

Neue Ansätze in der tomografischen Visualisierung und Auswertung von Ultraschallmessdaten bei Betonprüfung

Andrey Bulavinov, Roman Pinchuk, Andrey Samokrutov, Viktor Shevaldykin
ACS-Solutions GmbH, Saarbrücken

Kontakt E-Mail: andrey.bulavinov@acs-international.com

Kurzfassung. Das Full-Matrix-Capture-Verfahren (FMC) bei Ultraschalldatenaufnahmen mittels Gruppenstrahlersysteme bietet eine neue Qualität für die bildgebende Ultraschallprüfung von Bauwerkstoffen und wird erfolgreich in den im Markt erhältlichen Prüfgeräten eingesetzt. Diese implementieren jedoch nur das Prinzip des linearen Wandler-Arrays mit 2D-Rekonstruktion des B-Bildes nach dem SAFT-Prinzip.

Die in Ultraschall-Betonprüfgeräten eingesetzten Dry-Point-Contact-Wandler (DPC) bieten durch ihren matrixartigen Aufbau die Möglichkeit, den dreidimensionalen FMC-Datenaufnahmeprozess zu realisieren und damit die tomografische Volumenrekonstruktion durchzuführen.

Der aktuelle Vortrag präsentiert die neue Geräteplattform sowie die ersten praktischen Prüfergebnisse an Betonbauwerken mit 3D-FMC Bildrekonstruktion und Visualisierung von Ultraschallprüfdaten und thematisiert die Vorteile der dreidimensionalen Datenerfassung mit DPC-Wandlersystemen in Bezug auf die Erhöhung des Informationsinhaltes der Ultraschall-Betonprüfung sowie die Verbesserung ihres Nachweisvermögens. Unter anderem wird hierbei die quantitative Risstiefenbewertung diskutiert, die durch den neuen Ansatz eine praktische Dimension gewinnt.

1. Einleitung

Die Anwendung bildgebender Ultraschallprüfung im Bauwesen [1] hat sich in der letzten Dekade stark verbreitet. Als Gründe dafür kann man einerseits die alternde Infrastruktur und steigenden Bedarf an zerstörungsfreier Qualitätssicherung, andererseits den wesentlichen Fortschritt in der Entwicklung der Prüftechnologien und wachsendes Angebot an modernen bildgebenden Prüfsystemen im Markt nennen.

Während die Ultraschallprüfgeräte für metallische Erzeugnisse und Leichtbaukompositwerkstoffe eine langjährige Anwendungsgeschichte aufweisen können, gehören die Betonprüfgeräte zu einem „aufstrebenden Markt“, in dem es noch durchaus an Normen und Regelwerken mangelt. Dennoch bieten die modernen Prüfinstrumente mit ihrer zweidimensionalen und dreidimensionalen Bildgebung einen eindeutigen Mehrwert in Bezug auf den quantitativen Fehlernachweis und Zuverlässigkeit der Zustandsbewertung der Baukonstruktionen.

Das Ziel des aktuellen Beitrages ist es, die neusten Trends in der Umsetzung der modernen Ultraschallprüfgeräte für Betonprüfung, insbesondere auf die Verarbeitung und

Visualisierung von Ultraschallmessdaten, zu erläutern und das Potenzial zur Erweiterung deren Einsatzgebietes aufzuzeigen.

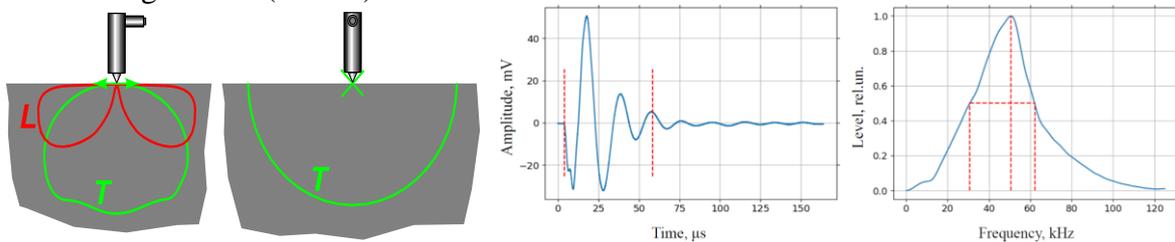
2. Moderne Ultraschallprüfgeräte für Betonprüfung: Aufbau und Funktionsprinzip

Ähnlich wie die aktuellen Ultraschallgeräte für die Metallprüfung, stellen die Betonprüfgeräte Mehrkanal-Gruppenstrahlersysteme dar [2], die die Prüfergebnisse bildgebend darstellen (Abb. 1).

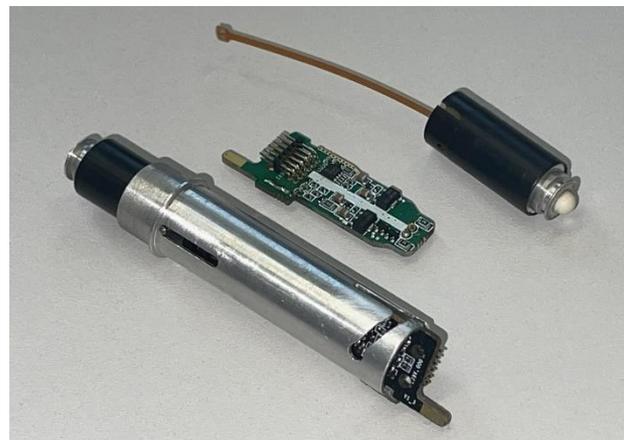
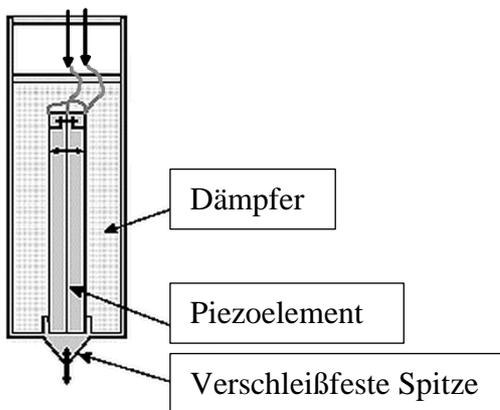


Abb. 1: Ultraschall-Betonprüfgerät mit $4 \times 8 = 32$ Array-Elementen

Das Schlüsselement eines solchen Prüfsystems ist die Ultraschallsensorik. Im Gegensatz zu herkömmlichen Ultraschallgeräten für die Metallprüfung, bei denen die piezoelektrischen Wandler über ein flüssiges Koppelmedium angekoppelt werden, realisieren die hier verwendeten Betonprüfköpfe das so genannte „Dry-Point-Contact“-Prinzip (DPC) [3], bei dem eine spezielle Anregungsart über ein mit der Nennfrequenz vibrierenden Pin zur Anwendung kommt (Abb. 2).



a) Richtdiagramm, Impulskenlinie und Frequenzspektrum eines DPC-Wandlers

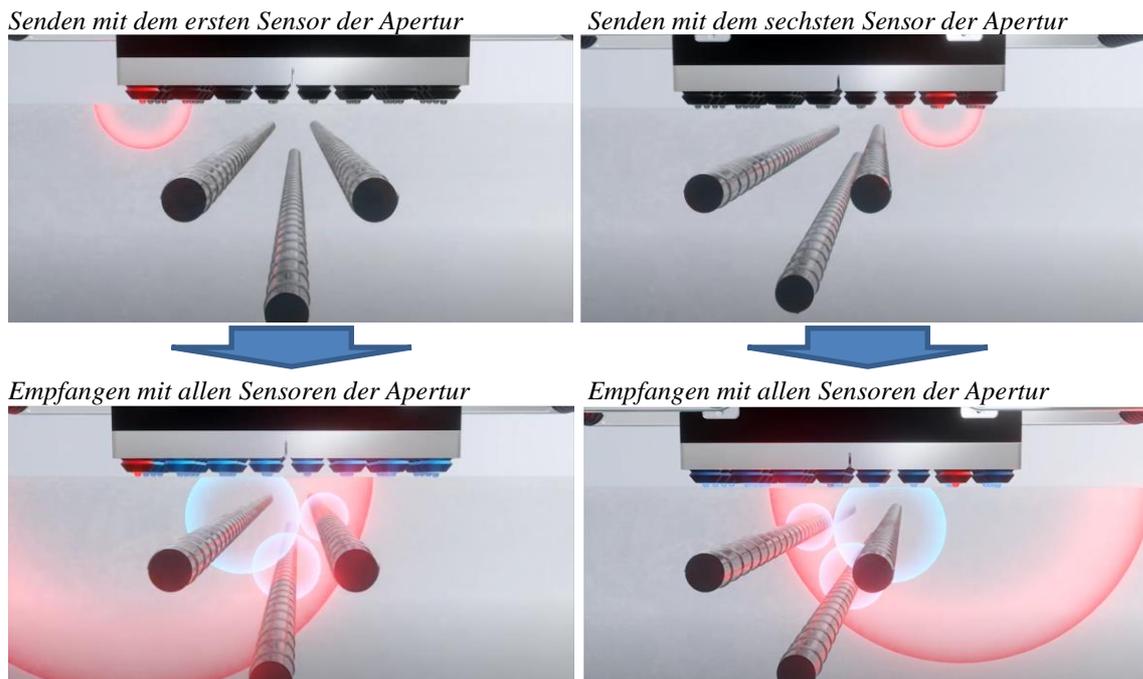


b) Aufbau eines aktiven DPC-Wandlers

Abb. 2: Aktiver DPC-Ultraschallwandler mit integrierter Sende-Empfangelektronik

Je nach gewünschtem Ultraschallwellentyp (longitudinal oder transversal), Arbeitsfrequenz und Bandbreite kann der Aufbau des Wandlers variieren. Für Zwecke der Ultraschallbildgebung im Beton werden typischerweise breitbandige Transversalwellen-Wandler mit der Mittelfrequenz um 50 KHz verwendet [4]. Der neuste Trend bei der Umsetzung moderner DPC-Sensoren besteht in der Integration der kompletten Sende-Empfangsstufe direkt in das Wandlergehäuse. Neben den rauscharmen elektrischen Eigenschaften ermöglicht diese Bauweise die Anregung und Empfang der Ultraschallwellen mit jedem einzelnen Element der zweidimensionalen Matrix-Apertur.

Dabei erfolgt die Ultraschall-Datenaufnahme nach dem so genannten „Full-Matrix-Capture“ oder FMC-Prinzip, wo die Array-Elemente einzeln als Sender und Empfänger agieren (Abb. 3).



Rot: durch einen Sensor ausgestrahlte kugelförmige Transversalwelle
Blau: von den Bewehrungsstäben zurückreflektierte kugelförmige Transversalwellen

Abb. 3: Das Prinzip der getakteten Anregung der Matrix-Apertur (3D-FMC)

Aus dieser zweidimensionalen 4 x 8 Apertur stammenden Ultraschalldaten inkl. aller $32 \times 32 = 1.024$ Kombinationen von Sendern und Empfängern werden nach der „Total-Focusing-Methode“ zusammen gerechnet. Die TFM-Methode ihrerseits stellt eine Variante der Synthetischen-Apertur-Fokus-Technik (SAFT) dar, bei der sich die zu synthetisierende Apertur auf die Apertur des Gruppenstrahlers mit sich wechselnden Sender- und Empfänger-Elementen beschränkt. So kann in jeder Prüfposition des Ultraschall-Tomographen eine dreidimensionale Abbildung des Bauteilvolumens erzeugt werden (Abb. 4).

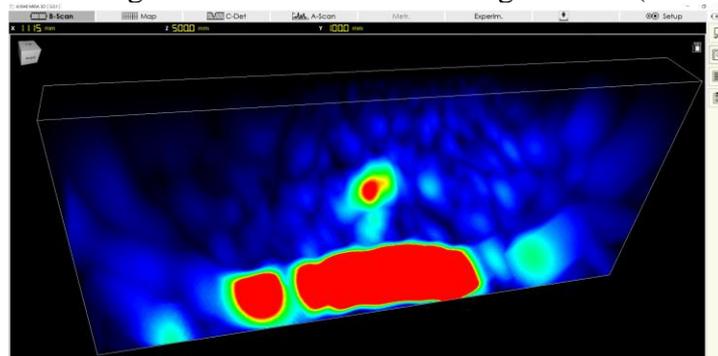


Abb. 4: 3D-Abbildung eines Materialfehlers in einer Prüfposition des Ultraschallgerätes

Ein weiterer Vorteil der getakteten Datenaufnahme mit der Matrix-Apertur ist die Möglichkeit, die Arrayelemente bzw. mehrere Aperturböcke beliebig zu kombinieren, um die Nahfeldgröße und damit die realisierbare Fokustiefe zu erweitern (Abb. 5).



Abb. 5: Mögliche Matrixapertur-Kombinationen bei der getakteten 3D-TFM Datenaufnahme

Abschließend kann zum Aufbau moderner Ultraschall-Betontomographen, ein weiteres Merkmal genannt werden, welches sich unter Umständen als wegweisend auch für andere Phased-Array-Systeme, z.B. für Metallprüfung erweisen kann. Die Bildrekonstruktion nach dem TFM-Prinzip, insbesondere bei der Berechnung von Matrixaperturen aus 32×32 oder 64×64 Punktquellen erfordert eine signifikante Rechnerleistung, um diese in Echtzeit ausführen zu können. Die modernen Tablet-PCs verfügen über Mehrkern-Grafikprozessoren, die durchaus in der Lage sind, die SAFT-Rekonstruktion der Matrix-Aperturdaten in Echtzeit durchzuführen.

So wird die Funktion der Datenaufnahme-Elektronik auf die Anregung und den Empfang der Ultraschallsignale sowie Digitalisierung und Transfer der Ultraschall-Rohdaten über eine WiFi-Datenschnittstelle beschränkt. Die gesamte Datenverarbeitung (inkl. digitale Filterung), Bildrekonstruktion, Visualisierung und Auswertung (inkl. Reporting) werden dabei von einem leistungsstarken Tablet-PC oder alternativ einem Desktop- oder Laptop-Rechner übernommen (Abb. 6).

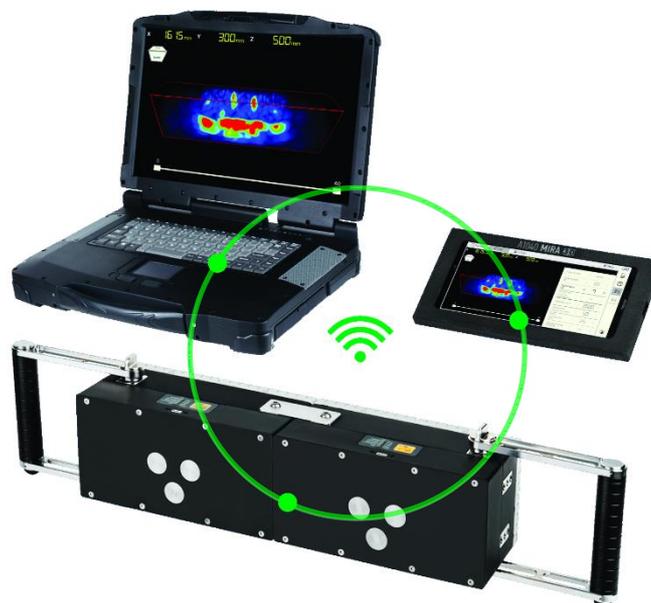


Abb. 6: Kommunikation der Messelektronik-Einheit mit verschiedenen Verarbeitungseinheiten

Der Vorteile einer solchen Trennung der Mess- und der Verarbeitungselektroniken bzw. ihrer drahtlosen Kommunikation sind u.a.:

- ⇒ Kostengünstigere Ausführung der Messelektronik
- ⇒ Flexible Weiterentwicklung der Applikationssoftware (APP) ohne „Eingriff“ in die Messelektronik

- ⇒ Automatische Vorteile dank neuen Generationen der Rechereinheiten mit verbesserter Leistung
- ⇒ Breite Palette an Möglichkeiten zur automatisierten Aufnahme von Ultraschalldaten, z.B. bei der Integration des Ultraschallgerätes in eine Scannereinheit mit Fernbedienung

2. Fortschrittliche Signalverarbeitungsmethoden zur Erweiterung des Prüfbereiches der Ultraschallprüfung

Eins der Alleinstellungsmerkmale der Ultraschallprüfgeräte für die Betonprüfung gegenüber anderen Prüfverfahren, wie z.B. Radarprüfsystemen („Ground Penetrating Radar“) besteht in ihrer größeren Reichweite bei hohem Auflösungsvermögen. Selbst bei der Stahlbetonprüfung sind die Prüfbereiche bis zu zwei Meter realisierbar (Abb. 7).

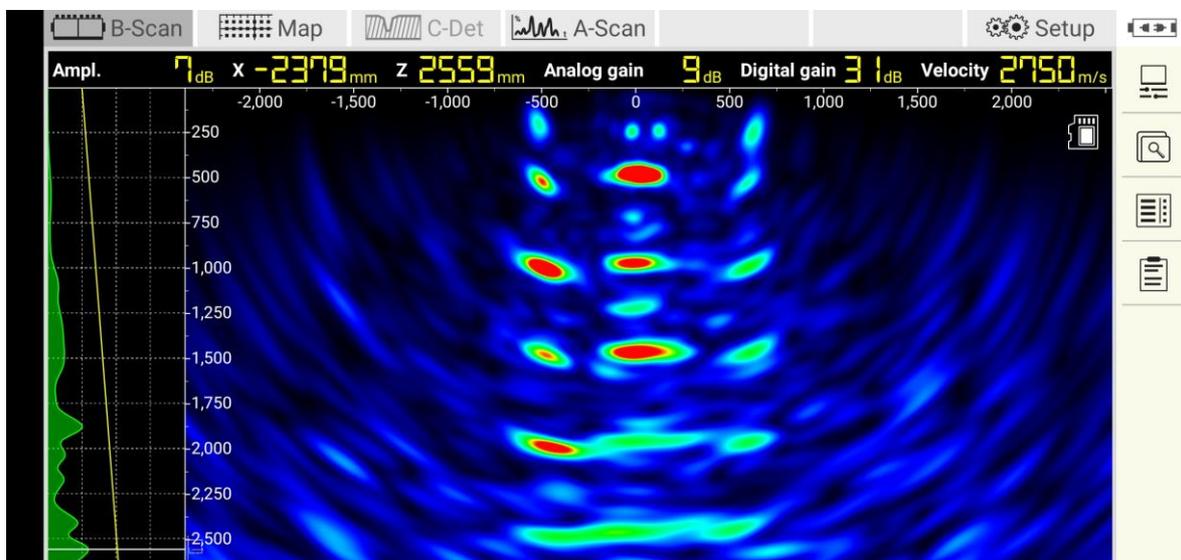


Abb. 7: B-Bilddarstellung eines bewehrtes Referenzblocks

Dennoch hat auch die Ultraschallprüfung ihre physikalischen Grenzen, wenn das zu prüfende Werkstoff, z.B. wegen grober Körnung, eine erhöhte Schallschwächung aufweist oder wenn es sich um die Prüfung besonders dicker Konstruktionen, wie z.B. Dämme, mit einer Wandstärke von mehreren Metern handelt. Das nicht ausreichende Signal/Rausch-Verhältnis gestattet es nicht, die aufgenommenen Ultraschallsignale auszuwerten.

Betrachtet man die Rohdaten bzw. die aufgenommenen Ultraschall-Echosignale in Detail, kann man das Signalauschen in drei Kategorien aufteilen:

- ⇒ Kohärentes akustisches Rauschen infolge der Ultraschallrückstreuung
- ⇒ Quantisierungsrauschen infolge der begrenzten Auflösung der Analog-Digital-Umsetzung
- ⇒ Thermisches Rauschen

Die beiden letzten Rauscharten kommen insbesondere bei sehr langen Schallwegen vor, wo man trotz erhöhten Verstärkungswerte mit relativ schwachen Signalen zu tun hat. Dies kann mittels so genannter Pulskompressionstechnik erfolgreich überwunden werden. Hierfür wird zur Anregung der Ultraschallwellen anstatt einer kurzen monochromatischen, eine lange modulierte Anregungssequenz verwendet, die anschließend in dem empfangenen

und digitalisierten Ultraschallsignal wieder extrahiert wird. Dadurch kann eine deutliche Verbesserung des Signal/Rausch-Verhältnisses sowie der zeitlichen Auflösung erzielt werden.

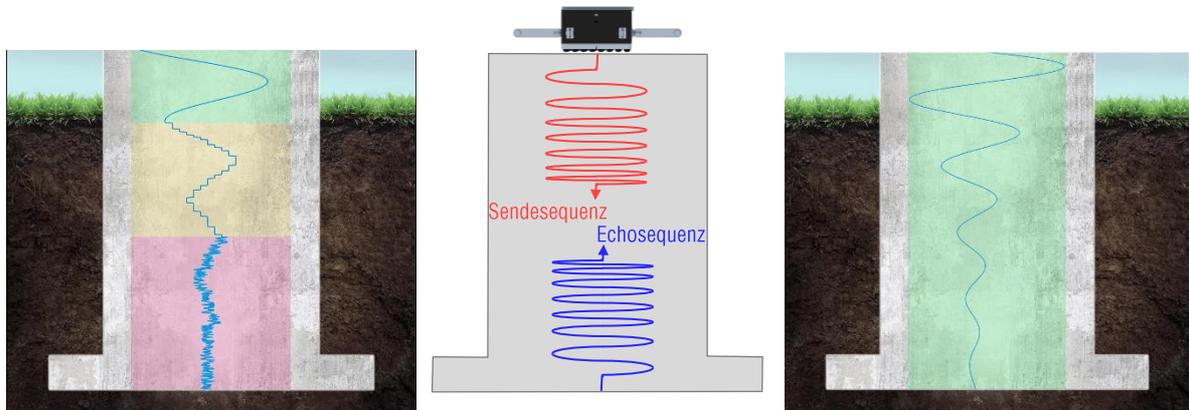
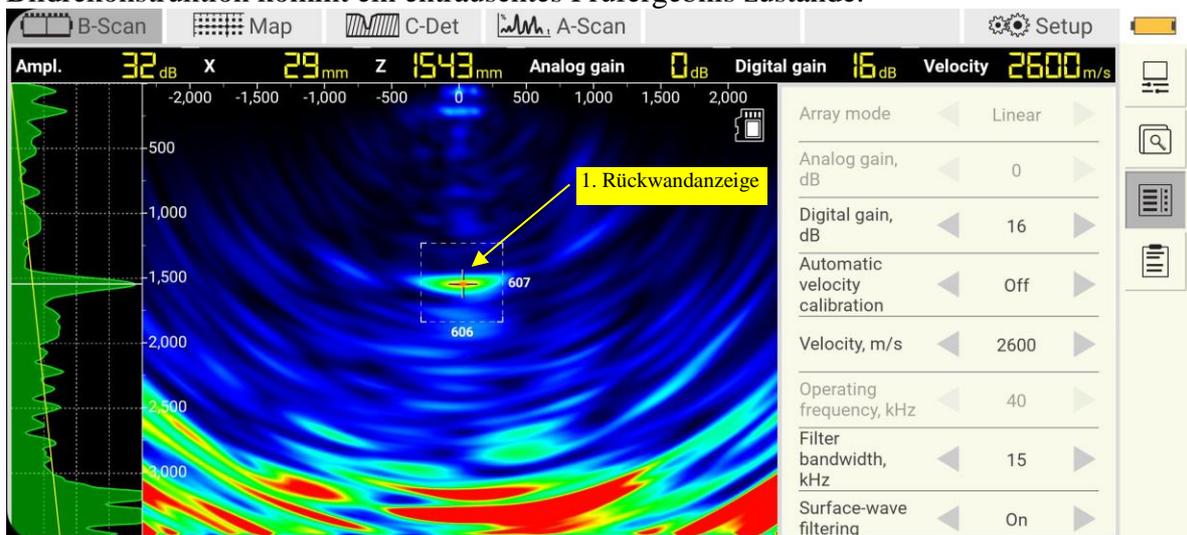
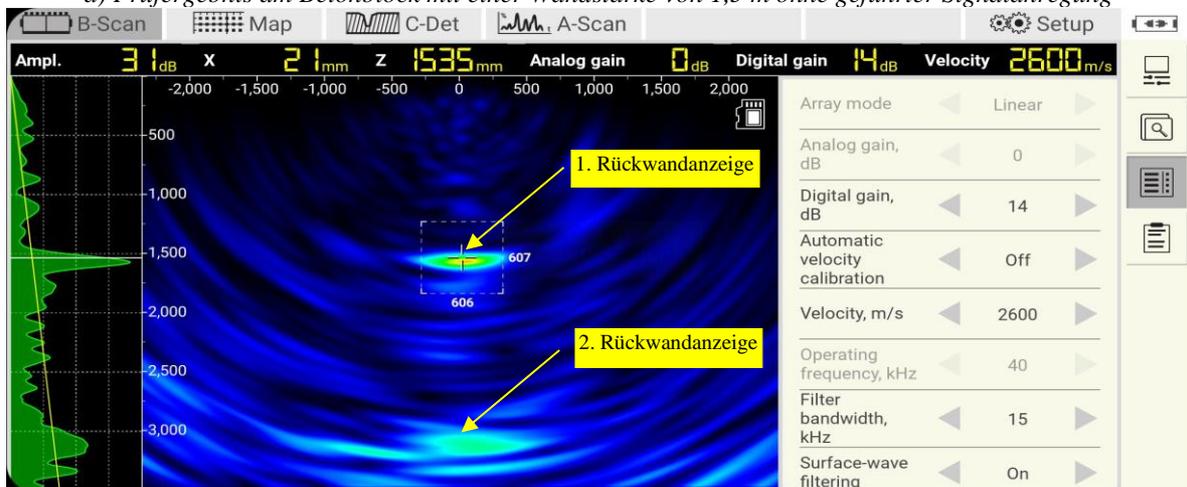


Abb. 8: Schematische Darstellung der Rauscharten (links) und das Entstörungsprinzip durch Anwendung modulierter Anregungssequenz

Als Ergebnis einer solchen Dekomposition der empfangenen Signale vor der SAFT-Bildrekonstruktion kommt ein enträushtes Prüfergebnis zustande.



a) Prüfergebnis am Betonblock mit einer Wandstärke von 1,5 m ohne geführter Signalanregung



a) Prüfergebnis am Betonblock mit einer Wandstärke von 1,5 m mit geführter Signalanregung

Abb. 9: Das Prüfergebnis ohne und mit geführter Signalanregung am dicken Betonblock

3. Arten der 3D-Visualisierung und Ergebnisdarstellung bei modernen Ultraschall-Betonprüfgeräten

Der Übergang von der Umsetzung des Linienarray-Prinzips zum Matrixarray-Prinzip bietet neue Optionen bei der Visualisierung von Ultraschallprüfergebnissen (3D). Als „elementares“ Datenset in einer Prüfposition wird bei jeder Aufnahme ein dreidimensionales Volumendatensatz verwendet, welches durch die Umsetzung des 3D-TFM-Prinzips eine verbesserte Ortsauflösung im Vergleich zu linearen Gruppenstrahler-Geräten aufweist. Selbstverständlich erfordert das eine aufwendigere Hardware-Umsetzung, wie etwa vollparallelen Aufbau der Ultraschallkanäle sowie rechenintensive 3D-SAFT Rekonstruktion.

Damit kommen bei jeder Art der Bauteilabtastung mit äquidistanten Messpunkten, sowohl in X-, als auch in Y-Richtung (siehe Abb. 10) ebenfalls dreidimensionale Datensätze (Panorama-B-Scan und Panorama-D-Scan) zu Stande, die entsprechend visualisiert werden, sodass jeweils drei Seitenansichten (B-, C-, D-Scans) dargestellt werden. Erfolgt die Datenaufnahme im zweidimensionalen MAP-Modus mit beiden Scanachsen X und Y, können dabei beliebig große Volumendatensätze (Area-Scans) zustande kommen, die bei ihrer Darstellung entsprechende Werkzeuge, wie „Zoomen“ und „Scrollen“ benötigen.

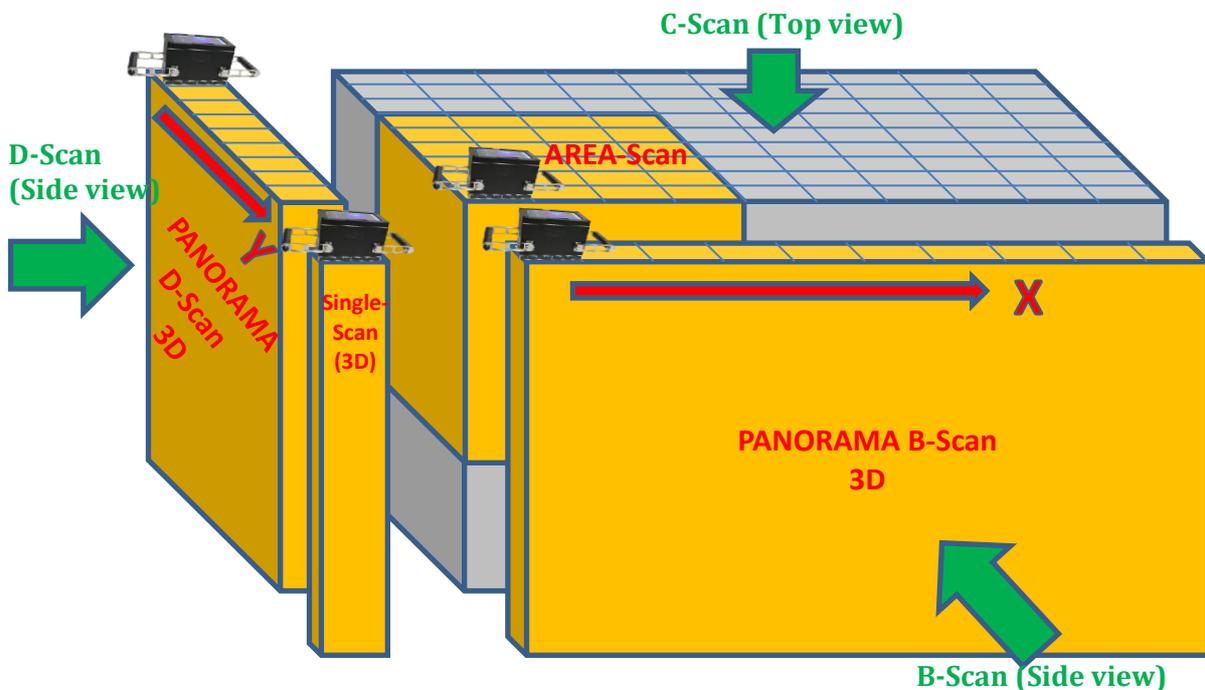
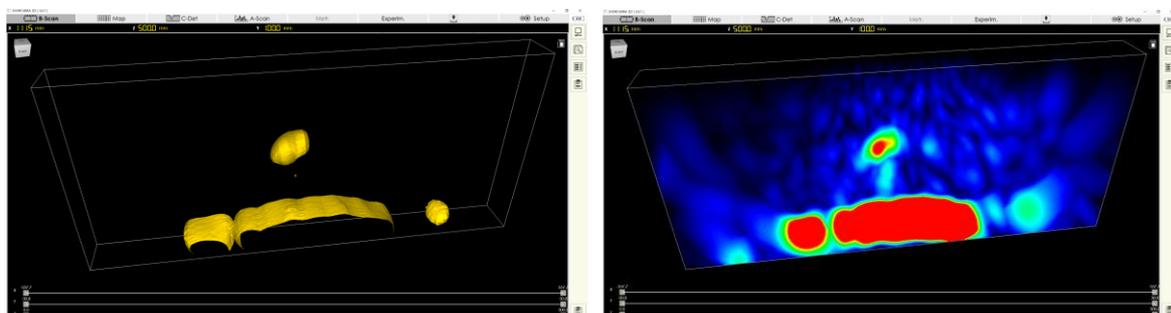


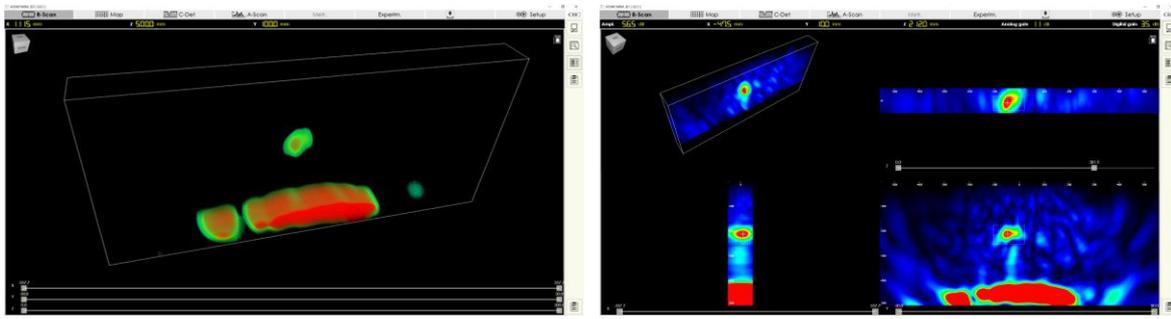
Abb. 10: Volumendarstellungsmodi bei der Visualisierung der Ultraschalldaten

Des Weiteren kann je nach Anwendungsfall die eigentliche Visualisierung der Voxeldaten in verschiedenen Rendering-Modi erfolgen (Abb. 11).



a) ISO-Surface

b) Maximum Intensity Projection (MIP)



c) Texture Mapping

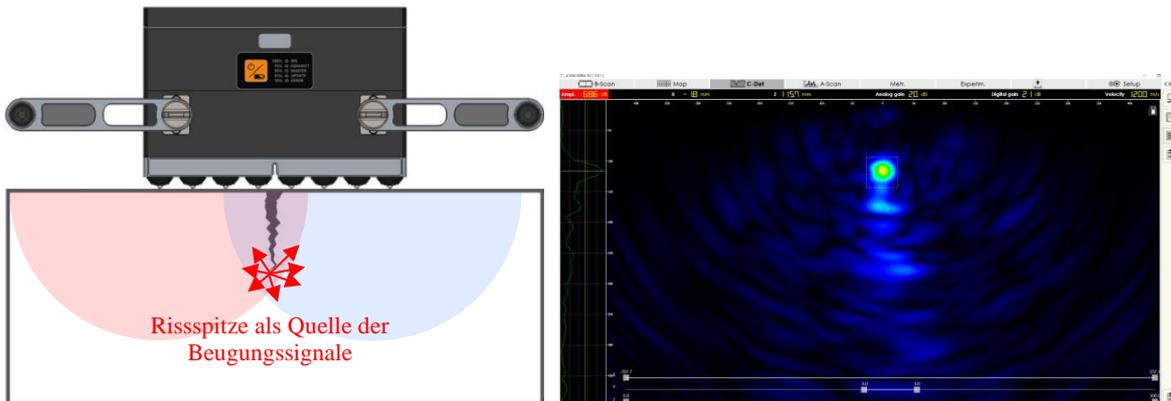
d) B/C/D Gated Volume MIP

Abb. 11: Volumendarstellungsmodi bei der Visualisierung der Ultraschalldaten

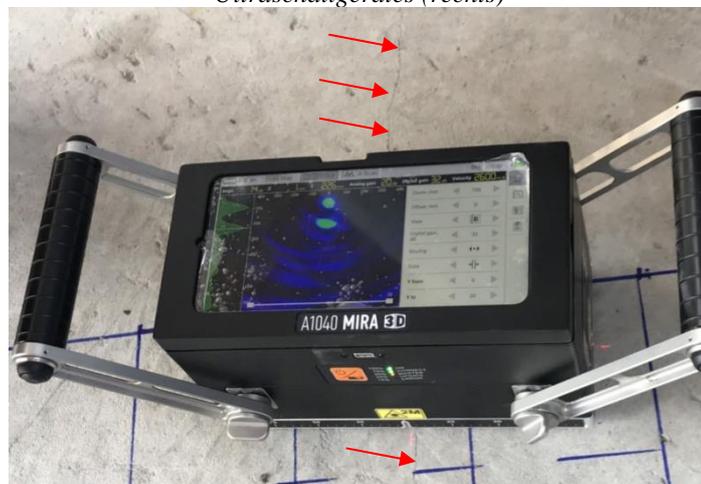
4. Risstiefenbestimmung

Ein weiterer wesentlicher Vorteil der Matrix-Apertur mit extrem kleinen Array-Elementen besteht in ihrer sehr breiten Richtcharakteristik, die u.a. gestattet die Beugungssignale von ungünstig liegenden Reflektoren, wie z.B. die Spitze eines nach außen offenen Risses, zu erfassen. Dies ermöglicht die Tiefe solcher Materialfehler zu bestimmen, ohne diesen „frontal“ anschauen zu können.

Bei der Durchführung einer solchen Messung ist es erforderlich, dass die Anzahl der DPC-Sensoren an beiden Seiten des offenen Risses gleich ist, sowie dass die Risttiefe die Gesamtaperturgröße des Gerätes nicht überschreitet.



a) Anordnung der Geräteapertur in Bezug auf den Riss (links) im Rissvermessungs-Modus des Ultraschallgerätes (rechts)



b) Vermessung eines natürlichen Risses am Bauwerk

Abb. 12: Ermittlung der Tiefe eines offenen Risses mittels Ultraschalltomografie

5. Zusammenfassung und Ausblick

Der aktuelle Beitrag präsentiert aktuelle Trends in der Implementierung und Anwendung von bildgebenden Ultraschallprüfsystemen zur zerstörungsfreien Betonprüfung.

Diese bestehen vor allem in der Applikation der Matrix-Aperturen auf der Basis von aktiven DPC-Ultraschallwandlern und der Umsetzung dreidimensionaler FMC / TFM- Methode zur tomografischen Bildgebung. U.a. gestattet diese Sensorausführung die Anwendung der Pulskompressionstechniken bei der Anregung der Ultraschallwellen und damit eine wesentliche Erweiterung des realisierbaren Prüfbereiches auf mehrere Meter.

Des Weiteren gestattet der Übergang von dem herkömmlichen Linienarray-Prinzip zur Anwendung der Matrixaperturen die dreidimensionale tomografische Bildgebung mit verbesserter Ortsauflösung in jeder Position des Ultraschallgerätes sowie die Umsetzung von Spezialfunktionen zur quantitativen Fehlerbewertung im Nahfeld des Ultraschallsensorsystems, wie etwa Bestimmung der Risstiefe.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei den Kollegen von der Bundesanstalt für Materialforschung und Prüfung BAM in Berlin für die angenehme und gewinnbringende Zusammenarbeit.

Referenzen

- [1] V.N. Kozlov, A. A. Samokrutov, V.G. Shevaldykin. Thickness measurements and flaw detection in concrete using ultrasonic echo method, *Nondestructive Testing and Evaluation* 13(2): 73-84, January 1997
- [3] HAZA, A. O.; PETERSEN, C. G.; SAMOKRUTOV, A. Three-Dimensional Imaging of Concrete Structures Using Ultrasonic Shear Waves. German Instruments SA, 2011, Denmark.
- [2] Shevaldykin, V.; Samokrutov, A.; Kozlov, V. 2003. Ultrasonic low-frequency short-pulse transducers with dry point contact. Development and application, in *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, 1619 September, 2003, *Journal of Civil Engineering and Management*, 2013, 19(6): 775786 785
- [4] Bishko A, Samokrutov AA, Shevaldykin VG (2008) Ultrasonic echo-pulse tomography of concrete using shear waves low-frequency phased antenna arrays. In *Proceedings of the 17th world conference on non-destructive testing* (Vol. 25, no. 28.10, p. 2008)