

# Bewertung der Tiefe von senkrechten Rissen mit Restwandstärke in Beton mit Ultraschall-Tomografie

Sergey PUDOVIKOV<sup>1</sup>, Sai Teja KUCHIPUDI<sup>2</sup>, Debdutta GHOSH<sup>2</sup>,  
Herbert WIGGENHAUSER<sup>3</sup>, Ute RABE<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP, Saarbrücken

<sup>2</sup> CBRI – Central Building Research Institute, Roorkee, India – 247667

<sup>3</sup> Berlin

**Kurzfassung.** Risse in Stahlbeton können die Tragfähigkeit oder Dichtheit eines Bauwerks beeinträchtigen und die Korrosion der Bewehrung beschleunigen. In solchen Fällen ist der Nachweis und die Größenbestimmung von Rissen in Betonkonstruktionen eine wichtige Aufgabe.

Eine Lösung hierfür ist die zerstörungsfreie Prüfung mittels niederfrequenter Ultraschallwellen. Stahlbeton zählt zu den akustisch schwer prüfbareren Materialien, denn die grobkörnige Struktur der Betonmatrix und die Bewehrungsseisen bewirken eine hohe Schallschwächung und -streuung. Zusätzlich ist die Prüfbarkeit der zu untersuchenden Objekte oft durch einseitigen Zugang eingeschränkt.

Die Aussagekraft der akustischen Prüfung kann durch Einsatz von Sensor-Arrays erhöht werden. Für Beton nutzt man Trockenpunktkontaktwandler (engl. DPC von Dry Point Contact), die horizontal polarisierte transversale Ultraschallwellen erzeugen. Nach dem Full Matrix Capture (FMC) Prinzip erzeugte und empfangene Ultraschallsignale werden für die tomografische Rekonstruktion des geprüften Volumens benutzt. Eine Rekonstruktion nach der Total Focusing Method (TFM) gewährleistet eine quantitative Auswertung der Ultraschallanzeigen im Objekt anhand von Projektionsbildern.

In der vorliegenden Arbeit werden Beispiele tomografischer Prüfergebnisse von Probekörpern aus Beton mit natürlichen Rissen vorgestellt. Bei der Rekonstruktion der Ultraschalldaten wurden nicht nur direkt reflektierte Wellen analysiert (Standardvariante der TFM), sondern auch die Ultraschallwellen, die vor der Wechselwirkung mit der Fehlstelle die Rückwandfläche des Probekörpers treffen. Diese Variante der TFM mit halbem Sprung wird Englisch Half-Skip TFM, kurz HSTFM, genannt. Die Ergebnisse beider Auswertungen – TFM und HSTFM – werden verglichen, und die Besonderheiten, Vor- und Nachteile und Aussagekraft werden diskutiert.

**Keywords:** Ultraschallprüfung, Beton, TFM, Half-Skip, HSTFM, Risse, Risstiefe



## **Einführung**

Im Gegensatz zu manchen metallischen Komponenten (wie z.B. Schweißverbindungen), dürfen Stahl- und Spannbetonstrukturen Risse aufweisen. Risse im Beton entstehen sehr häufig und können unter Umständen als unkritisch angesehen werden, so dass nicht die Präsenz von Rissen der entscheidende Faktor ist, sondern ihre Lage und Ausdehnung. Generell ist bei der Prüfung von Strukturwerkstoffen nicht nur der Nachweis eines Risses, sondern auch die Bestimmung seiner Dimensionen eine wichtige Aufgabe.

Während für metallische Werkstoffe die Prüftechniken für Nachweis und Größenbestimmung von vertikalen Rissen etabliert und genormt sind (ein Beispiel dafür ist TOFD – Time Of Flight Diffraction – für Schweißnähte [1]), bleibt diese Prüfaufgabe für Beton schwer lösbar. Für Beton findet man in einer englischen Norm, die sich auf die Geschwindigkeit von Ultraschallwellen in Beton bezieht, zwei ähnliche, auf der Ultraschall-Laufzeit basierende Methoden zur Bestimmung der Tiefe senkrechter Risse in Beton [2]. Ähnlich wie bei TOFD wird hier die Beugung an der Risspitze ausgenutzt. Die einfache Auswertung des Rissspitzenechos wird in einem Merkblatt der DGZFP [3] folgendermaßen kommentiert: „Bei Betonbauteilen ist dieser Ansatz in der Regel nicht zielführend, wie Untersuchungen gezeigt haben [4]. Während eine Bestimmung der Tiefe ungefüllter trockener Nuten zuverlässig gelang, war dies bei wassergefüllten oder verunreinigten Nuten und erst recht bei realen Rissen nicht möglich.“

In den letzten Jahrzehnten verbreitete sich in der Ultraschall-Prüfung der Einsatz von Arrays aus mehreren Sensoren in Kombination mit der Full Matrix Capture (FMC) Erfassung von akustischen Daten und ihrer nachfolgenden Bearbeitung nach der Total Focusing Method (TFM) [5]. Dieses bildgebende Verfahren hat sich erfolgreich für Nachweis und Größenbestimmung von Materialunzulänglichkeiten in unterschiedlichen Werkstoffen etabliert. Die Anwendung von niederfrequenten Dry Point Contact Sensoren (DPC [7]) ermöglichte die Applikation der TFM-Methode auch für die Ultraschall-Prüfung von Betonstrukturen. Die akustischen Eigenschaften von einem schallschwächenden und inhomogenen Werkstoff wie Beton beschränken jedoch die Aussagekraft von TFM und erschweren es, die inneren Fehler zuverlässig nachzuweisen und quantitativ zu bewerten. Zum Gewinn zusätzlicher Prüfinformation können die Erweiterungen des TFM-Rekonstruktionsverfahrens, die Half-Skip TFM (HSTFM) und die Full-Skip TFM herangezogen werden. Anstatt des direkten Echos werden hier Signale verarbeitet, die durch einfache (HSTFM) [6] oder doppelte (Full-Skip) Reflexion an einer Rückwand entstanden sind. In diesem Beitrag wird die Aussagekraft der TFM im Vergleich mit HSTFM beim Nachweis und der Analyse von vertikalen Rissen in Beton untersucht. Für metallische Werkstoffe wurde das Thema der Ausnutzung von Half- und Full-Skip Daten in [5, 6, 8-10] erforscht. Insbesondere wurde gezeigt, dass die Half-Skip Methode für die Bestimmung der Tiefe vertikaler Risse genutzt werden kann. Kuchipudi und Ghosh [11] haben die Eignung der HSTFM auch für Beton nachgewiesen.

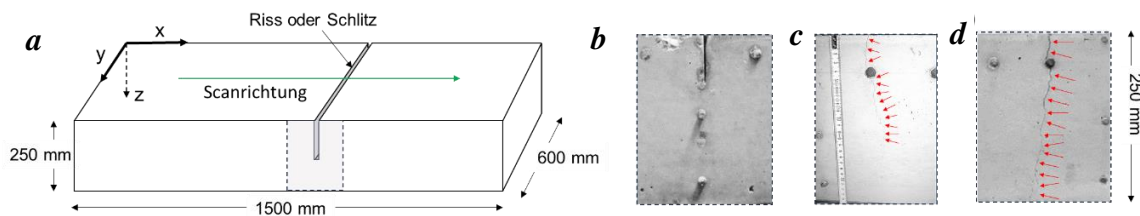
## **1. Probekörper, Ultraschallausrüstung, Datenaufnahme**

### *1.1 Probekörper*

Die Ultraschallmessungen für die Untersuchung der TFM und HSTFM Rekonstruktionen wurden an zwei Betonprobekörpern mit künstlichen und realistischen Fehlern durchgeführt. Das Verfahren, nach dem die Probekörper hergestellt wurden, ist in [12] erläutert. Die Abmessungen (1500 mm Länge, 600 mm Breite und 250 mm Dicke, Abb. 1a) sowie die

Betonmischung (Druckfestigkeitsklasse C30/37) sind identisch. Die Probekörper besitzen 3-lagige Quer- und Längsbewehrung.

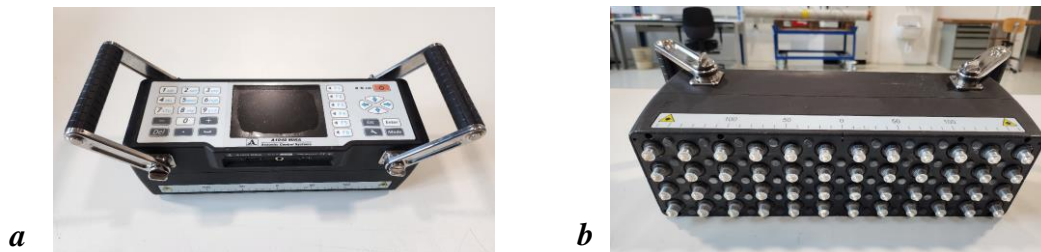
In einen Betonprobekörper (PK-A) wurde ein vertikaler Schlitz mit einer Tiefe von  $72,5 \pm 2,5$  mm durch die gesamte Körperbreite eingebracht (Abb. 1b). In dem anderen (PK-B) wurde ein vertikaler Riss erzeugt. Dafür wurde entsprechend [12] auf der Oberfläche des Probekörpers eine Reihe von vertikalen Bohrungen eingebracht, und in diese Bohrungen wurde der Quellsprengstoff BETONAMIT® eingeführt. Binnen 72 Stunden nach der Injektion dieses Mörtels entwickelt sich zwischen den Bohrungen ein Riss, der sich in die Tiefe ausbreitet. Die mittlere Lage der Stahlbewehrung (125 mm Tiefe) dient dabei als Stopperbewehrung und verhindert die weitere Entwicklung des Risses bis zur Rückwand (Abb. 1c). Die tatsächliche Tiefe des Risses mit Restwandstärke im Inneren des Probekörpers PK-B war unbekannt. Durch Vermessung der sichtbaren Risskontur an den Seiten des Probekörpers kann man den Verlauf approximieren. Die roten Pfeile in Abb. 2c deuten den Rissverlauf in PK-B auf einer Seitenfläche an. Nachdem sich in PK-B der Riss entwickelt hatte, und eine Messreihe durchgeführt worden war, wurden die Bohrungen an der Oberfläche des Probekörpers vertieft, und es wurde erneut Quellsprengstoff eingefügt, bis sich der Riss zu einem Trennriss entwickelt hatte, dessen Tiefe gleich der Dicke des Probekörpers war (Abb. 1d). Die Tiefe des Trennrisses (Abb. 2d) wurde überprüft, indem die Rückwand von PK-B inspiziert wurde.



**Abb. 1.** (a) Prinzipskizze der Probekörper, Seitenansicht um den Bereich des Testfehlers (b) PK-A, Nut (c) PK-B, Riss mit Restwandstärke, (d) PK-B, Trennriss. Die roten Pfeile zeigen auf die Rissöffnung.

## 1.2 Ultraschallgerät

Für die Akquisition von Ultraschalldaten wurde ein niederfrequentes Ultraschallarray A1040 MIRA von der Firma ACS benutzt. In diesem Gerät ist der akustische Block aus 48 DPC Sensoren mit der elektronischen Steuerung und dem Bildschirm in einem Gehäuse kombiniert (Abb. 2a). Die DPC Sensoren sind in äquidistanten Reihen (Abstand 30 mm in Längsrichtung des Gehäuses) in ein Array angeordnet (Abb. 2b). Jeweils vier DPCs in einer Reihe (Abstand 25 mm innerhalb der Reihe) sind parallelgeschaltet und werden als eine akustische Einheit angesteuert. Das Array ist also ein 12-elementiges Lineararray mit einem Elementabstand von 30 mm.



**Abb. 2.** Niederfrequentes Ultraschallarray A1040 MIRA

Die Sensoren des A1040 MIRA erzeugen horizontal polarisierte Transversalwellen. Die Polarisierungsebene ist bei allen DPCs gleich orientiert und ist parallel der kürzeren Gehäusesseite. Die Nennfrequenz der Sensoren beträgt 50 kHz.

Die Datenaufnahme erfolgt nach dem Half-Matrix-Capture-Prinzip (HMC). Hierbei handelt es sich um eine Variante der FMC: eine Reihe von Sensoren sendet eine akustische Welle, die anderen Sensorgruppen dienen als Empfänger. Unter Annahme der Reziprozität der Ultraschallsignale dienen die DPC-Elemente, die als Sender schon beteiligt waren, danach nicht mehr als Empfänger. Der Prozess wird wiederholt, bis 11 von 12 Sensorgruppen als Sender beteiligt sind. Ein komplettes Dataset besteht aus 66 Ultraschallsignalen. Diese werden mit 1 MHz Abtastrate digitalisiert, gespeichert und in der nachfolgenden Rekonstruktion benutzt.

### 1.3 Durchführung von Messungen

Die Ultraschallmessungen erfolgten auf dem jeweiligem Probekörper in Form eines Flächenscans. Das Koordinatensystem wurde so festgelegt, dass die X-Achse entlang des Probekörpers verlief, die Y-Achse quer und die Z-Achse – in die Tiefe (Abb. 1a). Dabei wurde das Array so orientiert, dass seine Längsachse in X-Richtung ausgerichtet war und die Polarisationssebene YZ (parallel der Riss/Nut Fläche) war. Die Flächenscans setzten sich aus 9 Linien mit je 13 Punkten zusammen. Das Messraster war wie folgt: X-Achse abgetastet von  $X = 200$  mm bis  $X = 1280$  mm mit einer Schrittweite von 90 mm; Y-Achse abgetastet von  $Y = 100$  mm bis  $Y = 500$  mm mit einer Schrittweite von 50 mm. Die Koordinaten des Gerätes beziehen sich auf die Mitte der Apertur. Die aufgenommenen HMC-Ultraschalldaten in jeder Position des Gerätes wurden gespeichert und in der nachfolgenden Rekonstruktion benutzt. Im Folgenden wird jeweils anhand einer einzelnen Scanlinie das Ergebnis der 2D-Rekonstruktion diskutiert. Die Schallgeschwindigkeit in den Betonblöcken wurde basierend auf der Reflektion von der Rückwandfläche ermittelt und betrug ca. 2700 m/s für beide Probekörper.

## 2. Datenbearbeitung

### 2.1 Half-Skip Total Focusing Method als Variante der TFM-Rekonstruktion

Das Prinzip der Total-Focusing Rekonstruktionsmethode besteht in der Rückprojektion der Zeitsignale in ein in Pixel unterteiltes Modell des Prüfobjektes. Die phasentreue Überlagerung von Signalanteilen verschiedener Zeitsignale in einem Pixel führt zu Verstärkung oder Auslöschung je nachdem, ob in diesem Punkt Schallenergie gestreut wurde oder nicht. In der klassischen TFM-Rekonstruktion werden die Informationen überlagert, die die reflektierten oder gebeugten Wellen von Streuern im Volumen beinhalten [5].

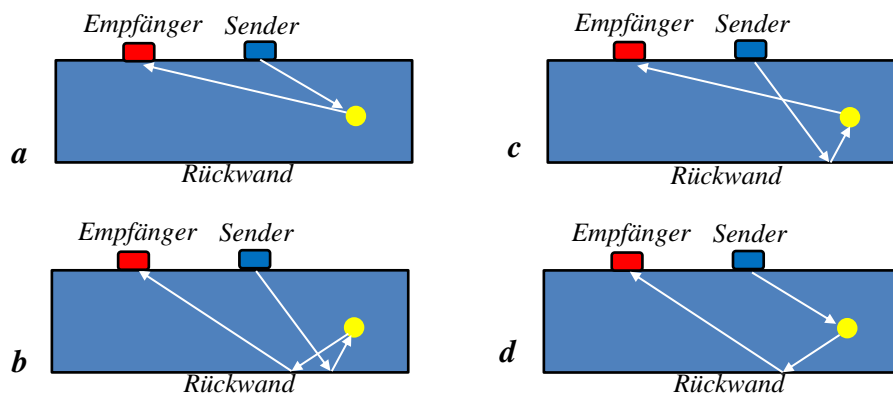


Abb. 3. Variante der Schallausbreitung in einem planparallelen Objekt: a – direkte Ausbreitung, b – Full-Skip, c und d – Half-Skip

Dabei werden die Streuer direkt von den Sendern beschallt, und die sekundären Wellen breiten sich unmittelbar von den Streuern zu den Empfängern aus. Unter der Half-Skip TFM, oder HSTFM, und Full-Skip TFM versteht man eine Rekonstruktion, in welcher nicht die direkt von den Streuern reflektierten Wellen benutzt werden, sondern die Wellen, die während ihrer Ausbreitung einmal (Half-Skip) [6] oder zweimal (Full-Skip) von der Rückwandfläche des Prüfobjektes reflektiert werden. Abb. 3 illustriert die Begriffe „Half-Skip“ und „Full-Skip“ im Sinne der Wellenausbreitung.

Der HSTFM-Rekonstruktionsprozess besteht wie bei TFM in der phasentretreuen Rückprojektion der empfangenen Daten und in ihrer Summation im Modell des Prüfobjektes. Die Intensitätswerte  $I_p$  und  $J_p$  eines rekonstruierenden Pixels  $p$  des Modells werden bestimmt als:

$$I_p = \sum_{S=1}^{n-1} \sum_{E=S+1}^n A^{SE} \left( t_{HSTFM} = \frac{K_{S1} + K_{S2} + K_E}{V} \right) \quad (1)$$

$$J_p = \sum_{S=1}^{n-1} \sum_{E=S+1}^n A^{SE} \left( t_{HSTFM} = \frac{L_S + L_{E1} + L_{E2}}{V} \right)$$

Die Formel (1) beschreibt das Summationsprinzip der HMC-Daten. Hierbei sind  $n$  die Anzahl der Arrayelemente,  $A^{SE}$  ist das Ultraschallsignal des Sender-Empfänger-Paares  $SE$ ,  $t_{HSTFM}$  ist die gesamte Laufzeit der Half-Skip-Ausbreitung und  $V$  ist die Schallgeschwindigkeit im Objekt (Abb. 4a). Da unter Half-Skip zwei Ausbreitungsschemen mit unterschiedlichen Laufzeiten möglich sind (siehe Abb. 3c und 3d), werden beide separat gezeigt.

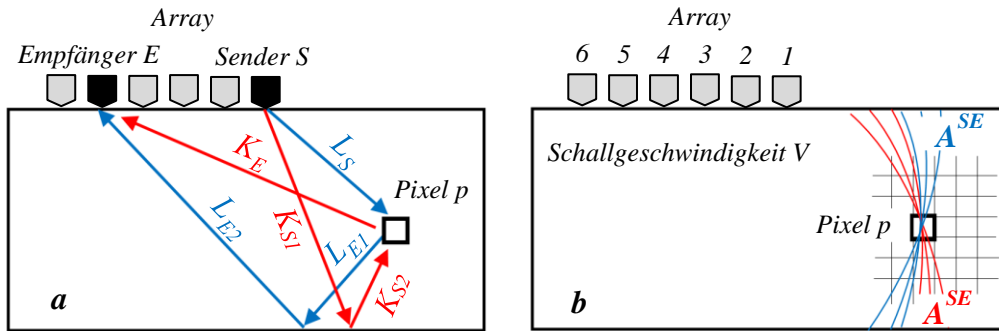


Abb. 4. Zur Erläuterung der HSTFM Rekonstruktion: a – Schallwege, b – Rekonstruktionsellipsen.

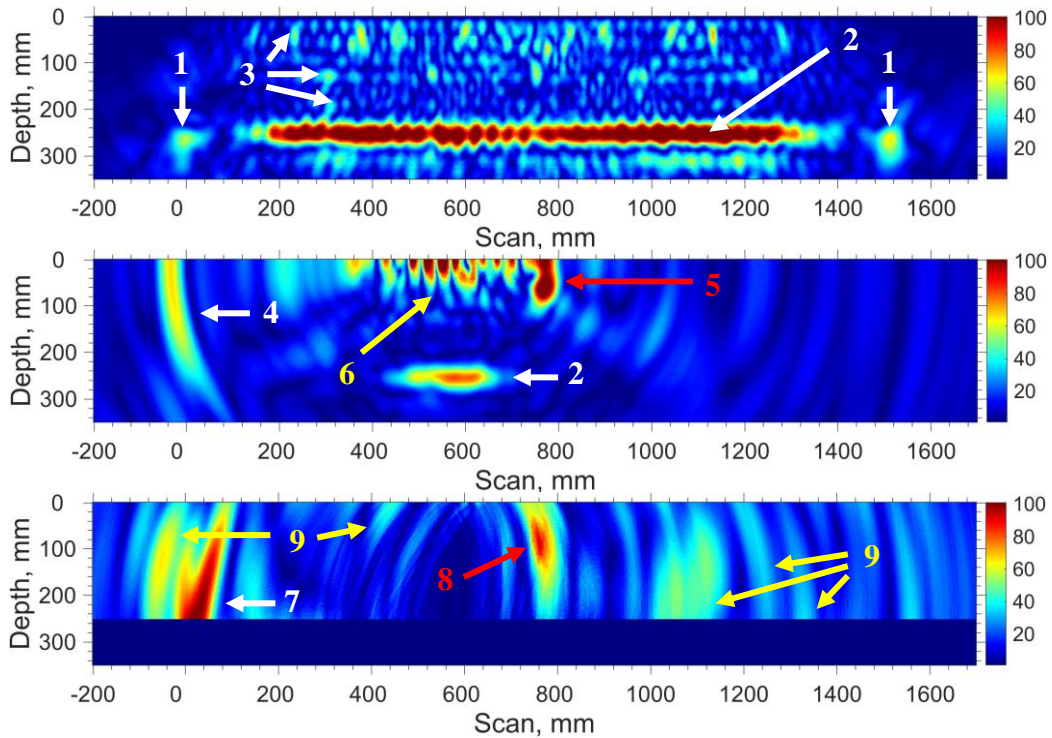
Zur Erläuterung aller Laufstrecken  $K$  und  $L$  in Formel dient Abb. 4a. Abbildung 4b illustriert schematisch die Projektion und Überlagerung der Ultraschalldaten mit konstanter Laufzeit für unterschiedliche Sender-Empfänger-Kombinationen in der Umgebung eines Pixels. Die roten Ortskurven beziehen sich auf die Schallausbreitung nach dem Half-Skip Schallweg wie in Abb. 3c und die blauen Ortskurven auf den Schallweg wie in Abb. 3d.

Ähnlich wie bei der TFM-Methode führt die phasentretreue Überlagerung der Signale in jedem Pixel  $p$  zu Verstärkung oder Schwächung der rekonstruierten Amplitude je nach Stärke des Streuers in diesem Punkt des Modells. Die Ellipsen, auf denen die rückprojizierten Daten eines Sender-Empfänger-Paares liegen, sind jedoch wegen der Reflexion an der Rückwand bei HSTFM anders orientiert als bei TFM (siehe Abb. 4b). Die Folge ist, dass die maximal erzielbare lokale Auflösung der HSTFM-Methode anders bzw. geringer ist als die der TFM-Methode. Ein detaillierter Vergleich des Auflösungsvermögens von TFM und HSTFM ist in [13] zu finden.

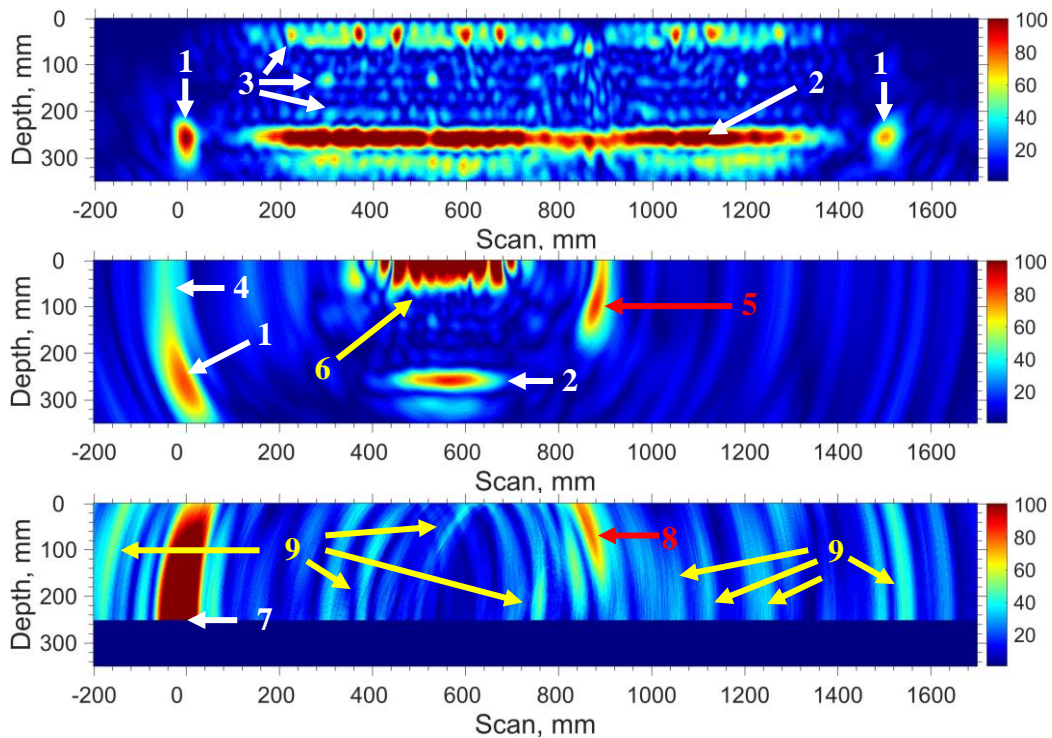
### 3. Rekonstruktionsergebnisse

In diesem Abschnitt (Abb. 6, 7 und 8) werden die nach dem TFM und HSTFM Prinzip rekonstruierten Daten von je einem Linienscan an den Probekörpern A (mit Nut) und B (einmal Zustand mit Riss mit Restwandstärke und einmal Zustand mit Trennriss) verglichen.

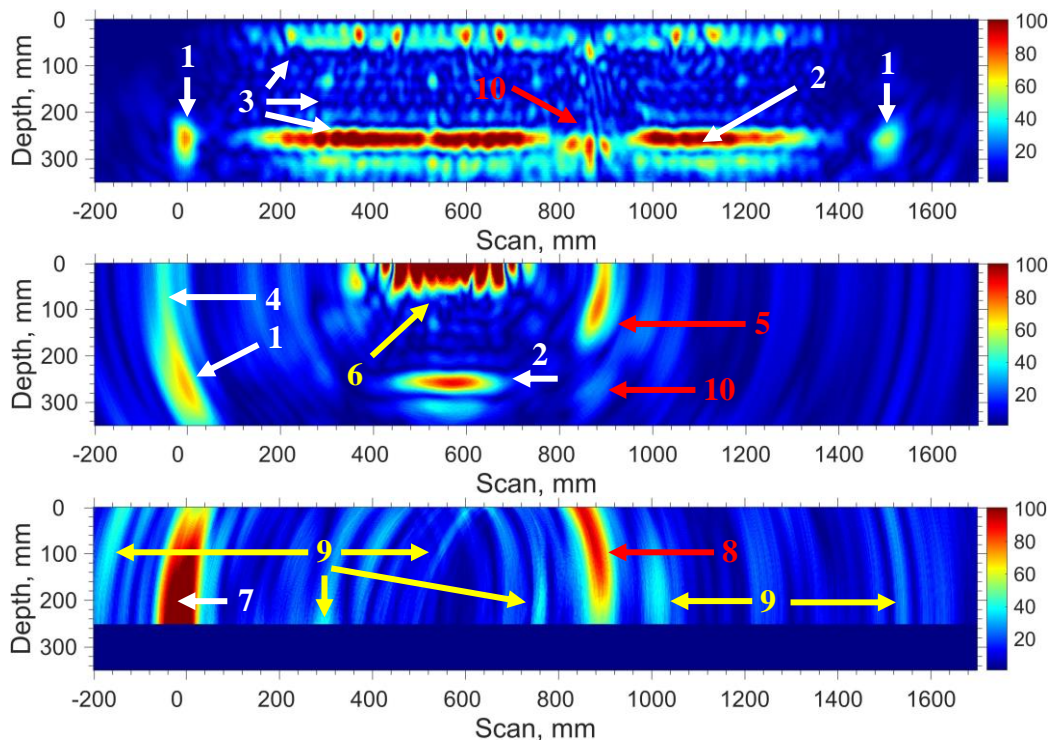
Zunächst wird jeweils der Compound-B-Scan der gesamten nach dem TFM-Prinzip rekonstruierten Scanlinie gezeigt. Darunter ist jeweils die TFM-Rekonstruktion einer einzelnen Arrayposition zu sehen. Es handelt sich um die Position des Arrays, bei der die Fehleranzeige in der HSTFM-Rekonstruktion maximal war. Als unterstes Bild ist die HSTFM-Rekonstruktion der Daten dieser Arrayposition gezeigt. Wie in [13] erläutert, wurde das Rückwandartefakt durch Filterung entfernt.



**Abb. 6.** Rekonstruktionsergebnisse Probekörper PK-A mit Nut: oben – TFM Compound-B-Bild einer Scanlinie, Mitte – TFM, eine Arrayposition, unten – HSTFM der Daten derselben Arrayposition



**Abb. 7.** Rekonstruktionsergebnisse, Probekörper PK-B mit Riss mit Restwandstärke: oben - TFM Compound-B-Bild einer Scanlinie, Mitte – TFM, eine Arrayposition, unten – HSTFM der Daten derselben Arrayposition



**Abb. 8.** Rekonstruktionsergebnisse an dem Probekörper PK-B mit Riss mit Trennriss: oben - TFM Compound-B-Bild einer Scanlinie, Mitte - TFM, eine Arrayposition, unten - HSTFM der Daten derselben Arrayposition

Die Indikationen in den Rekonstruktionsbildern (Abb. 6-8) sind mit Pfeilen unterschiedlicher Farbe markiert. Die weißen Pfeile und Ziffern verweisen auf Anzeigen der Geometrie des Prüfobjektes, und zwar: 1 - Winkelspiegelreflexion von den unteren Ecken des Probekörpers; 2 - Rückwandfläche; 3 - Bewehrung (gleichmäßig verteilte punktförmige Indikationen bei drei Tiefen); 4 - Reflexion der Oberflächenwelle von der oberen Ecke des Probekörpers; 7 - HSTFM-Indikation von der linken Stirnseite des Probekörpers. Rote Pfeile zeigen auf die Indikationen, die von Fehlern verursacht werden: 5 - Reflexion der Oberflächenwelle an der Nut; 8 - HSTFM-Indikation von der Nut bzw. vom Riss; 10 - Winkelspiegelecho des Trennrisses [14]. Mit gelber Farbe sind sonstige Indikationen markiert: 6 ist von Oberflächenwellen verursacht, die sich zwischen den Arrayelementen ausbreiten; 9 sind die Artefakte der Rekonstruktion. Die Rastergröße des Rekonstruktionsvolumens betrug  $5 \times 5 \text{ mm}^2$  für TFM und  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  für HSTFM.

#### 4. Diskussion

Die Bewertung der Tiefe von Rissen in Beton ist eine schwierige Aufgabe für die zerstörungsfreie Prüfung. Scherwellenarrays mit Trockenpunktcontactwandlern eröffnen sehr gute Möglichkeiten für die Ultraschallprüfung von Beton. Da allerdings die Zuschläge im Beton und die Bewehrungseisen Ultraschallwellen stark streuen, können Methoden, die bei der Prüfung von Metallen erfolgreich sind, nicht selbstverständlich auf Stahlbeton angewandt werden. Abb. 6 zeigt, dass die Nut im Standard-TFM-Compound-Bild kaum zu erkennen ist. Sowohl das TFM-Bild als auch das HSTFM-Bild, die von einer Position links neben der Nut aus aufgenommen wurden, liefern dagegen eine sehr deutliche Fehleranzeige in allen drei Fällen (Abb. 6-8). Der Riss mit Restwandstärke (Abb. 7) ist bereits im Standard-TFM-Bild anhand einer oberflächennahen Anzeige und durch eine Störung der Rückwandanzeige sichtbar. Der Trennriss (Abb. 8) kann anhand der Winkelspiegelanzeige in den TFM-Bildern identifiziert werden [14]. Die hauptsächlich durch Oberflächenwellen

erzeugte Rissanzeige (roter Pfeil 5) in den TFM-Bildern, Abb. 7 und 8 Mitte, verändert sich nicht mit der Risstiefe. Die HSTFM Anzeige (roter Pfeil 8), Abb. 7 und 8 unten, ist dagegen sowohl in ihrer Amplitude als auch in ihrer Ausdehnung bei dem Trennriss größer als bei dem Riss mit Restwandstärke.

Anhand von Ultraschall-Linienscans, aufgenommenen auf Probekörpern mit realistischen und künstlichen Fehlern, wurde die prinzipielle Eignung der TFM und Half-Skip TFM Algorithmen zum Nachweis von vertikalen Ungängen in Betonstrukturen gezeigt. Die TFM-Rekonstruktion von Half-Skip Daten ist allerdings aufgrund ihres niedrigen Signal-Rausch-Verhältnisses und Auflösungsvermögen nicht als Hauptwerkzeug für die Bestimmung der Fehlergrößen zu betrachten, sondern als zusätzliche Informationsquelle für die Ergänzung der mit TFM oder anderen Verfahren gewonnenen Kenntnisse.

## Referenzen

- [1] DIN EN ISO 16828:2014-06 Zerstörungsfreie Prüfung - Ultraschallprüfung - Beugungslaufzeittechnik, eine Technik zum Auffinden und Ausmessen von Inhomogenitäten (ISO 16828:2012); Deutsche Fassung EN ISO 16828:2014
- [2] British Standard BS 1881, Testing Concrete, Part 203, Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete (1986)
- [3] DGZfP-Fachausschuss Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen, Unterausschuss Ultraschallprüfung, Merkblatt B 04 „Ultraschallverfahren zur zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen“ (2018)
- [4] Mielentz, F., Milmann, B., Krause, M., Müller, W., Crail, S.: Zerstörungsfreie Risscharakterisierung in Betonbauteilen mit Ultraschall. Posterbeitrag **24**. In: *Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (Hrsg.): Fachtagung Bauwerksdiagnose – Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen* (2001) DGZfP-Berichtsband 76 auf CD
- [5] Holmes C., B. Drinkwater, B. and Wilcox, P., The post-processing of ultrasonic array data using the total focusing method (2004), *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, Vol. **46** 677-680. <https://doi.org/10.1784/insi.46.11.677.52285>
- [6] Felice, M. V., Velichko, A. and Wilcox, P. D. Accurate depth measurement of small surface-breaking cracks using an ultrasonic array post-processing technique. *NDT and E International* **68**, 105–112 (2014). DOI: 10.1016/j.ndteint.2014.08.004
- [7] Kozlov, V.N., Samokrutov, A.A. and Shevaldykin V.G. Thickness measurements and flaw detection in concrete using ultrasonic echo method. *Nondestructive Testing and Evaluation* **13** (2). (1997), 73-84. <https://doi.org/10.1080/02780899708953020>
- [8] Saini, A., Felice, M. V., Fan, Z. and Lane, C. J. L. Optimisation of the Half-Skip Total Focusing Method (HSTFM) parameters for sizing surface-breaking cracks. *NDT and E International* **116**, 102365 (2020). DOI: 10.1016/j.ndteint.2020.102365
- [9] Han, X.-L., Wu, W.-T., Li, P. and Lin, J. Combination of direct, half-skip and full-skip TFM to characterize multi-faceted crack. *IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)* **1–4** (2015). DOI:10.1109/ULTSYM.2015.0339. DOI: 10.1109/ULTSYM.2015.0339
- [10] Han, X., Wu, W. Zhang, D., Wan, H. Combination of direct, half-skip and full-skip TFM to characterize defect (II). *IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)* (2019). DOI: 10.1109/ULTSYM.2019.8925989
- [11] Kuchipudi, S. T. and Ghosh, D. An Ultrasonic wave-based framework for Imaging internal cracks in Concrete. *Structural Control and Health Monitoring* **29** (2022). DOI: 10.1002/stc.3108
- [12] Wiggerhauser, H., Köpp, C., Timofeev, J. and Azari, H. Controlled Creating of Cracks in Concrete for Non-destructive Testing. *Journal of Nondestructive Evaluation* **37**, 67 (2018). DOI: 10.1007/s10921-018-0517-x
- [13] Kuchipudi, S. T., Pudovikov, S., Wiggerhauser, H., Ghosh, D. and Rabe, U. Imaging of vertical surface-breaking cracks in concrete members using ultrasonic shear wave tomography. *Scientific Reports* **13**, 21744 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48699-w>
- [14] Rabe, U., Pudovikov, S., Herrmann, H.-G., Wiggerhauser, H., Prabhakara, P. and Niederleithinger, E. Using the Corner Reflection for Depth Evaluation of Surface Breaking Cracks in Concrete by Ultrasound. *Journal of Nondestructive Evaluation* **42**, 44 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10921-023-00956-8>