

# Erste Messergebnisse mit dem scannenden Ultraschall-Multikanal-Mess- und Abbildungs- system FLEXUS für Betonbauteile

Martin SCHICKERT\*, Wolfgang HILLGER\*\*

\* Materialforschungs- und -prüfanstalt (MFPA) Weimar,  
Coudraystr. 4, 99423 Weimar, martin.schickert@mfpa.de, www.mfpa.de

\*\* Ing.-Büro Dr. Hillger,  
Wilhelm-Raabe-Weg 13, 38110 Braunschweig, info@dr-hillger.de, www.dr-hillger.de

**Kurzfassung.** Durch Ultraschallmessungen mit nachfolgender SAFT-Rekonstruktion (*Synthetic Aperture Focusing Technique*) ist die dreidimensionale Darstellung des Volumens von Betonbauteilen möglich. Dadurch lassen sich innere Objekte wie Konstruktionselemente, Einbauteile und Fehlstellen nachweisen und in ihrer Position bestimmen.

Für flächendeckende Messungen sind automatisierte Mess- und Abbildungssysteme unerlässlich. Als integriertes Gesamtsystem für Messung und Auswertung wurde das scannende Ultraschall-Multikanal-Abbildungssystem FLEXUS entwickelt. Die Automatisierung des Messablaufs wird durch eine Kombination aus elektronischem und mechanischem Scannen der Oberfläche erreicht. 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.

Im Beitrag werden Messverfahren und Messsystem kurz vorgestellt, und es werden erste Messergebnisse an Testkörpern gezeigt, die das erreichbare Auflösungsvermögen in Abhängigkeit von der Messzeit anhand von punkt- und linienförmigen Objekten demonstrieren und die Abbildungsqualität verschiedener Messkonfigurationen vergleichen.

## 1 Einleitung

Im Bauwesen werden fertig gestellte Bauelemente und Bauwerke aus Beton bisher in der Regel nicht oder nur visuell auf ihre Qualität hin überprüft. Stattdessen wird lediglich die Festigkeit des Baustoffs an Testkörpern zerstörend nachgewiesen. Zur Qualitätssicherung, Zustandsanalyse und Fehlerdetektion beim Bau, nach Fertigstellung oder während des Betriebes von Betonbauwerken wäre aber eine eingehende Untersuchung einzelner Bauteilbereiche wünschenswert.

Dazu sind zerstörungsfreie Prüfverfahren mit Detektions- und Lokalisierungsfähigkeiten erforderlich, wie z. B. 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, oberflächenpa-

parallele 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.

Eine wirtschaftliche Prüfung größerer Bereiche kann nur durch automatisierte Messsysteme erreicht werden, die dreidimensionale Bilder von Betonbereichen direkt nach der Messung generieren können. Ein derartiges Messsystem wurde von den Autoren im Rahmen eines geförderten Kooperationsprojektes entwickelt und vorgestellt [3, 4]. Das Mess- und Abbildungssystem FLEXUS kann einen Oberflächenbereich von 1,0 m x 0,8 m automatisiert abtasten und aus den Messwerten ein dreidimensionales Bild des Betonbereichs unter der Oberfläche darstellen. Zur Beschleunigung des Scanvorgangs wurde ein lineares Prüfkopfarray entwickelt, dessen Elemente elektronisch umgeschaltet werden. Als Abbildungsverfahren wird die SAFT-Rekonstruktion (*Synthetic Aperture Focusing Technique*) eingesetzt. Bereits während der Messung werden zweidimensionale Schnittbilder berechnet und zu einem dreidimensionalen Ergebnisbild zusammengesetzt, das direkt nach Abschluss der Messung zur Verfügung steht. Das Messsystem kann vor Ort, im Labor und in der Produktion eingesetzt werden und lässt sich an spezielle Aufgaben anpassen.

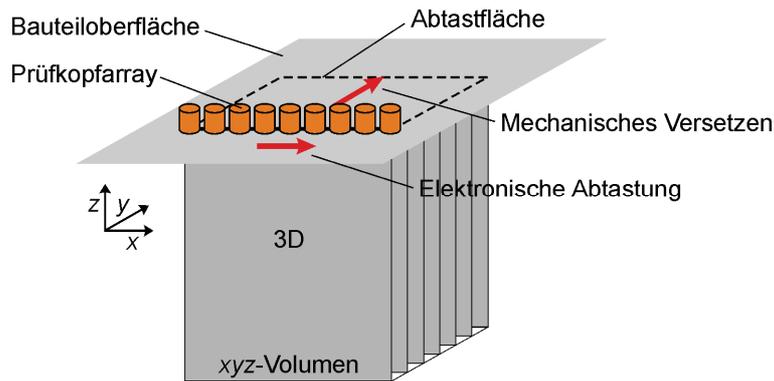
Im Beitrag werden Messverfahren und Messsystem kurz vorgestellt, und es werden erste Messergebnisse an Testkörpern gezeigt, die Auflösungsvermögen und Messzeit sowie die Abbildung von punkt- und linienförmigen Objekten demonstrieren und die Abbildungsqualität verschiedener Messkonfigurationen vergleichen.

## 2 Messverfahren

Eine kurze Einführung in Ultraschall-Abbildungsverfahren zur Betonprüfung enthält [4], eine ausführlichere Darstellung findet sich in [5]. Hier werden nur die Besonderheiten des Messverfahrens dargestellt, wie sie im FLEXUS-Messsystem zur Anwendung kommen.

Eine detaillierte, ortsrichtige Ultraschallabbildung des inneren Aufbaus von Betonbauteilen erreicht man durch eine Linien- oder Flächenabtastung der Betonoberfläche mit einer großen Anzahl von Messpunkten und eine nachfolgende Abbildung durch SAFT-Rekonstruktion (*Synthetic Aperture Focusing Technique*) [6, 7]. Dabei wird der Informationsinhalt aller Ultraschallmessungen verwendet, um ein Bild des untersuchten Betonbereichs darzustellen.

Beim FLEXUS-System werden die Messungen einseitig auf der Betonoberfläche auf einem flächenförmigen Raster aufgenommen (Bild 1). Zur Geschwindigkeitssteigerung werden die Querlinien einer Messspur durch elektronisches Umschalten eines Ultraschallarrays abgetastet. Der Übergang zur nächsten Messlinie erfolgt durch mechanisches Versetzen des Ultraschallarrays. Während des Versetzens wird aus den Messungen ein zweidimensionales SAFT-Schnittbild berechnet und dargestellt. Der gesamte dreidimensionale Darstellungsbe- reich wird so nach und nach aus zweidimensionalen Schnittbildern aufgebaut, wobei mehrere Messspuren abgefahren werden, um den gesamten Scanbereich abzudecken.



**Bild 1.** Kombinierte elektronische und mechanische Abtastung einer Messspur und Aufbau einer dreidimensionalen Darstellung aus zweidimensionalen SAFT-Schnittbildern

Das dreidimensionale Ergebnisbild kann in Quer-, Längs- oder Tiefenschnitte dargestellt werden (Tiefenschnitte in Bild 7). Einen Überblick über das gesamte rekonstruierte Volumen erhält man durch eine dreidimensionale Iso-Oberflächen-Darstellung (Bilder 4 bis 6).

#### 4 FLEXUS-System

Das automatisierte FLEXUS-Mess- und Abbildungssystem wurde im Rahmen eines PRO INNO II-Kooperationsprojektes entwickelt [3, 4]. Es ist die Weiterentwicklung des automatisierten Messsystems der MFPA Weimar durch ein Ultraschallarray und einen elektronischen Multiplexer.

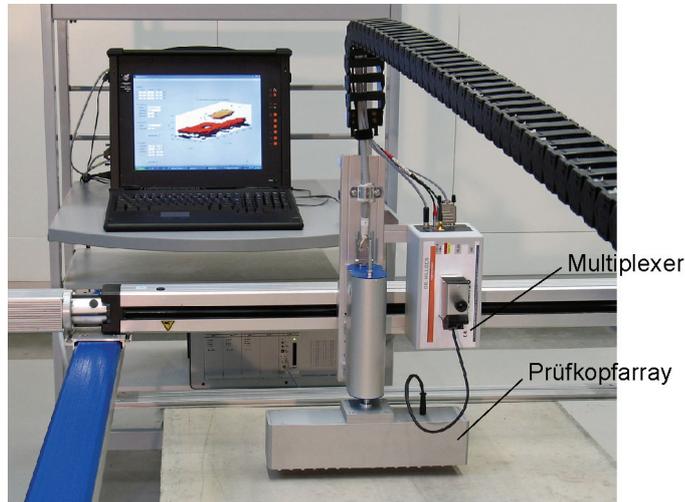
Das Mess- und Abbildungssystem besteht aus den Komponenten (Bild 2):

- Niederfrequenz-Ultraschallgerät;
- Ultraschall-Array mit 48 Prüfköpfen in 16 Gruppen, durch einen Multiplexer elektronisch umgeschaltet;
- automatisierter Scanner mit drei Achsen und 1,0 m x 0,8 m Scan-Fläche, Steuerprogramm zur Bewegung des Ultraschall-Arrays;
- SAFT-Abbildungs- und Bildauswertungssoftware für die Berechnung und Auswertung zwei- und dreidimensionaler Bilder unmittelbar vor Ort.

Das Messsystem ist sowohl als präzises Forschungssystem als auch für den Einsatz vor Ort konstruiert. Es lässt sich durch zwei Personen transportieren und ist innerhalb von 30 Minuten betriebsbereit.

Das Ultraschall-Array wird koppelmittelfrei angekoppelt und durch den mechanischen Scanner in linearen Spuren zu den einzelnen Rasterpositionen bewegt. An jeder Position wird ein elektronischer Scan durchgeführt. Der SAFT-Algorithmus berechnet nach jedem Schritt, also ca. alle 3 s, ein aktuelles  $xz$ -SAFT-Schnittbild in Richtung der Array-Ausdehnung. Die elektronische Abtastung ersetzt die mechanischen Prüfkopfbewegungen in einer Koordinatenrichtung weitgehend durch eine elektronische Umschaltung von Prüfkopfgruppen und verringert dadurch die Messzeit um den Faktor 10 auf minimal 12 min/m<sup>2</sup> Betonoberfläche. Der mechanische Versatz beschränkt sich auf Spuren in  $y$ -Richtung senkrecht zur Array-Ausdehnung; für größere Flächen werden mehrere Spuren kombiniert. Auflösung und Eindringtiefe werden durch angepasste Anregung der Prüfköpfe, rauscharme Verstärkung und Bandpassfilterung der Empfangssignale optimiert. Als Messergebnis liegt direkt nach Abschluss der 2500 bis 5000 Messungen/m<sup>2</sup> ein aus den Schnittbildern zusammenge-

setztes, dreidimensionales Bild vor. Das Messergebnis kann als dreidimensionale, drehbare Darstellung oder durch Schnittbilder des gemessenen Volumens unmittelbar nach Abschluss der Messung ausgewertet werden. Damit wird die Darstellung dreidimensionaler Bilder direkt auf der Baustelle möglich. Bei Bedarf kann anschließend eine vollständig fokussierte dreidimensionale SAFT-Rekonstruktion berechnet werden. Je nach Einsatzbedingung können Objekte mit minimal 50 mm Querabmessung detektiert werden.



**Bild 2.** 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 3). Während der Messung für ein Schnittbild wird jede Prüfkopfgruppe dynamisch als Sender oder Empfänger umgeschaltet. Dabei ist jede Gruppe des Prüfkopfarrays mit 3 Prüfköpfen dynamisch als Sender, als Empfänger oder funktionslos schaltbar. Durch Veränderung der Programmierung sind beliebige Ansteuermöglichkeiten konfigurierbar.



**Bild 3.** Ultraschall-Prüfkopfarray mit 48 Prüfköpfen in 16 Gruppen

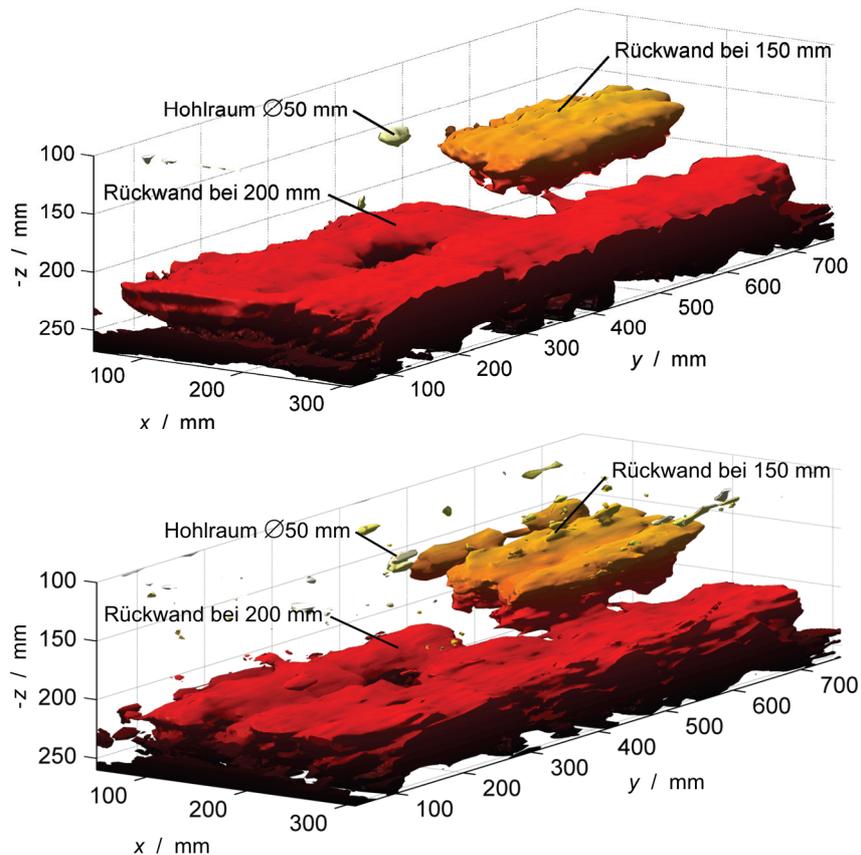
Die Messdaten werden dreidimensional SAFT-rekonstruiert. Die Bilder 4 bis 6 zeigen Messergebnisse räumlich in Iso-Oberflächen-Ansichten. Die Farbtabelle ändert sich mit der Tiefe, um die Lage der Objekte leichter erkennen zu können. Diese Iso-Oberflächen-Darstellung gibt einen guten Überblick über den 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.

## 5 Messbeispiele

Die folgenden Messergebnisse an Testkörpern sollen einen ersten Einblick in die Abbildungsmöglichkeiten und -eigenschaften des FLEXUS-Messsystems bieten. Alle Darstellungen stammen ohne Nachbearbeitung direkt aus dem Auswertprogramm.

### 5.1 Auflösungsvermögen und Messzeit

Zur anschaulichen Darstellung des Auflösungsvermögens des Messsystems und dessen Abhängigkeit von der Messzeit wurden Messungen am Testkörper TK0703 aufgenommen. Der Testkörper ist 1,2 m x 0,8 m x 0,2 m groß, aus Beton mit Größtkorn 16 mm gefertigt 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.



**Bild 4.** 3D-Schnittbild-SAFT des Testkörpers TK0703 mit Hohlraum mit 50 mm Durchmesser und Rückwandversatz; Messzeit 18 min (oben) und 2 min (unten)

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 Spur in  $y$ -Richtung über die Oberfläche geführt. Als Sender und Empfänger wurden jeweils virtuelle Wandler mit 2 x 3 Einzelprüfköpfen verwendet. Die Messung mit der Flächenabtastung von 240 mm x 700 mm in einem Raster von 20 mm x 10 mm inklusive der SAFT-Rekonstruktionen benötigte 16 Minuten, die Darstellung 1 Minute. Die zweidimensionalen 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 zur Verfügung (Bild 4, oben). Der

Hohlraum ist als direkte Anzeige und indirekt durch seine Rückwandabschattung zu erkennen; auch der Rückwandversatz zeigt sich eindeutig.

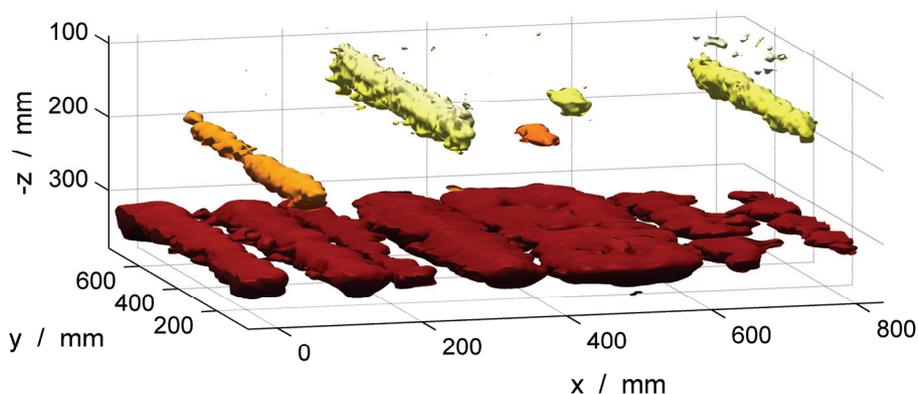
Für eine schnellere Messung wurden ein Messraster von 20 mm x 20 mm gewählt und die Anzahl der Mittelungen je Einzelmessung deutlich verringert. Die Messzeit betrug dann 3 min, was einer Abtastrate von etwa 12 min/m<sup>2</sup> entspricht. Das Ergebnis in Bild 4, unten, ist deutlich verrauschter als die erste Messung, wodurch die Hohlraumanzeige nicht mehr vom Rauschen unterschieden werden kann. Da sie ist aber indirekt über die Rückwandabschattung zu erkennen ist und auch der Rückwandversatz eindeutig dargestellt wird, kann eine derartige Messgeschwindigkeit für Überblicksmessungen gut verwendet werden.

## 5.2 Abbildung von punkt- und linienförmigen Objekten

Am Testkörper TK0901 wurden Untersuchungen zur Abbildung von punkt- und linienförmigen Objekten durchgeführt. Der Testkörper ist 1,2 m x 0,8 m x 0,3 m groß und besteht aus Beton mit Größtkorn 16 mm. Er enthält drei Leerrohre mit teils wechselndem Durchmesser, drei Hohlräume (Styrodurlinsen) von 80 mm Durchmesser und einen Abschnitt mit Mattenbewehrung von 12 mm Durchmesser und 150 mm Maschenweite (Bild 6, rechts).

Die Messungen wurden wieder mit dem elektronischen FLEXUS-Scanner durchgeführt. Das Prüfkopfarray war in  $x$ -Richtung ausgerichtet und tastete die Oberfläche in einem Raster von 20 mm x 10 mm in vier Spuren von je 220 mm x 720 mm in  $y$ -Richtung ab. Jeweils 3 x 3 Einzelprüfköpfe wurden als virtuelle Wandler für Sender und Empfänger verwendet. Die Messung benötigte inklusive der SAFT-Schnittbildberechnungen 38 Minuten, die Darstellung 1 Minute. Die zweidimensionalen SAFT-Schnittbilder jedes elektronischen Scans wurden während der Messung zu einem dreidimensionalen Datensatz zusammengesetzt. Das Messergebnis zeigen die Bilder 5 und 6, links, als räumliche Iso-Oberflächen-Darstellung.

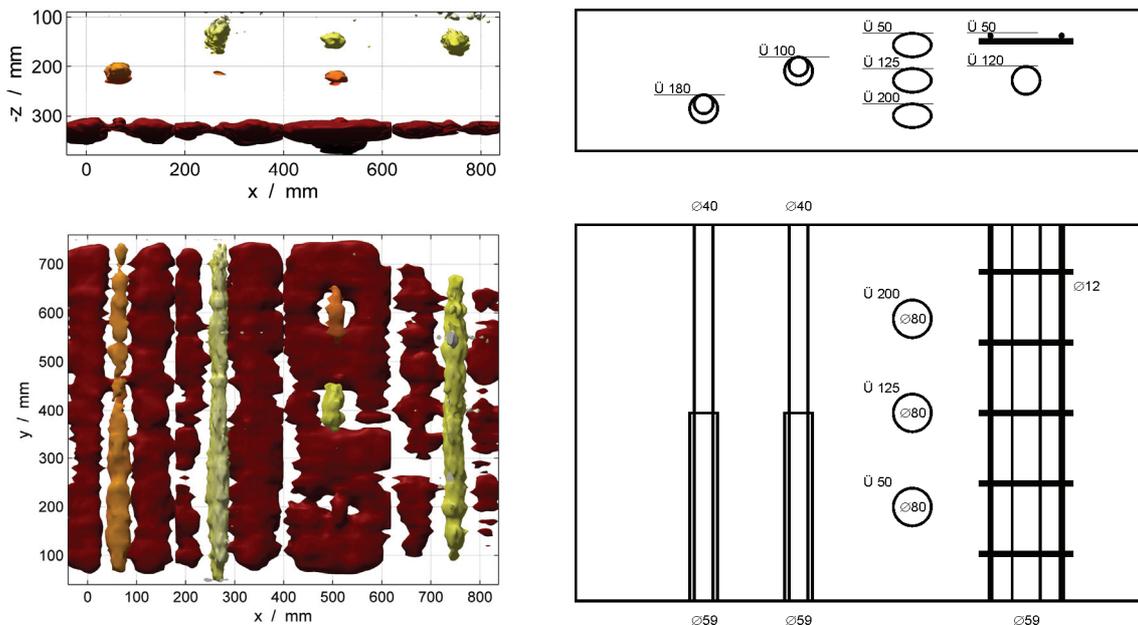
In Bild 5 sind die Rückwand, alle drei Rohre und zwei der drei Hohlräume im Überblick zu sehen. Die vier Messspuren sind anhand von Unterbrechungen der Rückwandanzeige zu erkennen, die durch schwächere Wiedergabe der Randbereiche der einzelnen Spuren entstehen.



**Bild 5.** 3D-Schnittbild-SAFT des Testkörpers TK0901 mit drei Leerrohren und drei Hohlräumen

Bild 6, links oben, zeigt die korrekte Wiedergabe der Tiefenlage der Objekte. Hier wie auch in Bild 6, links unten, fällt auf, dass die Bewehrung sich nur durch erhöhtes Rauschen bemerkbar macht. Die Auflösung dieser Konfiguration reicht für eine direkte Abbildung im

Nahbereich nicht aus. Ähnliches gilt für den Hohlraum mit 50 mm Überdeckung, dessen Anzeige in der Totzone des Ultraschallarrays liegt. Er wird aber indirekt durch die Rückwandabschattung detektiert. Die unterschiedlichen Rohrdurchmesser fallen in dieser Darstellungsart nur mit Kenntnis der Vorinformation auf. In der dreidimensionalen SAFT-Rekonstruktion (nicht abgebildet) sind die Unterschiede der Rohrdurchmesser deutlicher erkennbar. Die scheinbar kürzere Länge des rechten Rohres und die fehlende Rückwandabbildung in den Endbereichen entstehen durch erhöhte Porosität des Betons an beiden Enden durch schlechte Verdichtung, wodurch die Signalamplituden geschwächt werden.



**Bild 6.** Testkörper TK0901: Seitenansicht (oben) und Aufsicht (unten) des 3D-Schnittbild-SAFT-Bildes (links) und der Zeichnung (rechts)

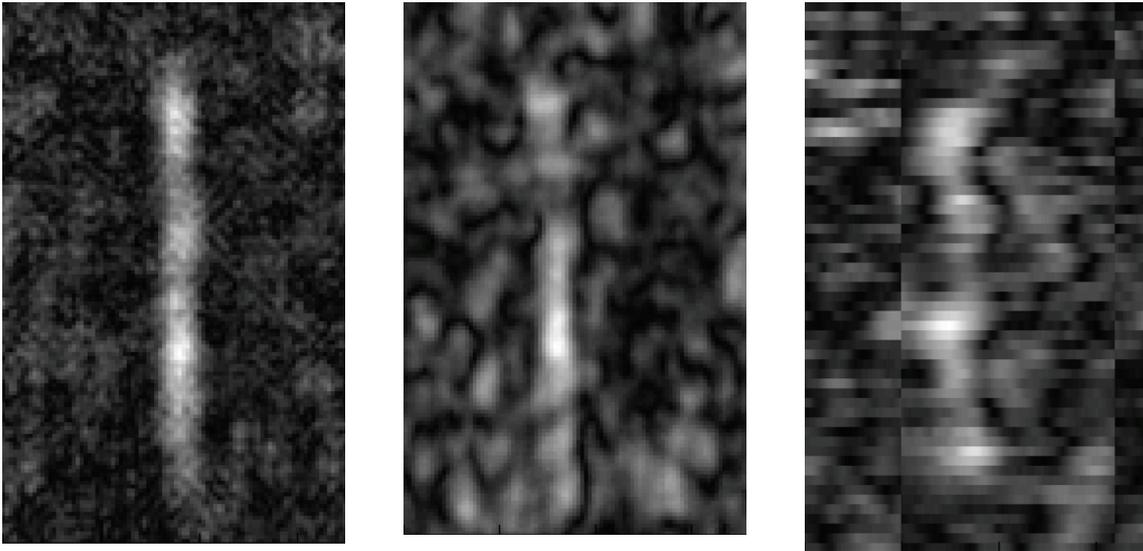
### 5.3 Vergleich der Abbildungsqualität

Für Messungen zum Vergleich der Abbildungsqualität zwischen verschiedenen Ultraschallprüfköpfen und SAFT-Algorithmen wurde das Testfeld TK0702/R2 im Hallenboden der MFPA-Experimentierhalle verwendet. Das Testfeld ist Teil eines Testgebietes mit sechs Testfeldern bei insgesamt 11,7 m x 0,9 m Ausdehnung [3]. 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.

Das Testfeld enthält drei leere Metallrohre mit 59 mm Durchmesser in verschiedenen Tiefen. Die Messungen wurden an dem mittleren Rohr mit einer Überdeckung von etwa 160 mm durchgeführt. Dabei wurden Messung und Auswertung wie folgt variiert:

1. Messung mit Ultraschallprüfkopf M2502 (einkanalig, je 12 Send- und Empfangswandler, Schrittweite 10 mm x 10 mm), dreidimensionale SAFT-Rekonstruktion;
2. Messung mit Ultraschallarray UA1 (elfkanalig, je 9 Send- und Empfangswandler, Schrittweite 20 mm x 10 mm), dreidimensionale SAFT-Rekonstruktion;
3. Messung mit Ultraschallarray UA1 (elfkanalig, je 9 Send- und Empfangswandler, Schrittweite 20 mm x 10 mm), dreidimensionale SAFT-Rekonstruktion aus zweidimensionalen SAFT-Schnittbildern.

Bild 7 zeigt die Ergebnisse. Die Messung mit dem einkanaligen Ultraschallprüfkopf gibt nach dreidimensionaler SAFT-Rekonstruktion eine klare Anzeige mit guten Signal-Rausch-Verhältnis (Bild 7, links). Die Anzeige, die vom Ultraschallarray bei gleicher Nachverarbeitung erzeugt wird, ist ungleichmäßiger und stärker durch Strukturrauschen gestört (Bild 7, Mitte). Dies lässt sich nur teilweise durch die geringere Zahl von Einzelwandlern und den damit verbunden kleineren Aperturen bei Senden und Empfang erklären. Die Auflösung ist etwa gleich. Dieselbe Messung in einem aus zweidimensionalen SAFT-Rekonstruktionen zusammengesetzten Bild, wie es direkt nach der Messung zur Verfügung steht, hat ein etwas geringeres Auflösungsvermögen bei etwa gleichem Strukturrauschen (Bild 7, rechts). Entlang zweier Linien in  $y$ -Richtung lassen sich die drei Spuren, aus denen der Bildausschnitt zusammengesetzt ist, gut erkennen. Die Ursache der Verzerrungen in  $x$ -Richtung muss noch ermittelt werden.



**Bild 7.** Vergleich mittleres Ziel TK0702/R2, Schnittbild-SAFT TK0702/R2, Abbildungsbereich  $x = -3200..-2850$ ,  $y = 700..1250$ ,  $z = 196$  mm: M2502, 3D-SAFT (links), UA 1, 3D-SAFT (Mitte), UA 1, 3D-Schnittbild-SAFT (rechts)

Im Vergleich ist die Abbildungsqualität der einkanaligen Messungen in engem Messraster und mit dreidimensionaler SAFT-Rekonstruktion am höchsten. Für Überblicksmessungen sind die Messungen mit dem Ultraschallarray und aus Schnittbildern zusammengesetztem SAFT-Bild aber ebenfalls gut geeignet. Dies gilt umso mehr in Anbetracht der um ein Vielfaches geringeren Messzeit.

## 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. Durch die automatisierten Messmöglichkeiten mit dem FLEXUS-Mess- und Abbildungssystem werden flächige Untersuchungen 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 zerstörungsfrei untersucht werden [8].

Die Zielrichtung liegt in einer automatisierten Untersuchung z. B. von Brücken, Querträgern und Bodenplatten, um Spannkanälen und anderen Einbauteilen zu orten, Fehlstellen zu

detektieren und zu lokalisieren sowie orts aufgelöste Dickenmessungen durchzuführen. Derartige Untersuchungen können perspektivisch zum Standardrepertoire gehören und helfen, die Qualität der Bauwerke bei der Bauausführung zu überprüfen und während der Nutzung zu sichern.

## Danksagung

Das Mess- und Abbildungssystem FLEXUS wurde im Rahmen des PRO INNO II-Verbundprojektes FLEXUS entwickelt. Die Autoren danken außerdem den Herren U. Tümmler (MFGPA Weimar), D. Ilse und Dr. L. Bühling (Ing.-Büro Dr. Hillger) für Ihre Mitarbeit am Aufbau des Messsystems. Herr U. Tümmler hat außerdem die meisten der gezeigten Messungen durchgeführt.

## 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, W. Hillger: 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, 1-10.
- [4] M. Schickert: Ultraschall-Abbildungsverfahren – Neue Entwicklungen beschleunigen den Einsatz; in: *Bauwerksdiagnose*, Berlin, 18.–19.2.2010. Berlin: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 2010, CD-ROM, S. 1–11.
- [5] M. Schickert, M.; Krause, M.: Ultrasonic Techniques for the Evaluation of Reinforced Concrete Structures. In: Ch. Maierhofer *et al.*: *Non-destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures*. Vol. 2. Cambridge: Woodhead, erscheint 2010.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.