



Ultraschall-Linienarray zur Untersuchung von Betonbauteilen

Martin FRIESE, Frank MIELENTZ, Herbert WIGGENHAUSER,
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

Kurzfassung. Ein neues Ultraschallverfahren für die Untersuchung von Betonbauteilen wird vorgestellt. Es beruht auf der Technik eines Linienarrays und bietet die Möglichkeit der sofortigen bildgebenden Auswertung. In diesem Beitrag wird zunächst das Verfahrensprinzip erläutert. Anschließend wird die Anwendung des Verfahrens zur Untersuchung von Spanngliedern in Spannbetonbauwerken gezeigt. Durch die Nutzung der speziellen Array-Technik können für Handmessungen Messzeiten erreicht werden, die bisher nur mit automatisierten Mess-Systemen (Scannern) möglich waren.

Einführung

Das Ultraschall-Echo-Verfahren wird seit Jahren erfolgreich zur zerstörungsfreien Untersuchung von Betonbauteilen angewandt. Typische Problemstellungen sind die Bestimmung von Bauteildicken, die Ortung von Spanngliedern und von unverpressten Bereichen in Hüllrohren sowie die Ortung von Kiesnestern [1].

Große Fortschritte konnten durch die Nutzung bildgebender Auswertungs-Algorithmen (Rekonstruktionsrechnung) erzielt werden. Durch eine spezielle Überlagerung der Messdaten aus verschiedenen Positionen von Sende- und Empfangsprüfkopf tritt das Nutz-Signal deutlicher aus dem Rauschen hervor als bei einer Einzelmessung. Außerdem lassen sich in der bildgebenden Darstellung Art und Lage der Reflektoren besser erkennen als bei einer Messung an nur einem Punkt.

Die für eine solche Rekonstruktionsrechnung erforderlichen Messdaten lassen sich beispielsweise durch flächige Messungen von Hand oder mit Hilfe eines automatisch arbeitenden Scanners erfassen [2]. Eine andere Möglichkeit, die die Technik eines Linienarrays mit bildgebender Rekonstruktionsrechnung erstmals für die Anwendung an Betonbauteilen adaptiert, wird hier vorgestellt.

1. Grundlagen

1.1. Das Ultraschall-Echo-Verfahren

Für Messungen mit dem Ultraschall-Echo-Verfahren werden mit Ultraschallköpfen an der Oberfläche des Bauteils elastische Wellen erzeugt, die sich im Bauteil ausbreiten. Diese Wellen werden an innenliegenden Grenzflächen (z. B. von Gesteinskörnungen, Bewehrungsstählen, Hüllrohren, Lufteinschlüssen) sowie an der Bauteilrückseite gestreut, reflektiert und gebeugt. Für die Wellenausbreitung ist die akustische Impedanz der

unterschiedlichen Materialien maßgebend, beispielsweise treten am Übergang von Beton zu Luft stärkere Reflexionen auf als am Übergang von Beton zu Stahl.

Als Messergebnis werden die Schalldrücke der zur Bauteiloberfläche zurück reflektierten Schwingungsimpulse über die Zeit erfasst. Aus den gemessenen Laufzeiten sind bei bekannter Schallgeschwindigkeit die Tiefenlagen reflektierender Objekte bestimmbar.

Für die Untersuchung von Betonbauteilen werden Ultraschall-Impulse mit Mittenfrequenzen im Bereich von 20 kHz bis 200 kHz genutzt. Diese Impulse werden piezoelektrisch mit einem elektrischen Spannungsimpuls erzeugt. Prinzipiell können sowohl Longitudinalwellen (Druckwellen) als auch Transversalwellen (Scherwellen) genutzt werden.



Abbildung 1 Ultraschall-Prüfkopfarray ACSYS M2502 [3] mit 24 einzelnen Punktkontakt-Prüfköpfen. Jeweils 12 sind parallel als Sender bzw. Empfänger geschaltet

Für die praktische Anwendung an Bauteilen aus Beton haben sich Punktkontaktprüfköpfe mit Trockenankopplung (Abbildung 1) bewährt. Diese haben den Vorteil, dass auf Koppelmittel wie Vaseline oder Glycerin verzichtet werden kann, die die Betonoberfläche verschmutzen oder beschädigen können.

1.2. Bildgebende Auswertung mit SAFT-Algorithmen

Bei einer Einzelmessung werden die vom Empfangsprüfkopf empfangenen Schwingungsimpulse über die Zeit erfasst und aufgezeichnet. Stellt man diese als Kurve dar, spricht man von einem A-Bild (Abbildung 2).

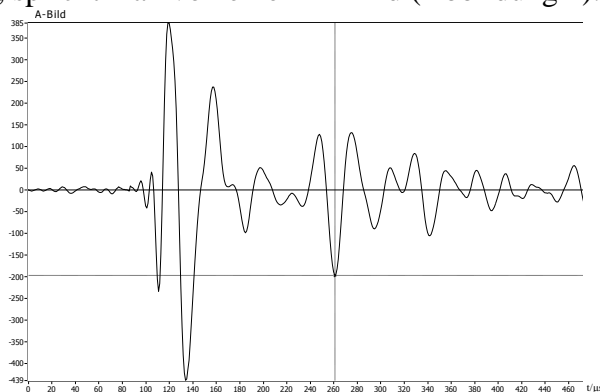


Abbildung 2 Ultraschall-A-Bild einer Messung an der Unterseite einer Fahrbahnplatte. Der markierte Peak bei 260 µs resultiert aus der Reflexion an der Bauteilrückseite

Werden mehrere Messungen entlang einer Linie durchgeführt und stellt man die Amplituden der dabei erhaltenen A-Bilder entlang einer Messstrecke farbcodiert dar, so entsteht ein so genanntes B-Bild (Abbildung 3). Da Ultraschall-Prüfköpfe für die Anwendung im Beton typischerweise keinen fokussierten Schallstrahl sondern einen Schallkegel ausstrahlen, dessen Öffnungswinkel vom Verhältnis der Wellenlänge zum Strahlerdurchmesser abhängt, werden auch Objekte, die sich seitlich der aktuellen Messposition befinden, erfasst und erscheinen im B-Bild als Hyperbeln.

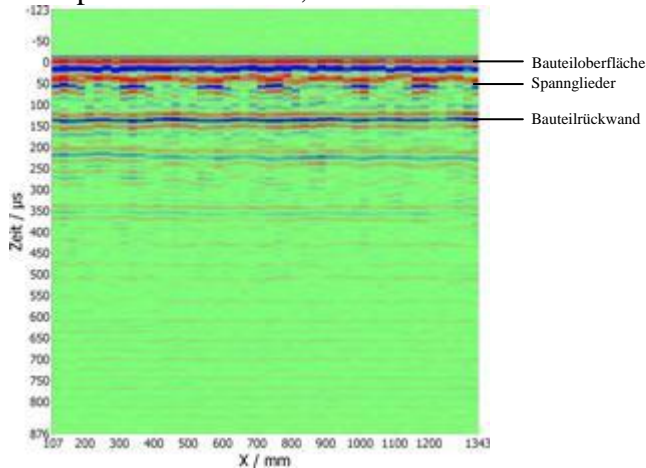


Abbildung 3 Ultraschall-B-Bild einer Messung an der Unterseite einer Fahrbahnplatte. Die Querspannglieder sind als Hyperbeln sichtbar, dahinter ist die Bauteilrückwand erkennbar.

Zur Verbesserung des Signal-/Rausch-Verhältnisses und bildgebenden Darstellung der Ergebnisse können die Ultraschall-Messdaten mit einem Rekonstruktionsalgorithmus ausgewertet werden. Hierzu ist es erforderlich, dass Messdaten von einer Vielzahl unterschiedlicher Sender- und Empfänger-Positionen vorliegen. Für die Rekonstruktionsrechnung wird das Bauteilvolumen unterhalb der Messfläche in gleich große Volumenelemente unterteilt. Die Messkurven werden für jedes Volumenelement um die Laufzeit korrigiert, die der Abstandsänderung des Volumenelements zum Sender und Empfänger entspricht [4].

Anschließend werden die zu den Volumenelementen gehörenden Anteile der Messkurven der zahlreichen Sender-Empfänger-Kombinationen im Bauteil überlagert. Der Nachteil von Ultraschallprüfköpfen, die in ihrer Abstrahlcharakteristik einen großen Öffnungswinkel aufweisen, kehrt sich dabei in den Vorteil um, dass jedes Volumenelement des Bauteils aus verschiedenen Richtungen beschallt wird.

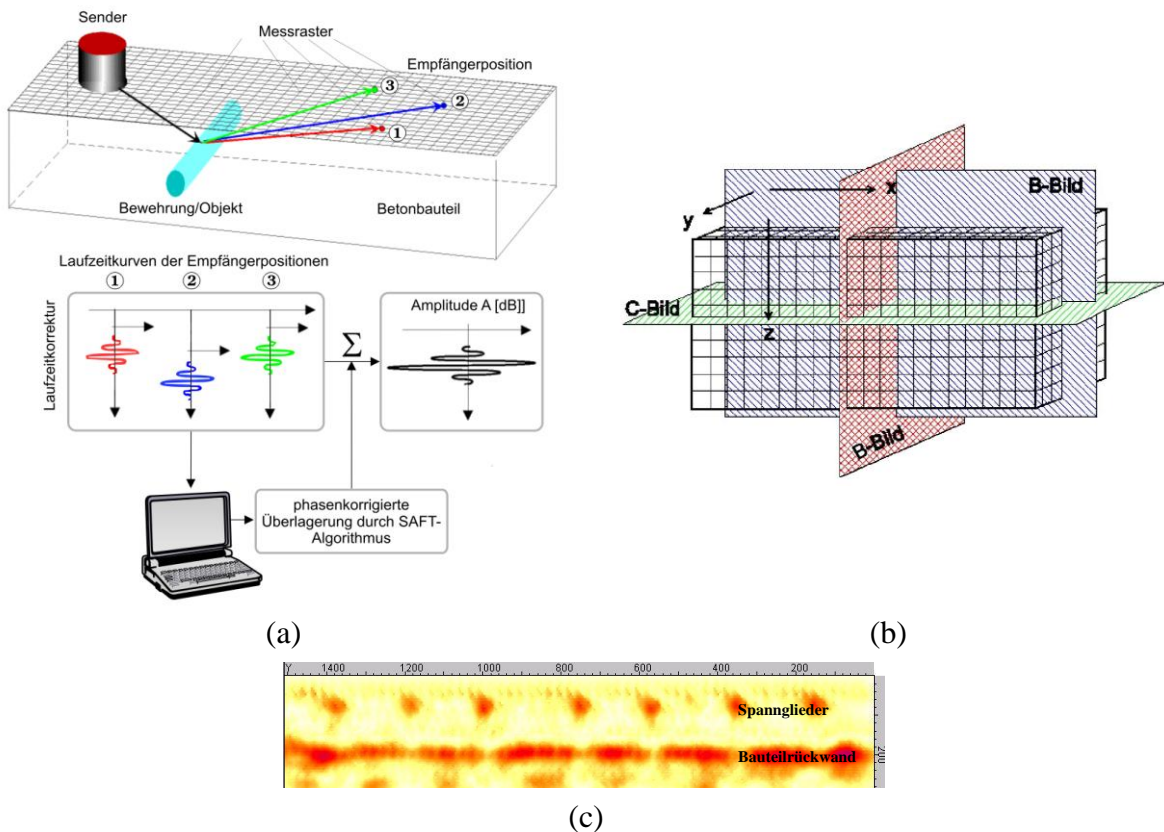
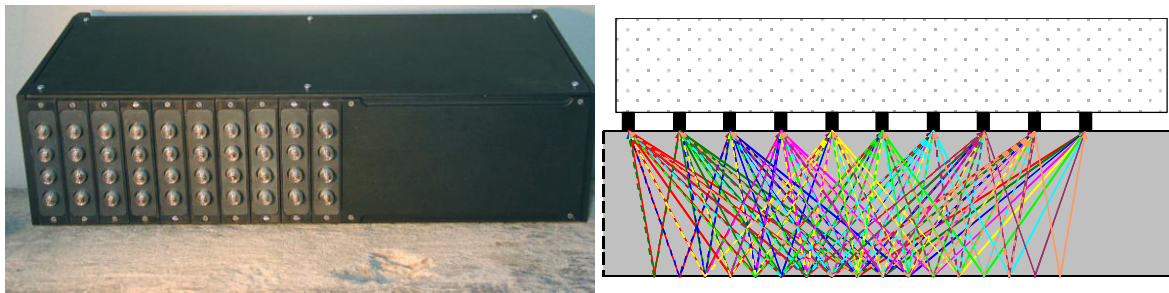


Abbildung 4 (a) Prinzip des SAFT-Algorithmus. (b) 3D-Datensatz mit verschiedenen Schnittebenen rechtwinklig (B-Bilder) und parallel zur Oberfläche (C-Bilder). (c) SAFT-B-Bild der Messung aus Abbildung 3. Deutlich erkennbar sind die Querspannglieder in einer Tiefe von 55 mm und die Bauteilrückwand in einer Tiefe von 200 mm

Die Rauschanteile heben sich wegen ihrer statistisch regellosen Phasenlage teilweise auf. Die Signalanteile des wirklichen Reflektors, z. B. eines Bewehrungsstabs oder der Bauteilrückwand, überlagern sich konstruktiv und werden so als Anzeige ablesbar. Dieses in Abbildung 4a dargestellte Prinzip liegt den sogenannten SAFT-Algorithmen (Synthetic Aperture Focusing Technique) zu Grunde. Das Ergebnis der SAFT-Rekonstruktion ist ein 2D- (z. B. Linien-Array an einer Messposition) oder 3D-Datensatz (Messung auf einer Fläche) und kann in Form von zweidimensionalen Schnitten (Abbildung 4b) oder dreidimensionalen Ansichten dargestellt werden [5],[6].

1.3. Funktionsweise des Linienarrays

Bei einem Linienarray sind mehrere Prüfköpfe oder Prüfkopfmodule entlang einer Linie angeordnet. Diese Prüfköpfe bzw. Prüfkopfmodule werden sequentiell so angesteuert, dass jedes Modul genau einmal als Sender (wobei alle anderen Module parallel als Empfänger agieren) und sonst als Empfänger arbeitet. So erhält man bei einer Messung gleich mehrere Messkurven aus unterschiedlichen Sender- und Empfängerpositionen, aus denen mit geeigneter Software sehr schnell ein zweidimensionales B-Bild rekonstruiert werden kann. Führt man mehrere Messungen entlang einer Linie durch, wobei das Array parallel verschoben wird, lassen sich aus den so gewonnenen Daten schnell ein dreidimensionales Abbild des Rekonstruktionsraumes bzw. entsprechende B- und C-Bilder erzeugen.



(a) (b)
Abbildung 5 (a) Ultraschall-Linienarray und (b) Prinzip des Messvorgangs mit diesem Gerät

Das in gemeinsamer Arbeit von BAM und der Herstellerfirma ACSYS entwickelte Linienarray A1040 „Polygon“ (Abbildung 5) wurde speziell für die Untersuchung von Betonbauteilen entwickelt [7]. Es besteht aus 8 bis 16 Prüfkopfmodulen, die in einer Reihe angeordnet sind. Jedes Prüfkopfmodul besteht aus 4 Einzelprüfköpfen, die eine breitbandige Charakteristik bei einer Mittenfrequenz von 50 kHz aufweisen und mit Transversalwellen arbeiten. Die Transversalwellen sind dabei senkrecht zur Array-Achse polarisiert. Die Prüfköpfe sind einzeln federnd gelagert, womit gewisse Unebenheiten der Oberfläche ausgeglichen werden können.

Eine Besonderheit dieses Linienarrays ist, dass die Digital-Analog-Umsetzung direkt in den Prüfkopfmodulen stattfindet. Zwischen den Prüfkopfmodulen und dem ins Gerät eingebauten Steuerungsmodul werden nur digitale Daten übertragen, ebenso zwischen Steuerungsmodul und dem per Netzkabel mit dem Linienarray verbundenen Computer.

Während des Betriebs ist das Linienarray per Netzkabel mit einem Computer verbunden, an dem die Messparameter eingestellt werden und die Rekonstruktionsrechnung ausgeführt wird. Die jeweiligen Messungen können dabei sowohl durch Betätigung eines Tasters am Gerät als auch vom Computer aus ausgelöst werden.

2. Ausgewählte Ergebnisse

Im Folgenden werden einige Ergebnisse, die bei Messungen mit dem Linienarray an Probekörpern sowie an Spannbetonbrücken gewonnen wurden, vorgestellt. Weitere Anwendungsbereiche, zum Beispiel die Untersuchung von Rissen, sind Gegenstand der Forschung an der BAM.

2.1. Probekörper mit Hüllrohr und Hohlstellen

Der Probekörper „BAM.NB.FBS1“ wurde im Rahmen der Beteiligung der Fachgruppe am Forschungsvorhaben „Zerstörungsfreie Strukturbestimmung von Betonbauteilen mit akustischen und elektromagnetischen Echo-Verfahren“ (DFG Forschergruppe 384) hergestellt. Der Betonquader mit den Abmessungen 2,00 m x 1,50 m x 0,50 m wurde mit diversen Einbauteilen (mehrere Styroporkugeln, die Hohlstellen unterschiedlicher Größe simulieren sowie ein metallisches Hüllrohr, das im mittleren Bereich planmäßig unverfüllt ist) versehen. Um den Einfluss der Bewehrung auf das Messergebnis zu untersuchen, wurde eine Hälfte des Probekörpers schwach bewehrt (\varnothing 12/15 kreuzweise), die andere Hälfte

blieb ohne Bewehrung [4]. In Abbildung 6 sind Konstruktionszeichnungen und Ergebnisse der Hüllrohr-Untersuchung mit dem Linienarray dargestellt.

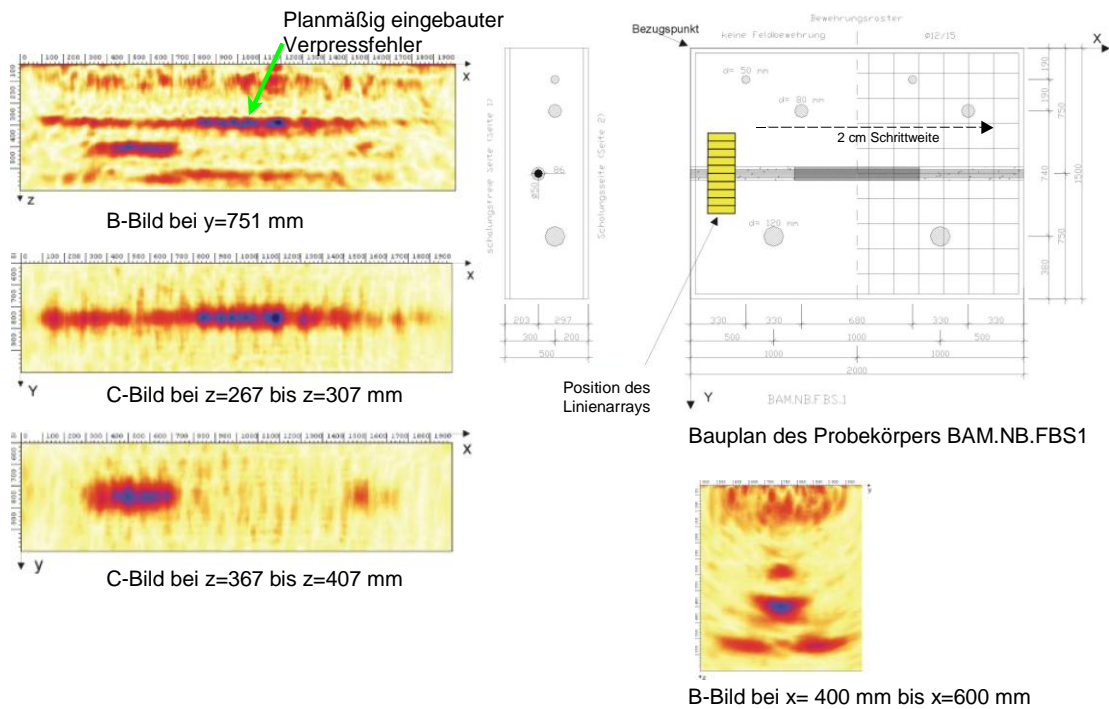


Abbildung 6 Ergebnis der Messungen mit dem Linienarray am Probekörper BAM.NB.FBS1, ausgewertet mit einem Rekonstruktionsprogramm des Fraunhofer IZFP

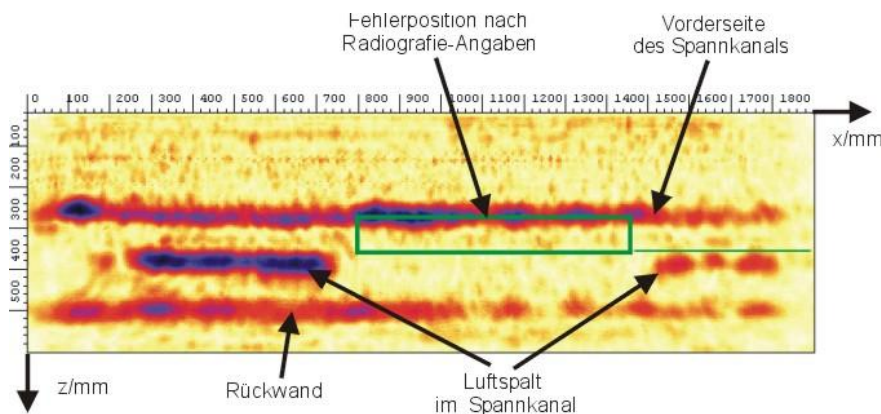


Abbildung 7 Ergebnis der Messungen mit Scanner und Prüfkopfarray ACSYS M2502, ausgewertet mit einem Rekonstruktionsprogramm des Fraunhofer IZFP. Dargestellt ist ein B-Bild im Bereich des Hüllrohrs.

Vergleicht man die Ergebnisse der mit dem Linienarray durchgeführten Messung mit denen, die mit herkömmlichen Prüfköpfen unter Zuhilfenahme des Scanners zustande kamen (Abbildung 7), ist festzustellen, dass das Hüllrohr mit seinen Fehlstellen mit beiden Verfahren gleichermaßen gut abgebildet wird. Auffällig bei den Linienarray-Ergebnissen sind jedoch starke Störungen im oberflächennahen Bereich, die daraus resultieren, dass sich die von den Prüfköpfen erzeugte SH-Welle (horizontal polarisierte Scherwelle) nicht nur im Bauteilvolumen sondern auch an dessen Oberfläche ausbreitet und aufgezeichnet wird. Nutzt man einen Algorithmus, der diese Störsignale dämpft, lassen sich die Ergebnisse deutlich verbessern, wie aus Abbildung 8 ersichtlich ist.

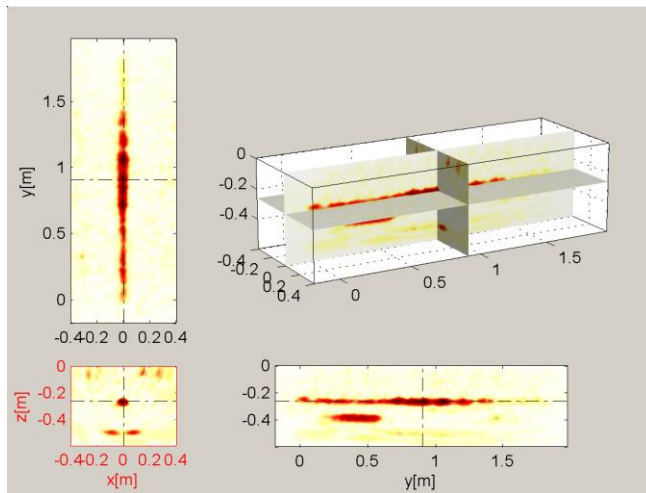


Abbildung 8 Ergebnis der Messungen mit dem Linienarray, ausgewertet mit einem an der Universität Kassel entwickelten Algorithmus

2.2. Querträger einer Spannbetonbrücke

Im Rahmen eines BAM-Forschungsvorhabens wurden umfangreiche Untersuchungen an einer in den 50er Jahren errichteten Spannbetonbrücke vorgenommen. Unter anderem wurde in einem Blindtest ein Querträger dieser Brücke unter Einsatz von Scannern untersucht, wobei die beiden dort vorhandenen Spannglieder der Quervorspannung detektiert und lokalisiert wurden. Diese Spannglieder waren ebenfalls Gegenstand von Handmessungen mit dem Linienarray. Für diese Handmessungen wurde der mit den automatisierten Messungen ermittelte Verlauf der Spannglieder auf das Bauteil übertragen. Das Linienarray wurde quer zur Spanngliedachse angekoppelt und dann in Richtung der Spanngliedachse verschoben. Der Zeitaufwand für die Handmessungen mit dem Linienarray (2 Linien der Länge 1,30 m, Messpunktabstand 2 cm) war vergleichbar mit dem für die automatisierte Messung (Messfläche 1,25 m x 0,55 m, Messraster 2,5 cm x 2,5 cm) mit einem Ultraschall-Prüfkopf.

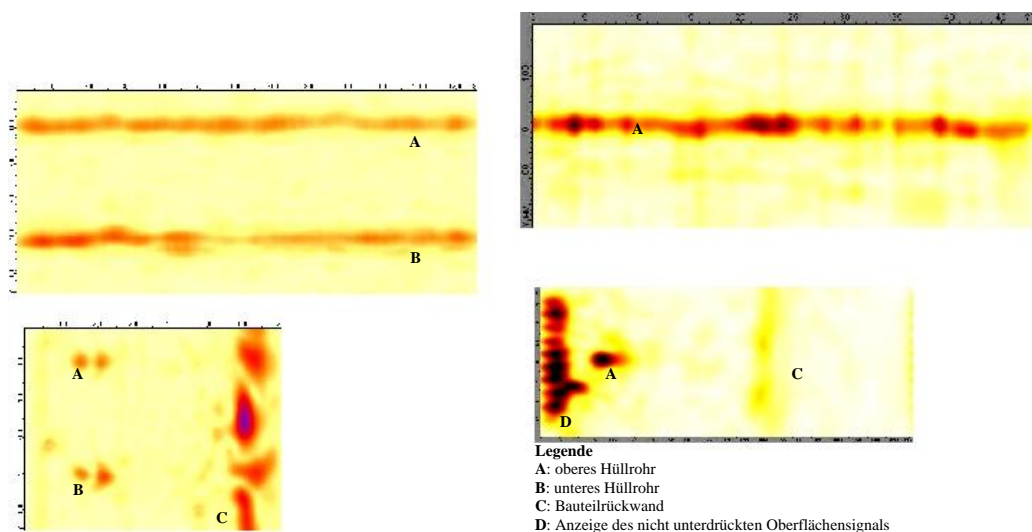


Abbildung 9 Querträger einer Spannbetonbrücke. links: Ergebnis der Scannermessung mit Prüfkopffarray ACSYS M2502, rechts: Ergebnis der Handmessungen mit dem Linienarray (oberes Hüllrohr), ausgewertet mit der vom Hersteller bereitgestellten Software. Dargestellt sind jeweils C-Bild (oben) und B-Bild (unten)

In Abbildung 9 sind Scannermessung und Messung mit dem Linienarray vergleichend gegenübergestellt. Das Hüllrohr kann mit beiden Verfahren eindeutig sowohl hinsichtlich seiner lateralen als auch seiner Tiefenlage geortet werden. Die Rückwand des ca. 60 cm dicken Querträgers ist ebenfalls bei beiden Messverfahren erkennbar, beim Linienarray ist das Rückwandssignal allerdings prinzipbedingt (beim am Scanner eingesetzten Prüfkopfarray senden und empfangen jeweils 12 Prüfköpfe, beim Linienarray senden und empfangen jeweils nur 4) schwächer. Dies kann aber durch eine entsprechende Verstärkung des Signals rechnerisch ausgeglichen werden.

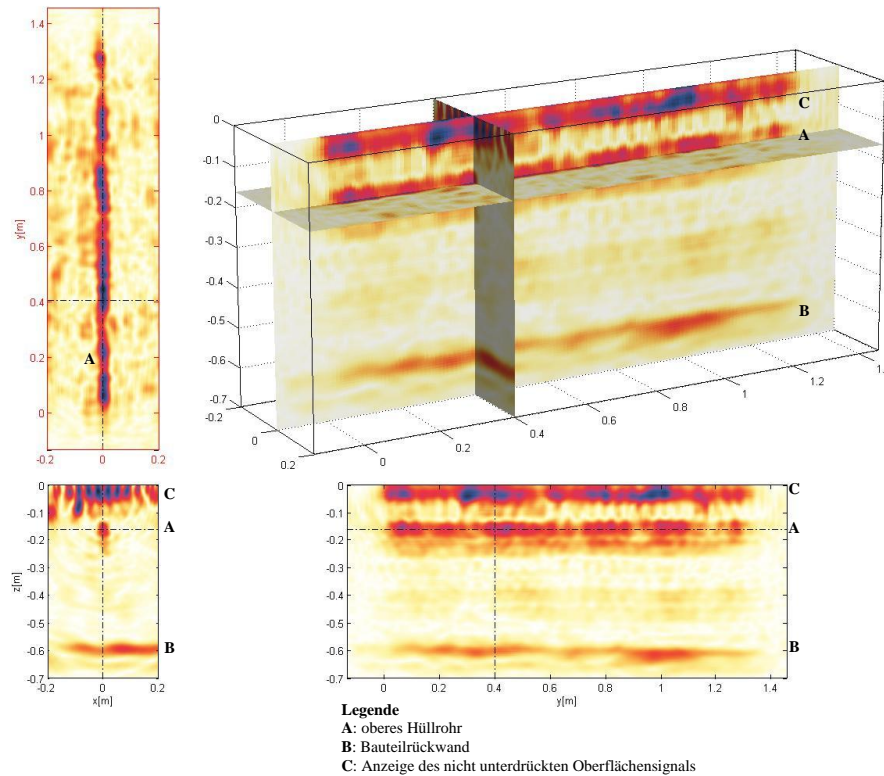


Abbildung 10 Querträger einer Spannbetonbrücke. Ergebnis der Messungen mit Linienarray (oberes Hüllrohr), ausgewertet mit einem an der Universität Kassel entwickelten Rekonstruktionsalgorithmus

Eine Bewertung der Phasenlage des rekonstruierten Ultraschall-Signals liefert deutlichere Hinweise auf das Vorhandensein von Verpressfehlern als eine Betrachtung der Amplituden [8].

Aufgrund der unterschiedlichen akustischen Impedanzen tritt bei einer Reflexion an der Grenzschicht Beton-Luft im Vergleich zu einer Grenzschicht Beton-Metall eine Phasenverschiebung, im optimalen Fall ein Phasensprung, auf. Bei den hier untersuchten Querspanngliedern lieferte eine Phasenauswertung keine eindeutigen Hinweise auf Verpressfehler. Abbildung 11 zeigt exemplarisch ein B-Bild mit Phasenauswertung.

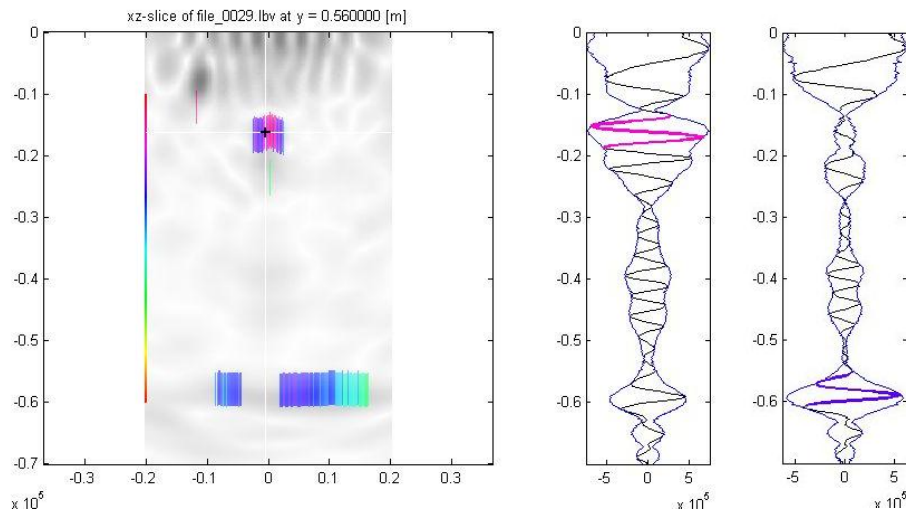


Abbildung 11 Querträger einer Spannbetonbrücke. Links: B-Bild mit Phasenauswertung, Mitte: Linienplot des rekonstruierten Ultraschallsignals im Bereich des Spannglieds, rechts: Linienplot des rekonstruierten Ultraschallsignals neben dem Spannglied

2.3. Steg einer Spannbetonbrücke

Eine weitere Prüfaufgabe, bei der das Linienarray zum Einsatz kam, war die Untersuchung einer Spannbeton-Bogenbrücke. Um die Brücke für den zunehmenden Verkehr zu ertüchtigen, ist eine Verstärkungsmaßnahme geplant, für die die Stege dieser Brücke durchbohrt werden müssen. Hierfür ist es erforderlich, die laterale Lage der in den Stegen in Bündeln verlegten Spannglieder zu kennen, um Beschädigungen der Spannglieder beim Bohren auszuschließen. Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten war eine automatisierte Messung nicht zweckmäßig. Es wurde stattdessen auf die Kombination zweier manuell angewandter Messverfahren gesetzt. In einem ersten Schritt wurden mit Hilfe des Radar-Verfahrens die jeweils oberflächennahen Spannglieder lokalisiert und die oberste Spanngliedlage markiert. Entlang dieser in den zu untersuchenden Bereichen nahezu horizontal verlaufenden Linien wurden dann Messungen mit dem Ultraschall-Linienarray durchgeführt, um zu überprüfen, ob weiter von der Oberfläche entfernte Spannglieder oberhalb der mit dem Radar-Verfahren lokalisierten obersten oberflächennahen Spannglieder liegen.

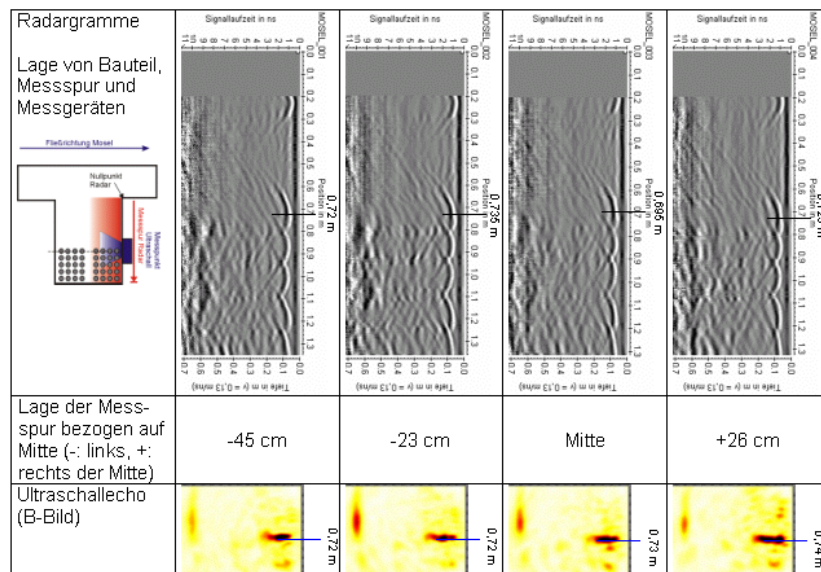


Abbildung 12 Steg einer Spannbeton-Bogenbrücke. Oben: Radargramme, unten: korrespondierende Ultraschall-B-Bilder.

Abbildung 12 zeigt exemplarisch die Ergebnisse der Untersuchung an einer der untersuchten Stellen. In den Ultraschall-Bildern ist die ca. 60 cm von der Messoberfläche entfernt liegende Rückwand klar abgebildet. Im Bereich oberhalb der mit dem Radar-Verfahren lokalisierten obersten Spanngliedlage sind weder Abschattungseffekte noch weitere Hüllrohre zu erkennen. Daher kann an dieser Mess-Stelle davon ausgegangen werden, dass sich die oberflächenferneren Spannglieder auf der selben Höhe oder unterhalb der mit dem Radar-Verfahren lokalisierten oberflächennahen Spannglieder befinden.

3. Zusammenfassung

Das Ultraschall-Verfahren ist ein leistungsfähiges zerstörungsfreies Prüfverfahren, das bei der Anwendung an Betonbauteilen sehr gute Ergebnisse zeigt. Durch fortschrittliche Array-Techniken und schnelle bildgebende Auswertung erhält der Anwender ein praxisgerechtes, leistungsfähiges Werkzeug für typische Prüfaufgaben. Das Verfahren wurde bereits erfolgreich zur Ortung von Spanngliedern, Hohlstellen und Minderdicken eingesetzt. Weitere Einsatzgebiete, zum Beispiel die Untersuchung von Rissen, werden derzeit an der BAM untersucht.

4. Danksagung

Herrn Dr.-Ing. Klaus Mayer (Universität Kassel) danken wir für die Bereitstellung des SAFT-Algorithmus und für die vielen wertvollen Hinweise bei der Auswertung der Messdaten.

Herrn Dr. Alexander Bishko (ACSYS) danken wir für die hilfreiche Unterstützung bei der Programmierung des Linienarrays.

Bei der Durchführung der experimentellen Untersuchungen haben viele Mitarbeiter der BAM, Fachgruppe VIII.2, engagiert mitgearbeitet. Allen Beteiligten gilt unser herzlicher Dank.

5. Referenzen

- [1] Krause, M.: Ultraschallechoverfahren an Betonbauteilen, in: Cziesielski, E. (Hrsg.); Bauphysik-Kalender 2004, Berlin: Ernst und Sohn (2004) Kap. C1, 2 Strukturaufklärung, Abschn. 2.4, S. 341-352.
- [2] Streicher, D., Kohl, Ch., Wiggenhauser, H., Taffe, A.: Automatisierte zerstörungsfreie Zustandsuntersuchungen von Brückenbauwerken, in: Zeitschriftenartikel: Beton- und Stahlbetonbau 101 (2006) 5, 330-342; Ernst, Berlin
- [3] Shevaldykin, V., Kozlov, V. and A. Samokrutov , Inspection of Concrete by Ultrasonic Pulse-Echo Tomograph with Dry Contact , in: Proceedings 7th ECNDT Conference, Copenhagen, 26-29 May 1998, pp. 816-821 (1998)
- [4] Krause, M., Mielentz, F., Milmann, B., Streicher, D., Müller, W. , Ultrasonic imaging of concrete elements: State of the art using 2D synthetic aperture , In: DGZfP {(Ed.);} International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) in Berlin, Germany, September 16-19, 2003, Proceedings on BB 85-CD, V51, Berlin (2003)
- [5] Krause, M., Mielentz, F., Milmann, B., Mayer, K.: Objektabbildung mit scannenden Ultraschallecho-Verfahren, Bergmeister, K., Wörner, J.-D. (Hrsg.); BetonKalender 2007, Verkehrsbauten-Flächentragwerke. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, Bd. 1, Kapitel V Echoverfahren in der zerstörungsfreien Zustandsuntersuchung von Betonbauteilen, Absch. 8, S. 543-555
- [6] Langenberg, K., Mayer, K., Marklein, R.: Zerstörungsfreie Prüfung von Beton: Modellierung und Abbildung, Bergmeister, K., Wörner, J.-D. (Hrsg.); BetonKalender 2007, Verkehrsbauten-Flächentragwerke. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, Bd. 1, Kapitel V Echoverfahren in der zerstörungsfreien Zustandsuntersuchung von Betonbauteilen, Absch. 6, S. 518-536
- [7] Wiggenhauser, H., Samokrutov, A. A.: Vorrichtung zur zerstörungsfreien Prüfung von Bauteilen. Patentanmeldung, AZ: DE 10 2006 029 435.1
- [8] Mayer, K., Langenberg, K.-J., Krause, M., Maierhofer, Ch., Milmann, B., Kohl, Ch.: Characterization of Ultrasonic and Radar Reflector Types in Concrete by Phase Evaluation of the Signal and the Reconstructed Image. In: Proceedings of the 9th European Conference on NDT, September 25-29, 2006, Berlin: DGZfP, BB 103-CD, We.1.3.4