

Aktuelle Entwicklungen bei scannenden Ultraschall-Abbildungsverfahren

Martin SCHICKERT, Materialforschungs- und -prüfanstalt (MFPA) Weimar
(martin.schickert@mfpa.de, www.mfpa.de)

Kurzfassung. Automatisierte Ultraschall-Abbildungssysteme bieten die Möglichkeit, das Volumen von Betonbauteilen bei einseitigem Zugang dreidimensional darzustellen. Je nach Randbedingungen der Messung sind detaillierte Bilder möglich, in denen sich Einbauteile und Fehlstellen lokalisieren lassen. Die Ergebnisse können u. a. zur Planerstellung, Schadensanalyse und Qualitätssicherung genutzt werden.

Der Beitrag beschreibt aktuelle Entwicklungen bei scannenden Ultraschall-Abbildungsverfahren anhand von zwei automatisierten Ultraschall-Scansystemen und den Messergebnissen, die mit ihnen erzielt wurden. Die Messsysteme beinhalten neben Ultraschallgerät und dreiachsigen Scannern eine integrierte Software zur dreidimensionalen Abbildung durch SAFT-Rekonstruktion (*Synthetic Aperture Focusing Technique*), wobei das rekonstruierte Bild bei Verwendung eines elektronisch gesteuerten Prüfkopffarrays direkt nach der Messung vorliegt. Einsatzbeispiele in Betontestkörpern im Labor und im Außeneinsatz demonstrieren die Anwendungsmöglichkeiten. Zwei neuartige Anwendungsmöglichkeiten sind die dreidimensionale, hochauflösende Abbildung von textilbewertem Beton und die berührungslose, flächige Abbildung der Lage und Tiefe von oberflächenverbundenen Rissen.

1 Einführung

Die Einführung automatisierter Scansysteme zur Abbildung von Betonbereichen mit Ultraschall eröffnet dem Bauwesen neue Möglichkeiten zur Planerstellung, Schadensanalyse und Qualitätssicherung [1, 2]. Mit derartigen Systemen kann beim Bau, nach Fertigstellung oder während des Betriebes von Betonbauwerken eine eingehende Untersuchung einzelner Bauteilbereiche erfolgen. Dabei kann die Lage von Einbauteilen verifiziert bzw. ihre Position bei fehlenden Plänen wieder rekonstruiert werden. Bei Schäden ist eine gezielte Vorausswahl von Bereichen möglich, in denen anschließend zerstörende Prüfungen durchgeführt werden.

Die Scansysteme werden derzeit in zwei Richtungen weiterentwickelt. Zum einen wird ihre Praxistauglichkeit verbessert. Dazu gehören kürzere Messzeiten, größere Handlichkeit und Robustheit sowie universellere Darstellungsmöglichkeiten der Ergebnisse auf der Baustelle. Zum anderen werden die Systeme für Anwendungen weiterentwickelt, die bisher aufgrund des hohen Messaufwandes nicht möglich waren.

Dieser Beitrag beschreibt aktuelle Entwicklungen bei scannenden Ultraschall-Abbildungsverfahren anhand von zwei automatisierten Ultraschall-Scansystemen der MFPA Weimar, die Eigenentwicklungen im Rahmen von mehreren Forschungsvorhaben und Industriekooperationen sind. Zunächst wird der mobile Betonscanner mit einem elektronisch gesteuerten Ultraschall-Prüfkopffarray mit 48 Einzelwandlern und einer Software zur dreidimensionalen Abbildung durch SAFT-Rekonstruktion (*Synthetic Aperture Focusing Technique*) vorgestellt. Zwei Messbeispiele an Betontestkörpern im Labor und im Außeneinsatz demonstrieren die Anwendungsmöglichkeiten. Zwei weitere Fallbeispiele

zeigen darüber hinausgehende, neuartige Anwendungsmöglichkeiten. Im ersten wird die Fehlerdetektion in textilbewertem Beton durch dreidimensionale Abbildung mit hoher Auflösung gezeigt. Für die Messungen wurde der Laborscanner verwendet. Im zweiten Fallbeispiel wird ein Ansatz zur flächigen Abbildung der Lage und Tiefe von oberflächenverbundenen Rissen durch berührungslose Ultraschallabbildung mit luftgekoppelten Prüfköpfen vorgestellt.

2 Ultraschall-Abbildungsverfahren

Mit Ultraschallverfahren lassen sich verschiedene zerstörungsfreie Prüfaufgaben an Betonbauteilen abdecken, die von einzelnen Dickenmessungen bis zur detaillierten, dreidimensionalen Darstellung des Volumens reicht [3, 4]. Den grundlegenden Messaufbau eines Ultraschall-Abbildungssystems zeigt Bild 1, links. Ein Ultraschallgerät erzeugt die elektrischen Sendepulse, die von einem Ultraschallprüfkopf als elastische Wellen in das Betonbauteil ausgesandt werden, sich dort ausbreiten und von Objekten wie Spannkanälen oder Fehlstellen reflektiert werden. Die Empfangssignale werden wieder im Ultraschallgerät verstärkt und digitalisiert. Um auf die Tiefe eines Objektes zu schließen, werden die Messungen als Zeitverläufe dargestellt und auf die Schallgeschwindigkeit im Betonbauteil kalibriert. Die Messungen werden einseitig auf der Betonoberfläche durchgeführt. Derartige Messungen an einzelnen Messpunkten reichen für einfache Messaufgaben wie eine Dickenbestimmung oft aus.

Bei automatisierten Scansystemen wird der Ultraschallprüfkopf von einem mechanischen Manipulator bewegt. Die Steuerung wird dabei mit dem Ultraschallgerät synchronisiert. Mit einem einachsigen Scansystem wird der Prüfkopf auf einer Linie bewegt, und es werden zweidimensionale Ultraschallbilder als Querschnitt durch das Bauteil aufgenommen (Bild 1, links). Ein zweiachsiges Scansystem bewegt den Prüfkopf auf einem flächigen Messpunktraster; aus den Messungen kann dann ein dreidimensionales Bild des Bauteils erzeugt werden, das in Schnittbildern (Bild 1, rechts) oder als Iso-Oberflächenbild (Bild 4) dargestellt wird. Auf diese Weise lassen sich ganze Bereiche von Betonbauteilen abbilden.

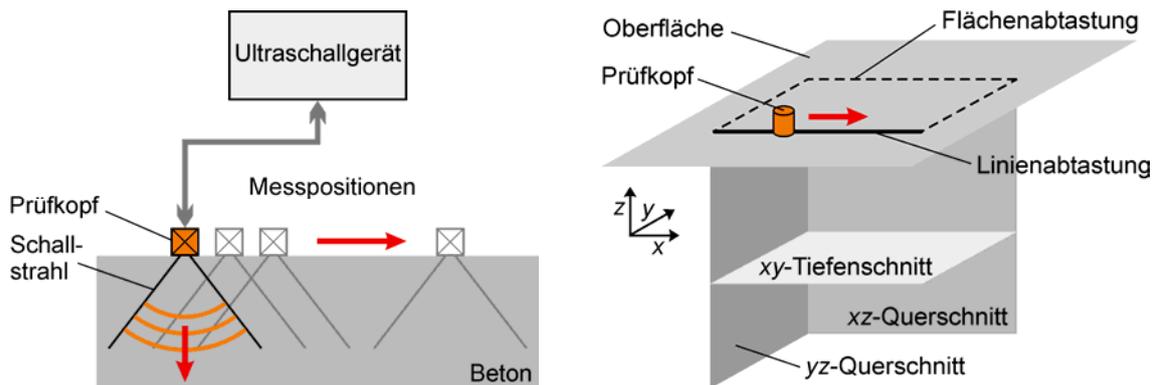


Bild 1. Prinzipieller Messaufbau für Ultraschall-Abbildungsverfahren (links); Koordinatensystem und Lage der Bildschnitte (rechts)

Für die Übertragung der Ultraschallwellen vom Prüfkopf in den Beton und zurück ist ein direkter Kontakt oder eine Ankopplung durch ein Koppelmedium notwendig. Messungen mit automatisierten Scannern erfordern Prüfköpfe, die ohne Koppelmittel auskommen. Derzeit kommen dafür Prüfköpfe mit Keramikspitzen für direkte Ankopplung sowie wasser- oder luftgekoppelte Prüfköpfe in Frage.

Für eine detaillierte, ortsrichtige Abbildung des inneren Aufbaus von Betonbauteilen werden die Messsignale aus einer Linien- oder Flächenabtastung mit einer großen Anzahl von Messpunkten durch eine nachfolgende SAFT-Rekonstruktion (*Synthetic Aperture Focusing Technique*) abgebildet. Diese Abbildungstechnik fokussiert alle in Frage kommenden Messsignale auf jeden Punkt des Bildes, um möglichst viel Information aus den empfangenen Signalen zu nutzen. Derartige Messungen sind nur mit automatisierten Messsystemen wirtschaftlich durchzuführen.

4 Automatisiertes Ultraschall-Abbildungssystem

In den letzten Jahren wurde an der MFPA Weimar das integrierte, automatisierte FLEXUS-Ultraschall-Abbildungssystem zur Untersuchung von Betonbauteilen entwickelt. Das System besteht aus einem kommerziellen Niederfrequenz-Ultraschallgerät (Ing.-Büro Dr. Hillger, Braunschweig), einem mechanischen Scanner mit Bediensoftware und einer integrierten Programmumgebung zur Bildberechnung und -darstellung (Bild 2).

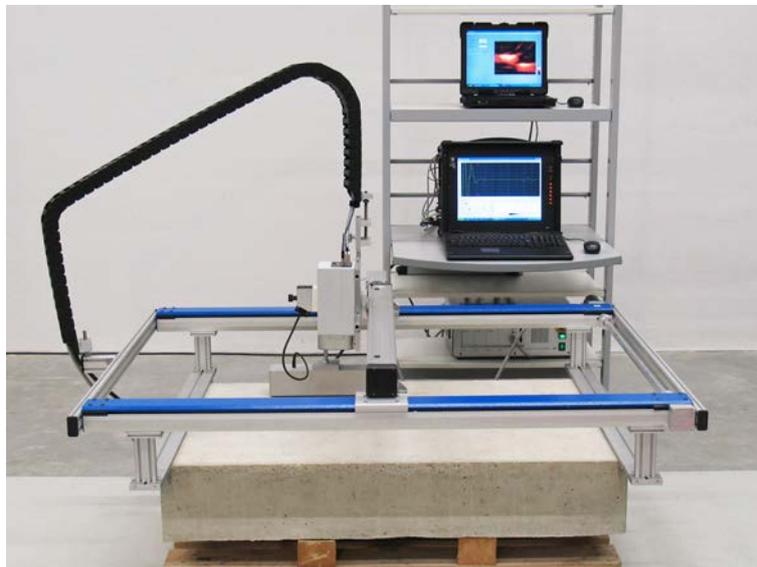


Bild 2. Automatisiertes Abbildungssystem mit Ultraschall-Prüfkopffarray mit 48 Prüfköpfen und elektronischem Multiplexer

Bei einseitigem Zugang können zwei- und dreidimensionale Bilder von Betonbereichen weitgehend automatisch generiert werden. Der Abtastbereich beträgt je nach Prüfkopf ca. 1,00 m x 0,80 m; für größere Messbereiche wird der Scanner verschoben. 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. Abhängig von der Anwendung werden einkanalige Prüfköpfe oder mehrkanalige Prüfkopffarrays eingesetzt (Bild 3). Der Einsatz eines Ultraschall-Prüfkopffarrays mit 48 Einzelwandlern in 16 Gruppen mit elektronischer Umschaltung verringert die Messzeit entscheidend und trägt so zu wirtschaftlichen Untersuchungen bei. Das Messsystem ist sowohl als präzises Forschungssystem als auch für den Einsatz auf der Baustelle konstruiert. Es kann liegend, stehend oder hängend betrieben werden, lässt sich durch zwei Personen transportieren und innerhalb von 30 Minuten betriebsbereit machen.



Bild 3. Ultraschall-Prüfkopffarray mit 48 Prüfköpfen in 16 Gruppen (links) und einkanaliger Prüfkopf mit je 12 Sende- und Empfangswandlern (rechts)

Nach Abschluss der Messungen mit dem Prüfkopffarray 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. Die dafür verwendete Software REKONS ist ebenfalls eine Eigenentwicklung. Sie beinhaltet neben der Bildberechnung und Bilddarstellung auch eine Signalvorverarbeitung, kann an spezielle Aufgabenstellungen angepasst werden und lässt sich auch mieten und lizenzieren.

Das Ultraschall-Abbildungssystem eignet sich dafür, Einbauteile, Konstruktionselemente und Fehlstellen abzubilden und in ihrer Lage zu bestimmen. In den dreidimensionalen Bildern 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 [5]. Für die Prüfung ist nur ein einseitiger Zugang zum Bauteil erforderlich. Die Hauptanwendungsgebiete sind Qualitätskontrolle, Zustandsanalyse und Fehlerdetektion. Die erreichbare Aussagesicherheit hängt von den Messbedingungen ab, vor allem von Betonrezeptur, Betondicke, Bewehrungsgrad und Oberflächenqualität.

5 Messbeispiele

5.1 Testkörper mit Einbauteilen

An einem Testkörper wurden Untersuchungen zur Abbildung von Fehlstellen und Spannkämen durchgeführt. Der Testkörper ist 1,2 m x 0,8 m x 0,3 m groß und besteht aus Beton C30/37 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 4 zeigt rechts Zeichnungen des Testkörpers.

Die Messungen wurden mit dem elektronischen FLEXUS-Scanner durchgeführt und benötigten inklusive der SAFT-Schnittbildberechnungen 20 Minuten, die Darstellung 1 Minute. Die zweidimensionalen SAFT-Schnittbilder jedes elektronischen Scans wurden während der Messung zu einem dreidimensionalen Datensatz zusammengesetzt. Das Messergebnis zeigt Bild 4, links, als räumliche Iso-Oberflächen-Darstellung.

In beiden Abbildungen sind die Rückwand, alle drei Rohre und zwei der drei Hohlräume im Überblick zu sehen. Ein Vergleich mit den Zeichnungen in Bild 4, rechts, zeigt, dass die Objekte an den korrekten Positionen dargestellt werden. Objekte im Nahbereich bis zu einer Tiefe von 80 mm können von dieser Messkonfiguration allerdings nicht abge-

bildet werden. Derartige Messungen lassen sich zum Erstellen von Zeichnungen von Betonbauteilen verwenden, deren Aufbau unbekannt oder zweifelhaft ist.

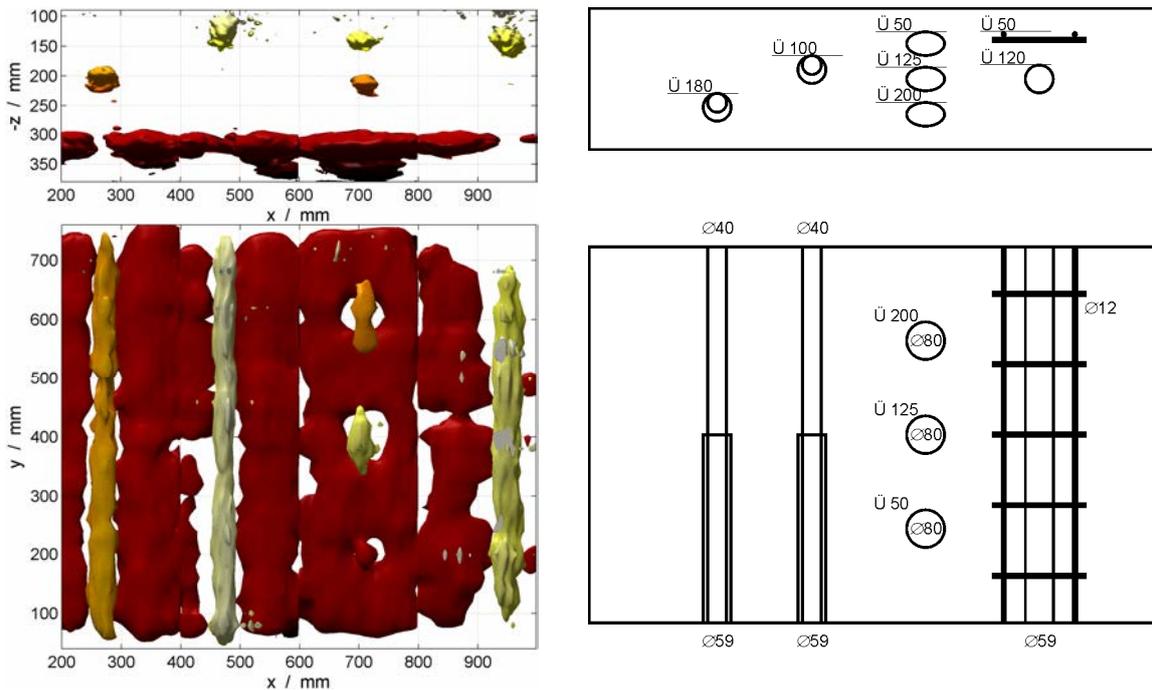


Bild 4. Testkörper mit Eionbauteilen: Iso-Oberflächendarstellungen der Messungen (links) und Zeichnungen (rechts)

5.2 Elementwand mit Testfehlern

Elementwände sind Beton-Fertigteile, die aus zwei Betonplatten mit Abstandhaltern oder Gittern aus Bewehrungsstahl bestehen und auf der Baustelle mit Ort beton ausgegossen werden. Für Vergleichsmessungen wurde von der Fa. Lütkenhaus, Dülmen, eine Elementwand aufgebaut und vor dem Vergießen mit Testfehlern ausgestattet, die von der FH Münster entworfen wurden. Die Wand hat eine Fläche von 6,00 m x 2,36 m und besitzt bei Plattendicken von je 6 cm eine Gesamtdicke von 30 cm.

Ein Teil der Wand wurde von der MFPA Weimar ohne Kenntnis der Fehlerlage mit dem FLEXUS-Scanner flächendeckend gemessen und als SAFT-Rekonstruktion dargestellt. Für die Messung wurde das elektronisch umgeschaltete Prüfkopfarray eingesetzt, das die Oberfläche der Scan-Fläche in nebeneinander liegenden Spuren abtastet (Bild 5). Direkt nach der Messung jedes Scan-Bereichs von 1,10 m x 0,84 m stand die entsprechende 3D-SAFT-Rekonstruktion zur Verfügung. Der gesamte, dreidimensionale Bildbereich wurde je Feld anschließend im Rechner aus den einzelnen Scan-Bildern zusammengesetzt.

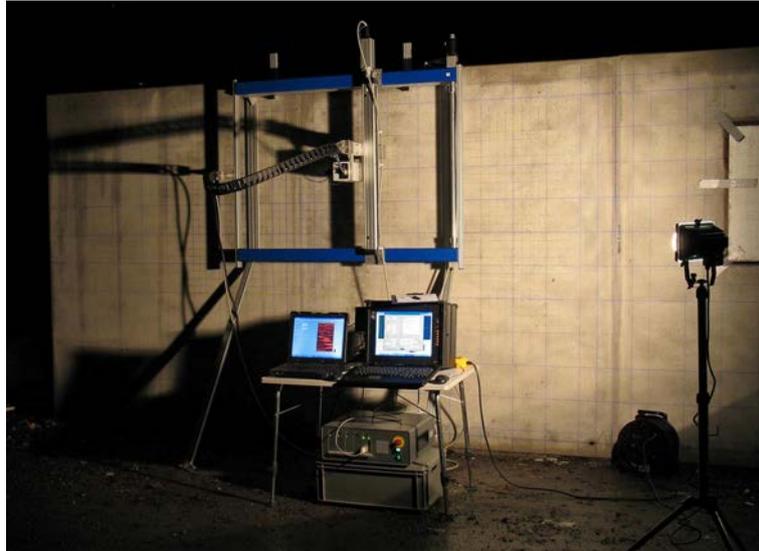


Bild 5. FLEXUS-Messsystem bei der Messung an einer Elementwand

Bild 6 zeigt im oberen Bildteil als Messbeispiel einen Tiefenschnitt aus dem Feld A. Man erkennt in y -Richtung verlaufende Bewehrungsseisen, die im Bereich $x = 1270 \dots 1640$ mm von einem rechteckigen Objekt verdeckt sind. Aus den weiteren Quer- und Tiefenschnitten lassen sich weitere Rohre und Einbauten lokalisieren, so dass sich für diesen Bereich die Kartierung von Bild 6, unten, ergibt. Die Tiefenlage der Objekte lässt sich aus den Bildern auch entnehmen, ist hier aber nur relativ dargestellt. Für die Interpretation derartiger Ultraschallbilder ist Erfahrung nötig.

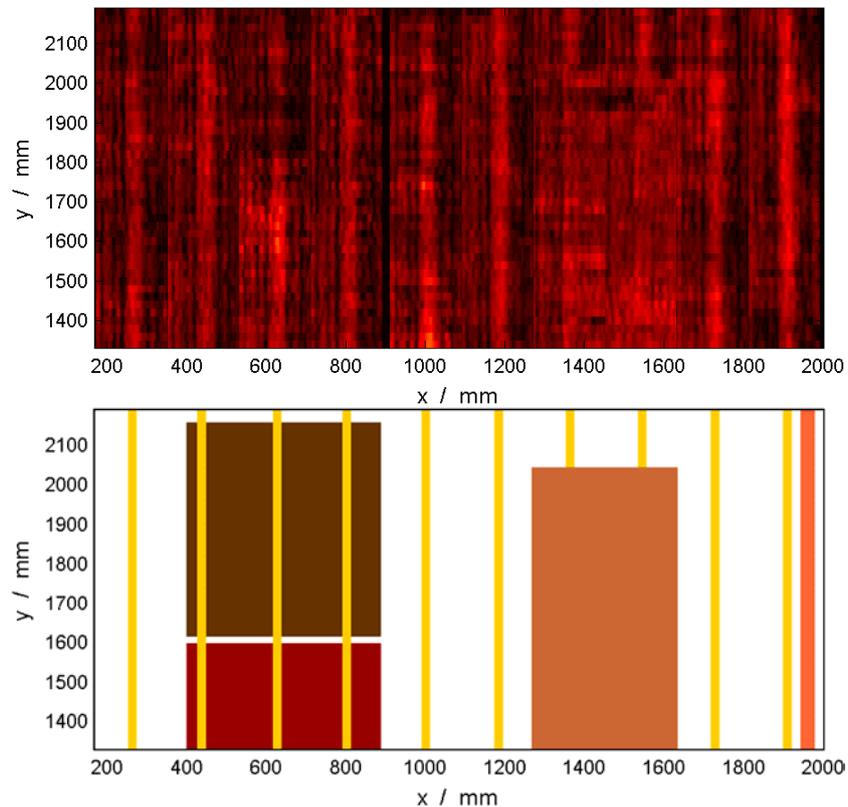


Bild 6. Messergebnisse Elementwand, Feld A: Tiefenschnitt durch die 3D-SAFT-Rekonstruktion aus Schnittbildern (oben) und in allen Tiefen detektierte, größere Objekte (unten).

5.3 Hochauflösende Abbildung und Fehlerdetektion von textilbewehrtem Beton

Textilbewehrter Beton wird seit einiger Zeit für die Verstärkung bestehender Bauteile und den Bau von Sonderbauwerken mit geringer Wanddicke und variabler Form eingesetzt. Der Beton mit geringer Korngröße wird durch eine oder zwei Lagen eines maschenförmigen Industrietextils bewehrt, so dass sich Wanddicken von 3 cm oder weniger realisieren lassen.

Wegen der geringen Abmessungen ist die Lage der textilen Bewehrung für die statischen Eigenschaften besonders wichtig. In Vorversuchen sollte deshalb geklärt werden, ob sich die Textilmatten abbilden und so in ihrer Lage bestimmen lassen. Dazu wurde eine Platte mit den Abmessungen 30 cm x 30 cm x 3 cm von der Fa. beweka, Kahla, angefertigt. Die Platte enthält eine zweilagige, netzartige Textilbewehrung sowie einige Testfehler und wurde entsprechend der Technologie des Instituts für Massivbau der TU Dresden hergestellt.

Die Platte wurde an der MFGPA Weimar mit einem automatisierten Laborscanner untersucht, wobei Ultraschallwandler mit Luftankopplung in Durchschallung und in Impuls-Echo-Technik mit Wasserankopplung eingesetzt wurden. Mit Luftankopplung konnten Fehlstellen ab etwa 1 cm² Fläche parallel zur Oberfläche nachgewiesen werden. Eine Tiefenbestimmung war wegen der Durchschallungsanordnung nicht möglich. Mit Wasserankopplung konnten sowohl die Textilnetze als auch die Testfehler detailliert abgebildet und vermessen werden. Dabei konnte eine Auflösung von 1 mm in Quer- und 0,1 mm in Tiefenrichtung erzielt werden. In Bild 7 sind ein Querschnitt (B-Bild) und zwei Tiefenschnitte (C-Bilder) bei $z = -5,6$ mm und $z = -8,0$ mm dargestellt. Da die Netze gebogen eingebaut wurden (oberes Bild), sind sie in den beiden oberflächenparallelen Schnitten (im Bild unten) nur zum Teil sichtbar. In allen Schnittbildern sind die Netzstruktur und die Fehlstellen deutlich sichtbar.

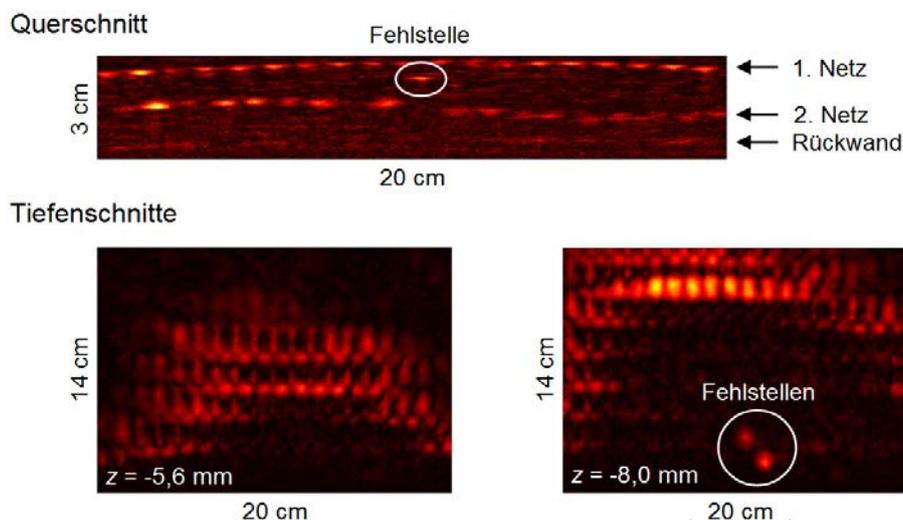


Bild 7. Abbildung von textilbewehrtem Beton mit Wasserankopplung

5.4 Berührungslose Abbildung von Oberflächenrissen

Risse sind ein häufiger Schaden in Beton. Oberflächenparallele Risse, die mit Ultraschall bei einer Einschallung von der Betonoberfläche aus gut nachweisbar sind, treten aber eher selten auf, dann als Ablösungen oder Absprengungen. Häufiger sind oberflächenverbundene Risse, die mehr oder weniger senkrecht in den Beton hinein verlaufen. Bei einer üblichen Schadensaufnahme wird die Rissöffnung an der Oberfläche gemessen; ein Schluss auf die Risstiefe ist naturgemäß nicht genau möglich.

Eine Möglichkeit, senkrecht zur Betonoberfläche verlaufende Risse mit Ultraschall nachzuweisen, besteht in der Anregung von Wellen, die sich parallel zur Oberfläche ausbreiten. Im Rahmen von Forschungsarbeiten wurden dafür Vorversuche zur Ermittlung der Machbarkeit durchgeführt. Für eine schnelle, automatisierte Messung wurden hier luftgekoppelte Ultraschallwandler bei 100 kHz eingesetzt, die bei schrägem Einfall eine Welle unter der Oberfläche anregen und die abgestrahlte Welle genauso aufnehmen. Beide Prüfköpfe werden parallel am mobilen Zwei-Achs-Scanner geführt, der die Betonoberfläche in einem Messraster von 2 cm x 2 cm abtastet. Je nach Risstiefe werden die Wellen unterschiedlich geschwächt, so dass sich aus der Amplitude die Risstiefe abschätzen lässt.

Bild 8 zeigt ein Messergebnis an einem Ausschnitt von 70 cm x 70 cm einer Bodenplatte aus Beton. Kleinere Amplituden und damit größere Risstiefen zeigen sich als dunklere Farben. Man kann flache Rissnetze an der Oberfläche und tiefere Risse deutlich unterscheiden und den Rissverlauf verfolgen. Es wird erwartet, dass sich die Methode zur Messung von Risstiefen bis ca. 10 cm eignet; in weiteren Messungen sollen dafür tiefere Frequenzen eingesetzt werden.

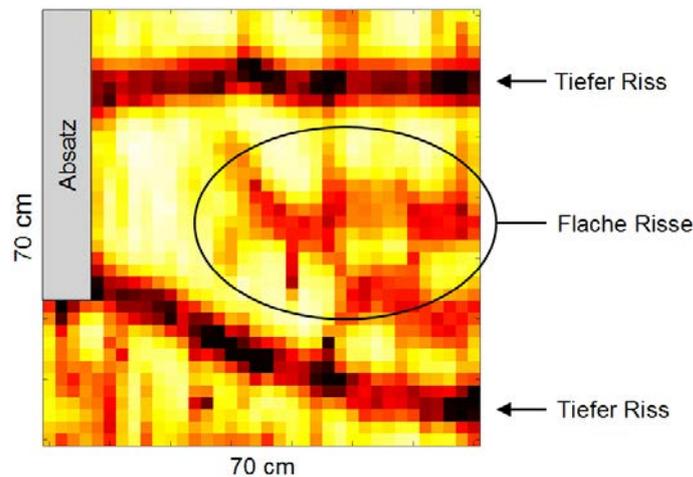


Bild 8. Ergebnis der berührungslosen Abbildung von Oberflächenrissen in einer Betonplatte

Danksagung

Der Autor dankt Herrn U. Tümmeler (MFGPA Weimar) für die Mitwirkung an den Messungen.

Referenzen

- [1] M. Schickert.: Automatisiertes Ultraschall-Abbildungssystem zur zerstörungsfreien Untersuchung von Betonbauteilen. *Sonderheft „Messtechnik im Bauwesen“*. Berlin: Ernst & Sohn, 2011, S. 93–96.
- [2] A. Taffe, Th. Kind, M. Stoppel, J.H. Kurz: Bauwerkscanner zur automatisierten und kombinierten Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen. *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2011), S. 267–276.
- [3] M. Schickert, M. Krause: Ultrasonic Techniques for Evaluation of Reinforced Concrete Structures. In: C. Maierhofer, H.-W. Reinhardt, G. Dobmann (Eds.): *Non-destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures. Vol. 2: Non-destructive Testing Methods*. Cambridge: Woodhead, 2010, pp. 490–530.
- [4] 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, S. 479–595.

- [5] 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.