

LAUS - Erste praktische Erfahrungen mit einem neuartigen Ultraschallsystem großer Eindringtiefe

Ernst NIEDERLEITHINGER¹, Herbert WIGGENHAUSER¹ & Boris MILMANN¹

¹ BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin

Kontakt E-Mail: ernst.niederleithinger@bam.de

Kurzfassung. Konventionelle Systeme zur Ultraschall-Echo-Prüfung von Betonbauteilen sind in ihrer Eindringtiefe auf etwa einem Meter begrenzt. Zur Prüfung stärkerer Objekte war die Entwicklung eines neuartigen Prüfsystems notwendig. Das LAUS-System (Large Aperture UltraSound) besteht aus 12 einzelnen Arrays, die mit jeweils 32 Einzelprüfköpfen (Scherwellen, 25 – 50 kHz) als Sender oder Empfänger betrieben werden können. Sie werden unabhängig auf Betonoberflächen mit Unterdruck befestigt und kommunizieren drahtlos untereinander und mit der Zentraleinheit. Alle möglichen Kombinationen ergeben 132 Einzelmessungen, die zur Rekonstruktion des durchschallten Volumens genutzt werden. Mehrere dieser Datensätze lassen sich zu einer 3D-Auswertung kombinieren. Das System wurde an mehreren Testobjekten und Bauwerken erfolgreich erprobt. So konnte die fünf Meter dicke, sehr stark bewehrte Fundamentplatte des Fallturms auf dem BAM-Testgelände bei Horstwalde durchschallt werden. Ein zweites Beispiel ist die erfolgreiche Detektion von Spannkämen in 1,8 m Tiefe in einem massiven Brückenbauwerk.

1. Einführung

Die zerstörungsfreie Ultraschall-Echo-Prüfung von Betonbauwerken ist seit etwa 10 Jahren Stand der Technik. In den letzten Jahren haben sich vor allem bildgebende Verfahren durchgesetzt, mit denen schon vor Ort eine erste Einschätzung und nach Kombination vieler Messungen und Datennachbearbeitung eine 3D-Darstellungen des Inneren von Bauteilen möglich ist. So können Spannkäme und Bewehrungen sicher geortet werden, die Dicke von Wänden oder Schichten und oberflächenparallele Ablösungen bestimmt werden [1][2][3][4]. Die Anwendung von Ultraschall-Echo-Verfahren ist einem DGZfP-Merkblatt geregelt, dass sich in Überarbeitung befindet.

Bei den derzeit kommerziell angebotenen Ultraschall-Echo-Systemen kommen in der Regel federnd gelagerte Punktkontakttransducer zum Einsatz, da sie kein Koppelmedium benötigen und sich auch an raue Oberflächen anpassen. Mehrere solcher Transducer werden zusammengefasst und bilden ein Array, das als Sender oder Empfänger genutzt werden kann. Mehrere Arrays können in einem Gehäuse untergebracht werden.

Mit derartigen Geräten liegen inzwischen langjährige Erfahrungen vor, so zum Beispiel mit dem monostatischem System ACS A1220 Transvisor (je ein Sender-



/Empfängerarray in gemeinsamen Gehäuse) oder dem ACS 1040 MIRA mit 10 schaltbaren Arrays, welches eine bildgebende Darstellung fast in Echtzeit erlaubt. Die Aperturlänge des MIRA Arrays beträgt 330 mm und ist damit besonders gut zur Untersuchung von Bauteilen mit einer Stärke bis etwa 100 cm geeignet. In jüngster Zeit sind vergleichbare Systeme auch von anderen Hersteller erhältlich.

Bildgebende Untersuchungen mit dem einfachen A1220 System erfordern eine linienförmige oder flächige Aufnahme von Daten, damit das Innere eines Bauteils rekonstruiert werden kann. Dies kann mit automatisierten Scannern erfolgen und hat sich bei der Untersuchung von Brücken und anderen Bauwerken sehr gut bewährt. Der erfassbare Tiefenbereich bei diesen Messungen reicht im Normalfall etwa bis 150 cm, falls nicht ein zu hoher Bewehrungsgrad, Risse oder ein zu großer Porengehalt die Schallausbreitung behindert und der Beton den Schall gut leitet.

Betonbauteile größerer Dicke konnten bisher nicht zerstörungsfrei mit Ultraschall untersucht werden. So mächtige Bauteile sind Bestandteil vieler Bauwerke, etwa als Fundament, Brückenträger, Stützbauwerke, Abschirmung und sie finden sich in Dämmen, Kraftwerken oder kerntechnischen Installationen. Die Lösung dieser Prüfaufgaben konnte nur auf der Basis einer Geräteentwicklung gelingen. Das hier präsentierte Material wurde zum Teil schon in [5] gezeigt.

2. Das LAUS-System

2.1 Anforderungen

Die Anforderungen an das neu zu entwickelnde System waren:

- Möglichst hohe Signalintensität der einzelnen Transducerarrays
- Großer Öffnungswinkel, um einen möglichst großen Bereich zu beschallen
- Flexibilität bei der Prüfkopfanordnung
- Drahtlose Kommunikation und Synchronisation
- Untere Grenzfrequenz max. 25 kHz abdecken, um von der geringeren Dämpfung langwelliger Ultraschallwellen zu profitieren

2.2 Prinzipieller Aufbau

Das mit diesen Anforderungen spezifizierte und realisierte System besteht aus 12 Prüfköpfen und einem Steuerrechner (Abb. 1). Die Einheiten synchronisieren sich über Funk und kommunizieren mit dem Steuerrechner über WLAN. Die Prüfköpfe können einzeln positioniert werden, um einerseits Stellen mit schlechten Ankoppelbedingungen zu vermeiden und andererseits die Prüfköpfe gezielt in bewehrungsfreie Zwischenräume platzieren zu können. Das LAUS System wurde für Forschungszwecke konzipiert und von der Firma ACSYS realisiert [6].

2.3. Prüfköpfe

Jeder der 12 Prüfköpfe enthält 32 dicht gepackte Punktkontakttransducer, die wahlweise gemeinsam als Sender oder Empfänger arbeiten (**Abb. 2**). Sie sind in acht Reihen zu je 4 Sensoren, alternierend um eine halbe Sensorbreite versetzt, angeordnet. Diese kompakte Anordnung gewährleistet einen breiten Öffnungswinkel bei gleichzeitig hoher Schallintensität, der Grundvoraussetzung für eine möglichst große Eindringtiefe. Die

einzelnen Transducer sind federnd gelagert und können sich damit auch an raue Oberflächen anpassen.

Die Transducer generieren wie in den oben erwähnten kommerziell erhältlichen Geräten horizontal polarisierte Scherwellen. Diese haben gegenüber Kompressionswellen bei gleicher Frequenz eine kürzere Wellenlänge und ermöglichen damit eine höhere geometrische Auflösung. Zudem können sie mit höherer Effizienz erzeugt werden und konvertieren bei Reflektion nur in geringerem Maße in andere Wellentypen. Der Frequenzbereich der Transducer kann durch die Variation des elektrischen Anregungspulses zwischen 25 und 150 kHz variiert werden.

Der Prüfkopf enthält außer den Transducern auch die Unterdruck-Ansaugvorrichtung, Stromversorgung sowie Sende-, Empfangs- und Kommunikationselektronik.

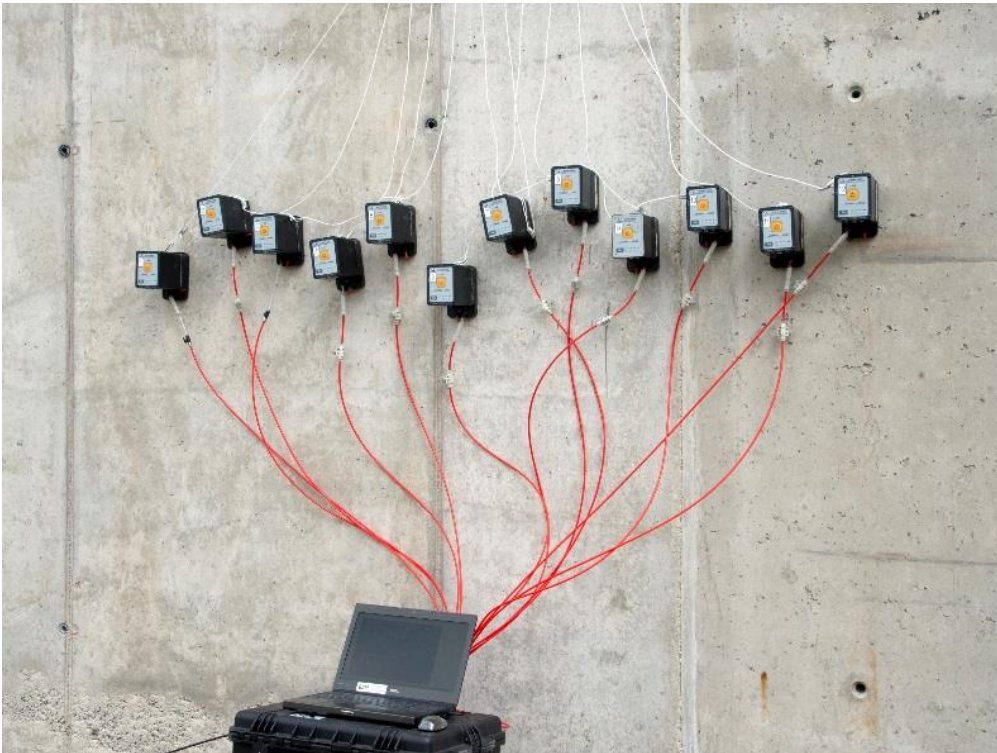


Abb. 1: Das LAUS-System: 12 per Unterdruck an der Oberfläche haftende Prüfköpfe und Steuerrechner. Die roten Leitungen dienen der Pressluftzufuhr.



Abb. 2: LAUS-Prüfkopf mit 32 Punktkontakttransducern.

2.4 Software

Die Software auf dem Steuerrechner erhält vom Nutzer die für die Messung notwendigen Parameter, protokolliert diese und gibt sie an die Prüfkopfelektronik weiter. Sie steuert auch den Modus der Prüfköpfe (Sender oder Empfänger). Aus den insgesamt 132 möglichen Einzelmessungen (A-Scans) eines Datensatzes wird ein linienhafter Vertikalschnitt (B-Scan) berechnet, allerdings unter der vereinfachenden Annahme, dass alle Prüfköpfe auf einer Linie und mit gleichem Abstand untereinander aufgestellt sind. Das Programm berechnet auch eine vereinfachte SAFT-Rekonstruktion, die nach wenigen Sekunden auf dem Bildschirm dargestellt wird.

Wenn die Prüfköpfe irregulär angeordnet werden oder verschiedene Messdatensätze kombiniert werden sollen, wird eine externe Software zur Auswertung eingesetzt. Diese benötigt zur 2D- bzw. 3D-Berechnung die genauen Positionen und Orientierungen der Prüfköpfe. Eingesetzt wird eine spezielle Version des Programmsystems InterSAFT von Dr. K. Mayer, Universität Kassel [7].

3. Anwendungsbeispiele

3.1 Dicke einer Fundamentplatte

Die BAM betreibt bei Horstwalde ca. 50 km südlich von Berlin ein „Testgelände Technische Sicherheit“ (BAM-TTS). Ein Fallturm zur Prüfung von Transportbehältern von bis zu 200 t steht dort auf einer massiv bewehrten, fünf Meter starken Betonplatte unter der zusätzliche Bohrpfähle jegliche Setzung bei den Versuchen unterbinden (Abb. 3).



Abb. 3: Fallturm auf dem BAM-Testgelände bei Horstwalde.

Auf der Fundamentplatte wurden 40 Einzeldatensätze gemessen, wobei die Prüfköpfe so dicht wie möglich aneinander standen (10 cm Mittelpunktabstand). Das Array wurde senkrecht zu seiner Ausrichtung jeweils um 10 cm versetzt, bis eine Messfeldlänge von 2 m erreicht war. Das Ganze wurde mit seitlichem Versatz von 60 cm wiederholt. Die Überlagerung beider Messfelder ergibt einen Messbereich von 160 cm * 200 cm.



Abb. 4: Messungen mit dem LAUS-System auf dem Fundament des Fallturms.

Die Daten wurden kombiniert mit dem InterSAFT Programm ausgewertet und das Volumen unter der Messfläche rekonstruiert. Abb. 5 zeigt einen repräsentativen Vertikalschnitt durch das rekonstruierte Datenvolumen.

Die hohen Amplituden im Nahbereich unter der Oberfläche bis etwa 150 cm, vereinzelt auch noch tiefer, sind auf die starke, mehrlagige Bewehrung zurückzuführen. Einzelne Bewehrungsstäbe können nur im Einzelfall abgebildet werden. Die Unterkante der Fundamentplatte in 5 m Tiefe lässt sich eindeutig identifizieren. Das am linken Rand schwächer werdende Echo ist wohl auf Streuung der Ultraschallwellen durch die hier angeordnete Randbewehrung zurückzuführen. Eine weitergehende Bearbeitung der Daten zeigt auch ein Echo bei der doppelten Tiefe, was einer zweimal reflektierten Welle entsprechen würde.

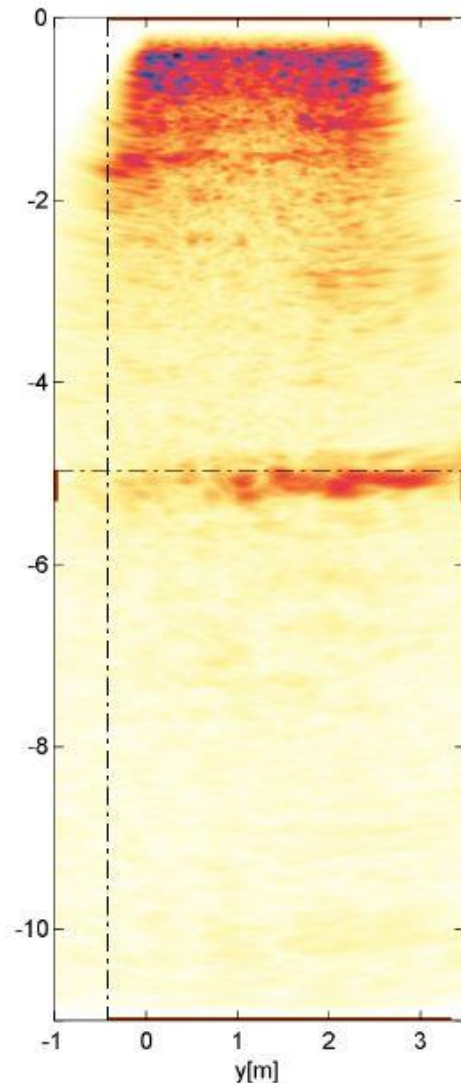


Abb. 5: SAFT Rekonstruktion der LAUS-Messungen auf der Fundamentplatte des Fallturms. Das Echo der Rückwand ist bei 5 m deutlich zu erkennen. Die hohen Amplituden bis ca. 1,5 m sind auf die dichte, mehrlagige Bewehrung zurückzuführen.

2.2 Ortung von Spannkanälen in einem massiven Brückenträger

Nach dem Ausschalen einer Spannbetonbrücke ergab sich der Verdacht auf Gefügestörungen im Inneren des massiven Brückenträgers. Solche Strukturen sind direkt nur schwer mit Ultraschall abzubilden. Daher wurde versucht, über etwaige Schwankungen in der Amplitude von Echos der Spannkanäle indirekt auf etwaige Mängel zu schließen. Während dies von unten mit kommerziellen Geräten gut möglich war, musste von oben aufgrund der großen Betonüberdeckung das LAUS-System eingesetzt werden (Abb.6). Die Messgeometrie ähnelte der am Fallturm eingesetzten Methode. Es wurde aber eine wesentlich größere Messfläche abgedeckt.

Abb.7 zeigt einen der gemessenen und mit SAFT rekonstruierten Schnitte durch die Brücke. Die Oberkante der Spannkanäle ist klar zu erkennen. Die Abschwächung der Amplituden am Rand ist auf die dort geringere Überdeckung mit Messungen zurückzuführen. Es ergeben sich hier keine Hinweise auf Gefügestörungen. Zwischen den Spannkanälen ist auch die Rückwand zu erkennen.

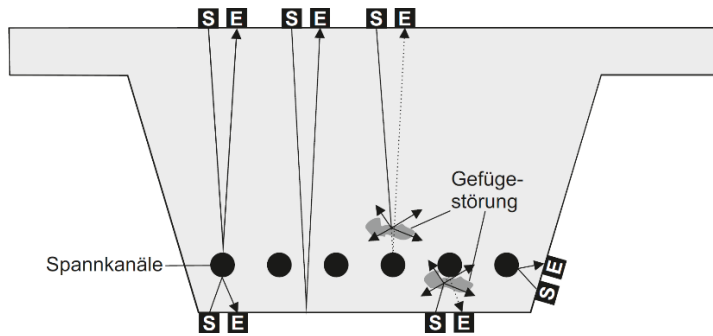


Abb. 6: Laus-Messungen auf einem massiven Brückenträger.
Links: Skizze (Querschnitt). Rechts: Messsituation.

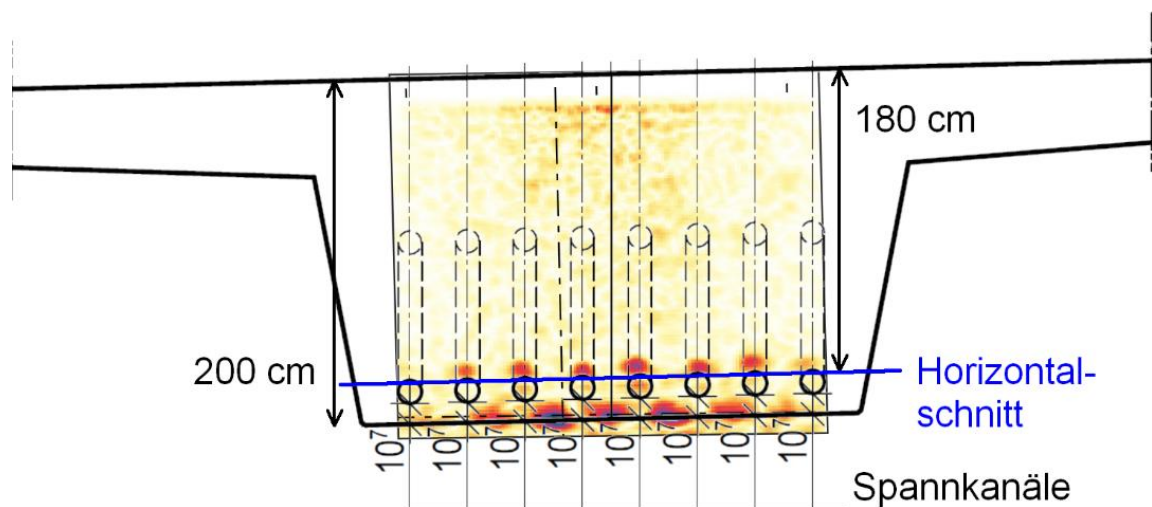


Abb. 7: Querschnitt durch die Brücke mit überlagerter SAFT-Rekonstruktion der LAUS-Messungen.

3. Zusammenfassung

Das LAUS-Messsystem hat sich bei ersten Einsätzen bewährt. Es wurden Eindringtiefen bis fünf m erreicht, ein mehrfach höherer Wert als bei jedem kommerziell verfügbaren Gerät. Es ist auch unter Baustellenbedingungen einsetzbar.

An weiteren Verbesserungen wird derzeit gearbeitet. So soll die Messelektronik in Zukunft noch größere Eindringtiefen ermöglichen, um auch einen Einsatz zur Qualitätssicherung bei Verschlussbauwerken in Endlagern für radioaktiven Abfall zu ermöglichen. Die Applikation (Aufbau und Versatz der Prüfköpfe) wird optimiert. Bei der Auswertung der Messungen sollen zukünftig auch andere Verfahren als SAFT eingesetzt werden, die auch komplexe Strukturen abbilden können [8].

Referenzen

- [1] Schulze, S., Krause, M., Mayer, K., Redmer, B. and Wiggenhauser H. (2014). "Grouting Defects Localized by Ultrasonic Testing Including Phase Evaluation". *Proc., ASNT Topical Conference, NDE/NDT for Highways and Bridges, Structural Materials Technology (SMT)*, Washington, DC, USA, pp. 321-328.
- [2] Taffe, A., Krause, M., Milmann, B. and Niederleithinger, E., (2005). „Assessment of foundation slabs with US-echo in the re-use process.” In: Alexander, M., Beushausen, H.-D., Dehn, F. and P. Moyo (eds); Proceedings of the International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR), 21.-23.11.05, Cape Town, South Africa, pp. 525-530.
- [3] Schulze, S., Mayer, K. and Krause, M., (2013): „Spannbetonuntersuchung mit bildgebenden Ultraschallecho-Verfahren.“ *Beton- und Stahlbetonbau*, 108(12).
- [4] Schickert, M., Krause, M. and Müller, W. (2003): "Ultrasonic Imaging of Concrete Elements Using Reconstruction by Synthetic Aperture Focusing Technique." *Journal of Materials in Civil Engineering (JMCE)*, ASCE Vol. 15, pp. 235-246.
- [5] Wiggenhauser, H., Niederleithinger, E., und Milmann, B. (2017): „Zerstörungsfreie Ultraschallprüfung dicker und hochbewehrter Betonbauteile.“ *Bautechnik* 94, 10: 682–88. <https://doi.org/10.1002/bate.201700040>.
- [6] Wiggenhauser, H., Samokrutov, A., Mayer, K., Krause, M., Alekhin, S., & Elkin, V. (2016). "Large Aperture Ultrasonic System for Testing Thick Concrete Structures". *Journal of Infrastructure Systems*, B4016004.
- [7] Mayer, K., Chinta, P., Langenberg, K.-J. und Krause, M. (2012) "Ultrasonic Imaging of Defects in Known Anisotropic and Inhomogeneous Structures with Fast Synthetic Aperture Methods". Proceedings of the 18th World Conference on Non-Destructive Testing, Durban, South Africa, 16.-20.04.2012, CD-ROM, 10 pages.
- [8] Grohmann, M., Müller, S., Niederleithinger, E., und Sieber, S. (2017): „Reverse Time Migration: Introducing a New Imaging Technique for Ultrasonic Measurements in Civil Engineering." *Near Surface Geophysics* 15, 3 (Juni 2017): 242–58. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2017006>.