

# Ultraschall-Abbildungsverfahren – Neue Entwicklungen beschleunigen den Einsatz

Martin SCHICKERT, Materialforschungs- und -prüfanstalt (MFPA) Weimar

**Kurzfassung.** Die Ultraschallprüfung von Beton ermöglicht die Abbildung des Inneren Aufbaus von Betonbauteilen bei einseitigem Zugang. Vor allem die SAFT-Rekonstruktion (*Synthetic Aperture Focusing Technique*) eignet sich zur dreidimensionalen, detaillierten Darstellung des Betonvolumens, wodurch sich innere Objekte wie Konstruktionselemente, Einbauteile und Fehlstellen nachweisen und in ihrer Position bestimmen lassen.

Um Betonbauteile flächendeckend zu untersuchen, sind automatisierte Mess- und Abbildungssysteme unerlässlich. Neue Entwicklungen beschleunigen den Einsatz, indem das zeitraubende mechanische Scannen der Oberfläche teilweise durch elektronisches Scannen ersetzt wird. Im Beitrag wird ein integriertes, automatisiertes Mess- und Abbildungssystem vorgestellt. Die Messung läuft mit Hilfe eines Scanners mit 0,8 m x 1 m Messfläche automatisch ab; mehrere Messbereiche lassen sich koppeln. Ein einkanaliger Prüfkopf liefert gute Auflösung und Reichweite; die Messung benötigt aber bis zu mehrere Stunden je Quadratmeter. Bei Einsatz eines Prüfkopfarrays verkürzt sich die Messzeit etwa um den Faktor 10, und direkt nach Abschluss der Messungen steht ein dreidimensionales Bild des untersuchten Betonvolumens bereit, das sich räumlich betrachten und drehen lässt. Zwei Messbeispiele zeigen die Anwendungsmöglichkeiten.

Durch automatisierte Messungen werden Bauuntersuchungen in den Bereichen Qualitätssicherung und Schadensanalyse wirtschaftlich. Kritische Bereiche können sowohl nach der Bauausführung als auch bei der wiederkehrenden Prüfung zum Beispiel von Brücken flächig untersucht werden. Dadurch kann die Qualität der Bauwerke bei der Bauausführung überprüft und in der Nutzung gesichert werden. Dem Bauwesen eröffnen sich dadurch neue Möglichkeiten.

## 1 Einführung

Zur Qualitätssicherung oder Schadensanalyse beim Bau, nach Fertigstellung oder während des Betriebes von Betonbauwerken ist häufig eine eingehende Untersuchung einzelner Bauteilbereiche wünschenswert. Sofern diese überhaupt durchgeführt wird, erfolgt sie in der Regel visuell oder durch Entnahme von Bohrkernen.

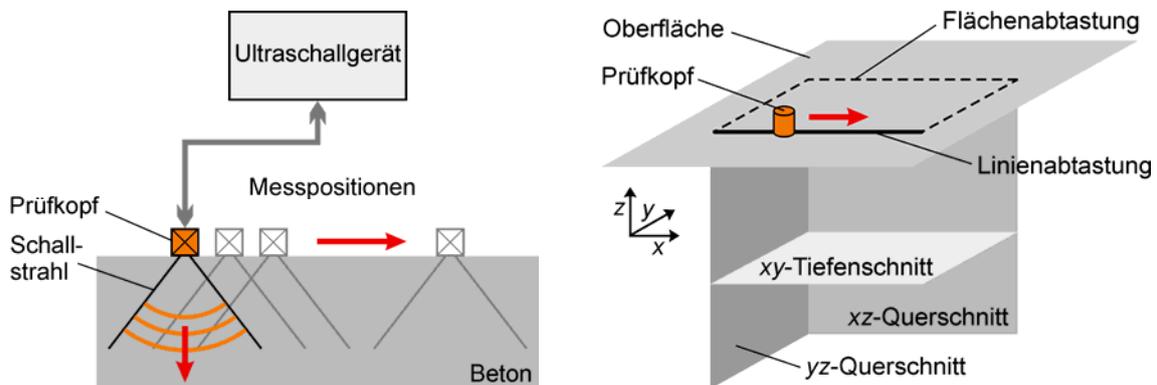
Eine zerstörungsfreie Alternative oder auch Ergänzung bieten Echo-Verfahren zur Abbildung des inneren Aufbaus von Betonbauteilen [1]. Insbesondere Ultraschall-Abbildungsverfahren eignen sich dafür, Einbauteile, Konstruktionselemente und Fehlstellen detailliert abzubilden und in ihrer Lage zu bestimmen. In den Ultraschallbildern werden Rückwände, Hüllrohre, Hohlräume, oberflächenparallele Risse, große Bewehrungseisen und Ablösungen sichtbar und können vermessen werden. Unter günstigen Bedingungen sind in Hüllrohren auch unverpreßte sowie durch Korrosion zerstörte Bereiche detektierbar [2]. Für die Prüfung ist nur ein einseitiger Zugang zum Bauteil erforderlich.

Neue Entwicklungen haben automatisierte Messsysteme zum Ziel, die dreidimensionale Bilder von Betonbereichen direkt nach der Messung generieren können. Im Beitrag wird ein derartiges Messsystem vorgestellt, das zur Messung einen automatisierten Scanner und als Abbildungsverfahren die SAFT-Rekonstruktion (*Synthetic Aperture Focusing Technique*) einsetzt. Je nach Einsatzgebiet werden Einzelmessungen an 2500 bis 10.000 Abtastpunkten je Quadratmeter aufgenommen und zu einem Bild verrechnet, das anschließend als dreidimensionales Übersichtsbild oder in Schnittbildern ausgewertet werden kann. Der Einsatz eines Ultraschall-Prüfkopfarrays mit 48 Einzelwandlern in 16 Gruppen verringert die Messzeit entscheidend und trägt so zu wirtschaftlichen Untersuchungen bei, die dem Bauwesen neue Bereiche der Qualitätssicherung und Fehlerdiagnose erschließen können. Das Messsystem kann vor Ort, im Labor und in der Produktion eingesetzt werden und lässt sich an spezielle Aufgaben anpassen. Zwei Messbeispiele an einem Testfeld im Hallenboden der MFPA-Experimentierhalle und an einem Testkörper illustrieren das Anwendungspotenzial des Verfahrens.

## 2 Ultraschall-Abbildungsverfahren

Ultraschallwellen, die von einem Ultraschall-Prüfkopf in ein Betonbauteil ausgesandt werden, breiten sich im Beton aus, bis sie von einem inneren Objekt wie z. B. einem Hüllrohr reflektiert werden oder durch Amplitudenverlust ausklingen. Ultraschall-Echomessungen beruhen auf dem Empfang der reflektierten Signale, aus denen auf das Vorhandensein und den Ort des Objektes geschlossen werden kann.

Den grundlegenden Messaufbau zeigt Bild 1, links. Ein Ultraschallgerät erzeugt die elektrischen Sendepulse und verstärkt und digitalisiert die empfangenen Signale nach ihrer Reflexion im Beton. Um auf die Tiefe eines Objektes zu schließen, werden die Messungen als Zeitverläufe dargestellt und auf die Schallgeschwindigkeit des Betonbauteils kalibriert.



**Bild 1.** Prinzipieller Messaufbau für Ultraschall-Abbildungsverfahren (links); Koordinatensystem und Lage der Bildschnitte (rechts)

Allerdings wird der Ultraschallpuls im Beton nicht nur von den gesuchten Objekten, sondern auch am Zuschlag, an den Poren und an der Bewehrung reflektiert. Dies führt zu einer Überlagerung der Signale mit einem Bildrauschen, das die Aussagekraft der Messungen einschränken kann. Das Bildrauschen kann durch die Wahl niedrigerer Prüffrequenzen verringert werden, was aber auf Kosten des Auflösungsvermögens geht. Eine starke Streuung des Ultraschallsignals führt außerdem zu einer geringen Eindringtiefe der Ultraschallwellen. Weiterhin kann Ultraschall auch dünne Luftschichten nicht überwinden, wie sie z. B. zwischen Beton und einer Kunststoffbahn auftreten. Für die Übertragung der Ultraschall-

wellen vom Prüfkopf in den Beton und zurück ist deshalb ein direkter Kontakt oder eine Ankopplung durch ein Koppelmedium wie Wasser notwendig.

### *2.1 Einzelmessungen und manuelle Schnittbilder*

Für einfache Messaufgaben wie eine Dickenbestimmung reicht es oft aus, die Zeitverläufe einzelner Messungen auszuwerten. Zur Aufzeichnung von Dickenverläufen, zur Lokalisierung größerer Objekte und bei ungünstigen Messbedingungen durch störende Reflexionen oder Rauschen ist die Aufnahme von Querschnitten durch das Bauteil notwendig. Dazu werden mehrere Einzelmessungen entlang einer Linie aufgenommen ( $x$ -Richtung in Bild 1). Dies kann manuell geschehen. Zur Darstellung werden die Amplituden der Empfangssignale mit einer Farbtabelle kodiert und nebeneinander als B-Bild aufgetragen, was ein Bild ähnlich einem Querschnitt ergibt. Innere Objekte werden von Messungen an mehreren Abtastpunkten erfasst, wodurch kleine Objekte im B-Bild als charakteristische Hyperbeln dargestellt werden.

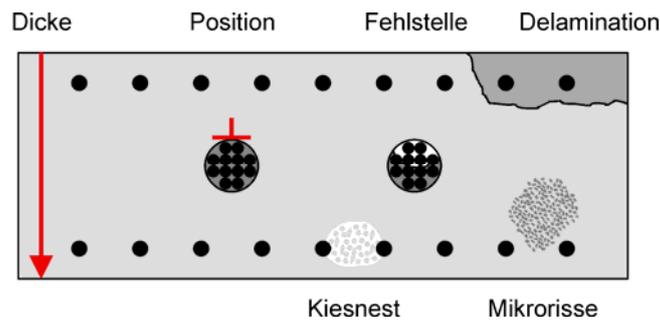
### *2.2 Zwei- und dreidimensionale SAFT-Bilder*

Eine detaillierte, ortsrichtige Abbildung des inneren Aufbaus von Betonbauteilen erreicht man durch Linien- oder Flächenabtastung mit einer großen Anzahl von Messpunkten und eine nachfolgende Abbildung durch SAFT-Rekonstruktion (*Synthetic Aperture Focusing Technique*) [3, 4]. Derartige Messungen sind nur mit automatisierten Messsystemen wirtschaftlich durchzuführen.

Die Ultraschall-SAFT-Rekonstruktion nutzt den Informationsinhalt mehrerer Echomesungen an unterschiedlichen Messpositionen, um daraus ein Bild des untersuchten Betonbereichs darzustellen. Die Messungen werden einseitig auf der Betonoberfläche auf einem linien- oder flächenförmigen Raster aufgenommen (Bild 1, rechts). Die Rekonstruktionsrechnung fokussiert alle Messsignale auf jeden Punkt des Rekonstruktionsbereichs. Objektgrenzen werden dadurch auf ihren tatsächlichen Ort abgebildet. Das Resultat sind einfacher auszuwertende Bilder, in denen innere Objekte ortsrichtig dargestellt werden. Linienmessungen werden zu zweidimensionalen Bildern, Flächenmessungen zu dreidimensionalen Bildern rekonstruiert. Letztere können als Quer-, Längs- oder Tiefenschnitte dargestellt werden (Bild 1, rechts). Einen Überblick über das gesamte rekonstruierte Volumen erhält man durch die dreidimensionale Iso-Oberflächen-Darstellung (Bilder 8 und 9).

## **3 Messmöglichkeiten**

Zerstörungsfreie Ultraschall-Abbildungsverfahren können eingesetzt werden, um eine Reihe von Aufgaben beim Bau, nach Fertigstellung oder während des Betriebes von Betonbauwerken zu lösen. Die Hauptanwendungsgebiete sind Qualitätskontrolle, Zustandsanalyse und Fehlerdetektion. Anhand eines vorgespannten Betonbauteils mit oberer und unterer Bewehrungslage werden in Bild 2 typische Messmöglichkeiten der automatisierten Ultraschallabbildung dargestellt.



**Bild 2.** Messaufgaben für die automatisierte Ultraschallabbildung von vorgespannten Betonbauteilen

Typische Messaufgaben für die automatisierte Ultraschallabbildung sind:

Dicke:	Einzelne Dicken und Dickenverlauf der Rückwand
Position:	Querposition und Tiefenlage von inneren Objekten wie Hüllrohren, größeren Bewehrungsseisen und anderen Einbauteilen
Fehlstellen:	Detektion und Lokalisierung von Fehlstellen in und an Hüllrohren sowie im Beton
Delamination:	Position, Ausdehnung und Dicke von Delaminationen; Position und Ausdehnung von oberflächenparallelen Rissen
Mikrorisse:	Indirekte Detektion und Flächenbestimmung von durch Mikrorisse geschädigten Bereichen
Kiesnest:	Position and Ausdehnung von Verdichtungsfehlern

Die erreichbare Aussagesicherheit hängt von den Messbedingungen ab, vor allem von Betonrezeptur, Betondicke, Bewehrungsgrad und Oberflächenqualität.

#### 4 Automatisiertes Ultraschall-Abbildungssystem

In den letzten Jahren wurde an der MFPA Weimar ein integriertes, automatisiertes Ultraschall-Mess- und Abbildungssystem zur Untersuchung von Betonbauteilen aufgebaut. Das System besteht aus einem kommerziellen Niederfrequenz-Ultraschallgerät, einem mechanischen Scanner mit Bediensoftware und einer integrierten Programmumgebung zur Bildberechnung und -darstellung (Bild 3). Bei einseitigem Zugang können zwei- und dreidimensionale Bilder von Betonbereichen weitgehend automatisch generiert werden. Je nach Anwendung werden einkanalige Prüfköpfe oder mehrkanalige Prüfkopfarrays eingesetzt. Das Messsystem ist sowohl als präzises Forschungssystem als auch für den Einsatz vor Ort konstruiert. Es lässt sich durch zwei Personen transportieren und innerhalb von 30 Minuten betriebsbereit machen.



**Bild 3.** Aufbau des automatisierten Abbildungssystems

#### 4.1 Einkanaliges Messsystem

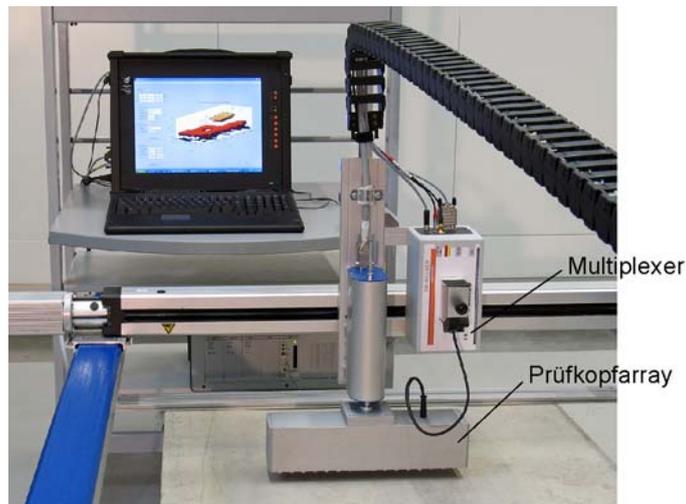
Das Ultraschallgerät wurde vom Ing.-Büro Dr. Hillger, Braunschweig, hergestellt. Es beinhaltet zwei Kanäle für Messungen mit konventionellen und mit luftgekoppelten Ultraschallwandlern in einem Frequenzbereich von 20 kHz bis 10 MHz. Die Signale werden mit 12 Bit bei 50 Ms/s abgetastet. Zur Verwendung mit dem Gerät steht eine breite Palette von Prüfköpfen für Longitudinal-, Transversal- und Rayleigh-Wellen zur Verfügung. Die Ankopplung erfolgt mit viskosen oder flüssigen Koppelmitteln, mit Trocken- oder mit Luftan- kopplung.

Der mechanische Scanner für Linien- und Flächenabtastung ist eine Eigenentwicklung der MFPA Weimar. Wasser- und luftgekoppelte Prüfköpfe werden entlang der  $x$ - und  $y$ - Richtung bewegt, während Prüfköpfe mit Trockenankopplung zusätzlich in der  $z$ -Richtung von der Betonoberfläche abgehoben werden. Der Abtastbereich beträgt 1,00 m x 0,80 m; für größere Messbereiche wird der Scanner verschoben. Der Scanner kann liegend, stehend oder hängend betrieben werden. Die Flächenabtastung erfolgt je nach Schrittweite mit 2.500 bis 10.000 Einzelmessungen pro Quadratmeter. Die Messzeiten dafür liegen zwischen 1,5 und 6 Stunden pro Quadratmeter.

Das Messsystem wird über Kontrollprogramme für Ultraschallgerät und Scanner bedient. Die Messsignale werden in einer integrierten Programmumgebung mit grafischer Benutzeroberfläche verarbeitet, die an der MFPA Weimar entwickelt wurde. Je nach Aufgabenstellung werden dort verschiedene Signalverarbeitungsschritte durchgeführt und Schnittbilder (B-Bilder, C-Bilder) und zwei- oder dreidimensionale SAFT-Rekonstruktionen berechnet und dargestellt. Dreidimensionale Iso-Oberflächen-Darstellungen können generiert und in Echtzeit gedreht werden.

#### 4.2 Mehrkanal-FLEXUS-Scanner

Zur Beschleunigung von Datenaufnahme und Bildberechnung wurde der elektronische FLEXUS-Scanner entwickelt. Der Scanner besteht aus einem Prüfkopfarray und einem elektronischen Multiplexer, die zusammen dem vorhandenen Messsystem vorgeschaltet werden (Bild 4). Der Scanner ersetzt die mechanische Abtastung in einer Koordinatenrichtung ( $x$ -Richtung in Bild 1) weitgehend durch eine elektronische Umschaltung von Prüfkopfgruppen. Je Messschritt wird ein  $xz$ -SAFT-Schnittbild in Richtung der Array-Ausdehnung berechnet. Der mechanische Versatz beschränkt sich auf Bahnen in  $y$ -Richtung senkrecht zur Array-Ausdehnung; für größere Flächen werden mehrere Abtastbahnen kombiniert. Der FLEXUS-Scanner ist in einem Kooperationsprojekt mit dem Ing.-Büro Dr. Hillger, Braunschweig, entstanden.



**Bild 4.** Ausschnitt des automatisierten Abbildungssystems mit Ultraschall-Prüfkopfarray mit 48 Prüfköpfen und elektronischem Multiplexer

Das Prüfkopfarray besitzt 48 Einzelwandler, die intern in 16 Gruppen zu je 3 Prüfköpfen angeordnet sind (Bild 5, links). Während der Messung für ein Schnittbild wird jede Prüfkopfgruppe dynamisch als Sender oder Empfänger umgeschaltet.

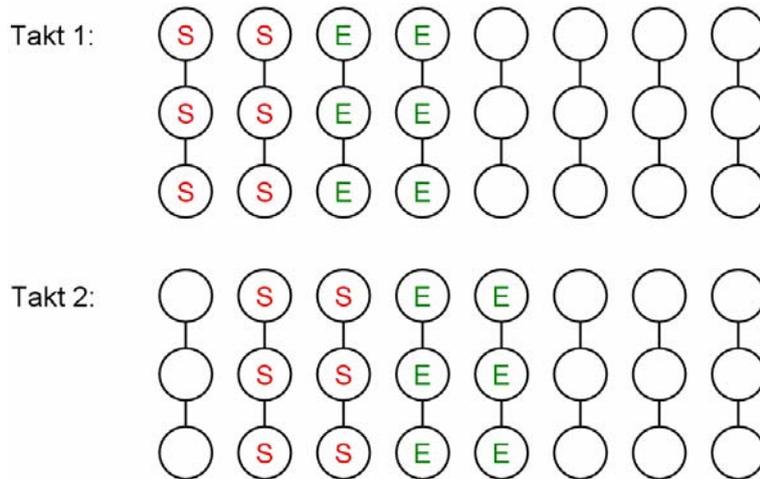


**Bild 5.** Ultraschall-Prüfkopfarray mit 48 Prüfköpfen in 16 Gruppen (links) und einkanaliger Prüfkopf mit je 12 Sende- und Empfangswandlern (rechts)

Demgegenüber sind beim einkanaligen Prüfkopf je 12 Prüfköpfe als Sendewandler und 12 Prüfköpfe als Empfangswandler fest verdrahtet (Bild 5, rechts). In beiden Prüfköpfen werden die gleichen 55 kHz-Einzelwandler für Transversalwellen verwendet. Durch ihre

Keramikspitzen wird eine direkte (trockene) Ankopplung und damit ein einfacher Einsatz mit automatisierten Scannern ermöglicht.

Jede Gruppe des Prüfkopffarrays mit 3 Prüfköpfen ist dynamisch als Sender, als Empfänger oder funktionslos schaltbar. Bild 6 zeigt ein Beispiel für die Ansteuerermöglichkeit des Prüfkopffarrays durch den Multiplexer, in dem jeweils sechs Prüfköpfe als Sender und sechs Prüfköpfe als Empfänger in einer Sende-Empfangs-Anordnung angesteuert werden. In jedem Steuertakt wandert die Gruppe der aktiven Prüfköpfe um einen Scan-Schritt weiter, so dass eine lineare elektronische Abtastung der Oberfläche des Betonbauteils realisiert wird. Durch Veränderung der Programmierung in einer Textdatei sind beliebige Ansteuermöglichkeiten konfigurierbar.



**Bild 6.** Beispiel für zwei Takte einer Ansteuerung des Prüfkopffarrays als Sender (S) und Empfänger (E) (dargestellt sind 8 der 16 Kanäle)

Nach jedem elektronischen Scan mit dem Prüfkopffarray wird aus den Messdaten ein zweidimensionales SAFT-Schnittbild berechnet und auf einem zweiten Rechner dargestellt. Die komplette Zykluszeit für elektronischen Scan, mechanischen Versatz und Bildberechnung beträgt minimal 3 s. Nach Abschluss der Messungen steht sofort eine dreidimensionale Volumendarstellung zur Verfügung, die sich aus den zweidimensionalen Schnittbildern zusammensetzt. Bei Bedarf kann anschließend eine vollständig fokussierte dreidimensionale SAFT-Rekonstruktion berechnet werden.

Durch die minimierte Prüfkopfbewegung wird gegenüber einer einkanaligen Messung eine Beschleunigung um den Faktor 10 bis herab zu 12 min/m<sup>2</sup> erreicht. Damit wird die Aufnahme und Berechnung dreidimensionaler, hoch auflösender Bilder direkt auf der Baustelle möglich.

## 5 Messbeispiele

### 5.1 Testfeld MFPA-Hallenboden

Für die Messungen wurden Testziele verwendet, die im Hallenboden der neuen MFPA-Experimentierhalle eingebaut wurden. Der Boden mit 37 cm Dicke besteht aus Stahlbeton mit einer Druckfestigkeit von C30/37 und einem Größtkorn von 16 mm. An Ober- und Unterseite liegt je eine Lage gekreuzter Bewehrungsstäbe mit 12 mm Durchmesser und einer Maschenweite von 11 cm.

Der Zweck des Testgebietes liegt in der Bereitstellung von Testzielen einfacher Geometrie, um Messmethoden und Abbildungsverfahren in einer bekannten, aber realen Umgebung vergleichen zu können. Das Testfeld mit einer Ausdehnung von 11,7 m x 0,9 m ist in sechs Teilfelder eingeteilt, die jeweils drei langgestreckte bzw. sechs runde Ziele in drei verschiedenen Tiefen und mit unterschiedlichen Durchmessern enthalten (Bild 7, links). Die Testziele bestehen aus leeren oder zur Hälfte mit Mörtel gefüllten Rohren, aus Scheiben aus Hartschaum bzw. aus Bewehrungseisen.

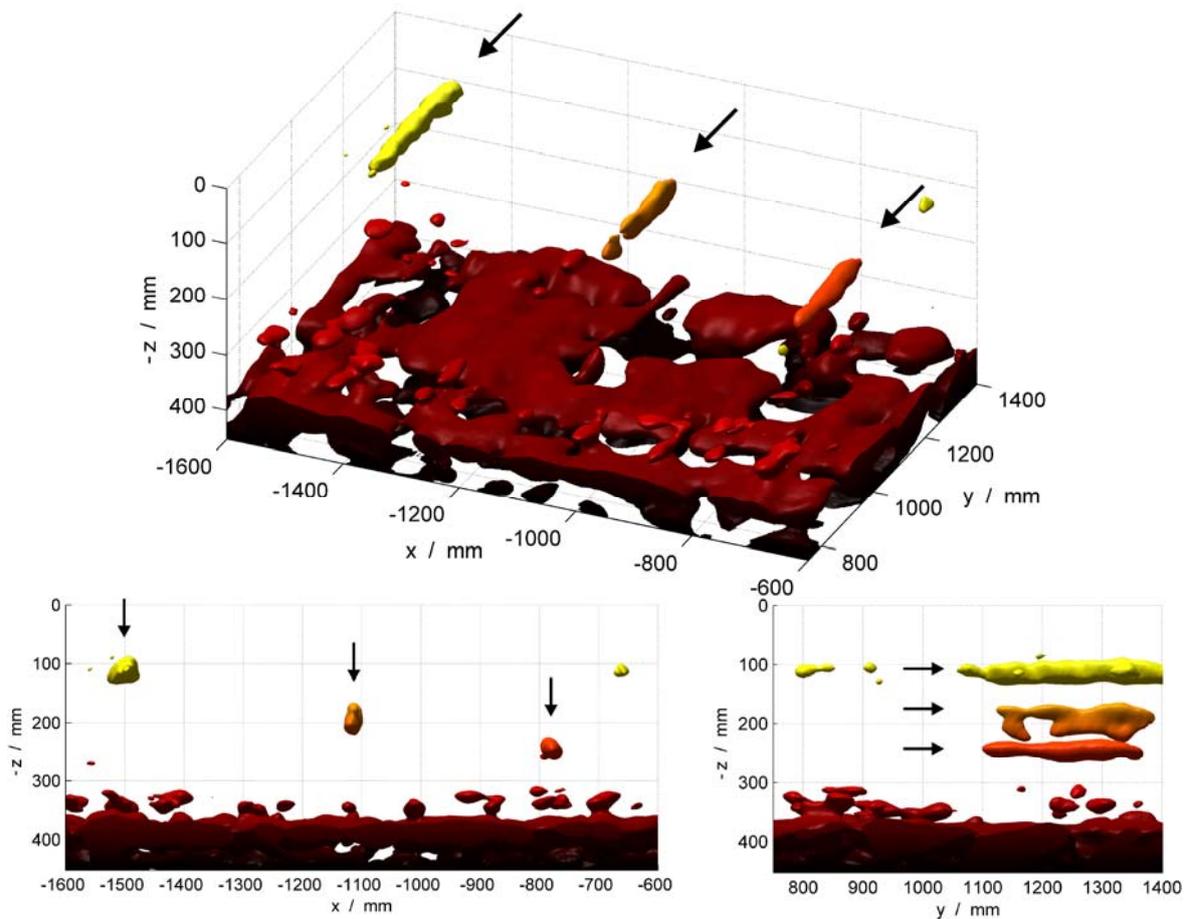


**Bild 7.** Übersicht über das Testgebiet in der Bauphase (links); Testfeld R1 mit 3 Rohren  $\varnothing$  87 mm, die in einen leeren und einen mit Mörtel gefüllten Abschnitt geteilt sind

Das folgende Messergebnis wurde mit dem einkanaligen Aufbau am Testfeld R1 aufgenommen. Dieses Testfeld enthält drei Rohre mit 87 mm Durchmesser, die längs in einen leeren und einen mit Mörtel gefüllten Teil aufgeteilt sind (Bild 7, rechts). Die Messung mit der Flächenabtastung von 1,0 m x 0,8 m in einem Raster von 10 mm x 10 mm benötigte vier Stunden, die SAFT-Rekonstruktion 77 Minuten und die Darstellung 2 Minuten.

Die Messdaten wurden dreidimensional SAFT-rekonstruiert. Bild 8 zeigt das Messergebnis räumlich in drei Iso-Oberflächen-Ansichten. Die Farbtabelle ändert sich mit der Tiefe, um die Lage der Objekte leichter erkennen zu können. Diese Iso-Oberflächen-Darstellung gibt einen guten Überblick über den gesamten Bereich, eignet sich aber wegen der fehlenden Amplitudenverläufe weniger gut für die Detailauswertung. Wie bei jeder SAFT-Rekonstruktion zeigen die Bilder nicht direkt ein Abbild des inneren Aufbaus des Betonbereichs, sondern müssen interpretiert werden.

Die Darstellungen stammen ohne Nachbearbeitung direkt aus dem Auswerteprogramm. In den Bildern sind die leeren Teilbereiche der Rohre gut abgebildet. Ungleichmäßige Anzeigen sind auf Abschattungen durch Bewehrung und Inhomogenitäten des Betons zurückzuführen. Die gefüllten Teilbereiche werden mit geringem Kontrast rekonstruiert und sind hier nicht zu erkennen. Die Rückwand zeigt sich bedingt durch Abschattungen und Amplitudenschwankungen nicht als ebene Fläche, sondern zerklüftet. Vor der Rückwand sind teilweise Anzeigen der rückseitigen Bewehrung und von Abstandhaltern zu erkennen; das Bewehrungsraster von 11 cm lässt sich daraus rekonstruieren. Die frontseitige Bewehrung wird wegen der schlechten Nahauflösung bei diesem Ultraschallprüfkopf nicht abgebildet. Weitere lokale Reflexionen sowie Rauschen machen sich in dieser Art der Darstellung als „Klumpchen“ bemerkbar, sind hier wegen des guten Signal-Rausch-Verhältnisses aber kaum vorhanden.



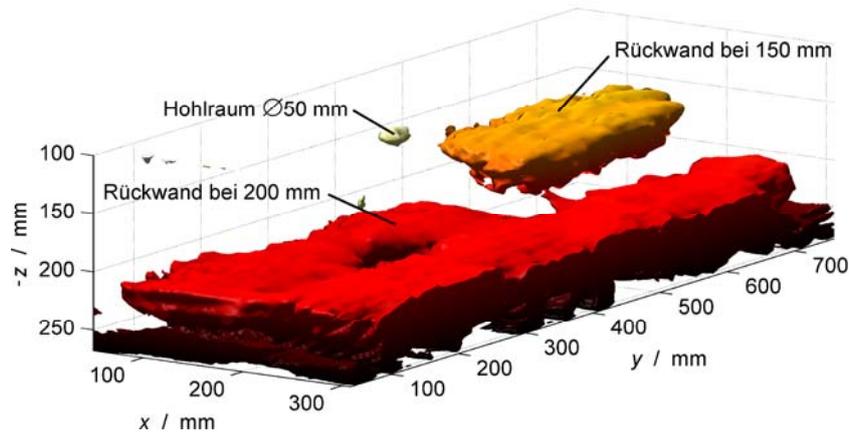
**Bild 8.** Ergebnis der dreidimensionalen SAFT-Rekonstruktion des Testfeldes R1 aus Bild 7, rechts, in drei verschiedenen Ansichten. Die drei Rohre sind mit Pfeilen markiert.

## 5.2 Testkörper mit Hohlraum und Rückwandversatz

Eine weitere Messung wurde an dem Testkörper in Bild 3 aufgenommen. Dieser Testkörper ist 1,2 m x 0,8 m x 0,2 m groß und enthält einen Hohlraum (Styrodurkugel) von 50 mm Durchmesser mit 100 mm Überdeckung sowie in einer Ecke einen Rückwandversatz von 200 mm auf 150 mm.

Die Messung wurde mit dem elektronischen FLEXUS-Scanner durchgeführt. Das Prüfkopfarray war in  $x$ -Richtung ausgerichtet, hatte eine Abtastbreite von 240 mm und wurde in einer Bahn in  $y$ -Richtung über die Oberfläche geführt. Die Messung mit der Flächenabtastung von 240 mm x 700 mm in einem Raster von 20 mm x 10 mm und die SAFT-Rekonstruktion benötigten 16 Minuten, die Darstellung 1 Minute. Eine schnellere Messung mit einer Messzeit von 2 Minuten lieferte eine etwas geringere Abbildungsqualität.

Die SAFT-Schnittbilder jedes elektronischen Scans wurden während der Messung zu einem dreidimensionalen Datensatz zusammengesetzt. Das Messergebnis stand nach der Messung als räumliche Iso-Oberflächen-Darstellung in Bild 9 zur Verfügung. Der Hohlraum ist direkt und indirekt durch seine Rückwandabschattung zu erkennen; auch der Rückwandversatz zeigt sich eindeutig.



**Bild 9.** Messergebnis mit elektronischem Array an einem Testkörper mit Hohlraum mit 50 mm Durchmesser und Rückwandversatz

## 6 Ausblick

Automatisierte Ultraschall-Abbildungsverfahren bieten die Möglichkeit, das Volumen von Betonbauteilen vollständig darzustellen. Je nach Randbedingungen der Messung sind hochauflösende Bilder möglich, die auch kleine Einbauteile und Fehlstellen zeigen. Mit dem einkanaligen Prüfkopf und dem mehrkanaligen FLEXUS-Scanner stehen Optimierungen für Durchdringungsfähigkeit bzw. Abtastgeschwindigkeit bereit. Es sind bereits Arbeiten im Gange, um die Vorteile beider Messköpfe in einem Gerät zu vereinen.

Durch die automatisierten Messmöglichkeiten eröffnen sich neue Möglichkeiten für das Bauwesen, indem Untersuchungen in den Bereichen Qualitätssicherung und Schadensanalyse wirtschaftlich werden. Kritische Bereiche können sowohl nach der Bauausführung als auch bei der wiederkehrenden Prüfung zum Beispiel von Brücken flächig zerstörungsfrei untersucht werden [5]. Derartige Untersuchungen können perspektivisch zum Standardrepertoire gehören und helfen, die Qualität der Bauwerke bei der Bauausführung zu überprüfen und in der Nutzung zu sichern.

Weitere Anwendungen automatisierter Messungen sind in der Entwicklung. So ist die Machbarkeit der tomographischen Abbildung von Betonstützen mit dem Ziel der Erkennung von Hohlstellen bereits gezeigt worden [6]. Die Verwendung von luftgekoppeltem Ultraschall verspricht noch kürzere Messzeiten [7, 8].

## Danksagung

Das automatisierte Abbildungssystem wurde im Rahmen der durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projekte FOR384 und USSTAT sowie dem PRO INNO II-Verbundprojekt FLEXUS entwickelt. Der Autor dankt ferner den Herren U. Tümmeler (MFGA Weimar), Dr. W. Hillger, D. Ilse und Dr. L. Bühling (Ing.-Büro Dr. Hillger) für Ihre Mitarbeit am Aufbau des Messsystems. Herr U. Tümmeler hat außerdem bei den gezeigten Messungen mitgewirkt.

## Referenzen

- [1] H.-W. Reinhardt *et al.*: Echo-Verfahren in der zerstörungsfreien Zustandsuntersuchung von Betonbauteilen; in: K. Bergmeister, J.-D. Wörner (Hrsg.): *Betonkalender 2007*. Berlin: Ernst & Sohn, 2007, Bd. 1, 479–595.
- [2] M. Krause, B. Milmann, F. Mielentz, D. Streicher, B. Redmer, K. Mayer, K.-J. Langenberg, M. Schickert: Ultrasonic Imaging Methods for Investigation of Post-tensioned Concrete Structures: A Study of Interfaces at Artificial Grouting Faults and Its Verification. *Journal of Nondestructive Evaluation*, Special Issue on Acoustic and Electromag. Nondestr. Eval. of Concrete Structures 27 (2008) pp. 67–82.
- [3] M. Schickert: Grundlagen der Ultraschall-SAFT-Rekonstruktion. In: H.-W. Reinhardt *et al.*: Echo-Verfahren in der zerstörungsfreien Zustandsuntersuchung von Betonbauteilen; in: K. Bergmeister, J.-D. Wörner (Hrsg.): *Betonkalender 2007*. Berlin: Ernst & Sohn, 2007, Bd. 1, 536–543.
- [4] M. Schickert, M. Krause, W. Müller: Ultrasonic Imaging of Concrete Elements Using Reconstruction by Synthetic Aperture Focusing Technique. *Journal of Materials in Civil Engineering* 15 (2003) 235–246.
- [5] J. Krieger, M. Krause, H. Wiggenhauser (Hrsg.): *Erprobung und Bewertung zerstörungsfreier Prüfmethoden für Betonbrücken*; Bericht zum Forschungsprojekt 9.94241-1. Bergisch-Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft B 18, 1998.
- [6] M. Schickert: Ultraschall-Tomografie an Betonbauteilen; *Tagungsband DACH-Jahrestagung 2004*, Salzburg, 17.–19.5.2004. Berlin: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 2004, CD-ROM, 8 S.
- [7] B. Gräfe: *Luftgekoppeltes Ultraschallecho-Verfahren für Betonbauteile*. Dissertation an der Fakultät VI – Planen Bauen Umwelt – der Technischen Universität Berlin. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), 2009.
- [8] M. Schickert, U. Tümmeler, L. Bühling: Rapid Scanning Approaches for Ultrasonic Imaging of Concrete. *9th European Conference on NDT (ECNDT)*, Berlin, 25.–29.9.2006. Berlin: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 2006, CD-ROM, 1–8.