insbesondere ihre Kombination (Komposite, Beschichtungen, Verstärkungen) erzwingen eine enge Zusammenarbeit zwischen den Materialtechnologen und den Prüfern [27]. Dies gilt vor allem vor dem Hintergrund der Entwicklung moderner Baustoffe wie Hochleistungsbetone mit Stahlfaser- oder Textilbewehrung [28]. Je mehr Informationen hier vor einer Auftragserteilung ausgetauscht werden, umso leichter fällt die Beurteilung, ob zerstörungsfreie Prüfmethoden eingesetzt werden können und wenn ja, welche.

Für die Ausbildung im nicht-akademischen Bereich ist die Konzeption eines Levelprüfsystems schwierig, da die unterschiedlichen Baumaterialien sehr unterschiedliche Randbedingungen mit sich bringen und die ZfP-Methoden unterschiedliche Kompetenzen erfordern. Einfach gefragt: Ist ein Spezialist für die ZfP-Prüfung von Stahlbeton auch kompetent für die Holzprüfung? Hier ist zu überlegen, ob eine Baustoffprüferqualifikation für den Bereich ZfP nicht auf die verschiedenen Materialklassen (zementgebundene Materialien, Holz, Mauerwerk und Stein, Baustahl etc.) fokussieren sollte. Im Hinblick auf die akademische Grundausbildung in den Ingenieurwissenschaften sollten die messtechnischen Grundlagen und insbesondere Grundlagen der ZfP-Verfahren zur Bauwerksdiagnose bereits heute zum Curriculum gehören. Hier mangelt es – trotz erster Konzepte [29] – noch an einem entsprechenden Dokument, so wie es beispielsweise für den Bereich der Werkstoffe des Bauwesens durch ein Memorandum existiert, das von den Hochschullehrern im deutschen Sprachraum 2012 herausgegeben wurde [30].

### **3. Danksagung**

Der Inhalt dieses Artikels reflektiert viele Gespräche, die der Autor in den letzten Jahren zum Thema führte. Dank gebührt deswegen meinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sowie meinen Kolleginnen und Kollegen aus dem In- und Ausland und aus Industrie und Forschung. Ein Teil der gezeigten Abbildungen entstand in Projekten, die von der Deutschen Forschungsgemeinschaft, dem Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie oder der Europäischen Kommission gefördert wurden.

### **Referenzen**

- [1] Reinhardt, H.-W.; u. a.: Echo-Verfahren in der zerstörungsfreien Zustandsuntersuchung von Betonbauteilen; in: K. Bergmeister, J.-D. Wörner (Hrsg.): Betonkalender 2007. Berlin: Ernst & Sohn, 2007, Bd. 1, S. 479–595.
- [2] Taffe, A.; Wiggenhauser, H.; u.a.: Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen, in: Cziesielski, E. (Hrsg.); Bauphysik-Kalender 2004, Berlin: Ernst und Sohn (2004) Kap. C1, S. 305-418.
- [3] Taffe, A.; Wiggenhauser, H.: Zerstörungsfreie Zustandsermittlung und Qualitätssicherung in der Betoninstandsetzung, Ernst und Sohn Verlag, Beton- und Stahlbetonbau, Volume 100, Issue Supplement 1, S. 2–14, July 2005.
- [4] Maierhofer, C.; Reinhardt, H.-W.; Dobmann, G. (Hrsg), Non-destructive testing methods. Vol. 1 + 2, Woodhead Publ. (2010), ISBN 1-84569-950-5.

- [5] Recommendation of RILEM TC 218-SFC: Sonic methods for quality control of fresh cementitious materials - Testing of fresh concrete by ultrasound transmission. *Materials and Structures*, July 2011, Volume 44, Issue 6, S. 1047-1062.
- [6] ZTV-ING, Teil 5 "Tunnelbau", Abschnitt 1 Geschlossene Bauweise - Anhang A: "Richtlinie für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Tunnelinnenschalen" (RI-ZFP-TU) für den Geschäftsbereich der Bundesfernstraßen (2007).
- [7] Fouad, N.A.; Richter, T.: Leitfaden Thermografie im Bauwesen - Theorie, Anwendungsgebiete, praktische Umsetzung. ISBN: 3-8167-7071-1, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart (2006), 125 Seiten.
- [8] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP): B10 Merkblatt über das Radarverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen, Februar 2008, überarbeitete Fassung, 41 Seiten.
- [9] Schickert, M.; Hillger, W.: Ein Ultraschall-Multikanal-Messsystem mit SAFT-Rekonstruktion für die Abbildung von Betonbauteilen; in: DGZfP-Jahrestagung, Münster, 18.-20.5.2009. Berlin: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 2009, CD-ROM, S. 1-10.
- [10] Samokrutov, A.; Shevaldykin, V.; Bobrov, V.; Kozlov, V.: Development of acoustic methods and production of modern digital devices and technologies for ultrasonic non-destructive testing; ISSN 1392-2114 ULTRAGARSAS, Nr.4 (61), 2006, S. 12-21.
- [11] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP): B11 Merkblatt über die Anwendung des Impakt-Echo-Verfahrens zur Zerstörungsfreien Prüfung von Betonbauteilen, März 2011, 37 Seiten.
- [12] Göller, A.: Moist Scan – Multischicht-Feuchtescans auf großen Flächen in der Praxis. *NDT.net Vol. 10* (2010), 9 Seiten.
- [13] Sodeikat, C., Gehlen, C. und Schießl, P.: Auffinden von Bewehrungskorrosion mit Hilfe der Potentialfeldmessung, *Beton- und Stahlbetonbau* 97 (2002) 9, S. 437-444.
- [14] Grosse, C.U.; Pascale, G.; Simon, S.; Krüger, M.; Troi, A.; Colla, C.; Rajcic, V.; Lukomski, M.: Smart Monitoring of Historic Structures by Wireless Sensors. *Proceedings of the International Workshop on Conservation of Heritage Structures Using FRM and SHM (CSHM-3)*, 11-13, August 2010, Ottawa-Gatineau, Canada, S. 281-290.
- [15] Naumann, J.: Bauwerksprüfung nach DIN 1076 - Bedeutung, Verantwortung, Durchführung. 14. Dresdner Brückenbausymposium 9. März 2004. Planung, Bauausführung und Ertüchtigung von Massivbrücken. Tagungsband, Dresden: Selbstverlag (2004), S. 53-64.
- [16] Grosse, C.U.; Gehlen, C.; Glaser, S.D.: Sensing methods in civil engineering for an efficient construction management. In C. Grosse (Ed.): *Advances in Construction Materials*. Springer publ., Heidelberg 2007, S. 553-566.
- [17] Grosse, C.U.; Glaser, S.D.; Krüger, M.: Initial development of wireless acoustic emission sensor nodes for civil infrastructure state monitoring. *J. of Smart Structures & Systems* 6 (2010), Nr. 3, S. 197-209.
- [18] Grosse, C.U.; Schumacher, T.: Anwendungen der Schallemissionsanalyse an Betonbauwerken. *Bautechnik*, Volume 90, Heft 11, S. 721-731, November 2013.
- [19] VDI/VDE 2660 Blatt 1: Experimentelle Strukturanalyse - Optischer Dehnungssensor basierend auf Faser-Bragg-Gitter - Grundlagen, Kenngrößen und deren Prüfung. VDI-Richtlinie, Juli 2010, 43 Seiten.
- [20] Langenberg, K.-J.; Marklein, R.; Mayer, K.: Theoretische Grundlagen der zerstörungsfreien Materialprüfung mit Ultraschall. Verlag Oldenbourg, 2009, 648 Seiten.
- [21] Schubert, F.: Ausbreitungsverhalten von Ultraschallimpulsen in Beton und Schlussfolgerungen für die zerstörungsfreie Prüfung. Dissertation, TU Dresden (2000), 310 Seiten.
- [22] Schechinger, B.: Schallemissionsanalyse zur Überwachung der Schädigung von Stahlbeton, IBK-Bericht Nr. 295, vdf Hochschulverlag, Februar 2006, 149 Seiten.
- [23] Gräfe, B.: Luftgekoppeltes Ultraschallecho-Verfahren für Betonbauteile. Dissertation, TU Berlin, ISBN 978-3-9812354-4-9, 2009, 170 Seiten.
- [24] Taffe, A., Kind, T., Stoppel, M.; Kurz, J.H.: Bauwerkscanner zur automatisierten und kombinierten Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen. *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2011), Nr.4, S. 267-276.
- [25] Heidt, H.: ZfP im Bauwesen - ist Ausbildung notwendig? DGZfP-Berichtsband 66-CD, Vortrag 12 1999, S. 117-120.
- [26] Wiggenhauser, H.: Bauwerksdiagnose mit zerstörungsfreien Prüfverfahren - Einführung und neue Entwicklungen. *NDT.net Vol. 11, Nr. 1* (2006), 4 Seiten.
- [27] Grosse, C.U.: Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen – Möglichkeiten und Grenzen. In: *VDI-Bautechnik*, Jahresausgabe 2011/2012, Springer VDI-Verlag, S. 122-131.
- [28] Grosse, C.U. (Hrsg.): *Advances in Construction Materials 2007*. Springer-Verlag, Heidelberg 2007, ISBN: 978-3-540-72447-6, 784 Seiten.
- [29] Grosse, C.U.: Ausbildung an deutschen Hochschulen im Bereich ZfP im Bauwesen, Tagung Bauwerksdiagnose Berlin, Berichtsband BB 134 (ISBN 978-3-940283-40-5), DGZfP, Berlin (2012), 9 Seiten.
- [30] Hochschullehrer Memorandum: Werkstoffe im Bauwesen – Universitäre Lehre und Forschung. *Bauingenieur*, Band 87, Februar 2012, S. 72-80.