

Zerstörungsfreie Prüfverfahren im Bauwesen (ZfPBau)

Automatisierung von zerstörungsfreien Prüfverfahren für das Bauwesen

Alexander Taffe, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

1 Anwendungsgebiete von ZfPBau-Verfahren

Zerstörungsfreie Prüfverfahren im Bauwesen (ZfPBau) haben in den vergangenen Jahren zunehmend Anwendung gefunden. Eine detaillierte Auflistung der Verfahren mit Kurzbeschreibung, Charakterisierung, Anwendung und Bewertung kann dem ZfPBau-Kompodium entnommen werden [1].

Die zunehmende Verbreitung dieser Verfahren liegt zum einen an technischen Neuentwicklungen, die nunmehr eine Bearbeitung baupraktisch relevanter Prüfprobleme auf wirtschaftliche Weise ermöglichen, zum anderen an neuen Fragestellungen, die im Rahmen erhöhter Qualitätsanforderungen an Bauwerke etwa durch „Nachhaltige Entwicklung“ im Bauwesen von Bauwerken oder einem verstärkten Bewusstsein hinsichtlich dauerhafter Lösungen bei der Bauwerksinstandsetzung gestellt werden.

DIN 1076 und objektbezogene Schadensanalyse

In Deutschland wird der Zustand von Brücken und anderen Ingenieurbauwerken im Zuge von Wegen und Straßen im Rahmen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076 erfasst [2].

Die hierbei festgestellten Schäden werden entsprechend der Richtlinie zur einheitlichen Erfassung von Ergebnissen der Bauwerksprüfung, RI-EBW-PRÜF, ausgewertet [3]. Bei komplexen Schadensbildern oder dem Verdacht weiterer visuell nicht erkennbarer Schäden müssen zusätzlich zur Bauwerksprüfung detaillierte Informationen zu Art und Umfang von Schäden im Rahmen objektbezogener Analysen [4] erhoben werden.

Der erste Schritt besteht in der detaillierten Erfassung der Bauwerksschäden durch zerstörende Untersuchungen, z.B. Entnahme von Materialproben oder Freilegen vermuteter Schadstellen bzw. durch den Einsatz zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen. ZfPBau-Verfahren werden dabei zur Lokalisierung von Schwachstellen und zur detaillierten Untersuchung von Schadstellen und deren Ausmaß eingesetzt. Aus den Ergebnissen werden die Auswirkungen der Schäden auf die Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit des Bauteils abgeleitet. Darüber hinaus wird aus Schädigungsmodellen der weitere Schadensverlauf und dessen Einfluss auf die Restnutzungsdauer bzw. zu erwartende Instandsetzungskosten abgeschätzt.

ZfPBau ist somit ein fester Bestandteil der objektbezogenen Schadensanalyse, wie sie im Rahmen des Bauwerksmanagement-Systems durchgeführt wird, das durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW) entwickelt wurde. Der Bund wird dadurch in die Lage versetzt, neben einem Überblick über den Zustand der Bauwerke auch Aussagen zum Finanzbedarf zu erlangen.

Um die Leistungsfähigkeit von ZfPBau-Verfahren im Rahmen der objektbezogenen Schadensanalyse beurteilen zu können, wurden an dem abzubrechenden Bauwerk Talbrücke Haiger die ZfPBau-Verfahren Radar, Ultraschall-Echo und Impact-Echo eingesetzt. Die Untersuchungen wurden an Bauteilen des Abbruchbauwerks durchgeführt und später durch Bohrkernentnahme an Stellen mit repräsentativen Erhaltungszuständen und vermuteten Schadstellen verifiziert. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag auf der Lokalisierung und der Zustandsuntersuchung von Spanngliedern im Hinblick auf Verpressfehler und die Lokalisierung von Fehlstellen im Beton [5].

Nachhaltiges Bauen und probabilistische Lebensdauerbemessung

In dem vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen herausgegeben Leitfaden [6] wird durch nachhaltiges Bauen eine Minimierung des Verbrauchs von Energie und Ressourcen sowie eine möglichst geringe Belastung des Naturhaushalts angestrebt.

Dies soll u.a. durch die Verlängerung der Lebensdauer von Bauprodukten und Baukonstruktionen sowie durch wiederverwendbare Bauprodukte sichergestellt werden. Dabei kommt ZfPBau-Verfahren die Aufgabe zu, Materialeigenschaften und den Zustand von Bauteilen zu ermitteln. Eng damit verbunden ist das zuvor beschriebene Auffinden von Schad- und Schwachstellen an Baukonstruktionen. Diese Stellen umfassen u.a. korrosionsaktive Bereiche an schlaffer und vorgespannter Bewehrung, Verpressfehler in Hüllrohren von Spannstahlkonstruktionen, in denen keine alkalische Schutzwirkung des Einpressmörtels für den Spannstahl vorhanden ist, strukturelle Schäden, z.B. Verbundverluste in Mehrschichtsystemen oder Risse, wobei bei letzteren die Risttiefe von besonderem Interesse ist. Die Kenntnis der Lage dieser Stellen im Bauteil und deren Zustand sind erforderlich, um Eingangsdaten für Modelle zur Beschreibung des Schädigungsverlaufs und einer Lebensdauerabschätzung bzw. probabilistischen Lebensdauerbemessung [7] zu gewinnen.

Anforderungen der Baupraxis

In der Baupraxis besteht die Anforderung, leistungsfähige Messverfahren automatisiert an großen Flächen einzusetzen. Außerdem ist die Zugänglichkeit von Bauteilen, z.B. die Untersicht einer Brücke durch ein Steigerfahrzeug oft nur temporär gegeben, so dass selbstarbeitende Systeme erforderlich sind. Es müssen Geräte entwickelt werden, die automatisiert über eine Bauteiloberfläche bewegt werden können. Dabei muss baupraktischen Schwierigkeiten begegnet werden, wie das Ausgleichen von Unebenheiten und eine Anpassung an die Geometrie des Bauteils.

Des Weiteren muss das automatische Aufzeichnen von Messwerten über einen Zeitraum mehrerer Stunden und deren Verarbeitung sichergestellt werden.

Das Auffinden von Schad- und Schwachstellen an Baukonstruktionen bedingt den Einsatz der Verfahren an großflächigen Bauteilen. Auf der anderen Seite sind detaillierte Aussagen über den Bauwerkszustand nur durch ein enges Untersuchungsraaster am Bauwerk zu realisieren. Bislang werden solche flächigen Untersuchungen durch Verfahren wie Radar, Potentialfeldmessungen, Ultraschall-Echo oder Impact-Echo von Hand ausgeführt. Dies bedingt insbesondere im Fall von Ultraschall-Echo und Impact-Echo eine eng eingegrenzte Auswahl von zu untersuchenden Bereichen verbunden mit erhöhtem wirtschaftlichen Aufwand bei der Ausweitung der Messbereiche, da Messraaster von 1 cm bis 2 cm je nach Prüfaufgabe erforderlich sind.

Entwicklung eines Baustellenscanners

In der BAM wurde als Gemeinschaftsprojekt der Fachgruppe IV.4 (Zerstörungsfreie Schadensdiagnose und Umweltmessverfahren) ein rechnergesteuerter automatischer Messabtaster für Bauteile (Baustellenscanner) entwickelt.

Es handelt sich um ein auf Schienen verfahrbares modulares System mit einem multifunktionalen Messkopf, das an einem Bauteil befestigt, quer und längs zur Schienenrichtung angesteuert werden kann (Abb. 1). Die Länge des Scanners kann modular in Schrittweiten von 1,20 m bzw. 2,40 m gewählt werden. Die Montage auf einer ebenen Bauteilfläche kann schräg, senkrecht oder auch über Kopf erfolgen. Derzeit kann der multifunktionale Messkopf mit den Verfahren Radar, Ultraschall-Echo und Impact-Echo betrieben werden, wobei beide zuletzt genannten Verfahren gleichzeitig betrieben werden können.

Nachfolgend werden die o.g. Verfahren kurz beschrieben und deren Entwicklung hinsichtlich einer Automatisierung aufgezeigt.



Abb. 1: Modulares Baustellenscanner-System mit multifunktionalem Prüfkopf zur Durchführung von Ultraschall-Echo-, Impact-Echo-Messungen (hier dargestellt) sowie Radarmessungen

2 Entwicklung von ZfPBau-Verfahren zur Untersuchung von Beton

Die nachfolgende Betrachtung der seitens der BAM bei der Automatisierung mit Hilfe des Baustellenscanners verwendeten ZfPBau-Verfahren Ultraschall, Impact-Echo und Radar zeigt, inwieweit Prüfproblem, physikalische Gesetzmäßigkeiten und technische Randbedingungen die Auswahl von Kenndaten und Einstellungen zur Lösung von Prüfaufgaben am Baustoff Beton beeinflussen.

2.1 Ultraschall

Das Ultraschall-Verfahren wird im Bauwesen zur Messung von Bauteildicken eingesetzt und zur Lokalisierung von Fehlstellen (z.B. Verpressfehler in Hüllrohren von Spannbetonkonstruktionen und Kiesnester) entwickelt. Bei der Automatisierung des Verfahrens wird die Ultraschall-Echo-Anordnung verwendet, bei der sich Sender und Empfänger auf der gleichen Seite des Bauteils befinden. Die Funktionsweise beruht auf der gerichteten Einkopplung von Ultraschallimpulsen einer bestimmten Wellenart in das Material über einen Sendekopf. Die Schallwellen werden bei der Änderung der akustischen Impedanz im untersuchten Bauteil reflektiert, wobei an Außenflächen, Hohlräumen und Rissen nahezu eine Totalreflexion erfolgt. Mit Hilfe eines Empfangsprüfkopfs, der im Einkopfbetrieb mit dem Sendekopf identisch ist, werden die empfangenen Signale gemessen und aufgezeichnet.

Die Schwierigkeit der Anwendung des Ultraschall-Verfahrens auf Beton liegt in der Heterogenität der Zusammensetzung des Baustoffs aus Zuschlägen und einer Zementmatrix mit Poren und deren Füllung mit Luft und Wasser, was zu einer starken Schallschwächung führt.

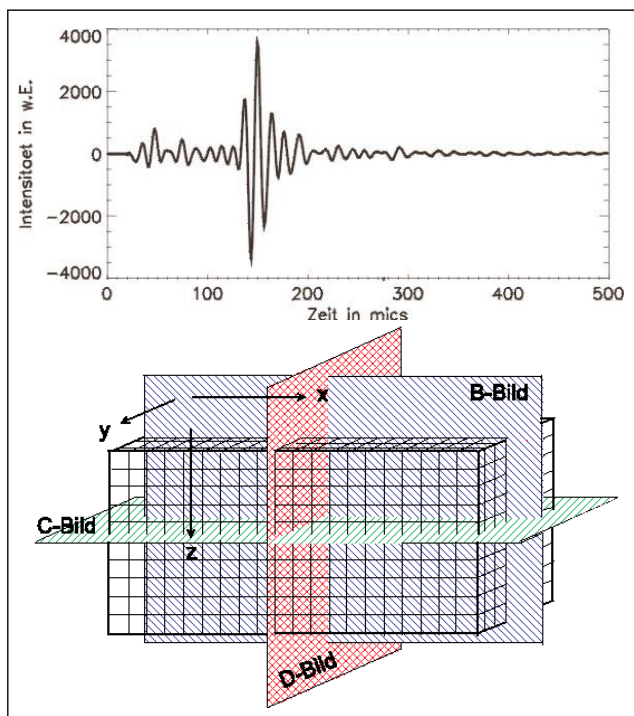


Abb. 2: Signalamplitude über der Zeit aufgetragen (A-Bild, oben); Schnitte zur Darstellung von Messdaten durch das Bauteil schematisch dargestellt (B-Bild, C-Bild und D-Bild, unten)

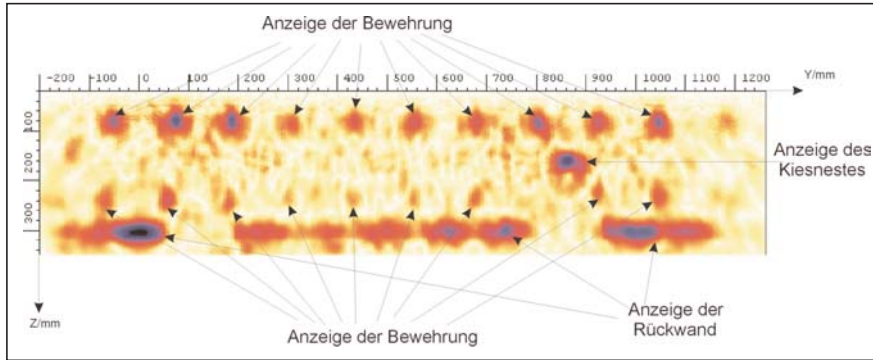


Abb. 3: SAFT-Rekonstruktion zur Ortung von Kiesnestern sowie oberer und unterer Bewehrung in einer Sohlplatte (B-Bild) [8]

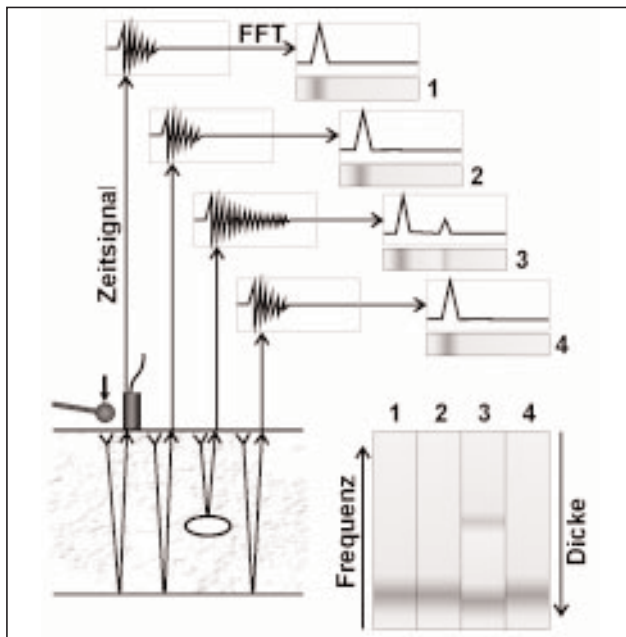


Abb. 4: Vielfachreflexionen an einem Bauteil mit Fehlstellen im Zeitbereich dargestellt; transformiertes Signal im Frequenzbereich; Schnitt durch das Bauteil über die Tiefe in Grauwertdarstellung (B-Scan) [5]

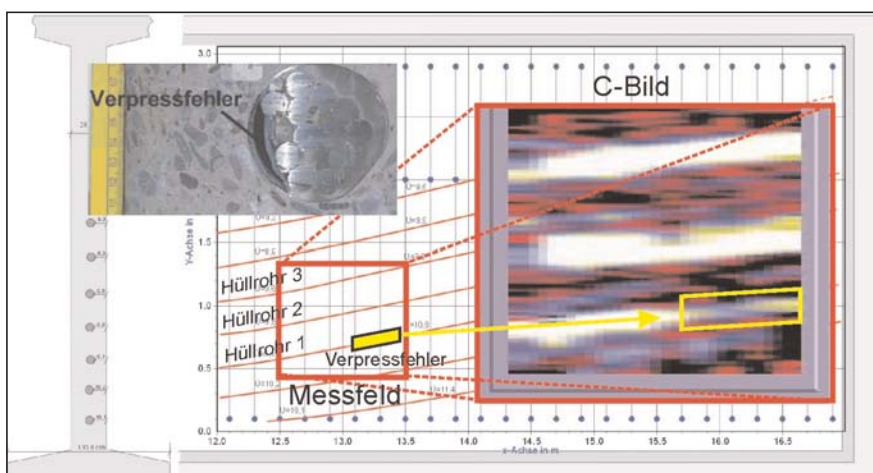


Abb. 5: Brückenlängsträger mit Impact-Echo-Messfeld; Tiefenschnitt (C-Bild) der Messfläche: die hellen Flächen kennzeichnen die Lage der verpressten Hüllrohre; teilweise verpresstes Hüllrohr mit großer Fehlstelle (gelb umrandeter Bereich); links oben: Foto der lokalisierten Fehlstelle am entnommenen Bohrkern [5]

Da die baupraktisch verwendeten Wellenlängen ($\lambda=2..10$ cm bei Frequenzen $f=200..40$ kHz und Schallausbreitgeschwindigkeit $v=4000$ m/s) in der Größenordnung des im Beton verwendeten Größtkorns von 16 mm bzw. 32 mm liegen, kommt es zu Streueffekten. Verwendet man größere Wellenlängen werden die störenden Einflüsse der Streuwellen zwar geringer, wobei aber auch das Auflösungsvermögen zur Ortung von Fehl- oder Schädstellen im Bauteil reduziert wird.

Die Ankopplung planarer Prüfköpfe erfolgt mit einem Koppelmittel. Baupraktisch und messtechnisch stellt sich dies oft als problematisch dar, da die Reste des Koppelmittels das optische Erscheinungsbild aber auch die Materialeigenschaften der Oberfläche – etwa für weitere Messungen – nachteilig beeinflussen. Außerdem ist eine Ankopplung mit Koppelmittel bei der automatisierten Messwerterfassung technisch nur mit großem Aufwand realisierbar.

Aus diesem Grund erfordert die automatisierte Messwerterfassung mit Ultraschall den Einsatz von Prüfköpfen, die koppelmittelfrei arbeiten. Derartige Köpfe stehen jetzt für den praktischen Einsatz zur Verfügung. Sie haben über eine Spitze einen Punktkontakt mit dem Bauteil und werden zur Messung einfach an das Bauteil gepresst [13].

Bei der Automatisierung von Ultraschallmessungen werden die bei jedem Messpunkt erhaltenen A-Bilder (Ultraschallamplitude über der Zeit, Abb. 2, oben) nach Abfahren des Messrasters weiter verarbeitet. Die besten Ergebnisse erhält man, wenn man anhand der Reflexionen und Rückstreuung eine Rekonstruktion aus dem darunter liegenden Volumen berechnet. Hierfür stehen verschiedene Methoden der Rekonstruktionsrechnung und künstlichen (synthetischen) Apertur zur Verfügung (SAFT: Synthetic Aperture Focusing Technique) [8].

Die Ergebnisse dieser Berechnung können als beliebige Schnitte durch das Bauteil dargestellt werden (Abb. 2, unten). Abb. 3 zeigt die SAFT-Rekonstruktion einer Stahlbetonsohlplatte, bei der ein Kiesnest in rd. 10 cm Tiefe direkt und in 22 cm Tiefe indirekt über die Abschattung der Rückwand (bei $y \approx 100$ mm) geortet wurden [8].

Das Lokalisieren von Verpressfehlern in Hüllrohren und deren Visualisierung ist derzeit in der Fachgruppe IV.4 Gegenstand der Forschung. Ergebnisse hierzu wurden im Rahmen des International Symposium Non-Destructive Testing in Civil-Engineering (NDT-CE) vom 16.-19. September 2003 in Berlin präsentiert [9].

2.2 Impact-Echo

Das Impact-Echo-Verfahren wird im Bauwesen primär zur Dickenmessung von Bauteilen eingesetzt. Eine Ortung von Hüllrohren ist unter bestimmten Bedingungen möglich, wobei die zuverlässige Lokalisierung unverpresster Bereiche im mit Mörtel gefüllten Hüllrohr von Spannstahlkonstruktionen immer noch Gegenstand intensiver Forschungsarbeit ist [5].

Auf der Bauteiloberseite werden durch einen kurzen Schlag mit einer Kugel akustische Wellen generiert und deren Vielfachreflexionen im Bauteil gemessen. Der Frequenzgehalt des Anregungsspektrums wird maßgeblich von Dauer und Stärke des Impacts bestimmt, welche durch die Größe der Kugel und die Oberflächenbeschaffenheit festgelegt werden. Dabei führt ein vergleichsweise großer Kugeldurchmesser (25 mm) zu einem schmalbandigen Anregungsspektrum, mit großer Amplitude jedoch ohne Anteile höherer Frequenzen.

Damit sind Aussagen für geringe Tiefen nicht möglich. Aussagen über die innere Struktur des Bauteils in geringeren Tiefen erhält man durch das breitbandige, jedoch deutlich schwächere Anregungsspektrum eines vergleichsweise geringeren Kugeldurchmessers (3 mm).

Treten im Bauteil Änderungen der akustischen Impedanz auf, z.B. an der Bauteilrückwand oder der Grenzfläche zu einer Fehlstelle (unverpresster mit Luft gefüllter Bereich eines Hüllrohrs), so kommt es zur Reflexion der Welle. Die auftretenden Vielfachreflexionen eines eingeleiteten Impacts werden mit Hilfe eines Sensors über die Zeit aufgezeichnet und digitalisiert. Diese Daten werden auf einen

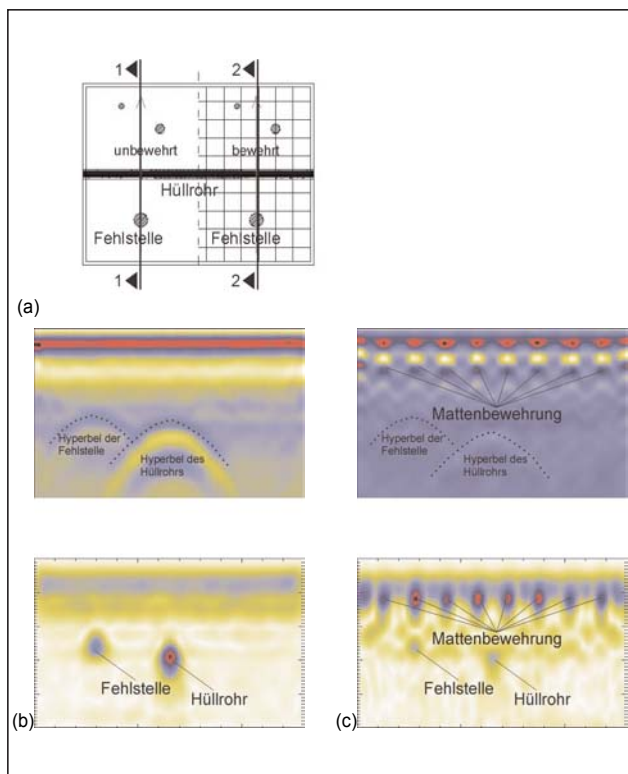


Abb. 6: (a) Betonprobekörper, bereichsweise bewehrt; (b) oben Radargramm und unten SAFT-Rekonstruktion in Schnitt 1-1 des unbewehrten Teils; (c) oben Radargramm und unten SAFT-Rekonstruktion in Schnitt 2-2 des bewehrten Teils [12]

Rechner übertragen, wo eine Fourier-Transformation vom Zeitbereich in den Frequenzbereich erfolgt. Dominante Frequenzen infolge von Vielfachreflexionen der Wellen an der Bauteilrückseite oder an Fehlstellen erscheinen als Anzeige im Frequenzspektrum (Frequenzbereich von ca. 2 bis 40 kHz). Der charakteristischen Frequenz, an der diese Spitzen auftreten, kann bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen die Tiefe des Reflektors zugeordnet werden (Abb. 4).

In Abb. 5 ist das Ergebnis einer Flächenmessung an einem vorgespannten Längsträger im Stegbereich dargestellt. Nach Auswertung der Messergebnisse der rd. 1 m² großen untersuchten Fläche mit eigens dafür entwickelter Software kennzeichnen die hellen Flächen die Lage der ordnungsgemäß verpressten Hüllrohre. Im rechten Teil von Hüllrohr 1 wurden verschobene Rückwandsignale gemessen, die auf Verpressfehler hindeuteten (gelb umrahmter Bereich). Die Vermutung wurde durch die Entnahme eines Bohrkerns an dieser Stelle verifiziert (Abb. 5, links oben).

2.3 Radar

Radar wird im Bauwesen zur Lokalisierung von schlaffer Bewehrung, Hüllrohren von Spannstählen, Einbauteilen (Anker u.ä.), zur Ermittlung von Belagschichtdicken und ausreichend großer Fehlstellen (z.B. Kiesnester) sowie der Detektion von außen nicht sichtbarer durchfeuchteter Bereiche in Bauteilen verwendet.

Das Radarverfahren beruht auf der aktiven Aussendung elektromagnetischer Wellen und der Einleitung in das zu untersuchende Bauteil. Dabei werden zur Untersuchung von Betonbauteilen i.d.R. Antennen mit Mittenfrequenzen im Bereich von 500 MHz bis 1,5 GHz verwendet.

Die Wellenausbreitung im Bauteil hängt von den elektromagnetischen Materialeigenschaften ab, die primär durch die Dielektrizitätskonstante ϵ_r) beschrieben werden.

Die Leitfähigkeit σ und die magnetische Permeabilitätskonstante μ_r können bei trockenem Beton vernachlässigt werden [11]. Auf ihrem Weg wird die Welle an Diskontinuitäten, d.h. Bereichen deren Dielektrizitätskonstanten ϵ_r sich nennenswert unterscheiden, gestreut, reflektiert und gebeugt.

Die Dielektrizitätskonstante ϵ_r liegt für trockenen Beton bei $\epsilon_r = 4..10$ und feuchten Beton (je nach Porengehalt) bei $\epsilon_r = 10..20$. Für Luft beträgt sie $\epsilon_r = 1$. Aus diesem Grund treten erkennbare Reflexionen insbesondere an Grenzflächen Luft/Beton (Rückwand, Fehlstelle) auf. An der Grenzfläche Beton/Metall (schlaffe Bewehrung, Hüllrohr) tritt eine Totalreflexion auf.

Bereiche mit stark unterschiedlichen Feuchtegehalten können aufgrund der unterschiedlichen Dielektrizitätskonstante und den daraus resultierenden veränderten Ausbreitungsgeschwindigkeiten lokalisiert werden.

Mit einer Empfangsantenne wird ein Teil der reflektierten Energie der eingeleiteten elektromagnetischen Welle gemessen. Die Amplituden des Signals werden als Funktion der Laufzeit t digital aufgezeichnet und auf dem Monitor dargestellt (A-Scan). Ist die Dielektrizitätszahl des unter-

suchten Baustoffs bekannt, lässt sich aus der Laufzeit des Signals die Tiefe der Reflektoren (Rückwand, Bewehrung, Grenzfläche/Fehlstelle) ermitteln.

Für einen halbseitig bewehrten Betonprobekörper (Abb. 6a) mit einer Dicke von 50 cm (Abmessungen: 200x150x50 cm³) sind Radargramme aus dem bewehrten (Abb. 6b, oben) und dem unbewehrten Bereich (Abb. 6c, oben) des Probekörpers abgebildet.

Darunter befinden sich die Rekonstruktionen mit SAFT, die mit Hilfe eines von der Universität Kassel zur Verfügung gestellten Auswerteprogramms erzeugt wurden (Abb. 6b und c, unten). In den oberen Radargrammen sind die typischen Reflexionshyperbeln des Hüllrohrs (Ø 85 mm) und der Fehlstelle zu erkennen. Mit Hilfe der SAFT-Rekonstruktion werden diese Hyperbeln auf den Scheitelpunkt reduziert. Weitere Ergebnisse sind in [12] dokumentiert.

Jedes der drei oben beschriebenen Verfahren hat im Rahmen der Verfahrensgrenzen seine Leistungsfähigkeit bei der Lösung von Prüfproblemen gezeigt. Während Radar in den oberen Bereichen eines Bauteils sehr gut Bewehrung und metallische Hüllrohre abbildet, kann das Ultraschallverfahren aus größeren Tiefen insbesondere unterhalb dichter Bewehrung Informationen über Bewehrung oder Bauteildicke liefern. Durch Radar-lokalisierte Hüllrohre können von Impact-Echo und Ultraschall-Echo auf ihren Verpresszustand untersucht werden. Während mit akustischen Verfahren im Falle stark durchfeuchteter Bauteile im Gegensatz zu Radar noch Informationen gewonnen werden können, liefert Radar noch Informationen aus tieferen Schichten, wenn mehrschichtige Bauteile durch Luftschichten, Folien oder Bitumenbahnen unterteilt sind.

Aber erst der gemeinsame Einsatz von Ultraschall-Echo, Impact-Echo und Radar verbunden mit Daten-Fusion aus den gewonnenen Ergebnissen ermöglicht eine neue Art der Aussagequalität von Ergebnissen. Da die Randbedingungen am Bauwerk hinsichtlich Durchfeuchtung, Bewehrungsgehalt und Schichtaufbau ständig variieren, ist nur durch den kombinierten Einsatz mehrerer Verfahren ein Maximum an Informationen zu erzielen.

3 Automatisierung der Messwerterfassung

Neben der Leistungsfähigkeit der Messverfahren besteht wirtschaftlich das Erfordernis, möglichst große Bauteilflächen mit geringem Aufwand an Personalkosten zu untersuchen. Die Qualität der Ergebnisse steigt mit zunehmender Dichte des Messrasters. Darüber hinaus wird eine Vereinheitlichung der Prüfungsdurchführung herbeigeführt, so dass der Einflussfaktor des Prüfers entfällt. Dies ist insbesondere im Rahmen der Validierung von besonderem Interesse, da die Einflussfaktoren auf die Ergebnisse reduziert werden. Die Automatisierung bietet den Vorteil einer guten Wiederholbarkeit von Messungen am gleichen Objekt. Messungen an verschiedenen Objekten werden unter gleichen Randbedingungen durchgeführt, was zur besseren Vergleichbarkeit von Ergebnissen beiträgt.

Der entwickelte Baustellenscanner ist eine auf Prismenschienen geführte Verstelleinrichtung mit Zahnstangenantrieb. Dieses verfahrbare modulare System ist mit einem multifunktionalen Messkopf, der an einer Brücke befestigt ist, ausgestattet. Die Brücke kann als ganzes in Schienen-

richtung verfahren werden. Der Messkopf lässt sich in x- und y-Richtung mit einer Positioniergenauigkeit von ~ 1 mm verfahren.

Die Schrittmotoren von Brücke und Messkopf werden über einen Controller angesteuert. Der erforderliche Anpressdruck des Messkopfs beim Ultraschall- und Impact-Echo-Verfahren wird durch eine pneumatische Hubeinheit erzeugt. Die aufgenommenen Daten werden zunächst auf einem PC zwischengespeichert und anschließend weiterverarbeitet.

Der Scanner kann modular in Schrittweiten von 1,20 m bzw. 2,40 m, vorgegeben durch die Länge (x-Richtung) der Schienen, auf einer ebenen Bauteilfläche angebracht werden. Die Breite (y-Richtung) der Scannfläche kann maximal 4 m betragen. Die zu untersuchende Fläche kann schräg, senkrecht oder auch über Kopf verlaufen. Derzeit wird der multifunktionale Messkopf mit den Verfahren Radar, Ultraschall-Echo und Impact-Echo betrieben, wobei beide zuletzt genannten Verfahren gleichzeitig betrieben werden können.

Erst der Einsatz koppelmittelfrei arbeitender breitbandiger Punktkontaktköpfe im Bereich von 100 kHz [13] machte eine praxistaugliche automatisierte Ultraschall-Echo-Messung möglich. Das verwendete Ultraschall-Messgerät erzeugt Transversalwellen und besteht aus je zwölf Sendern und Empfängern. Die erforderliche Anpresskraft von rd. 120 N wird durch die pneumatische Hubeinheit erzeugt.

Die Hubeinheit sorgt auch bei der Impact-Echo-Messung für den erforderlichen Anpressdruck des Sensors. Der Abstand zwischen dem Anregungspunkt und dem Sensor ist fest und beträgt 4 cm, was gegenüber einer Messung von Hand eine Vereinheitlichung dieses sonst variierenden Abstands bedeutet. Auch die Stärke des Impacts ist bei allen Messungen einheitlich und somit vom Prüfer unabhängig.

Die Radarantenne wird im Gegensatz zu den akustischen Verfahren in einem konstanten Abstand, d.h. berührungslos, über die Bauteiloberfläche bewegt. Dabei ist bei den unvermeidbaren Unebenheiten der Bauteiloberfläche zu beachten, dass eine Vergrößerung des Antennenabstands zur Bauteiloberfläche mit einer scheinbaren Verschiebung der Signale in größere Tiefen einhergeht. Dieser Effekt wird bei der Datenverarbeitung berücksichtigt.

Die mögliche Geschwindigkeit der Bewegung der Radarantenne ergibt sich aus der Geschwindigkeit, mit der die Daten erfasst und digitalisiert werden. Bei einer Wiederholungsfrequenz der Impulse von 100 kHz beträgt bei 1.000 Samples pro aufgezeichnetem Signal die Messdauer für einen A-Scan 10 Millisekunden. Werden als Raster der A-Scans Werte zwischen 1 cm und 10 cm gewählt, so sind Messgeschwindigkeiten der Radarantenne von 1,0 m/s bis 10 m/s möglich.

Bei den akustischen Verfahren hingegen sind die Zeit zum Positionieren des Messkopfs und die gewählte Anzahl der Wiederholungsmessungen für die erreichbare Messgeschwindigkeit maßgebend. Beim Impact-Echo ergibt sich die längste Messdauer von mehreren Sekunden, da für jede der drei Wiederholungsmessungen ein neuer Schlag des Impactors ausgeführt wird. Bei dem verwendeten Ultraschall-Gerät hingegen können Wiederholungsmessungen je Messpunkt in einer Frequenz von 10 Hz durchgeführt

werden. Zur Zeitersparnis wurde der Messkopf des Baustellenscanners so konstruiert, dass eine parallele Durchführung von Ultraschall- und Impact-Echo-Messungen möglich ist.

4 Ausblick

Der Baustellenscanner wird künftig neben Bauwerksuntersuchungen für Validierungsuntersuchungen am großen Betonprobekörper der BAM [14] eingesetzt. Diese 40 m² Stahlbetonplatte weist Hüllrohre mit Verpressfehlern und Bereiche mit variierender Dicke auf. Für die automatisierte Ortung von Verpressfehlern in Hüllrohren sind umfangreiche Forschungsaktivitäten im Rahmen von EU-Projekten und der DFG-Forschungsgruppe FOR 384 im Gange. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden mit Durchstrahlungsprüfungen verifiziert.

Baupraktisch wurde der Baustellenscanner erstmals im August 2003 an einer abzureißenden Spannbetonbrücke in der Nähe von Fulda eingesetzt. Dabei wurden die Fahrbahnplatte von der Ober- und Unterseite und die Seitenwand des Hohlkastens untersucht. Der Abbruch des Bauwerks zur Verifizierung der Ergebnisse steht noch aus. Weitere baupraktische Einsätze im Rahmen der objektbezogenen Schadensanalyse sind vorgesehen.

Danksagung

Der Dank gilt allen in der Fachgruppe IV.4 Beteiligten bei der Realisierung des Baustellenscanners, insbesondere Herrn Schaurich und Herrn Behrens für die Konstruktion. Herrn Dr. Krause, Herrn Kohl und Frau Dr. Maierhofer danke ich für die Bereitstellung aktueller Messergebnisse.

5 Literatur

- [1] Schickert, G., Krause, M., Wiggenhauser, H.: ZfP-Bau-Kompodium; www.bam.de/service/publikationen/zfp_kompodium/welcome.html
- [2] DIN 1076 – Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen; Überwachung und Prüfung. Ausgabe 1999
- [3] Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 (RI-EBW-PRÜF), Ausgabe 1998. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Straßenbau, Verkehrsblatt-Verlag, 1998.
- [4] Krieger, J., Kaschner, R., Haardt, P.; Die objektbezogene Untersuchung und Bewertung von Brücken im Rahmen des Bauwerks-Management-Systems; in Bautechnik 77 (2000), Heft 7 S. 453 – 463.
- [5] Krieger, J., Krause, M., Wiggenhauser, H.: Materialtechnisch Untersuchung beim Abbruch der Talbrücke Haiger, Durchführung von Ultraschall- und Impact-Echo-Messungen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 38, Verlag für neue Wissenschaft, Bremerhaven, 2002.
- [6] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen: Leitfaden Nachhaltiges Bauen, Januar 2001, www.bmvbw.de/Anlage8183/Leitfaden-Nachhaltiges-Bauen.pdf
- [7] Gehlen, C.: Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. Heft 510 der Schriftenreihe des DAfStb, Beuth-Verlag, 2000.
- [8] Schickert, M., Krause, M., Müller, W.: Ultrasonic Imaging of Concrete Elements Using Reconstruction by Synthetic Aperture Focusing Technique; Journal of Materials in Civil Engineering, May/June 2003 S. 235-246.
- [9] Krause M., Mielentz F., Milmann B., Streicher D., Müller W.: Ultrasonic imaging of concrete elements; State of the art using 2D synthetic aperture. Tagungsband: International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) 16.-19.09.2003, Berlin
- [10] Sansalone, M. J.; Streett, W. B.; Impact-Echo, Non-destructive Evaluation of Concrete and Masonry. Bullbrier Press. Ithaka. N.Y. 1997.
- [11] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, DGZfP-Fachausschuss für Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen (AB) Unterausschuss Radar, Merkblatt B 10
- [12] Kohl C., Krause M., Maierhofer C., Mayer K., Wöstmann J., Wiggenhauser H.: 3D-Visualisation of NDT-Data using Data Fusion Technique; Tagungsband: International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) 16.-19.09.2003, Berlin
- [13] Kozlov, V., Samokrutov, V., Shevaldykin, V.: Ultrasonic Defectoscopy of concrete by means of Pulse-Echo Technique. Proceedings of the 8th ECNDT, Barcelona, CD-ROM (2002)
- [14] Taffe A., Borchardt K., Wiggenhauser H.: Specimen for the improvement of NDT-methods – Design and construction of a large concrete slab for NDT at BAM; Poster P 11, International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) 16.-19.09.2003, Berlin

Der Autor:

Dipl.-Ing. Alexander Taffe, geboren 1969, studierte Bauingenieurwesen an der RWTH in Aachen.



Nach Tätigkeit als Leiter des Berliner Büros der BauingenieurSozietät Aachen (Sasse-Schießl-Fiebrich-Raupach) im Bereich Schadensdiagnose von Bauwerken und Instandsetzung ist er derzeit wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Fachgruppe Zerstörungsfreie Schadensdiagnose und Umweltmessverfahren an der BAM.