

Bewertung von Radar- und Ultraschalldaten mit Hilfe der Datenfusion

Christiane MAIERHOFER, Gerhard ZACHER, Jens WÖSTMANN, Martin KRAUSE,
Doreen STREICHER, Boris MILMANN
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

Kurzfassung. Zur Lösung von Prüfproblemen im Bauwesen gewinnt die effektive Kombination zerstörungsfreier Prüfverfahren zunehmend an Bedeutung. In diesem Beitrag werden praktische Beispiele aus dem Bereich der zerstörungsfreien Prüfung von Betonstrukturen zur Fusion von Radar- und Ultraschalldatensätzen vorgestellt.
E-Mail: christiane.maierhofer@bam.de

1 Einführung

Bei der Lösung von Prüfproblemen im Bauwesen gewinnt die Kombination verschiedener komplementärer zerstörungsfreier Prüfverfahren bzw. unterschiedlicher Messkonfigurationen eines Verfahrens zunehmend an Bedeutung. Zur Verfahrenskombination eignen sich besonders elektromagnetische (z. B. Radar) und akustische Verfahren (z. B. Ultraschall oder Impact-Echo), da die Wellenausbreitung von unterschiedlichen Materialparametern beeinflusst wird und die Impedanzunterschiede an den Grenzflächen Beton/Luft und Beton/Metall deutlich voneinander abweichen [1]. Gleichzeitig ist aber die Ortsauflösung bei der Abbildung von Strukturen im Inneren vergleichbar, so dass eine pixelweise mathematische Verknüpfung der Messdaten, die sogenannte Datenfusion, möglich ist [2], [3], [4]. Bei der Überlagerung von Datensätzen eines Messverfahrens mit unterschiedlichen Sensorkonfigurationen können sich ebenfalls komplementäre Informationen (z. B. verschiedene Polarisierungen von Sende- und Empfangsantenne) und unterschiedliche Ortsauflösungen und Eindringtiefen (z. B. unterschiedliche Antennenfrequenzen) ergänzen.

Die Automatisierung der Messverfahren ermöglicht zukünftig eine effiziente Messdurchführung und eine genauere Positionierung der Sensoren, so dass Wiederholungsmessungen mit unterschiedlichen Verfahren überhaupt erst realisierbar sind. Durch die anschließende Datenfusion werden die Zuverlässigkeit und der Informationsgehalt eines Messeinsatzes deutlich erhöht.

Die Erweiterung der einfachen Datenfusion (Addition, Subtraktion oder der Auswahl des Pixels mit der maximalen Intensität der einzelnen Messdaten) durch die Zuordnung von Nutz- und Störsignalen nach dem Prinzip der Dempster-Shafer-Theorie ermöglicht eine ortsaufgelöste Bewertung von 3D-Datensätzen von Einzelverfahren und von fusionierten Datensätzen und somit einen quantitativen Vergleich der Zuverlässigkeit der Einzelverfahren [5], [6], [7].

In dem vorliegenden Beitrag werden praktische Beispiele aus dem Bereich der zerstörungsfreien Prüfung von Betonstrukturen zur Fusion von Radar- und Ultraschall-datensätzen vorgestellt.

2 Prinzip der Datenfusion

Für viele Fragestellungen im Bauwesen ergeben sich effiziente Kombinationsmöglichkeiten mit unterschiedlichen zerstörungsfreien Prüfverfahren, wie z. B. die schnelle Ortung von Spanngliedern in Spannbetonbrücken mit Radar und die anschließende Untersuchung des inneren Zustandes der Spannglieder mit akustischen Verfahren [1].

Mit dem Impuls-Radar können Strukturen geortet werden, an deren Grenzflächen sich die dielektrischen Eigenschaften des Materials deutlich ändern, so dass dort Reflexionen der elektromagnetischen Wellen auftreten. Das Verfahren eignet sich daher sehr gut zur Detektion von metallischen Einbauteilen wie z. B. schlaffer Bewehrung und Hüllrohren in Spannbetonkonstruktionen. Weiterhin können Hohlstellen, Ablösungen und unter bestimmten Bedingungen auch Kiesnester nachgewiesen werden [8], [9]. Elektromagnetische Wellen werden an metallischen Einbauteilen stärker reflektiert als elastische Wellen. Da außerdem bei der Durchführung der Radarmessungen keine direkte Berührung des Bauteils erforderlich ist und die Messungen automatisiert und schnell durchgeführt werden können, kann schlaffe und vorgespannte Bewehrung zuverlässiger und schneller als mit den akustischen Verfahren geortet werden. Daher ist das Impuls-Radarverfahren eine sinnvolle Ergänzung der akustischen Verfahren. Weiterhin können mit dem Ultraschallechoverfahren aufgrund des großen akustischen Impedanzunterschiedes an der Grenzfläche Beton/Luft Hohlstellen und Ablösungen mit höherer Aussagesicherheit geortet werden als mit Radar. Häufig ist die Eindringtiefe der elastischen Wellen in den Beton größer als die der elektromagnetischen. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass sich auch die Randbedingungen, die den Einsatz eines Verfahrens begrenzen, unterscheiden. Beispielsweise werden elektromagnetische Wellen im hier eingesetzten Frequenzbereich durch einen hohen Feuchtegehalt sehr stark gedämpft, während die Feuchte die Ausbreitung elastischer Wellen eher unterstützt. Die Ergebnisse beider Messverfahren sind daher zum großen Teil komplementär zueinander und für viele Aufgabenstellungen liefert eine Verfahrenskombination mehr Informationen als ein Einzelverfahren.

Um die Messergebnisse unterschiedlicher Messverfahren effizient und zuverlässig zu interpretieren, können die Messdaten neben der Einzeldarstellung miteinander verknüpft werden. Dieser Prozess wird als Datenfusion bezeichnet [2]. Liegen mehrere Datensätze verschiedener Sensoren des gleichen untersuchten Volumens vor, so kann eine Datenfusion z. B. pixelweise durchgeführt werden. Dazu ist, wie in Abbildung 1 dargestellt, vorher häufig eine Bearbeitung der Rohdaten erforderlich, die neben Filterung, Interpolation und Konvertierung der Einzeldatensätze in ein gemeinsames Datenformat auch deren SAFT (Synthetic Aperture Focusing Technique) Rekonstruktion umfasst [10]. Für die Überlagerung der einzelnen Datensätze werden hier die folgenden Operationen eingesetzt:

- Summe der Amplituden (Fusion von Radar und Ultraschall, Reduzierung des Rauschens)
- Maxima der Amplituden (Fusion zweier Radardatensätze mit unterschiedlicher Polarisation, Vermeidung der Überbewertung von Kreuzungspunkten)

Bei der Durchführung der Datenfusion kann die unterschiedliche Nachweiswahrscheinlichkeit (probability of detection) der Verfahren für verschiedene Fehlstellen und Inhomogenitäten berücksichtigt werden. Eine Wichtung der Daten kann z. B. nach der Bayesian-Theorie [nach Thomas Bayes, 1702-1761] oder der Dempster-Shafer-Theorie [6], [7] durchgeführt werden. Die Bayesian-Theorie setzt voraus, dass die Nachweiswahrscheinlichkeit der Einzelverfahren bekannt ist, aus der sich dann die Gesamtnachweiswahrscheinlichkeit des Multisensorsystems ergibt. Die Dempster-Shafer-Theorie führt die Evidenz ein, die als eine Erweiterung einer Wahrscheinlichkeit betrachtet werden kann. Statt eines eindimensionalen wird ein zweidimensionales Maß verwendet, welches sich aus dem Grad des Vertrauens darin, dass die Aussage eines Sensors zutrifft (degree of

belieb), und der Plausibilität des Ereignisses, bzw. aus einem Wahrscheinlichkeitsbereich mit einer unteren und oberen Grenze, zusammensetzt. Die Evidenz für die Anwesenheit eines Reflektors (einer Hypothese) lässt sich über die orthogonale Summe der Evidenzen der Einzelverfahren ermitteln. Daher muss zunächst die Evidenz der Einzelverfahren ermittelt werden, wobei die Annahme der Anwesenheit eines Reflektors als positive Evidenz, die Annahme der Abwesenheit als negative Evidenz und eine dritte Annahme als Kombination der beiden vorherigen Annahmen (Anwesenheit oder Abwesenheit eines Reflektors) als zweifelhafte Evidenz bezeichnet werden.

Für rekonstruierte 3D-Datensätze (Radar, Ultraschall) können für jedes Volumenelement diese Evidenzen durch einen Vergleich der lokalen mit den globalen Amplitudenverteilungen ermittelt werden [5]. Die Kombinationen der Evidenzen der Einzeldatensätze ergeben dann die Evidenz des Gesamtergebnisses.

Die globale Amplitudenverteilung (Histogramm der Amplituden eines gesamten 3D-Datensatzes) kann, wie in Abbildung 2 dargestellt, näherungsweise mit einer Gaussverteilung beschrieben werden [5]. Fügt man in diese Darstellung das Histogramm der Amplitudenverteilung eines lokalen Volumenbereiches hinzu, dann kann die Fläche unter der Kurve des globalen Histogramms bis zur unteren Grenze des lokalen Histogramms der positiven Evidenz zugeordnet werden (ein Reflektor hat eine hohe Amplitude). Die Fläche zwischen unterer und oberer Grenze entspricht der zweifelhaften Evidenz, und die Fläche oberhalb der oberen Grenze ist ein Maß für die negative Evidenz (siehe Abbildung 2). Demnach nimmt, entsprechend der Erwartung, die positive Evidenz mit zunehmender Amplitude des lokalen Volumenbereiches zu. Entsprechend ist die Standardabweichung der lokalen Amplitudenverteilung gleichzeitig u. a. ein Maß für das Signalrauschen und gibt somit die Streuung und damit einen Bezug zur Unsicherheit des Messwertes wieder.

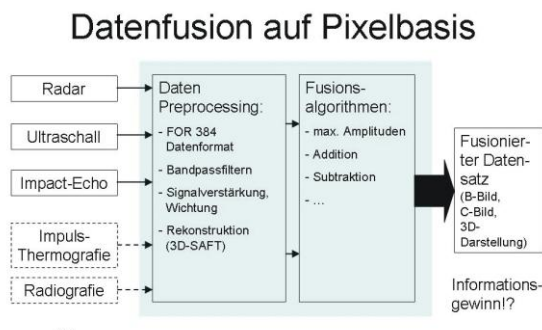


Abbildung 1: Prinzip der pixelweisen Datenfusion.

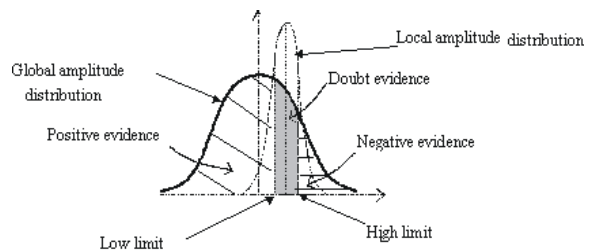


Abbildung 2: Bestimmung von Wahrscheinlichkeitsbereichen für das Vorhandensein von Reflektoren mit einer unteren und oberen Grenze [5].

3 Beispiel: Fusion zweier Radardatensätze

Da elektromagnetische Wellen an metallischen Einbauteilen vollständig reflektiert werden, eignet sich das Radarverfahren sehr gut zur Bewehrungsortung. Kommerzielle Dipol-Radarantennen senden in der Regel linear polarisierte elektromagnetische Wellen aus, d. h. die Richtung des elektrischen Feldes bleibt zeitlich und räumlich konstant. Die von der metallischen Bewehrung reflektierte Signalintensität der Radarwellen ist dabei abhängig von der Richtung des elektrischen Feldes: die Intensität ist maximal, wenn die Polarisation parallel zur Bewehrung verläuft, und minimal bei senkrechter Konfiguration [11].

Zur Untersuchung des Einflusses der Bewehrungsdichte auf die Ortung von Hohlstellen, die sich unterhalb der Bewehrung befinden, wurde ein Betonprobekörper

hergestellt, dessen Schalung vor dem Betonieren in Abbildung 3 zu sehen ist. Drei Hohlstellen mit jeweils gleichen Maßen von $10 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$ wurden mit Polystyrol nachgebildet und mit einer Betondeckung von 6 cm unterhalb der Bewehrung fixiert. Die Bewehrungsdichte wurde durch den Einbau von ein, zwei und drei Lagen Q188 Matten variiert. In gleicher Höhe wurden als Referenz drei Fehlstellen ohne Bewehrung eingebaut.

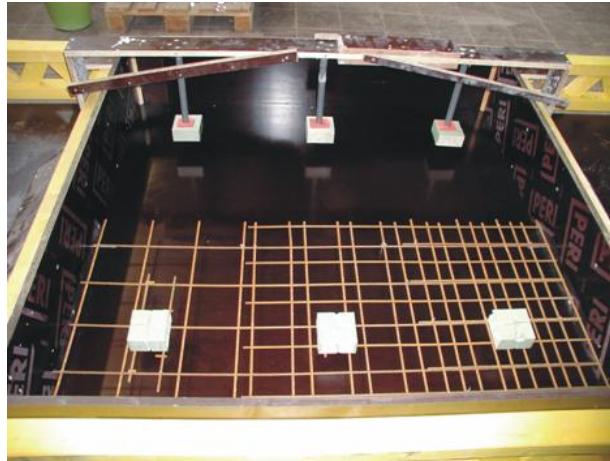
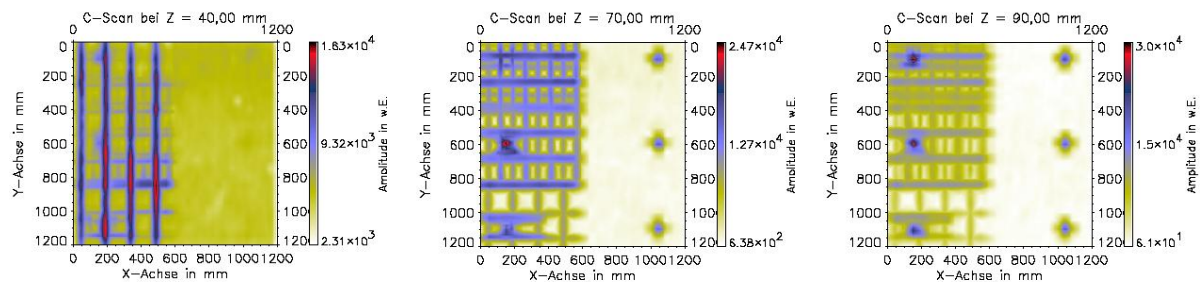


Abbildung 3: Schalung des Betonprobekörpers mit Fehlstellen und Bewehrung (Q188 Matte: Abstand der Stäbe: 150 mm, &: 6mm), vor dem Betonieren (Ansicht von der Rückseite).

Mit einem automatisierten Scannersystem wurden mit einer 1,5 GHz Radarantenne durch Variation der Bewegungsrichtung und der Antennenpolarisation vier Datensätze erfasst. Im Folgenden werden nur zwei dieser Datensätze weiter betrachtet. Für den ersten Datensatz wurde die Antenne in horizontaler Richtung (x-Richtung) verfahren und die Antennenpolarisation dazu senkrecht (vertikal) ausgerichtet (HV-Konfiguration). Für den zweiten Datensatz wurde die Antenne vertikal (in y-Richtung) verfahren und die Polarisation wiederum dazu senkrecht (horizontal) ausgerichtet (VH-Konfiguration). Anschließend wurden die einzelnen Datensätze mit einem 3D-FT-SAFT-Algorithmus rekonstruiert.

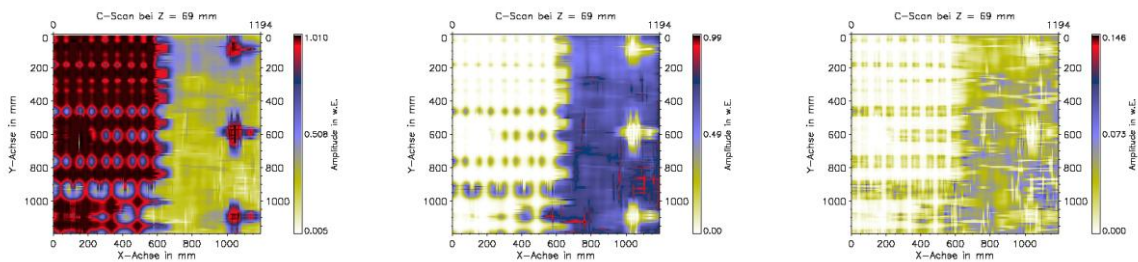
Eine pixelweise Datenfusion erfolgte durch Auswahl der jeweils maximalen Amplituden in beiden Datensätzen. Drei ausgewählte C-Bilder in Tiefen von 40, 70 und 90 mm des fusionierten Datensatzes sind in Abbildung 4 dargestellt. Insbesondere im Bereich mit der dreilagigen Bewehrung können nicht alle Bewehrungsstäbe einzeln aufgelöst werden, aber beide Richtungen der Bewehrungsstäbe werden vergleichbar gut dargestellt. Alle Fehlstellen sind im Tiefenschnitt bei 90 mm klar zu erkennen.



a) C-Bild in 40 mm Tiefe b) C-Bild in 70 mm Tiefe c) C-Bild in 90 mm Tiefe

Abbildung 4: C-Bilder in unterschiedlichen Tiefen der rekonstruierten und pixelweise fusionierten Radardatensätze der Messungen mit der 1,5 GHz Antenne am in Abbildung 3 dargestellten Probekörper.

Positive, negative und zweifelhafte Evidenzen des kombinierten Datensatzes, berechnet aus der orthogonalen Summe der Einzeldatensätze [5], zeigt die Abbildung 5. Hier wurden C-Bilder der Evidenzen entsprechend einer Tiefe von 70 mm ausgewählt. Da die betrachteten lokalen Volumina jeweils deutlich größer als ein Pixel waren (hier: jeweils 125 Pixel), werden die Strukturen mit einer geringeren Ortsauflösung dargestellt. Entsprechend der Erwartung zeichnen sich hohe positive, geringe negative und geringe zweifelhafte Evidenzen in den Bereichen der Bewehrung und der Hohlstellen ab.



a) Positive Evidenz

b) Negative Evidenz

c) Zweifelhafte Evidenz

Abbildung 5: C-Bilder in einer Tiefe von 70 mm der nach der Dempster-Shafer Theorie bestimmten volumenbezogenen positiven, negativen und zweifelhaften Evidenzen, die aus der orthogonalen Summe aus den Evidenzen der Einzeldatensätze ermittelt wurden.

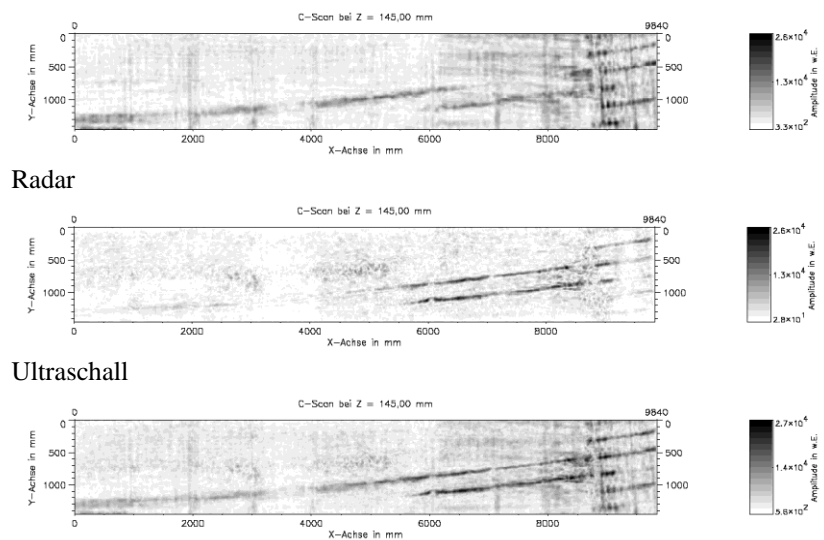
4 Beispiel: Fusion von Radar- und Ultraschallmessdaten, aufgenommen an einem Steg einer Hohlkastenbrücke

Auf die Ergebnisse der Untersuchung des Verpresszustandes von Spanngliedern mit Ultraschall hat sowohl die Anordnung der Spannglieder als auch die Art der Spannglieder eine Auswirkung.

Im Folgenden wird ein Beispiel aus dem Untersuchungsprogramm an einer Hohlkastenbrücke vorgestellt [12]. Hier wurden automatisierte Messungen mit Radar und Ultraschall an einem der Hohlkastenstege in einem Messfeld der Größe $10 \times 1,5 \text{ m}^2$ durchgeführt (siehe auch Abbildung 6). Abbildung 7 zeigt zum Vergleich untereinander die wie folgt ermittelten drei C-Bilder aus einer Tiefe von jeweils 14,5 cm:

- C-Bild eines aus zwei rekonstruierten Radardatensätzen (HV- und VH-Konfiguration) zusammengesetzten Datensatzes
- C-Bild eines rekonstruierten Ultraschalldatensatzes
- C-Bild des aus Radar- und Ultraschalldaten fusionierten Datensatzes (Summe der Amplituden)

Im obersten C-Bild der Radardaten ist das Spannglied im linken Bereich deutlicher zu erkennen als im C-Bild des Ultraschalldatensatzes. Auf der rechten Seite im Bereich der Koppelglieder werden die Spannglieder mit Ultraschall besser abgebildet. Die geringere Intensität der an den Spanngliedern reflektierten elektromagnetischen Impulse kann auf die hier vorhandene dichtere Bewehrung zurückgeführt werden, durch die die Ultraschallwellen wesentlich schwächer beeinflusst werden. Der fusionierte Datensatz im unteren Bild stellt die Spannglieder optimal dar.



Datenfusion

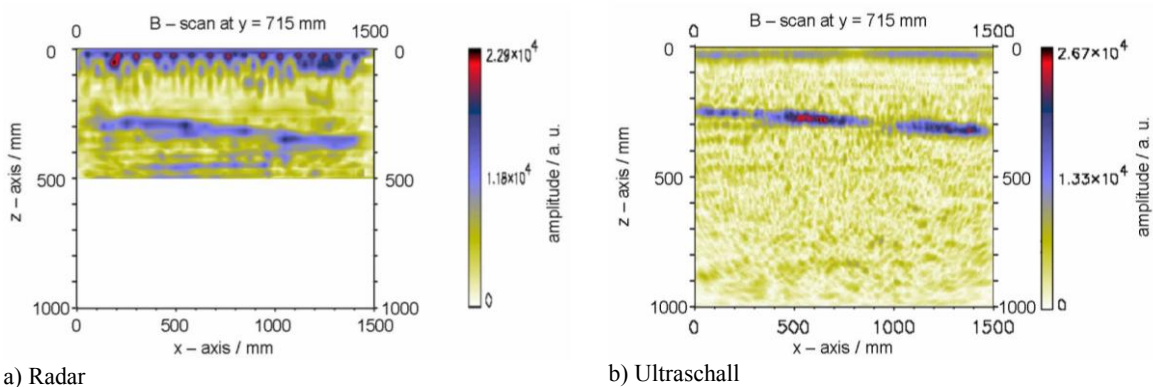
Abbildung 6: Radarmessung mit Scanner am Hohlkastensteg.

Abbildung 7: Oben: Radar C-Bild in einer Tiefe von 14,5 cm. Mitte: Ultraschall C-Bild in einer Tiefe von 14,5 cm. Unten: C-Bild des aus Ultraschall- und Radardaten fusionierten Datensatzes in einer Tiefe von 14,5 cm.

5 Beispiel: Fusion von Radar und Ultraschallmessdaten, aufgenommen an einem Querträger einer Betonbrücke

An einem Querträger einer vorgespannten Betonbrücke wurde ein Riss zwischen dem Träger und der darüber liegenden Tragplatte entdeckt. Zur Ermittlung der Rissursache war daher die Bestimmung der genauen Position der Bewehrung innerhalb des Trägers erforderlich. Vier ausgewählte Messbereiche wurden mit Hilfe eines Scanners sowohl mit Radar als auch mit Ultraschall untersucht. Im Folgenden werden Messdaten des Trägers innerhalb des Hohlkastens der Brücke vorgestellt und diskutiert.

Die Radarmessungen erfolgten mit der 1,5 GHz Antenne entlang horizontaler und vertikaler Messspuren mit jeweils rechtwinkliger Ausrichtung der Polarisation bzgl. der Messspur. Die Radardatensätze wurden mit FT-SAFT rekonstruiert und anschließend fusioniert (max. Amplituden). Die Ultraschallmessungen erfolgten mit einem Ultraschallarray der Fa. ACSYS mit einer Frequenz von 50 kHz und wurden mit 3D-SAFT rekonstruiert.

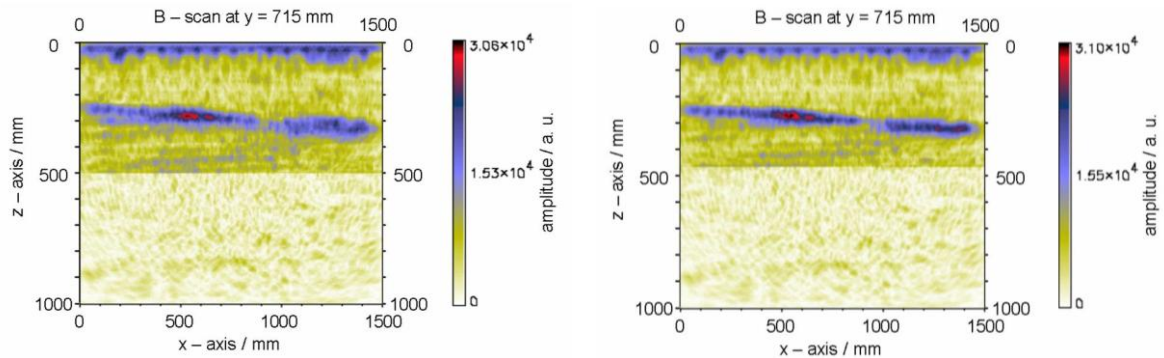


a) Radar

b) Ultraschall

Abbildung 8: a) FT-SAFT Radar B-Bild einer Messspur auf dem Querträger. b) 3D-SAFT B-Bild der Ultraschallmessung der gleichen Messspur wie in (a).

Abbildung 8 zeigt zwei vergleichbare rekonstruierte B-Bilder der Radar- und der Ultraschallmessungen vor der Datenfusion. Die Radarmessungen (a) ermöglichen die Ortung der oberflächennahen Bewehrung, während der sich darunter befindende Spannkanal in einer Tiefe von ca. 25 bis 30 cm nur sehr schwach abgebildet wird. Im Ultraschall B-Bild (b) kann die oberflächennahe Bewehrung nicht detektiert werden, der Spannkanal ist aber wesentlich deutlicher zu erkennen.



a) Ohne Geschwindigkeitskorrektur

b) Mit Geschwindigkeitskorrektur

Abbildung 9: a) Datenfusion von Radar und Ultraschall ohne Geschwindigkeitskorrektur.
b) Datenfusion nach Geschwindigkeitskorrektur.

Der bereits vorher fusionierte Radardatensatz und der Ultraschalldatensatz wurden über die Addition der Amplituden fusioniert. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass, obwohl vor der Datenfusion die Ausbreitungsgeschwindigkeiten mit möglichst hoher Genauigkeit ermittelt wurden, lokale Schwankungen der Materialeigenschaften zu Abweichungen der Tiefenskalierung in beiden Datensätzen führen können. Zusätzlich können Inhomogenitäten im Material die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der elektromagnetischen und elastischen Wellen unterschiedlich stark beeinflussen. Da die Datenfusion jedoch nur dann sinnvoll eingesetzt werden kann, wenn beide Datensätze hinsichtlich ihrer geometrischen Zuordnung übereinstimmen, wurden hier die Radar- und Ultraschalldatensätze bezüglich der Tiefe der Reflexion von der oberen Kante des Spannkanaals an einem ausgewählten Messpunkt aneinander angepasst. Abbildung 9 beinhaltet zwei B-Bilder des fusionierten Datensatzes vor (a) und nach (b) der Korrektur der Tiefenskala und zeigt deutlich die dadurch verbesserte räumliche Auflösung.

6 Diskussion und Ausblick hinsichtlich der Anwendung

Die in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse zeigen deutlich die Vorteile der pixelweisen und der wahrscheinlichkeitsorientierten Fusion von Einzelmessdaten eines oder mehrerer Messverfahren, die eine bessere Darstellung der in den Datensätzen enthaltenen Informationen ermöglichen.

Aufgrund der schnellen und unproblematischen Datenerfassung sowie der komplementären Eigenschaften eignet sich das Radarverfahren optimal für die Kombination mit akustischen Messverfahren. Datenpunkte aus gleichen Messbereichen können mathematisch über die Datenfusion miteinander verknüpft werden. Die in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse zur Fusion von Radardatensätzen, die in unterschiedlichen Polarisationsrichtungen des elektrischen Feldes der Antenne aufgenommen wurden, sowie von Radar- und Ultraschalldatensätzen zeigen deutlich die Vorteile dieser Auswertungsmethode: Gleichzeitige Darstellung von zueinander rechtwinkliger Bewehrung (zwei Radardatensätze mit zueinander rechtwinkliger Polarisation des von der Antenne

abgestrahlten elektrischen Feldes) und gleichzeitige Darstellung von oberflächennahen (Radar) und tiefer liegenden (Ultraschall) metallischen Einbauteilen sowie von Hohlstellen (Ultraschall, hier nicht dargestellt) mit gutem Signal-zu-Rausch-Verhältnis.

Die jeweiligen Vorteile der Einzelmessverfahren ergänzen sich insbesondere dann optimal, wenn Datensätze vorliegen, die mit Hilfe eines Scannersystems mit hoher Positioniergenauigkeit erfasst wurden. Diese Systeme können bereits in der Praxis effizient eingesetzt werden.

Danksagung

Teile der in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse wurden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Rahmen der DFG-Forschergruppe FOR 384 finanziert.

Die Untersuchungen an den Hohlkastenbrücken wurden von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) und der Baustoff- und Bodenprüfstelle Wetzlar dankenswerterweise gefördert.

Bei der Durchführung der experimentellen Untersuchungen haben viele Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der BAM, Fachgruppe VIII.2, sehr engagiert mitgearbeitet.

Die FT-SAFT Rekonstruktionen erfolgten mit Programmen der Universität Kassel im Rahmen der Forschergruppe (Klaus Mayer).

Referenzen

- [1] Maierhofer, Ch., Krause, M., Mielentz, F., Streicher, D., Milmann, B., Gardei, A., Kohl, Ch. and Wiggenhauser, H.: Complementary application of radar, impact-echo and ultrasonics for testing concrete structures and metallic tendon ducts. In: Proceedings of 83rd Annual Meeting Transportation Research Board of the National Academies, 11.-15. January 2004, Washington, D.C., USA, Paper 04-2651 on CDROM
- [2] Gros, X. E.: NDT Data Fusion. John Wiley and Sons, New York, 1997
- [3] Kohl, Ch., Krause, M., Maierhofer, Ch., Mayer, K., Wöstmann, J., and Wiggenhauser, H.: 3D-visualisation of NDT data using data fusion. Insight 45 (2003) 12, pp. 800-808
- [4] Maierhofer, Ch., Krause, M., Mielentz, F., Milmann, B. und Müller, W.: Kombiniertes Einsatz von Radar und Ultraschallarray-Verfahren zur Strukturuntersuchung von Brückenbauteilen. Berichtsband 73 der DACH-Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP) 2000, pp. 519-534
- [5] Francois, N.: A new advanced multitechnique data fusion algorithm for NDT. In: Proceedings of the 15th WCNDT, 2000, Roma, <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn316/idn316.htm>
- [6] Dempster, A.P.: A generalization of Bayesian inference. Journal of the Royal Statistical Society, Series B 30 (1968), pp. 205-247
- [7] Shafer, G.: Perspectives on the theory and practice of belief functions. International Journal of Approximate Reasoning 3 (1990), pp. 1-40
- [8] Maierhofer, Ch., Wöstmann, J., and Kohl, Ch.: Strukturuntersuchung von Betonbauteilen mit Radar. Bergmeister, K., Wörner, J.-D. (Hrsg.); Beton-Kalender 2007, Verkehrsbauten-Flächentragwerke. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, Bd. 1, Kapitel V Echoverfahren in der zerstörungsfreien Zustandsuntersuchung von Betonbauteilen, Absch. 5, pp. 512-518
- [9] Maierhofer, Ch.: Non-destructive Evaluation of Civil Infrastructure with Ground Penetrating Radar. Journal of Materials in Civil Engineering (JMCE), ASCE Vol. 15 (2003) 3, pp. 287-297
- [10] Mayer, K., Marklein, R., Langenberg, K. J. and Kreuter, T.: Three-dimensional imaging system based on Fourier transformation synthetic aperture focusing technique. Ultrasonics 28 (1990), pp. 241-255
- [11] Daniels, D. J.: Ground-Penetrating Radar, 2nd Edition. The Institution of Electrical Engineers, London, 2004
- [12] Kohl, Ch. and Streicher, D.: Results of reconstruction and fused NDT-data measured in the laboratory and on-site at bridges. Cement & Concrete Composites 28 (2006) 4, pp. 402-413