

# Kurzbericht

zum Forschungsvorhaben  
„Kombination von zerstörungsfreien Prüfverfahren: Verbesserung der  
Einsetzbarkeit in der Baupraxis durch Charakterisierung und Fusion der  
Verfahren“

Aktenzeichen	SF-10.08.18.7-11.45 / II 3-F20-10-1-073
Auftraggeber	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumordnung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
Zuwendungs- bescheid	21.12.2011
Zeichen	SF-10.08.18.7-11.45
Prüfgegenstand	Erhöhung der Aussagekraft von Datensätzen der ZfPBau durch Datenfusion
Laufzeit	01.02.2012 - 30.06.2013
Beteiligte	Softwareentwicklung M.Sc. Sergey Pushkarev  Koordination Prof. Dr.-Ing. C. Boller  Projektbearbeitung und Berichterstattung Dr.-Ing. Sascha Feistkorn Dipl.-Ing. Norman Diersch
Koordination	Universität des Saarlandes Dipl.-Ing. Norman Diersch Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren Campus, Geb. E3.1 66123 Saarbrücken  e-Mail: <a href="mailto:norman.diersch@bam.de">norman.diersch@bam.de</a>

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.  
Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

C.Boller<sup>1</sup>, J.Kurz<sup>1</sup>, S.Pushkarev<sup>1</sup>  
N. Diersch<sup>2</sup>, S. Feistkorn<sup>2</sup>

## 1 Einleitung und Motivation

Die Anwendung der ZfPBau Verfahren Radar, Ultraschall und Wirbelstrom für die Zustandsanalyse bzw. Schadenserfassung hat in letzter Zeit zunehmende praktische Bedeutung erlangt. In Abhängigkeit der vorhandenen Randbedingungen wird hierbei das ZfPBau Verfahren ausgewählt, mit dem die gestellte Prüfaufgabe bestmöglich gelöst werden kann.

Bei den elektromagnetischen Verfahren (Radar) findet eine Totalreflexion an metallischen Einbauteilen wie Hüllrohre und oberflächennaher Bewehrung statt. Außerdem erlaubt dieses Verfahren eine schnelle Messdatenaufnahme. Bei akustischen Verfahren mit elastischen Wellen (Ultraschall) findet eine Totalreflexion an Grenzflächen zu schubspannungsfreien Medien statt, so dass Dickenbestimmungen von Betonbauteilen bis ca. 1.0 m gut durchführbar sind. An metallischen Objekten wie Hüllrohre oder Bewehrung werde nur ca. 50 % der eingebrachten mechanischen Energie reflektiert, so dass auch hinter dicht verlegter Bewehrung noch Strukturen bestimmt werden können. Mit dem Wirbelstromverfahren lässt sich die Tiefenlage bei bekannter Dicke der Bewehrungsstäbe oder die Stabdicke bei bekannter Tiefe genau bestimmen.

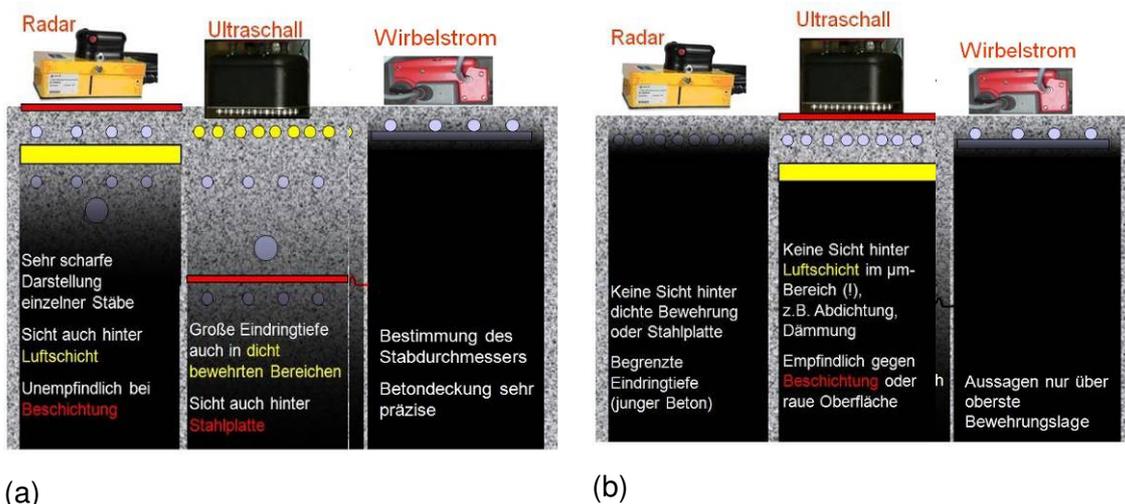


Abb 1 (a) Möglichkeiten und (b) Grenzen verschiedener ZfPBau-Verfahren; entnommen aus [1]

Aufgrund dieser wenigen aber signifikanten Eigenschaften der drei Verfahren geht deutlich hervor, dass die Kombination von ZfPBau Verfahren zur optimalen Lösung einer Prüfaufgabe sinnvoll ist, um die Schwächen des einen Verfahren durch die Stärken des anderen zu kompensieren (Abb 1). Neben der Kombination von Verfahren mit einer getrennten Auswertung der Ergebnisse ist die Fusion der aufbereiteten Messergebnisse der drei Verfahren eine Möglichkeit, den Wert der Prüfaussage zu erhöhen sowie die Aussagesicherheit zu verbessern.

In dem Forschungsvorhaben wird eine Methodik entwickelt, mit der Radar-, Ultraschall- und Wirbelstromdaten aufbereitet, fusioniert und anschließend in einem Bild dargestellt werden können, um die Aussagekraft der Datensätze zu erhöhen. Dafür wird ein vorhandener Scanner (OSSCAR – OnSite SCAnner) so weiterentwickelt, dass neben der erforderlichen Aufnahmegenaugigkeit schon bei der Datenaufnahme die Deckungsgleichheit von Messfeldern, die mit den drei unterschiedlichen Verfahren aufgenommen, gegeben ist. Desweiteren werden Auswertestrategien und –algorithmen weiterentwickelt um eine optimale Datenaufbereitung zu gewährleisten. Zusammenfassend wird daraus eine Mess- und Auswertestrategie für die Datenfusion entwickelt, um einen Leitfaden für baupraktische Fragestellungen zur Verfügung zu stellen.

<sup>1</sup> Universität des Saarlandes, Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren, 66123 Saarbrücken

<sup>2</sup> BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, 12200 Berlin

## 2 Methodisches Vorgehen

Um die ZfPBau Verfahren Radar, Ultraschall und Wirbelstrom hinsichtlich ihrer Möglichkeiten und Grenzen objektiv bewerten zu können, wurden nach der Festlegung der verwendeten Prüfgeräte Messreihen an einer Referenz aus Polyamid mit unterschiedlichen Reflektoren durchgeführt. Mit diesen an einem homogenen Testkörper aufgezeichneten Daten wurden mit zuvor entwickelten Auswertelgorithmen unterschiedliche Datenfusionen durchgeführt, um optimale Parameter für die Datenfusion festzulegen. Diese werden dann auf eine vorher festgelegte Prüfaufgabe - Detektion von Schädigungen an Elementwandkonstruktionen - angewendet, da die Fusion von Daten bei dieser Fragestellung einen Informationsgewinn liefert.

Mithilfe der Untersuchung dieser baupraktischen Fragestellung werden die Fusionsalgorithmen und Aufnahmeparameter optimiert. Dazu werden im ersten Schritt Elementwände mit bekannten Fehlstellen untersucht.

Nachdem umfangreiche Erfahrungswerte durch die Untersuchung von Referenzen und bekannten Elementwandkonstruktionen vorliegen, wird im letzten Schritt ein Arbeitskatalog entwickelt, in dem die Aufbereitungsschritte so dokumentiert werden, dass sie in der Baupraxis für die Qualitätssicherung und Zustandsanalyse dieser Konstruktionsart angewendet werden können.

## 3 Entwicklung von Testkörpern

Einen Hauptbestandteil der ZfPBau macht die Untersuchung des heterogenen Werkstoffs Beton aus. Jedoch ist es durch die zufällige Anordnung der Gesteinskörnung bei der Herstellung nicht möglich, einen allgemeingültigen Referenzkörper aus Beton herzustellen. Um die Problemstellung der Datenfusion im ersten Schritt zu vereinfachen, ist ein homogener und isotroper Referenzkörper aus Polyamid (Abb 2) ausgewählt worden.



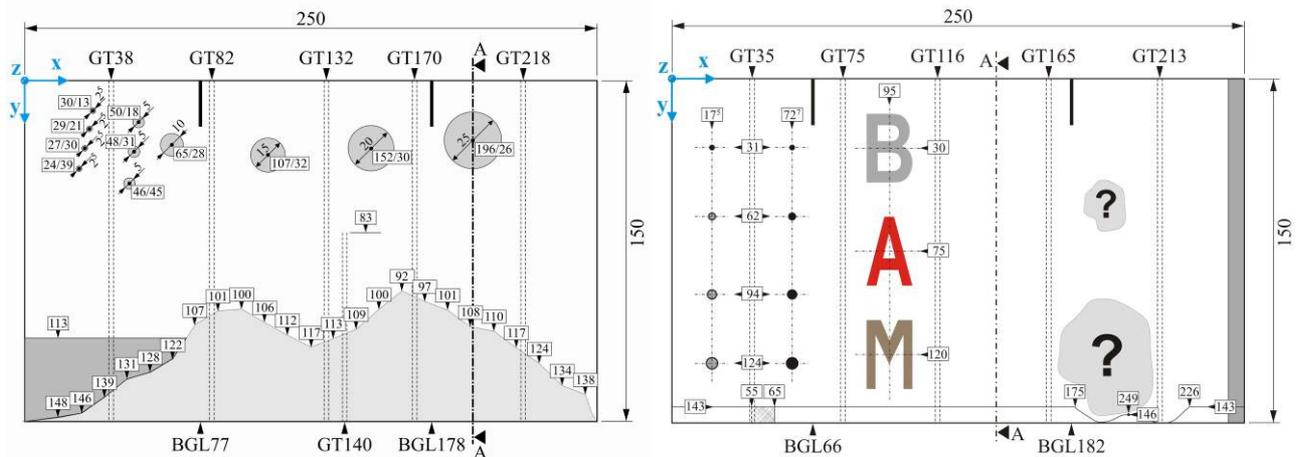
**Abb 2 Darstellung des Referenzkörpers aus Polyamid**

Durch die Untersuchungen des bekannten Polyamidblocks mit den ZfPBau Verfahren liegen nun Messdaten eines Objektes als Referenz vor, welches als genau definiert betrachtet werden kann.

Nachdem die Möglichkeiten der Datenfusion im ersten Schritt an dem homogenen isotropen Testkörper aus Polyamid bestimmt wurden, erfolgt anschließend die Untersuchung von realen Bauteilen den Elementwänden, die jedoch definiert hergestellt werden, so dass deren Aufbau genau bekannt ist.

Dabei wurden einige praxisrelevante Schädigungen in die Elementwände eingebaut. Neben der Ausbildung eines Schüttkegels, der aus einem Monokorngemisch besteht, wurden zusätzlich zwei verschiedene Betonrezepturen mit unterschiedlichem Größtkorn als Kernbeton verwendet. Außerdem wurden durch das Aufbringen von dünnen Folien auf der Innenseite der Betonschale

künstliche Delaminationen erzeugt. In einem weiteren Testkörper wurden außerdem noch Kiesnester als Fehlstellen und metallische Reflektoren eingebracht.



**Abb 3 schematischer Aufbau der zu untersuchenden beiden Elementwände, entnommen aus [2]**

An diesen konzipierten Testkörpern, in denen die Lage der Fehlstellen genau bekannt ist, wird der zweite Teil der zerstörungsfreien Voruntersuchungen mit den ZfPBau Verfahren durchgeführt, die die Grundlage der Datenfusion für die gewählte Prüfaufgabe an realen Bauteilen bilden.

## 4 Eingesetzte Software und Algorithmenentwicklung

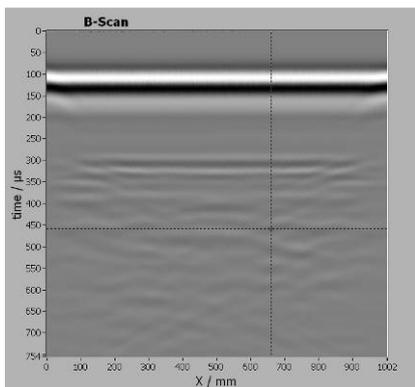
Im Verlauf des Forschungsvorhabens wurden unterschiedliche Algorithmen so entwickelt und verbessert, dass sie für die Datenfusion der Messdaten verwendet werden können. Diese werden so variiert, dass daraus ein Arbeitsablauf entwickelt wird mit dem ein bestmögliches Ergebnis für die festgelegte Prüfaufgabe möglich ist.

Dafür wurden MATLAB Routinen zur Vorbereitung und der Fusion der Datensätze entwickelt. Desweiteren wurden die Datensätze der Messungen mit ReflexW für Radar, einem kommerziellen Programm, und mit einem speziellen Abbildungsverfahren für Ultraschall, der SAFT-Rekonstruktion (Synthetic Aperture Focusing Technique), aufbereitet [3][4]. Diese damit rekonstruierten Daten wurden daraufhin mit ZIBAmira, einer Software des Zuse Institutes Berlin (ZIB), fusioniert.

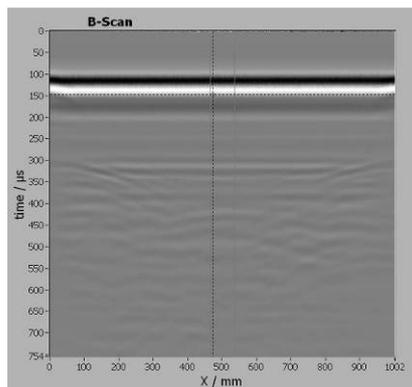
### 4.1 Untersuchungen am Polyamidblock

Die Untersuchungen am Polyamidblock dienen dazu, die verwendeten Verfahren Radar, Ultraschall und Wirbelstrom an einem homogenen Testkörper zu charakterisieren. Aus diesem Grund wurden Voruntersuchungen mit unterschiedlichen Parametereinstellungen durchgeführt. Variiert wurde hierbei unter anderem die Frequenz, sowohl bei den Radar- als auch bei den Ultraschalluntersuchungen. Des Weiteren wurde die Polarisierung der Prüfköpfe bzw. Antennen variiert. Zusätzlich wurden die Ultraschalluntersuchungen mit Transversal- und Longitudinalwellenprüfköpfen durchgeführt.

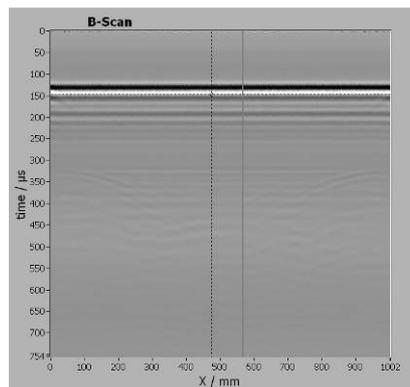
In Abb 4 sind beispielhaft sechs Radargramme (Radar B-Bild) dargestellt, die den Einfluss unterschiedlicher Antennenmittenfrequenzen und Polarisierungen verdeutlichen.



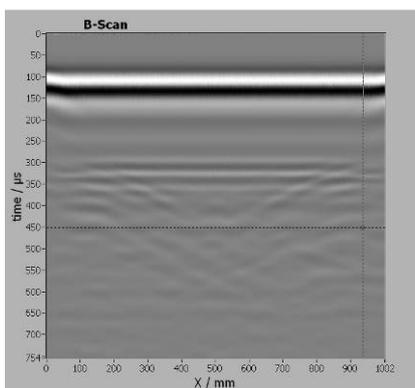
a) 1,2 GHz Polarisation parallel x-Achse



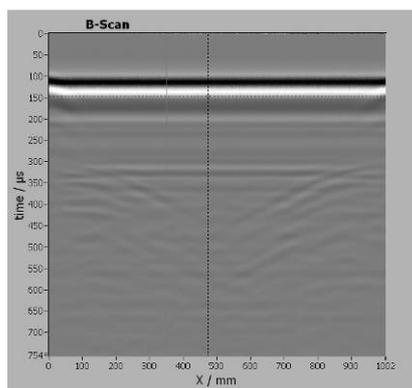
b) 1,6 GHz Polarisation parallel x-Achse



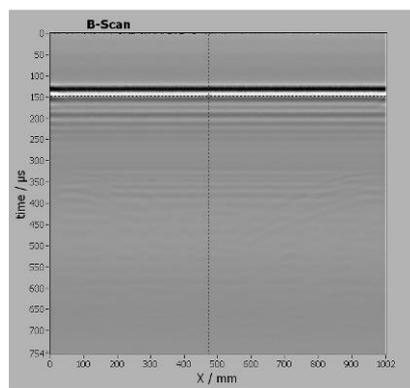
c) 2,3 GHz Polarisation parallel x-Achse



d) 1,2 GHz Polarisation parallel y-Achse



e) 1,6 GHz Polarisation parallel y-Achse



f) 2,3 GHz Polarisation parallel y-Achse

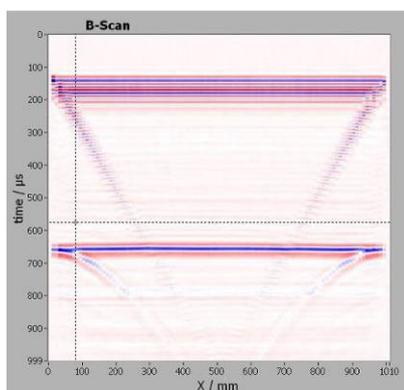
**Abb 4 Radar B-Bilder unterschiedlicher Antennenmittenfrequenz und Polarisation; aufgezeichnet am Polyamidblock**

Aus der Abb 4 können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

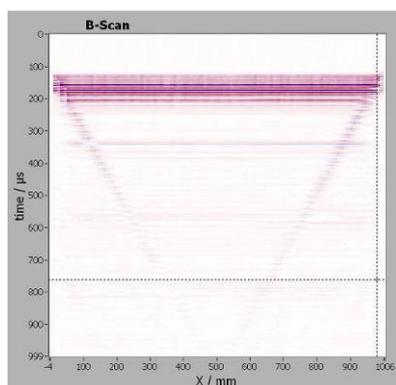
Mit zunehmender Antennenmittenfrequenz (in Abb 4 von links nach rechts) verbessert sich die Auflösung, die Eindringtiefe der elektromagnetischen Wellen nimmt jedoch ab. Dies ist an dem schwächer werdenden Rückwandsignal bei ca. 300  $\mu\text{s}$  zu erkennen.

Bei einer Antennenpolarisation parallel zur y-Achse zeichnen sich die Effekte der Seitenränder deutlicher im Radargramm ab. So sind die Randeffekte in der unteren Zeile deutlich stärker als in der oberen Zeile der Abb 4.

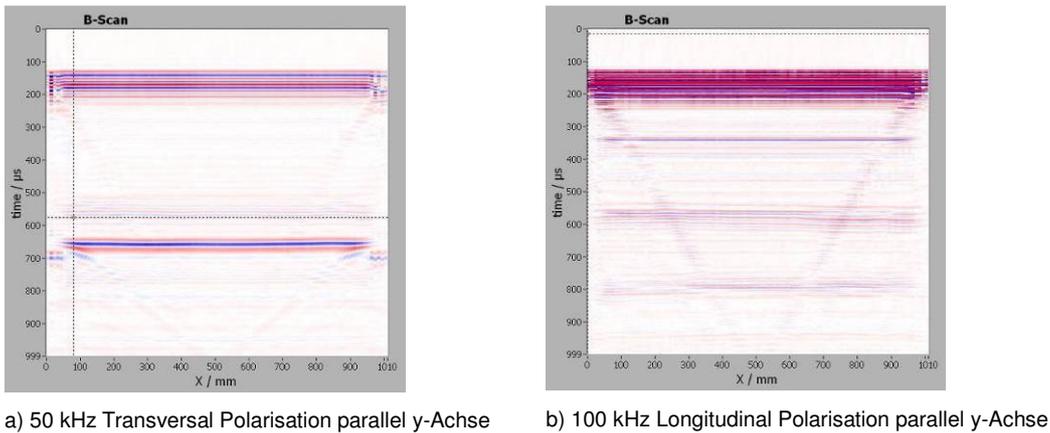
In Abb 5 werden verschiedene B-Bilder des Ultraschallverfahrens einander gegenübergestellt.



c) 50 kHz Transversal Polarisation parallel x-Achse



d) 100 kHz Longitudinal Polarisation parallel x-Achse



**Abb 5 Ultraschall B-Bilder unterschiedlicher Mittenfrequenz, Polarisation und Wellenart; aufgezeichnet am Polyamidblock**

Folgende Schlussfolgerungen können aus Abb 5 gezogen werden:

Wird die linke Spalte (50 kHz Transversal) mit der rechten Spalte (100 kHz longitudinal) verglichen, ist ersichtlich, dass sich die Rückwand deutlicher abzeichnet, wenn mit einem Transversalwellenprüfkopf und einer Mittenfrequenz von 50 kHz aufgezeichnet wird.

Um die bestmöglichen Eigenschaften beider Verfahren in der Datenfusion zu vereinen, werden auf diesen Grundlagen folgende Festlegungen getroffen:

Radar:

Die Messungen werden mit einer hochfrequenten Antenne (Mittenfrequenz 2,3 GHz) aufgezeichnet. Dies bietet den Vorteil einer hohen Auflösung. Zusätzlich wird die Polarisationsrichtung parallel zur x-Achse festgelegt, um den Einfluss der Randeffekte zu minimieren.

Zusammengefasst bieten diese Parameter den Vorteil, detaillierte Informationen über den oberflächennahen Bereich zu generieren. Für die Datenaufzeichnung an realen Objekten ist es jedoch sinnvoll, die Polarisation an die Lage der Bewehrung anzupassen.

Das Messraster der Radaruntersuchung sollte feiner als das Messraster der Ultraschalluntersuchung gewählt werden, um die Messzeit zu optimieren.

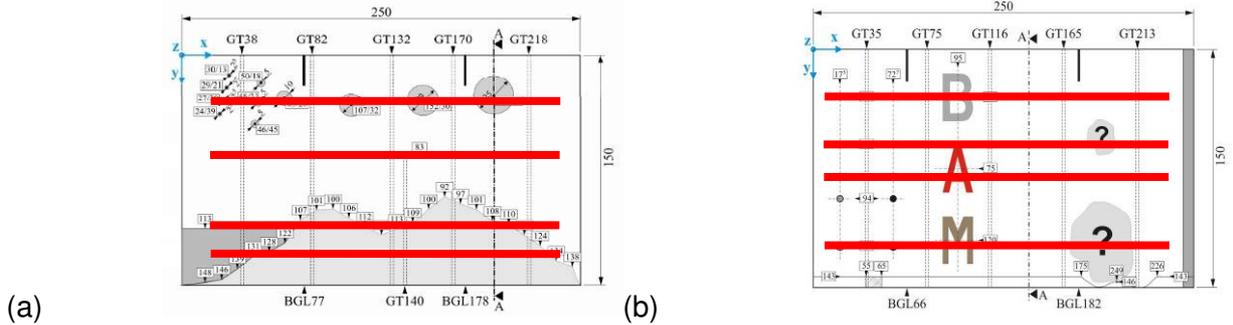
Ultraschall:

Die Messungen werden mit einem Transversalwellenprüfkopf, einer Mittenfrequenz von 50 kHz und einer Polarisation parallel zur y-Achse durchgeführt. Vorteilhaft bei dieser Wahl ist, dass damit Informationen über tiefer liegende Bereiche gewonnen werden.

## 5 Untersuchungen an den Elementwänden

Um im ersten Schritt Daten von realen Messobjekten für eine Fusion zu erhalten, wurden jeweils vier ausgewählte Messlinien auf den beiden Elementwänden, wie in Abb 6(a) und Abb 6(b) gekennzeichnet, aufgezeichnet. Die Randabstände der Messlinien betragen 15 cm, um die Auswirkung der Randeffekte zu reduzieren. Die Länge der jeweiligen Linien ergibt sich dadurch zu 220 cm.

An der ersten wie auch an der zweiten Elementwand wurden vier Messlinien aufgezeichnet (s. Abb 6).



**Abb 6** aufgezeichnete Messlinien an den Beiden zu untersuchenden Elementwänden

Im weiteren Verlauf des Projektes wurden 3D-Messungen an den beiden Elementwänden mit dem OSSCAR-Scannersystem durchgeführt. Ein 3D-Datensatz wurde an der ersten Elementwand aufgenommen. Dieser liegt im unteren linken Bereich und innerhalb diesem befinden sich Bereiche mit verschiedenen Betonmischungen.

Um die bestmöglichen Eigenschaften der beiden Verfahren Radar und Ultraschall in der Datenfusion zu vereinen, wurden auf Grundlage der durchgeführten Referenzuntersuchungen am Polyamidblock (Kap.4.1) entsprechende Festlegungen bezüglich der Messdatenaufnahme an den Elementwänden in 2D und 3D getroffen.

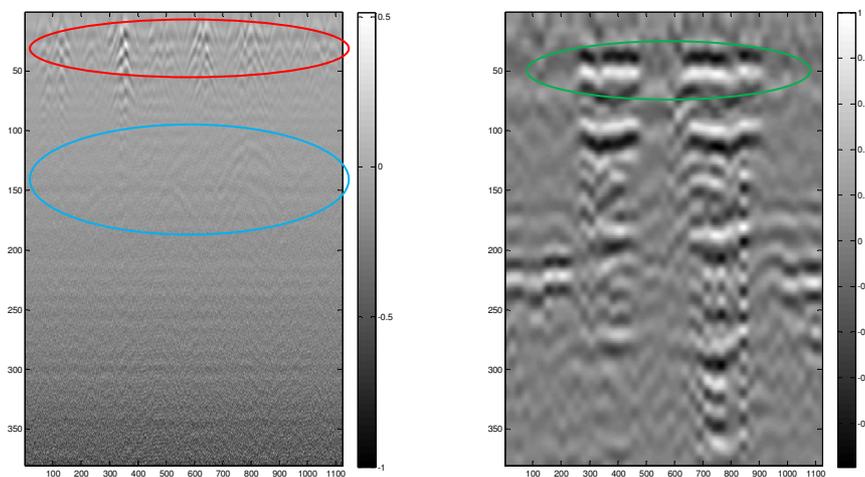
### 5.1 Ergebnisse der Datenfusion an den Elementwänden

Im ersten Schritt der Bearbeitung wurden die Datensätze der Messlinien der ersten Elementwand mit Hilfe von MATLAB-Routinen normiert und interpoliert und darauf folgend die erste Ableitung der Signalamplituden durchgeführt. Im nächsten Schritt sind die Datensätze gewichtet und miteinander addiert, subtrahiert oder multipliziert worden. Dieser Vorgang der Datenaufbereitung und –fusion wurde durch die Referenzmessung am Polyamidkörper entwickelt.

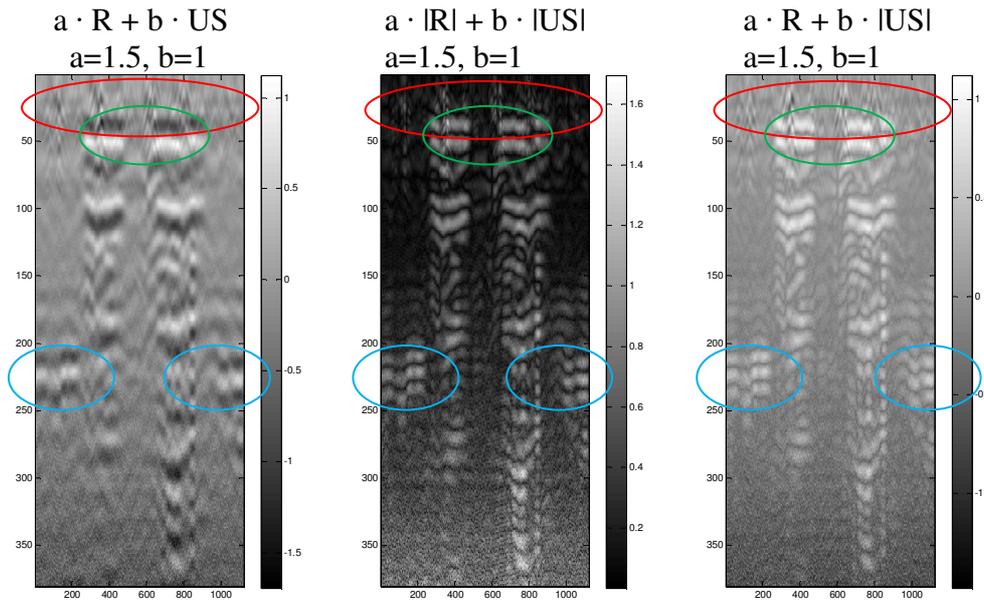
Der Fortgang der Untersuchungen und der Entwicklung der Datenfusion soll exemplarisch an einigen Beispielen aufgezeigt werden.

#### Fusionierte Daten der Linie 3 an der ersten Elementwand

Die Messlinie 3 wurde im Bereich der Schüttkegel (s. Abb 6(a)) aufgenommen. Im B-Bild der Radarmessung sind die Reflexionshyperbeln der oberflächennahen Bewehrung deutlich zu erkennen (rote Ellipse). In einer etwas größeren Tiefe sind weitere Reflexionen zu erkennen, welche durch die Schüttkegel hervorgerufen worden (blaue Ellipse). Im B-Bild der Ultraschallmessung erkennt man die beiden Bereiche des Wechsels der Betonmischung durch die Schüttkegel (grüne Ellipse, Abb 7).



**Abb 7** interpolierte Radar- (links) und Ultraschalldaten (rechts)

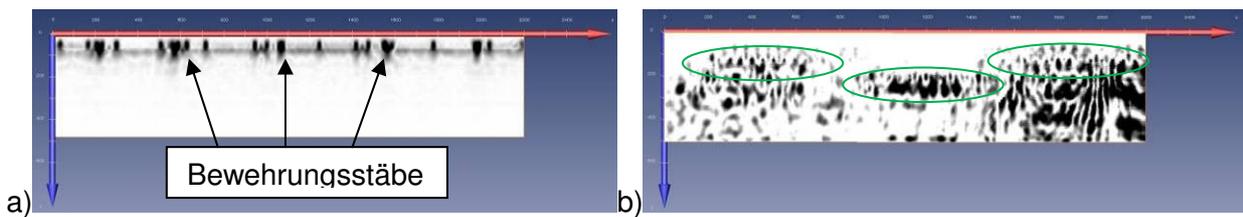


**Abb 8** der Messdaten für die Linie 3 der ersten Elementwand

Nachdem die beiden Datensätze miteinander addiert wurden, wobei die Radardaten eine 1,5fache Gewichtung erhalten haben, sind in den erhaltenen B-Bildern deutlich die Reflexionshyperbeln der Bewehrungsstäbe der Radarmessungen (rote Ellipse) erkennbar sowie die Bereiche mit einer anderen Betonmischung durch die Schüttkegel innerhalb des eingebrachten Ortbetons (grüne Ellipse). Auch ist die Rückwandreflexion erkennbar (blau). Diese wird nur in dem Bereich der Betonmischung 1 (s.Abb 8) sichtbar.

Zusammenfassend wird deutlich, dass bei der Fusion der Datensätze mit einer entsprechenden Gewichtung ein Mehrwert in der Darstellung der B-Bilder erreicht wird. Zum Teil kann es aber zur Verschlechterung bis zum Verlust von Informationen kommen. Es ist bei einem fehlenden akustischen Verbund zwischen dem eingebrachten Kernbeton und der Betonschale die Rückwand der Elementwand im dahinter liegenden Bereich nicht mehr erkennbar. Den größten Informationsgehalt beinhalten dabei die B-Bilder der Addition der Datensätze.

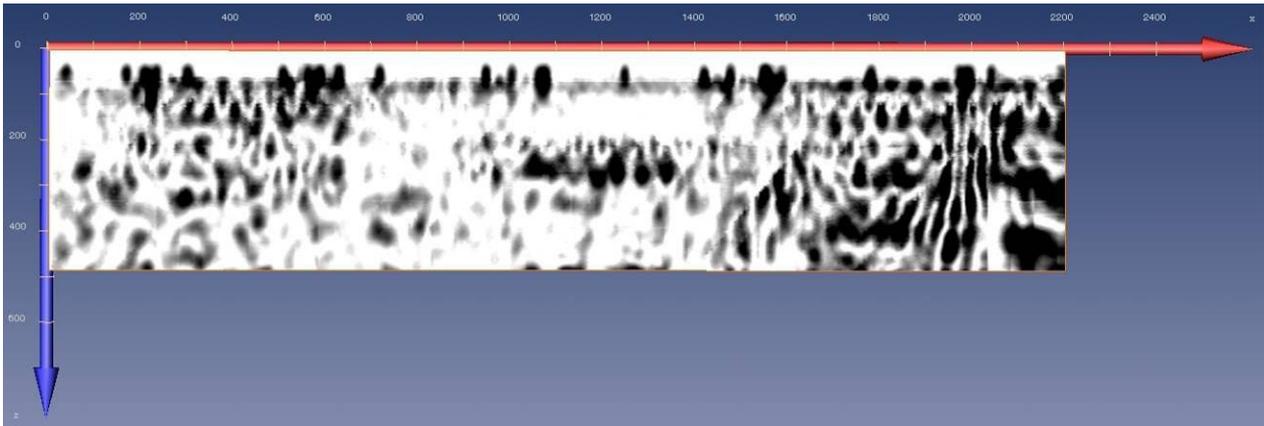
Fusionierte Daten der Linie 2 an der zweiten Elementwand



**Abb 9** prozessierte a) Radar- und b) Ultraschalldaten der Messlinie 2

In dem B-Bild der Radarmessung (Abb 9(a)) sind die Reflexionen der oberflächennahen Bewehrungsstäbe deutlich zu erkennen. Dahinter in einer Tiefe von etwa 80 mm scheint eine flächige Reflexion vorhanden zu sein, welche durch die Rückwand der vorderen Betonschale hervorgerufen wird.

In dem B-Bild der Ultraschallmessung (Abb 9(b)) ist ein Verrauschen in zwei unterschiedlichen Tiefen (ca. 80 mm und 220 mm) erkennbar (grüne Ellipsen). Diese könnten durch einen fehlenden akustischen Verbund zwischen dem eingebrachten Kernbeton und der Betonschale der Elementwand hervorgerufen werden.



**Abb 10 Addition der Messdaten für die Linie 2 der zweiten Elementwand**

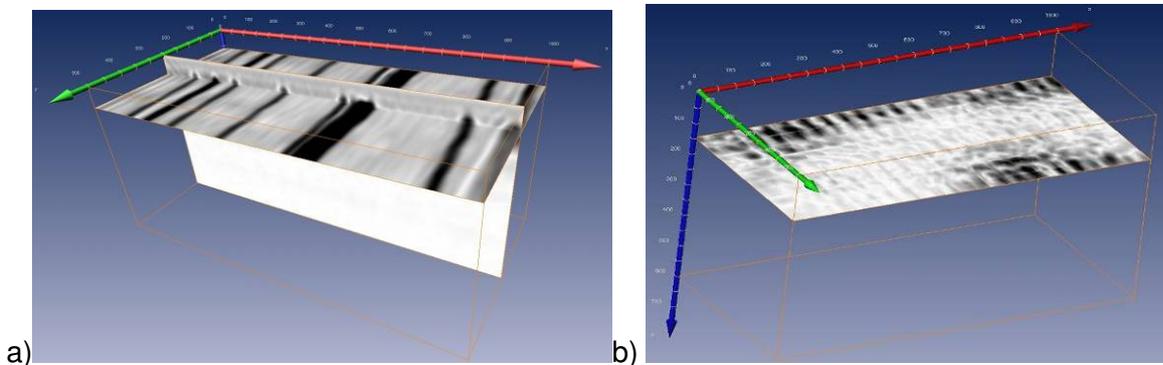
Die oberflächennahe Bewehrung ist im B-Bild nach der Fusion (Abb 10) und die durchgehende Reflexion in einer Tiefe von 80 mm deutlich zu erkennen.

### 3D-Datenfusion an der ersten Elementwand eines Messfeldes

Es wurde ein Messfeld mit der Größe von 100 x 50 cm im Bereich dreier verschiedener Betonmischungen des Ortbetons aufgezeichnet, um Daten eines realen Messobjektes für die dreidimensionale Datenfusion zu erhalten. Die gewonnenen Messdaten wurden mit dem Programm ZIBAmira fusioniert. Die Fusion von 3D-Datensätzen ist ausschließlich mit prozessierten Daten durchgeführt worden.

Bei der Fusion der Datensätze mit ZIBAmira wurden diese miteinander addiert, wobei Radar eine 1,5fache Gewichtung gegenüber Ultraschall erhielt.

Im Folgenden sind die Ergebnisse der 3D-Messung für Radar und Ultraschall als C-Bilder (s. Abb 11) für das Messfeld 1 der ersten Elementwand dargestellt.



**Abb 11 a) C-Bild der oberflächennahen Radar- und b) der Ultraschallmessung**

Das Ergebnis der Fusion der Daten der Radar- und Ultraschallmessung ist im Folgenden als Isoflächendarstellung in der Abb 12 aufgezeigt. Deutlich erkennbar sind hier die Bewehrungsstäbe, welche oberflächennah liegen. Desweiteren ist der Schüttkegel sowie die Reflexion der Rückwand zu erkennen. Insgesamt ist die Detektion und die Zuordnung von Bauteilobjekten im dreidimensionalen fusionierten Datenobjekt schwieriger als bei der 2D-Datenerfassung und -Fusionierung.

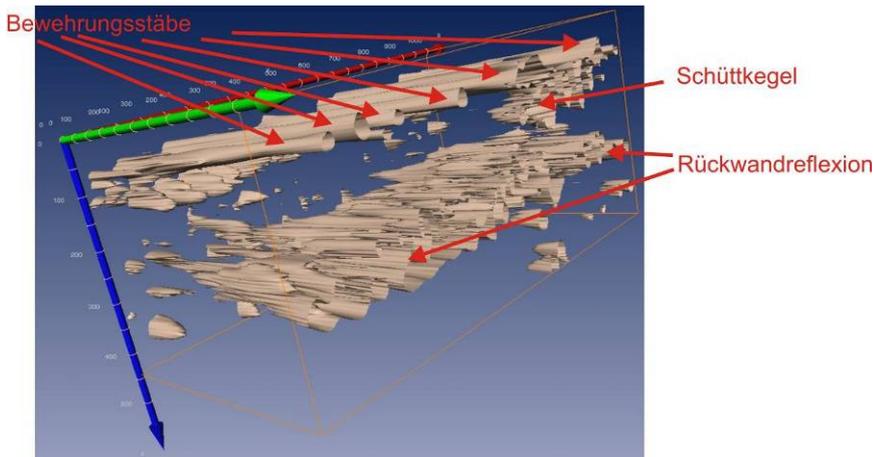


Abb 12 3D-Darstellung der fusionierten Datensätze der Radar- und Ultraschallmessung des Messfeldes 1 an der ersten Elementwand

## 5.2 Untersuchungen an einer Betonplatte

Um einen weiteren möglichen Anwendungsbereich der 3D-Darstellung eines fusionierten 3D-Datensatzes zu erkennen, wurden an einem Testkörper Messungen mit dem OSSCAR-Scannersystem mit den ZfPBau Verfahren durchgeführt, die Messdatensätze prozessiert und mit ZIBAmira fusioniert.

In Abb 13a) ist die innere Konstruktion des Testkörpers zu erkennen, bevor er betoniert wurde. Das Messfeld wurde so gewählt, das die oberflächennahe Bewehrungsmatte die Hälfte des Messfeldes abdeckt. Das Hüllrohr befindet sich komplett im Messbereich, wie auch die Bewehrungsmatte auf der Rückseite der Betonplatte.

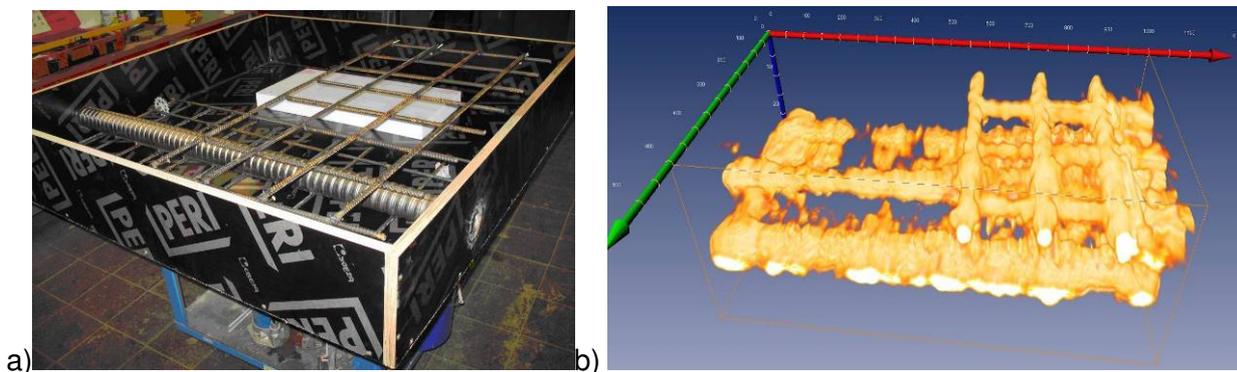


Abb 13 a) innere Konstruktion der untersuchten Betonplatte und b) Isoflächendarstellung der fusionierten 3D-Datensätze

In Abb 13b) ist das Ergebnis der Fusion der Messdatensätze als Isoflächendarstellung dargestellt. Deutlich ist die oberflächennahe Bewehrungsmatte zu erkennen. In einer etwas größeren Tiefe ist das durchlaufende Hüllrohr abgebildet. In einer Tiefe von etwa 200 mm ist eine flächige Reflexion zu sehen, die durch die Rückwand der Betonplatte hervorgerufen wird.

Es wird deutlich, dass bei einer anderen Konstruktionsweise des zu untersuchenden Betonbauteiles als der von Elementwänden eine 3D-Darstellung der fusionierten Datensätze einen Zugewinn an Informationen möglich ist.

## 6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Um bestmögliche Ergebnisse in diesem Forschungsvorhaben zu erzielen, ist eine Auswahl getroffen worden, welche Messgeräte im Rahmen der Fusion von Messdaten integriert werden sollen. Die Auswahl eines Messgeräts wurde auf Grundlage folgender Kriterien getroffen:

- Anwendbarkeit des Messgeräts in der Praxis
- Kompatibilität mit dem OSSCAR-Scanner
- Lösbarkeit der Prüfaufgabe

Ein großer Vorteil bei der Auswahl der verwendeten Messgeräte, die meist als Einzelmessgeräte verwendet werden, ist die Kompatibilität mit dem OSSCAR-Scanner. So lassen sich alle drei Systeme mit dem OSSCAR-Scanner ansteuern. Dies ist ein wichtiges Kriterium für die Datenfusion, da mit dieser automatisierten Messdatenaufnahme die Deckungsgleichheit der Messfelder gegeben ist. Zusätzlich erfüllen die Scannermessungen die Anforderungen an die Genauigkeit.

Ein elementarer Punkt für das Forschungsvorhaben ist das Zusammenfügen der Informationen der verschiedenen Verfahren. Hierfür standen zu Beginn des Vorhabens keine geeigneten Softwaretools zur Verfügung.

Aus diesem Grund wurden in einem frühen Stadium des Vorhabens Algorithmen auf Basis der kommerziell erhältlichen Software MATLAB entwickelt, die eine Datenfusion mit unterschiedlichen Ansätzen ermöglicht.

Unabhängig von den eigentlichen Algorithmen sind hierbei immer folgende Schritte für die Datenfusion notwendig:

- Aufnahme der Messdaten in einen kompatiblen Raster
- Eliminieren systematischer Abweichungen (DC-Shift etc.)
- Verkürzung der Zeitachse
- Normierung und Interpolation der Messdaten
- Datenfusion mit unterschiedlichen Algorithmen

In einem späteren Stadium wurde desweiteren die kommerzielle Software ZIBAmira des Zuse Institut Berlin (ZIB) verwendet. Mit dieser war es desweiteren möglich auch 3D-Datensätze zu fusionieren. Um mit dieser Software sinnvolle Ergebnisse zu erhalten, wurden die Messdaten vor der Fusion, prozessiert.

Als Ergebnis für das Forschungsvorhaben ist festzustellen, dass durch die Fusion von Datensätzen der Radar- und Ultraschallmessungen und der Nutzung des Wirbelstromverfahrens zur Bestimmung der Betondeckung ein deutlicher Zuwachs der Aussagekraft erreicht werden kann. In Abhängigkeit der Fragestellung und der Betonbauteile kann diese allerdings stark schwanken. So ist die Fusion von Radar- und Ultraschalldaten an Elementwänden durch mögliche Delaminationen des eingebrachten Kernbetons in die Betonschale häufig nicht mit einem Zuwachs an Informationen verbunden. Ist die Elementwand hingegen homogen und hat der eingebrachte Ortbeton in die Betonschale einen akustischen Verbund mit dieser, so sind mögliche Störungen wie Kiesnester nach der Datenfusion besser erkennbar.

Die Anwendung der Fusion auf andere Konstruktionsbauteile des Ingenieurbaus lässt, wie in Kap. 5.2 dargestellt, eine deutliche Verbesserung der Aussagekraft über den inneren Aufbau zu. Mit der Verwendung des Wirbelstromverfahrens kann hierbei die Betondeckung der oberflächennahen Bewehrung und damit die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Radarwellen bestimmt werden. Dadurch wird auch eine genauere Lagebestimmung von Konstruktionselementen in der Tiefe möglich.

Im Zeitraum des Forschungsvorhabens wurden Erkenntnisse gesammelt, die als Grundlage für die Anwendung der Fusion an realen Testkörpern dienen. So ist die Anwendung der Fusion an Elementwänden möglich und kann damit die Aussagekraft erhöhen. Doch kann es durch einen fehlenden akustischen Verbund dazu kommen, dass nach der Fusion Informationen überlagert werden. Hier wären weitere Untersuchungen nötig, wie z.B. die Fusion solcher Datensätze zusätzlich mit einem Datensatz einer Radarmessung, der mit einer niederfrequenten Radarantenne aufgenommen wurde, durchzuführen wäre. Durch entsprechende Gewichtung der einzelnen Datensätze ist es dann möglich, im fusionierten Datensatz auch hinter vorhandenen Delaminationen, Aussagen über die Konstruktion zu erhalten.

Desweiteren wären weitere Untersuchungen der Fusion von Datensätzen, welche an Ingenieurbauwerken (wie z.B. Brückenelementen oder Betonplatten mit Vorspannung) aufgenommen worden sind, von Interesse. Damit könnte die Datenfusion und damit die Erhöhung der Aussagekraft von ZfPBau Verfahren auf ein breiteres Feld des Betonbaus ausgeweitet werden.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] Taffe, A., Feistkorn, S. und N. Diersch: Erzielbare Detektionstiefen metallischer Reflektoren mit dem Impulsradarverfahren an Beton; In: Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012) 7, Ernst & Sohn
- [2] Maack, S.: Untersuchungen zum Schallfeld niederfrequenter Ultraschallprüfköpfe für die Anwendung im Bauwesen, Dissertation; in Veröffentlichung
- [3] Zimmer, A.: Abbildende zerstörungsfreie Prüfverfahren mit elastischen und elektromagnetischen Wellen. Kassel university press GmbH, Kassel, 2008
- [4] M.Schickert, M.Krause, W.Müller: Ultrasonic Imaging of Concrete Elements Using Reconstruction by Synthetic Aperture Focusing Technique“. Journal of Materials in Civil Engineering 15 (2003) 235-246

**Universität des Saarlandes**  
**Naturwissenschaftl.-techn. Fakultät III,**  
**Lehrstuhl für zerstörungsfreie Prüfverfahren und Qualitätssicherung**  
**Prof.Dr.-Ing. Christian Boller**  
**Campus, Geb. E3.1**  
**66123 Saarbrücken**

Im Auftrag

Prof. Dr.-Ing. C. Boller  
Projektleiter/Wissenschaftler

Dipl.-Ing. Norman Diersch  
Wissenschaftler