



# Bauwerksdiagnose durch mechanisierte Ultraschallmessungen

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

**Kurzfassung.** Ultraschall-Abbildungsverfahren ermöglichen die zerstörungsfreie Diagnose von Betonbauteilen. Vor allem die SAFT-Rekonstruktion (*Synthetic Aperture Focusing Technique*) eignet sich zur detaillierten Darstellung von inneren Objekten wie Konstruktionselementen, Einbauteilen und Fehlstellen, die sich so nachweisen und in ihrer Position bestimmen lassen.

Dadurch entstehen neue, zerstörungsfreie Prüfmöglichkeiten für das Bauwesen, die bisherige Prüfverfahren ergänzen. Der Beitrag zeigt, wie dies effektiv durch mechanisierte Messsysteme geschehen kann, für die nur ein einseitiger Zugang zum Bauteil erforderlich ist. Die Messung läuft mit Hilfe eines Scanners mit 0,8 m x 1 m Messfläche automatisch ab; mehrere Messbereiche lassen sich koppeln. Je nach Oberflächenqualität und Untersuchungsziel kommen dabei unterschiedliche Ankopplungsverfahren wie Wasser-, Trocken- und Luftankopplung zum Einsatz.

Die Messungen werden durch die SAFT-Rekonstruktion zu hochauflösenden Bildern des Betonbauteils verarbeitet und zwei- oder dreidimensional dargestellt. Die Ergebnisse können zur Qualitätssicherung und Schadensanalyse eingesetzt werden.

Im Beitrag werden die automatisierte Messtechnik sowie Funktion und Einsatz der am Institut entwickelten SAFT-Rekonstruktion anwendungsorientiert erläutert. Beispiele von Untersuchungen an Hüllrohren und in Estrich zeigen die Anwendungsmöglichkeiten.

## 1 Einführung

Zur Qualitätssicherung oder Schadensanalyse beim Bau, nach Fertigstellung oder während des Betriebes von Betonbauwerken ist häufig eine eingehende Untersuchung einzelner Bauteilbereiche notwendig. Diese wird in der Regel visuell oder durch Entnahme von Bohrkernen durchgeführt.

Eine zerstörungsfreie Ergänzung bzw. Alternative bieten Echo-Verfahren zur Abbildung von Materialbereichen in Betonbauteilen [1]. Aufbauend auf der langen Tradition von Ultraschalluntersuchungen im Betonbereich [2] bieten sich insbesondere mechanisierte Ultraschallmessungen mit nachfolgender SAFT-Rekonstruktion (*Synthetic Aperture Focusing Technique*) an, um Einbauteile, Konstruktionselemente und Fehlstellen abzubilden und in ihrer Lage zu bestimmen. Dadurch werden Rückwände, Hüllrohre, Hohlräume, querliegende Risse, große Bewehrungseisen und Ablösungen sichtbar und können vermessen werden. Unter günstigen Bedingungen sind in Hüllrohren auch größere unverpreßte sowie durch Korrosion zerstörte Bereiche detektierbar. Für die Prüfung ist nur ein einseitiger Zugang zum Bauteil erforderlich.

Mit der mechanisierten Ultraschall-SAFT-Rekonstruktion steht ein hochentwickeltes zerstörungsfreies Prüfverfahren zur Verfügung, das dem Bauwesen neue Bereiche der Qualitätssicherung und Fehlerdiagnose erschließen kann. Es kann vor Ort, im Labor und in der Produktion eingesetzt werden und lässt sich an spezielle Aufgaben anpassen. Das Leistungsvermögen des Verfahrens wurde bereits bei manueller

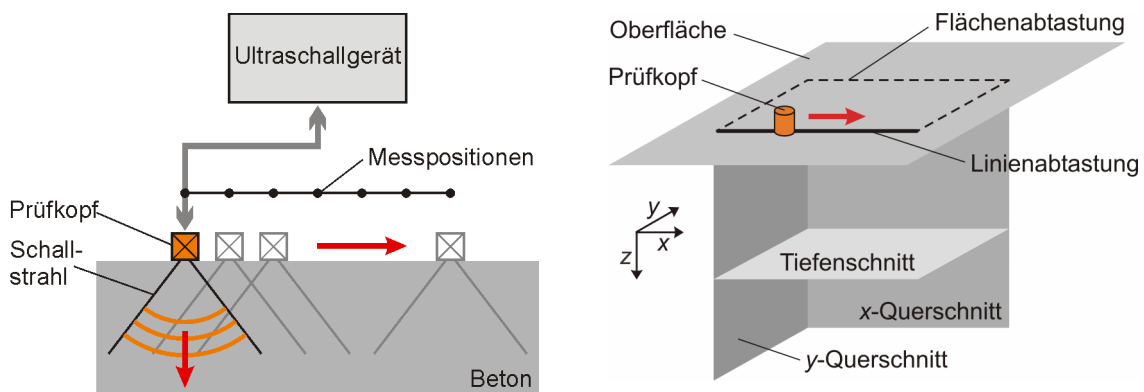
Datenaufnahme in mehreren Ringversuchen an Brückenteilen und Testkörpern nachgewiesen [3, 4].

Der Beitrag erläutert anwendungsorientiert Funktion und Einsatz der am Institut entwickelten SAFT-Rekonstruktion und des baustellene geeigneten Scanners. Messbeispiele illustrieren das Anwendungspotenzial des Verfahrens für die besonderen Prüfprobleme des Bauwesens wie die Hüllrohruntersuchung und die Ortung von Heizungsschläuchen in Estrich.

## 2 Abbildung durch Ultraschall-SAFT-Rekonstruktion

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 elektrische 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)

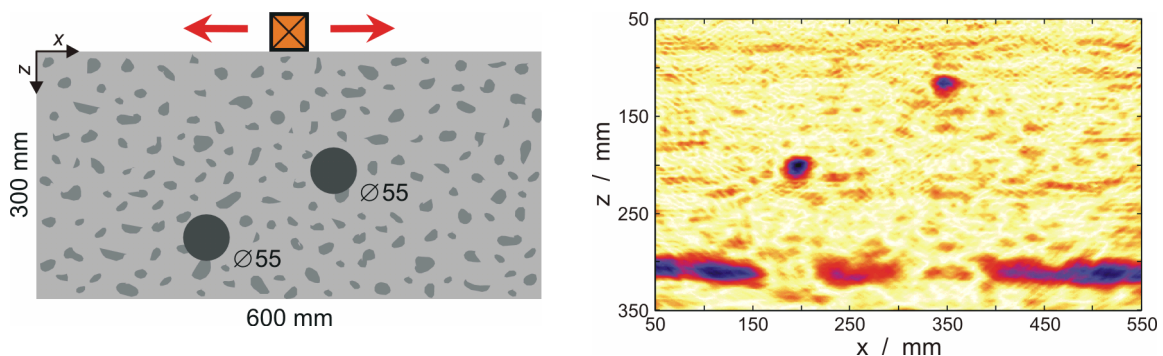
Ultraschall-Abbildungsverfahren nutzen den Informationsinhalt mehrerer Ultraschall-Echomessungen an unterschiedlichen Messpositionen, um daraus ein Bild des untersuchten Betonbereichs darzustellen. Die Messungen werden einseitig auf der Betonoberfläche auf einem linien- oder flächenförmigen Raster aufgenommen. Dazu werden die Prüfköpfe von Messung zu Messung zu den einzelnen Rasterpunkten verschoben. Dies geschieht vorzugsweise automatisiert durch einen Scanner. Ein spezielles Abbildungsverfahren ist die SAFT-Rekonstruktion (*Synthetic Aperture Focusing Technique*) [5, 6, 7]. Hier werden die Empfangssignale vor ihrer Darstellung durch eine kohärente Überlagerungsrechnung ähnlich der Tomographie verarbeitet. Das Resultat sind detaillierte und einfacher auszuwertende Bilder, in denen innere Objekte ortsrichtig dargestellt werden. Messungen auf einem Linienraster werden zu zweidimensionalen Bildern, Messungen auf einem Flächenraster zu dreidimensionalen Bildern rekonstruiert. Letztere können auch als Quer-, Längs- oder Tiefenschnitte dargestellt werden (Bild 1, rechts).

Allerdings wird der Ultraschallpuls im Beton nicht nur von den gesuchten Objekten, sondern auch am Zuschlag und an den Poren reflektiert. Dies führt zu einer Überlagerung

des Bildes mit einem Bildrauschen, das die Aussagekraft der SAFT-Rekonstruktionen 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. Die Bildqualität wird daher durch groben Zuschlag und hohe Porosität sowie eine große Abtastschrittweite, eine raue Oberfläche und eine große Tiefenlage im Bauteil beeinträchtigt. Weiterhin ist zu beachten, dass Ultraschall auch dünne Luftschichten nicht überwinden kann, wie sie z. B. zwischen Beton und einer Kunststoffbahn auftreten. Für die Übertragung der Ultraschallwellen vom Prüfkopf in den Beton und zurück ist deshalb eine Ankopplung notwendig.

Zur Illustration des grundlegenden Verhaltens der SAFT-Rekonstruktion wird der Testkörper aus Bild 2, links, verwendet. Der Testkörper aus Beton C20/25 mit einem Größtkorn von 8 mm besitzt Abmessungen von 30 cm x 30 cm x 60 cm und enthält zwei Bohrungen von 55 mm Durchmesser.

Auf der Oberseite des Testkörpers wurden 51 einzelne Ultraschallmessungen entlang einer Linie aufgenommen. Als Prüfkopf wurde ein Einzelwandler mit einem Frequenzbereich von 330 bis 680 kHz verwendet. In dem Resultat der SAFT-Rekonstruktion in Bild 2, rechts, zeigen zwei einzelne Anzeigen die Oberkanten der Bohrungen an. Die Rückwand wird als horizontale Linie abgebildet, die durch Abschattung der Bohrungen unterbrochen wird. Der Querschnitt des Testkörpers wird deutlich wiedergegeben, was das hohe Abbildungspotential der SAFT-Rekonstruktion unterstreicht. Die Abbildungsgenauigkeit beträgt hier unter optimalen Laborbedingungen in Quer- und Tiefenrichtung jeweils etwa 2 mm.



**Bild 2.** Querschnitt eines Testkörpers mit 2 Bohrungen (links) und 2D-SAFT-Rekonstruktion des Testkörpers (rechts)

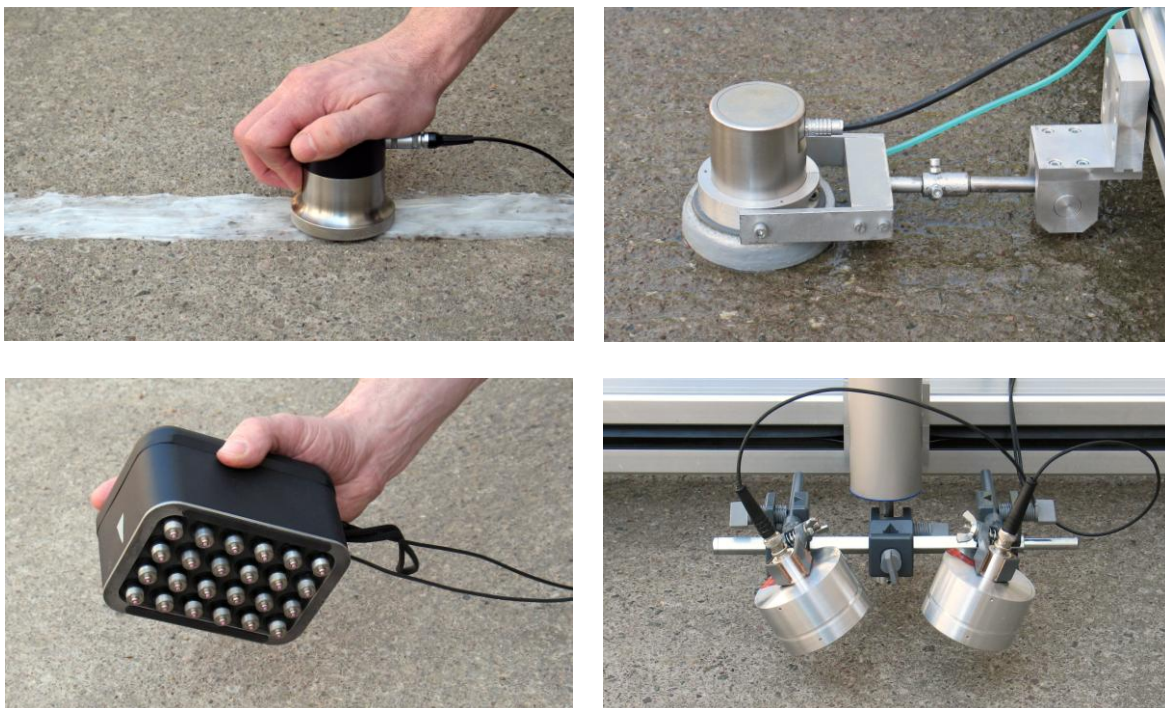
### 3 Prüfköpfe und Ankopplung

Die Ultraschall-Prüfköpfe bestimmen durch ihre Bauart und ihren Frequenzbereich maßgeblich den überdeckten Tiefenbereich und die Qualität der resultierenden Bilder. Generell können Prüfköpfe mit niedrigen Frequenzen Beton weiter und porigen Beton oder Beton mit grobem Zuschlag besser durchdringen, führen aber zu einer geringeren Bildauflösung.

Durch die Bewegung des Prüfkopfes zu den einzelnen Punkten des Abtastrasters entsteht die Notwendigkeit, den Prüfkopf wiederholt an den Beton anzukoppeln. Die Ankopplung muss eine gute und gleichbleibende Schallübertragung gewährleisten, wodurch die Ankopplungsmethode einen direkten Einfluss auf die Bildqualität sowie die Geschwindigkeit der Datenaufnahme hat. Da die Messzeit wesentlich größer ist als die

Rechenzeit zur SAFT-Rekonstruktion der Bilder, bestimmt die Ankopplung auch die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens. Derzeit werden überwiegend folgende Ankoppelmethode eingesetzt (Beispiele in Bild 3):

1. Viskoses Koppelmittel: Als Koppelmittel wird Vaseline, Honig oder ein anderes viskoses Koppelmittel verwendet. Die Methode gibt letztlich einen guten Kontakt, erfordert aber eine manuelle Handhabung und ist damit für größere Raster zu zeitaufwendig.
2. Wasserankopplung: Die Zuführung von Wasser als Koppelmittel ermöglicht ein Verschieben der Prüfköpfe auf dem Beton und damit eine zügige Datenaufnahme. Es ist eine schalglatte Oberfläche erforderlich.
3. Trockenankopplung: Prüfköpfe mit Kontaktspitzen oder kleinen Kontaktflächen benötigen kein Koppelmittel. Sind die Prüfköpfe als Arrays angeordnet und einzeln gelagert, sind auch raue Oberflächen prüfbar. Einschränkungen bestehen derzeit hinsichtlich des Auflösungsvermögens; zudem müssen die Prüfköpfe rechtwinklig zur Oberfläche abgehoben werden, was die Scan-Zeit erhöht.
4. Luftankopplung: Durch technische Verbesserungen bei Prüfköpfen und Ultraschallgeräten ist die kontaktlose Ankopplung über Luft prinzipiell möglich geworden. Es besteht aber noch Forschungsbedarf, um die technischen Probleme bei einseitigen Messungen zu lösen. In Aussicht stehen eine höhere Scan-Geschwindigkeit und eine geringere Abhängigkeit von der Oberflächenqualität.



**Bild 3.** Ankopplung von Prüfköpfen: Manuelle Kopplung mit Vaseline als Koppelmittel (oben links), automatische Abtastung mit Wasserankopplung (oben rechts), Prüfkopfarray für Trockenankopplung (unten links), kontaktlose automatische Abtastung mit Luftankopplung (unten rechts)

#### 4 Messsysteme

Ist die ungefähre Lage eines Objektes in einem Betonbauteil bekannt, reichen meist einige Messungen aus, um das Objekt aufzufinden und seine Koordinaten zu bestimmen. Derartige Messungen können von Hand durchgeführt werden. Zur flächendeckenden Untersuchung eines ganzen Bauteilbereichs muss die Oberfläche des Bauteils abgerastert

werden. Für die detaillierte Untersuchung eines Quadratmeters sind beispielsweise 2.500 bis 10.000 Einzelmessungen erforderlich. Dies lässt sich nur noch automatisiert durchführen. An der MFPA wurde deshalb ein Scannersystem entwickelt, das die Ultraschallprüfköpfe sukzessive auf die Messpunkte positioniert und die Messungen automatisiert aufnimmt.

Der Scanner ist für horizontale und vertikale Flächen bis zu 1 m x 0,8 m ausgelegt. Größere Bereiche können durch Versetzen des Scanners abgearbeitet werden. Das Gerät ist sowohl für die dreiachsige Positionierung mit Trockenankopplung ausgelegt, bei der der Prüfkopf senkrecht zu Oberfläche abgehoben und aufgesetzt werden muss (Bild 4), als auch zur zweiachsigen Positionierung mit Wasserankopplung (Bild 5) und Luftankopplung. Für hohe Positioniergenauigkeiten werden alle drei Achsen mit Schrittmotoren angetrieben. Die Abtastgeschwindigkeit von Flächen liegt bei einer Schrittweite von 2 cm und Trockenankopplung bei 0,5 m<sup>2</sup>/h, bei Wasserankopplung bei 0,8 m<sup>2</sup>/h. Die Abtastung einzelner Linien von 1 m Länge ist mit 2 bis 3 min wesentlich schneller. Die Anlage lässt sich von zwei Personen auf Baustellen transportieren und ist in 20 min betriebsbereit.



**Bild 4.** Messsystem und Scanner im 3D-Betrieb mit Trockenankopplung

SAFT-Rekonstruktionen können direkt vor Ort oder später im Labor durchgeführt werden. Dabei liegen die Rechenzeiten im Bereich von 1 s für zweidimensionale Bilder bis zu mehreren Stunden für dreidimensionale Bilder in feiner Auflösung. Die Prüfbarkeit von Beton ist meist bis 60 cm Dicke und Größtkorn 16 mm gut. Abhängig von Größtkorn und Tiefe können Objekte ab einem Durchmesser von etwa 1 bis 5 cm detektiert werden. Die Abbildungsgenauigkeit bei Vor-Ort-Messungen hängt stark von den Einsatzbedingungen ab. Sie beträgt im Allgemeinen in Tiefenrichtung 1 bis 2 cm und in Querrichtung 1 bis 4 cm. Einschränkungen bestehen vor allem bei rauer Oberfläche, Größtkorn ab 32 mm, porigem oder sonst minderwertigem Beton und enger Bewehrung ab 75 mm Maschenweite.



**Bild 5.** Scanner im 2D-Betrieb mit Wasserankopplung

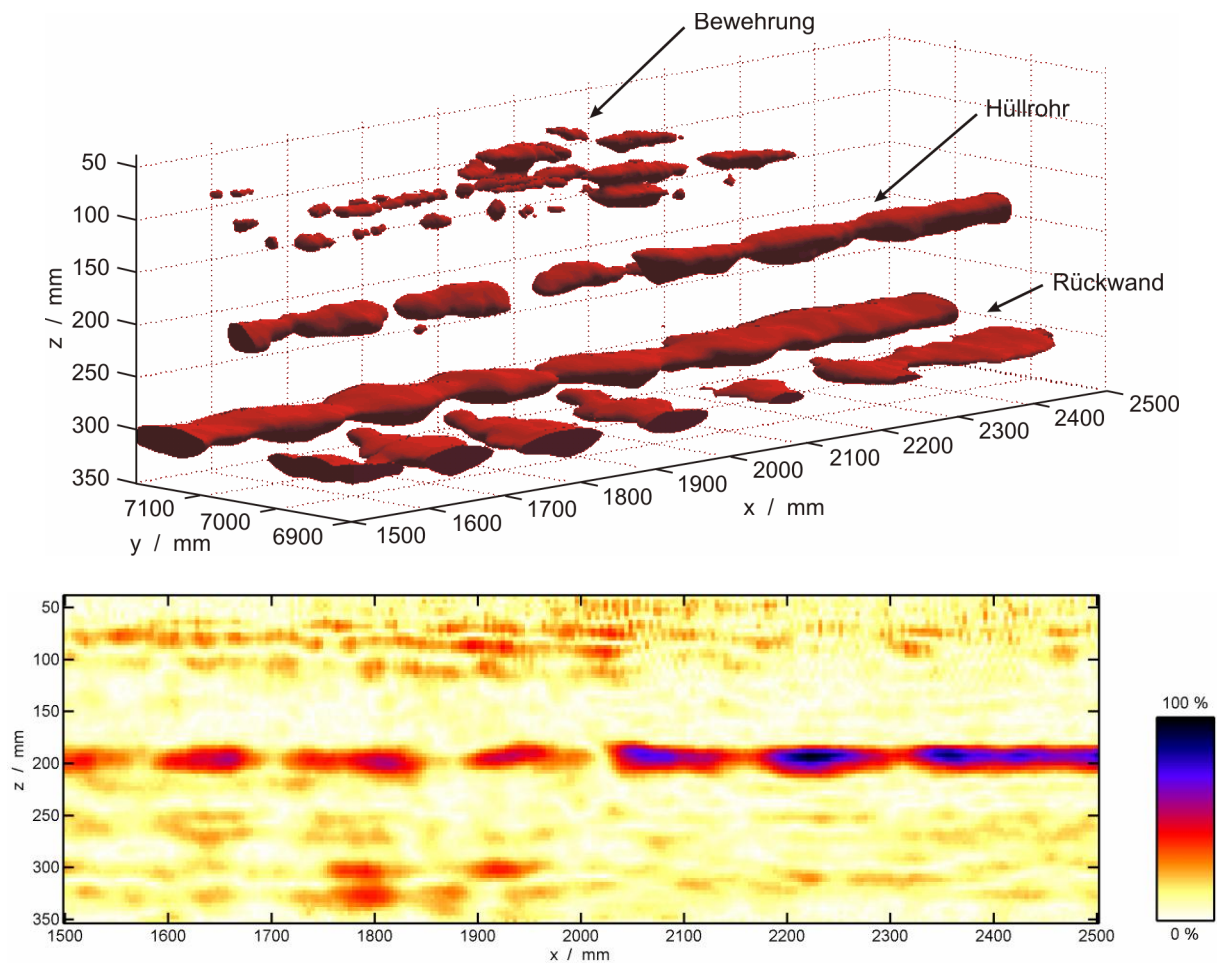
## 5 Anwendungsbeispiele

### 5.1 Abbildung von Hüllrohren im Betoninnern

Der Anwendungsbereich mechanisierter Ultraschallmessungen liegt vor allem in der hochauflösenden Darstellung des Volumens von Betonbauteilen. Aus dreidimensionalen Volumenbildern oder zweidimensionalen Schnittbildern können Objekte detektiert und lokalisiert werden. Als Beispiel wird hier die Untersuchung eines Hüllrohrs gezeigt, das einen künstlichen Verpressfehler enthält. Dazu wurde ein 1 m x 0,4 m x 0,3 m großer Bereich im Testkörper „GBP“ der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) mit Wasserankopplung untersucht (Bild 5).

Das dreidimensionale Datenfeld der SAFT-Rekonstruktion wird als Volumen visualisiert, indem Punkte einer gewählten Amplitude durch Oberflächen verbunden werden. Im Ergebnis in Bild 6, oben, ist das Hüllrohr mit einer Überdeckung von 18,3 cm zu erkennen. Die oberflächennahe schlaffe Bewehrung führt zu Abschattungen, die als Einschnürungen oder sogar scheinbare Unterbrechungen des Hüllrohrs sichtbar werden. Die in ihrem Verlauf unterschiedliche Dicke der Hüllrohranzeige deutet auf unterschiedliches Reflexionsverhalten und damit unterschiedliche Verfüllung hin. Die untere Anzeige gehören zu der Rückwand bei  $z = 30$  cm. Das Hüllrohr schattet die Rückwandanzeige ab und teilt sie dadurch längs. Die Abschattung durch die oberflächennahe schlaffe Bewehrung führt wiederum zu Einschnürungen und Unterbrechungen der Rückwandanzeige. Während der Auswertung kann das Bild zur besseren Übersicht am Rechner in allen Richtungen gedreht werden. Derartige Volumenbilder bieten einen schnellen Überblick über den rekonstruierten Betonbereich.

In einem zweidimensionalen Schnitt durch das Rekonstruktionsvolumen ist in Bild 6, unten, das Hüllrohr im Längsschnitt zu sehen. Diese Darstellung eignet sich besser zur genauen Interpretation und zum Ausmessen der Bildanzeigen. Der Interpretation derartiger Bilder erfordert in jedem Fall Einsicht in den Entstehungsprozess, um die Darstellungen richtig deuten zu können.



**Bild 6.** 3D-SAFT-Rekonstruktion eines Hüllrohrs mit künstlichem Verpressfehler nach Flächenabtastung mit Wasserankopplung: 3D-Ansicht (oben) und Längsschnitt (unten)

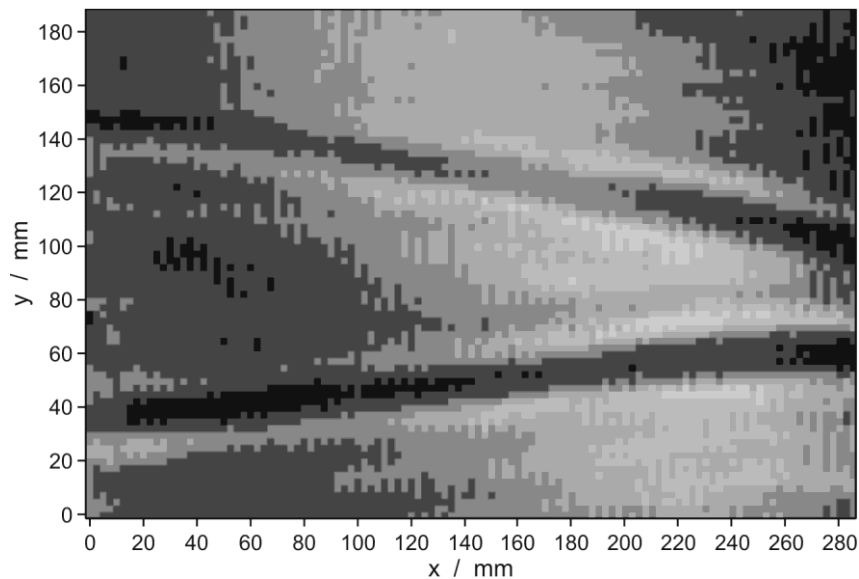
## 5.2 Abbildung von Heizungsschläuchen in Estrich

Die Luftankopplung ist bei Ultraschallmessungen erst in jüngster Zeit durch Verbesserungen im Prüfkopfbau realisiert worden. Sie ermöglicht durch kurze Messzeiten neuartige Anwendungen bei Verwendung unterschiedlicher Wellenarten. In Kooperation mit dem Ingenieurbüro Dr. Hillger wurde ein Estrich-Testkörper mit einem zweidimensionalen Scanner in Luftankopplung untersucht. Der Testkörper enthielt luftgefüllte Heizungsschläuche in einer V-förmigen Anordnung (Bild 7).



**Bild 7.** Seitenansicht des Estrichtestkörpers mit Heizungsschläuchen

Bild 8 zeigt als Messergebnis einen Bereich des Tiefenschnitts durch die Messdaten, in dem zwei der Heizungsschläuche abgebildet sind. Weitere Forschungsarbeiten zur Luftankopplung werden gegenwärtig durchgeführt.



**Bild 8.** Tiefenschnitt durch einen Estrich-Testkörper mit V-förmig eingelegten Heizungsschläuchen, aufgenommen mit luftgekoppeltem Ultraschall

## Danksagung

Der Autor dankt Herrn U. Tümmler für die Mitarbeit bei dem Aufbau des Scanners und den Ultraschallmessungen. Herr Dr. Bühling vom Ingenieurbüro Dr. Hillger wirkte bei den Messungen mit luftgekoppeltem Ultraschall mit. Ein großer Teil der Untersuchungen wurde von der Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Forschergruppe FOR384 gefördert, in der sieben Institute und Forschungseinrichtungen in den Jahren 2001 bis 2007 gemeinsam am Thema „Zerstörungsfreie Strukturbestimmung von Betonbauteilen mit akustischen und elektromagnetischen Echo-Verfahren“ forschten.

## 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. Schickert (invited): „Ultrasonic NDE of Concrete“; 2002 IEEE Ultrasonics Symposium, München, 9.–11.10.2002. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2002, Vol. 1, 718–727.
- [3] M. Schickert: „Impulsecho mit B-Bild-Darstellung und LSAFT-Rekonstruktion“; in: 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, 82–88.
- [4] M. Schickert: „Ultraschallecho mit linearer Abtastung und 2D-Rekonstruktion“; in: M. Krause, H. Wiggenhauser, J. Krieger (Hrsg.): *Materialtechnische Untersuchung beim Abbruch der Talbrücke Haiger*; Bericht zum Forschungsprojekt 86.017/2000. Bergisch-Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft B 38, 2002, 61–70.
- [5] M. Schickert: „Towards SAFT-Imaging in Ultrasonic Inspection of Concrete“; International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlin, 26.–28.9.1995. Berlin: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 1995, 411–418.
- [6] 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.
- [7] 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.