

# 3-D-Visualisierung von Radar- und Ultraschallecho-Daten mit ZIBAmira

Doreen STREICHER<sup>\*</sup>, Olaf PAETSCH<sup>\*\*</sup>, Robert SEILER<sup>\*\*</sup>, Steffen PROHASKA<sup>\*\*</sup>,  
Martin KRAUSE<sup>\*\*\*</sup>, Christian BOLLER<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Universität des Saarlandes (66123 Saarbrücken, [Doreen.Streicher@bam.de](mailto:Doreen.Streicher@bam.de))

<sup>\*\*</sup> Zuse-Institut Berlin (ZIB) (14195 Berlin, [paetsch@zib.de](mailto:paetsch@zib.de))

<sup>\*\*\*</sup> BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (12200 Berlin,  
[Martin.Krause@bam.de](mailto:Martin.Krause@bam.de))

**Kurzfassung.** Mit zerstörungsfreien Prüfverfahren gewonnene Messdaten werden in der Regel mit verfahrensbegleitenden Auswerteprogrammen visualisiert.

Für anspruchsvolle Prüfungen an Bauteilen ist es notwendig, mehr als ein Prüfverfahren, z.B. Radar, Ultraschallecho und Wirbelstrom, einzusetzen. Ergänzende Informationen aus Bauunterlagen u. ä. und/oder die Unterstützung durch Simulationsrechnungen können erforderlich sein.

Das verfahrensneutrale Softwaresystem ZIBAmira ermöglicht es, die Ergebnisse von Radar und Ultraschallecho verfahrensübergreifend einheitlich und aneinander angepasst darzustellen. Die rekonstruierten Daten beider Verfahren können durch eine synchronisierte Darstellung in 2-D oder 3-D einfacher als bisher miteinander verglichen und durch einfache Rechenoperationen überlagert werden. Zusätzlich lassen sich mit ZIBAmira vorhandene Informationen zum Aufbau der Bauteile, in Form von CAD-Bauzeichnungen, visualisieren und in die Ergebnisdarstellung einbinden. Das modular aufgebaute Visualisierungssystem wurde am Zuse-Institut Berlin (ZIB) entwickelt.

## 1. Einführung

Radar und Ultraschallecho etablieren sich als zerstörungsfreie Prüfverfahren, mit denen nicht einsehbare Geometrien von Betonbauteilen ermittelt und die im Beton eingebauten Bewehrungsstäbe, Spannglieder und Entwässerungsrohre detektiert werden können. Die gewonnenen Messdaten werden in der Regel mit verfahrensspezifischen Auswerteprogrammen visualisiert.

Für die Lösung komplexer Prüfaufgaben ist meist der Einsatz beider Verfahren nötig. Eine effiziente Verfahrenskombination wird allerdings erst erreicht, wenn die Ergebnisse bzw. die Daten beider Verfahren miteinander verknüpft werden. Ziel dabei ist es, dass die Interpretation der Daten vereinfacht und die Ergebniszuverlässigkeit gesteigert werden. Zur Erfüllung wurde ein Softwaresystem gesucht, mit dem folgende Aspekte realisierbar sind:

- Ganzheitliche Darstellung von Ergebnissen der ZfPBau-Verfahren mit Bezug auf das untersuchte Bauteil gegenüber dem Kunden,
- Vergleich sowie qualitative und quantitative Bewertung von Ergebnissen mehrerer Messkonfigurationen und Verfahren,
- Verfahrenübergreifende Fusion von Daten.

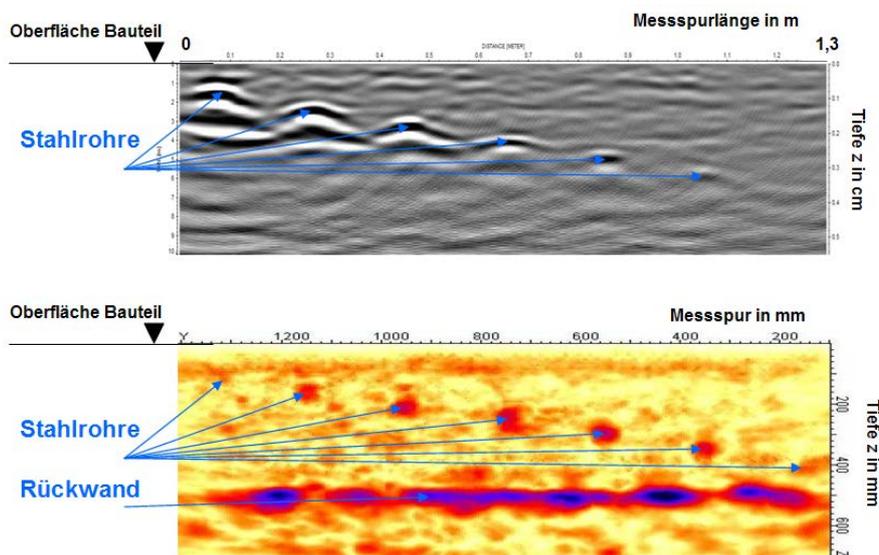


Mit dem Visualisierungssystem ZIBAmira [1] existiert ein Programm, mit dem verfahrens-unabhängig Ergebnisse dargestellt, Daten bearbeitet und Zusatzinformationen zum Untersuchungsobjekt integriert werden können. Im Rahmen einer Kooperation des Zuse-Instituts Berlin und der BAM, Fachgruppe 8.2 wurde ZIBAmira an die Erfordernisse für die 3-D-Visualisierung der ZfPBau-Ergebnisse angepasst.

## 2. Bildgebende ZfPBau-Verfahren Radar und Ultraschallecho

Zur Lagebestimmung von Bewehrung, Hohlräumen u. ä. in Betonbauteilen werden Radar und Ultraschallecho im Echobetrieb angewendet und die Ergebnisse für die Bewertung als B-Bild oder Radargramm dargestellt. Das bedeutet, dass für die Messaufnahme die Sensoren über die Bauteilfläche geführt und innerhalb eines Messfeldes eine Vielzahl von Einzelmessungen durchgeführt werden. Im Anschluss erfolgt eine Aufbereitung der Daten, u. a. durch 2-D und 3-D-Rekonstruktionsberechnungen, bei der die Lage der Messpositionen zueinander berücksichtigt wird. Die Grundlage für die Interpretation der Ergebnisse bilden Schnitte und/oder Projektionen, bei denen die Amplituden der Impulsschodaten dem untersuchten Volumenraum zugeordnet sind. Die Amplitudenwerte werden in Form von Grau- oder Farbwerten wiedergegeben. Die Schnitte und Projektionen können orthogonal oder parallel zur Messfläche gewählt werden.

Für die Kombination von Radar und Ultraschallecho wurden bisher ausschließlich rekonstruierte Daten betrachtet und miteinander fusioniert [3, 4]. In der Regel werden die Messdaten vor der Rekonstruktion gefiltert und ggf. tiefenabhängig verstärkt [5]. Durch die Rekonstruktionsberechnungen werden dann die in den Messdaten typischen Reflexions-hyperbeln in den geometrischen Ort der Reflexion fokussiert und das Signal-Rausch-Verhältnis angehoben.



**Abbildung 1** Oben: Radargramm von 2-D-migrierten Daten für die am Probekörper eingezeichnete Messspur, Unten: Projektion von B-Bildern 3-D-SAFT-rekonstruierter Ultraschallechodaten für die in der Probekörperdarstellung in Abbildung 2 eingezeichnete Messspur.

Abbildung 1 präsentiert Ergebnisdarstellungen von rekonstruierten Radar- und Ultraschallechodaten. Ihnen zu Grunde liegen Messungen an dem in Abbildung 2 dargestellten Probekörper, aufgenommen von der Seite ohne oberflächennahe Bewehrung. Für die Auswertungen wurden verfahrensspezifische Programme verwendet. In den 2-D-Darstellungen orthogonal zur Messfläche werden die im Betonprobekörper eingebauten

Stahlrohre und, bei Ultraschallecho darüber hinaus, die Rückseite des Probekörpers als Reflektoren angezeigt.

### **3. Visualisierungssystem ZIBAmira**

ZIBAmira ist ein objektorientiertes interaktives Visualisierungssystem, das auf ein breites Spektrum von 3-D-Daten anwendbar ist. Das System entwickelte sich von einem anfangs auf medizinische Anwendungen ausgerichteten System zu einem allgemein einsetzbaren Visualisierungssystem, dessen Anwendungsgebiete von bio-medizinischen, über ingenieurtechnische bis zu astrophysikalischen Visualisierungen reichen. Neben der Visualisierung steht die Datenanalyse im Fokus. Dafür werden nicht die Daten selbst, sondern aus den Daten mit Hilfe spezieller ZIBAmira-Module berechnete Merkmale, z.B. Wirbellinien aus Strömungsdaten, dargestellt. Weiterhin können aus bildgebenden Verfahren gewonnene Daten in Finite-Element-Gitter für mathematische Berechnungen überführt werden. Für eine Vielzahl von weitverbreiteten Datenformaten stehen Einlesefunktionen zur Verfügung. Das ermöglicht dem Anwender Daten unterschiedlichster Modalitäten in ZIBAmira gleichzeitig zu bearbeiten und vergleichend zu visualisieren. Durch seinen modularen Aufbau ist das Visualisierungssystem einfach an neue Aufgabengebiete anpassbar. Es ist lauffähig unter Windows, Linux und MacOS und stützt sich auf OpenInventor, OpenGL, Qt und Tcl als Skript-Sprache.

ZIBAmira wurde ursprünglich am Zuse-Institut Berlin (ZIB) in der Abteilung Visualisierung und Datenanalyse entwickelt. Unter dem Namen *amira* wird es von der Berliner Firma Visage Imaging kommerziell vertrieben. Eine weitere Variante wird unter dem Namen *AVIZO* von der französischen Firma VSG, Visualization Science Group angeboten. Die Softwareprodukte werden hauptsächlich im Bereich Forschung und Entwicklung eingesetzt.

### **4. Erweiterung von ZIBAmira für ZfPBau-Anwendungen**

Die Erweiterung von ZIBAmira erstreckt sich zunächst auf die Bearbeitung und Visualisierung der Rekonstruktionsdaten von Radar und Ultraschallecho und deren in der BAM, Fachgruppe 8.2, verwendete Dateiformate.

Die gemeinsame Visualisierung und Datenfusion erforderte die Erstellung von Einleseroutinen. Zusätzlich sollen Informationen über das Untersuchungsobjekt innerhalb des Systems nutzbar sein. Im Fokus stand zunächst die Integration von Bauplänen. Sie liegen in der Regel als CAD-Zeichnungen vor. Ein Werkzeug für den Abgleich der Koordinaten und ein Arithmetikmodul, mit dem verschiedene Daten miteinander überlagert werden können, stehen in ZIBAmira standardmäßig zur Verfügung. Davon ausgehend wurden Spezialmodule entwickelt, die den typischen Arbeitsablauf abbilden und damit die Arbeit mit ZIBAmira vereinfachen.

#### *4.1 Datenformate und -import*

Der Arbeit der BAM, Fachgruppe 8.2, folgend, stehen in ZIBAmira Einleseroutinen für folgende Formate zur Verfügung:

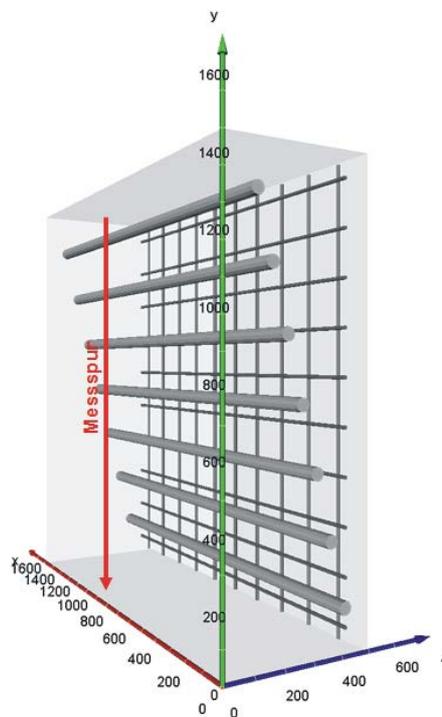
- FOR384 (Rekonstruktionsdaten von Radar und Ultraschallecho)
- ReflexW (Rekonstruktionsdaten von Radar)
- Muse3D (Rekonstruktionsdaten von Ultraschallecho).

Darüber hinaus können Rohdaten auf uniformen Gittern, wenn die räumliche Auflösung und die Codierung bekannt sind, eingelesen werden. Außerdem existiert für komplexe mathematische Berechnungen eine Matlab-Anbindung an ZIBAmira. Messdaten, die in diesem Format vorliegen, können ebenfalls als Eingabe für ZIBAmira verwendet werden. Der integrierte Datenimport und –export von Matlab-Formaten ermöglicht die direkte Berechnung von ZIBAmira-Daten mit Matlab während der Laufzeit, nicht als Nachbearbeitungsschritt. Voraussetzung ist eine entsprechende Lizenz und ein installiertes Matlab auf dem genutzten Rechner.

Daneben stehen einige CAD-Datenformate zur Verfügung. Die darin befindlichen Geometrien werden beim Einlesen in ZIBAmira in Oberflächen gewandelt und können unter Anderem zur Geometriedarstellung verwendet werden. Die in den Datenformaten gespeicherten Zusatzinformationen, z. B. zur Bemaßung, werden in ZIBAmira nicht interpretiert. Alternativ sind in ZIBAmira interaktive Abstandsmessungen und Bemaßungen möglich, die wiederum in einem eigenen Format gespeichert werden können.

Im Bauwesen werden Baupläne üblicherweise mit AutoCAD angefertigt. Um sie in ZIBAmira einzulesen, werden die Baupläne in ein 3D-StudioMax-Format (3ds) umgewandelt. Das AutoCAD-Dateiformat wird nicht direkt unterstützt.

Im Ergebnis ist die Visualisierung der Untersuchungsobjekte mit ZIBAmira möglich, wie für den Betonprobekörper in Abbildung 2 gezeigt. Der Probekörper enthält als metallische Einbauelemente sieben Stahlrohre (Außendurchmessern 43 mm) in unterschiedlichen Einbautiefen und eine Bewehrungsmatte, bestehend aus parallel und senkrecht angeordneten Stahlstäben mit 12 mm Durchmesser. Es wurde ein Normalbeton mit einer Gesteinskörnung von 0 mm bis 32 mm verwendet. Auf den zwei Probekörperseiten in der X-Y-Ebene erfolgten Messungen auf deckungsgleichen Messfeldern ( $x = 500 \text{ mm} - 1100 \text{ mm}$ ,  $y = 100 \text{ mm} - 1400 \text{ mm}$ ) mit Radar (1,2 GHz) und Ultraschallecho (50 kHz).



**Abbildung 2** Betonprobekörper mit eingezeichneter Messspur Größe  $1,50 \text{ m} \times 1,50 \text{ m} \times 0,50 \text{ m}$ , mit sieben Stahlrohren (Außen- $\text{\O} 43 \text{ mm}$ , Wandstärke 2 mm) und einer Bewehrungsmatte ( $\text{\O} 12 \text{ mm}$ , Abstand 15 cm). Visualisierung des Konstruktionsaufbaus aus ZIBAmira.

## 4.2 Koordinatenanpassung

Für die Interpretation der Messdaten ist der Bezug zum untersuchten Objekt erforderlich. Bei der Anwendung mehrerer Verfahrens- und Messkonfigurationen ist zusätzlich der Bezug zueinander bedeutsam. Das Offset jeder Messung ist zu berücksichtigen und die Koordinatenachsen sind zu vereinheitlichen. Erst die Anpassung der Koordinaten – die Registrierung – macht Vergleiche möglich. Im günstigsten Fall kann eine bautechnische Zeichnung oder eine Skizze als Basis genutzt werden.

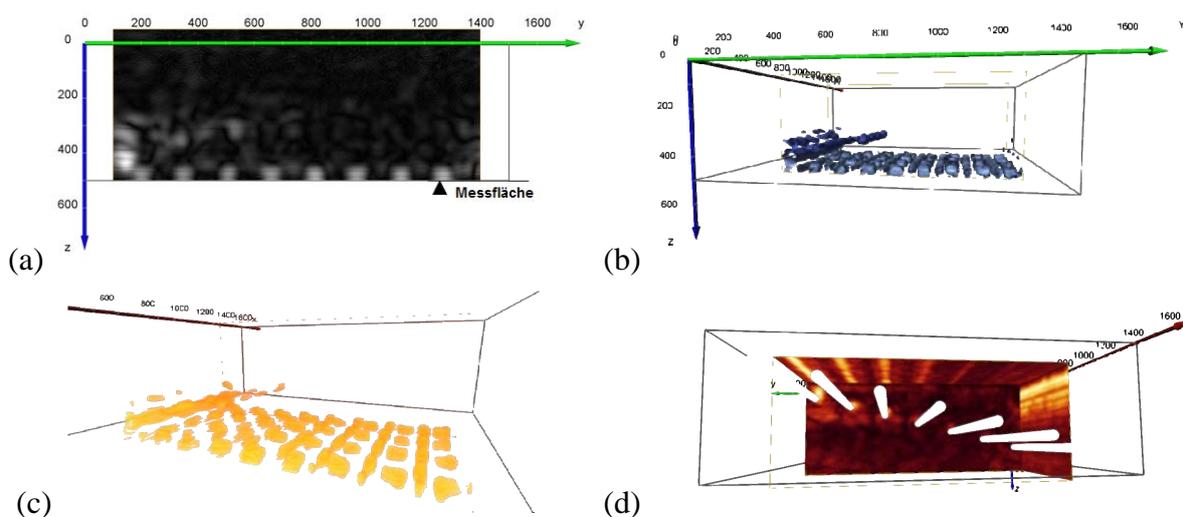
Die Registrierung der Datensätze erfolgt manuell. Als Transformationen werden globale Rotationen um eine der Hauptachsen um  $90^\circ$  und globale Verschiebungen und Skalierungen entlang einer der Hauptachsen benötigt. Die Transformationen erfolgen mit dem ZIBAmira-Transformationseditor oder mit einem speziellen Modul zur Dateneingabe unter Sichtkontrolle. Auf eine automatische Registrierung wurde verzichtet. Aufgrund der stark verrauschten Bilddaten ist es schwer, Landmarken an Bildmerkmalen für eine automatische Transformationsberechnung zu setzen.

## 4.3 Visualisierung skalarer Daten

Der Umfang der bei den ZfPBau-Verfahren Radar und Ultraschallecho erzeugten skalaren Daten ist vergleichsweise gering (typische Größenordnungen sind  $150 \times 300 \times 400$  Voxel) im Vergleich zu anderen bildgebenden Verfahren wie CT. Für die Darstellung der Radar- und Ultraschallechodaten können folgende Visualisierungsmethoden gewählt werden:

- Schnittbilder parallel und senkrecht zur Messfläche (2-D),
- 3-D-Visualisierung in Form von Isoflächen oder direktem Volume-Rendering,
- Projektionen der maximalen Intensität (2-D).

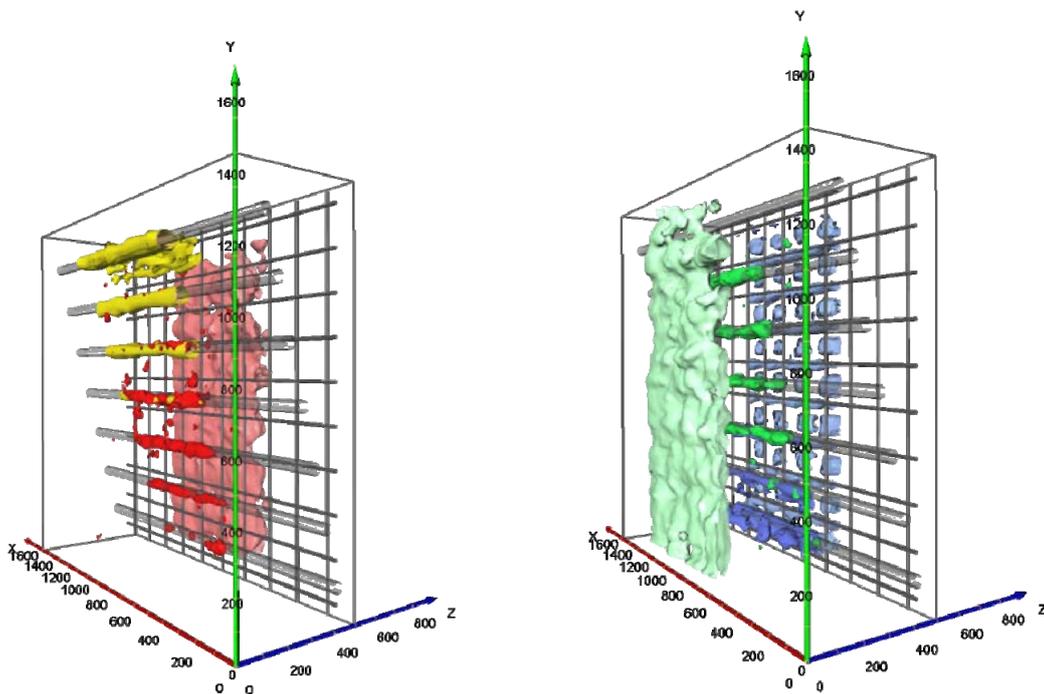
Die unterschiedlichen Formen werden in Abbildung 3 vorgestellt. Für den Vergleich wurden Rekonstruktionsdaten von Radar verwendet. Die hierfür durchgeführten Messungen erfolgten an dem in Abbildung 2 vorgestellten Probekörper, auf der Seite mit oberflächennaher Bewehrung.



**Abbildung 3** Vergleich der Darstellungsformen am Beispiel 2-D-migrierter Radardaten, gemessen von der Seite mit Mattenbewehrung ( $z = 500$  mm). Von oben links nach unten rechts: (a) Volumenschnitt, (b) Isoflächen, (c) direktes Volume Rendering, (d) Projektion der maximalen Intensität.

Bei Schnitten durch das Volumen wird jedem Datenwert auf dem Schnitt ein Farbwert oder eine Höhe zugeordnet (Abbildung 3 a). Je nach verwendeter Farbtabelle oder Höhenskalierung können die Datenwerte gut beurteilt werden. Dabei ist der räumliche Kontext aber oft schwer, resp. nur auf dem Schnitt erkennbar. Im Gegensatz dazu geben Methoden der 3-D-Visualisierung einen räumlichen Überblick. Etablierte Verfahren sind die Isoflächenextraktion (Abbildung 3 b) oder auch das direkte Volume-Rending (Abbildung 3 c). Bei letzterem Verfahren ist es besonders wichtig, geeignete Farbtabellen mit Transparenzen zu finden, um die relevanten Daten und ihre räumliche Anordnung zu erkennen [6]. Die 3-D-Darstellungen können allerdings nur für eine geringe Anzahl gegebener diskreter Datenwerte berechnet und ohne Verlust der Übersichtlichkeit angezeigt werden. Die Projektionen der Datenwerte auf eine Seitenfläche des Datenwürfels (Abbildung 3 d) geben einen schnellen Überblick über die Werteverteilung der Daten. Eine genaue Lokalisierung ist jedoch nicht möglich.

Für den qualitativen Vergleich der Daten von Radar und Ultraschallecho im Raum hat sich die Visualisierung durch Isoflächen als geeignetste Darstellungsform erwiesen. Die Schwellenwerte für die Isoflächen können den Amplitudenwerten regional angepasst werden. Dies ist hilfreich, da Reflektoren in unterschiedlichen Tiefen erwartet werden und ein Tiefenausgleich zweckmäßig ist. Ein einzelner Datensatz wird dazu in mehrere ROIs (Regions of Interest) unterteilt. In Abbildung 4 sind beispielgebend die Ergebnisse von Radar- und Ultraschallecho-Messungen gemeinsam, jeweils für ein Messfeld, aufgezeigt. Die Messdaten von den gegenüberliegenden Messfeldern wurden gleich aufbereitet und gleiche Schwellenwerte für adäquate Wertebereiche gewählt.

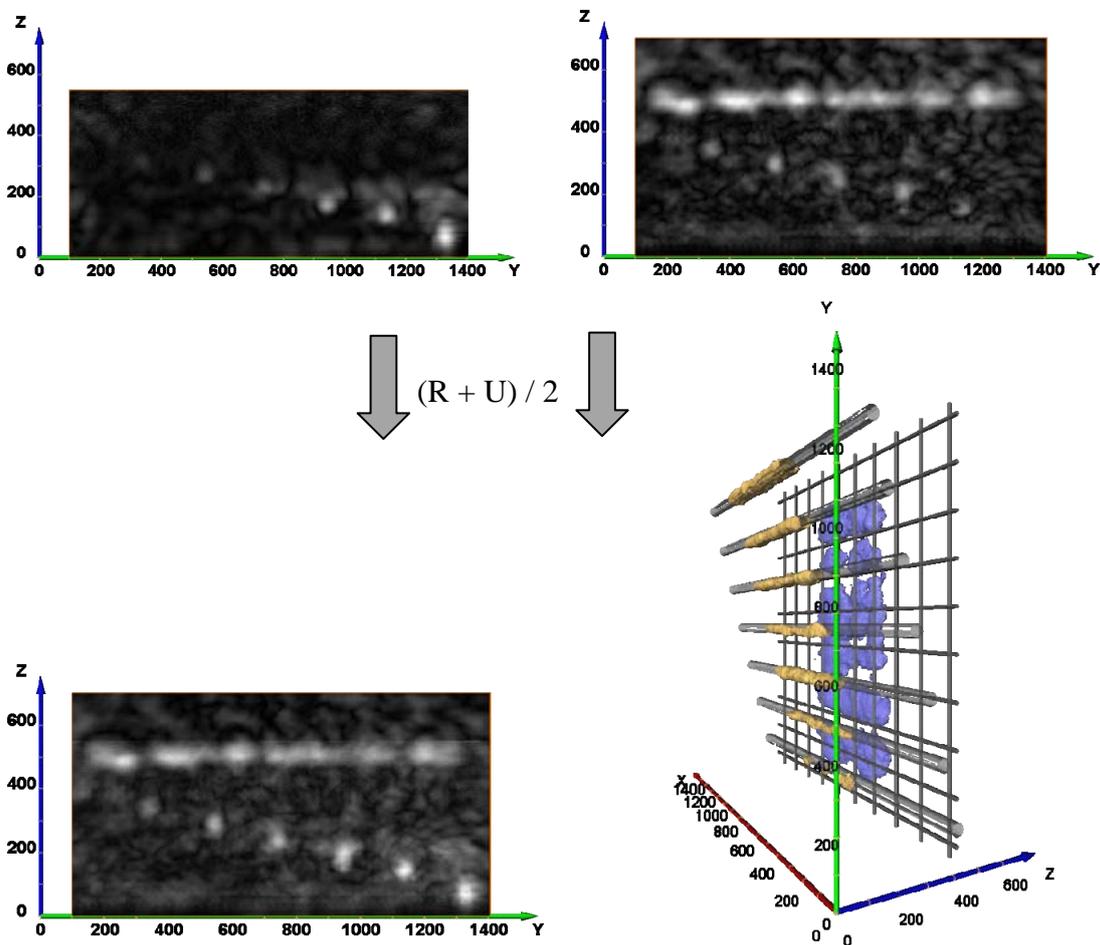


**Abbildung 4** Rechts: Messungen von der Seite ohne Mattenbewehrung ( $z = 0$  mm) – Radar: gelb - Reflexion an den Stahlrohren, Ultraschallecho: rot - Reflexion an den Stahlrohren, rosa - Reflexion an der Probekörperrückwand; Links: Messungen von der Seite mit Mattenbewehrung ( $z = 500$  mm) – Radar: blau - Reflexion an den Stahlrohren, hellblau - Reflexionsebene der Mattenbewehrung, Ultraschallecho: grün - Reflexion an den Stahlrohren, hellgrün - Reflexion an der Probekörperrückwand.

#### 4.4 Datenfusion

Die Fusion der Daten unterschiedlicher Verfahrens- oder Messkonfigurationen kann die Interpretation von Messergebnissen vereinfachen und die Zuverlässigkeit der Ergebnisse steigern [2, 3]. Das Visualisierungssystem ZIBAmira bietet hierfür ein Arithmetik-Modul an, mit dem einfache Datenfusionen wie z.B. die Superposition verschiedener Datensätze durch Addition, Subtraktion, Durchschnitt oder Maximalwerte ausgeführt werden können. Ebenso sind tiefenabhängige Wichtungen der Daten (linear und nichtlinear) berechenbar. Voraussetzung ist eine vorherige Registrierung der Daten.

Bei der Fusion werden die zu fusionierenden Daten ausgehend vom Datensatz mit der höchsten Auflösung interpoliert. Das Resultat einer sehr einfachen Datenüberlagerung ist in Abbildung 5 dargestellt. Hierfür wurden die Amplituden der Radar und Ultraschallecho-Daten addiert und anschließend halbiert. Die Daten beruhen auf Messungen an dem in Abbildung 2 dargestellten Probekörper, auf der Seite ohne oberflächen-naher Bewehrung.



**Abbildung 5** Ergebnisse der Messungen am Probekörper in Abbildung 2, von der Seite ohne Mattenbewehrung ( $z = 0$  mm), oben links: Schnitt durch den Radar-Datensatz R, oben rechts: Schnitt durch einen Ultraschall-Datensatz U, unten: Abbildungen des fusionierten Datensatzes, es wird der Durchschnittswert angezeigt – links: Schnitt durch den fusionierten Datensatz der beiden oberen Datensätze, rechts: Isoflächen (gelb – Reflexionen an den Stahlrohren, blau – Reflexion an der Probekörperwand).

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem Visualisierungssystem ZIBAmira steht ein Werkzeug zur Verfügung, das die gleichzeitige Visualisierung von Radar- und Ultraschallechodaten verfahrensübergreifend und Koordinaten angepasst erlaubt. Die Anzeige von Geometriedaten des untersuchten Objekts aus CAD-Systemen ist sehr hilfreich.

Als volumenbasierte 3-D-Visualisierungsmethode bildet die Isoflächen-Darstellung eine sehr gute Grundlage für die qualitative Bewertung von Ergebnissen und den Vergleich von Ergebnissen unterschiedlicher Verfahrens- und Messkonfigurationen.

Das Modul zur Datenfusion ermöglicht es, Datensätze durch einfache arithmetische Operationen zu überlagern. Gleichzeitig können weiterführende Algorithmen für die Überlagerung, zum Beispiel die tiefenabhängige Wichtung der Daten, berücksichtigt werden.

Eine quantitative Bewertung der Ergebnisse anhand der Isoflächen-Darstellung ist bisher schwierig. Ebenso eignet sie sich nicht für die kundenorientierte Darstellung, da die Reflexionsanzeigen im Ergebnis der ZfPBau-Verfahren mit Lage und Größe der realen Einbauelemente verwechselt werden können. Um dies zu vermeiden, ist der Entwurf eines Editors mit einer Objektbibliothek vorgesehen. Mit dessen Hilfe soll die Lage der realen Einbauelemente wie Bewehrungsstäbe, Spannglieder etc. anhand der Reflexionsanzeigen in die 3-D-Visualisierung des Bauteils eingefügt werden (inklusive Bemaßung). Zusätzliche Informationen zum Untersuchungsobjekt können auf diesem Weg integriert werden.

## Referenzen

- [1] Stalling, D.; Westerhoff, M., Hege, H.-Ch.: *Amira: A Highly Interactive System for Visual Data Analysis*, in: Charles D. Hansen, Christopher R. Johnson (eds.), *The Visualization Handbook*, Chapter 38, pp. 749-767, Elsevier, 2005.
- [2] Kohl, Ch.; Krause, M.; Maierhofer, Ch.; Wöstmann, J.; Wiggenhauser H.: *Datenfusion komplementärer Impuls-Echo-Verfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung von Betonbauteilen*, in: Tagungsband DGZfP-Jahrestagung 2004 ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung Salzburg.
- [3] Kohl, Ch.; Streicher, D.: *Results of reconstructed and fused NDT-data measured in the laboratory and on-site at bridges*, in *Cement & Concrete Composites*, 28 (2006), pp. 402-413, Elsevier, 2006.
- [4] Maierhofer, Ch.; Zacher, G.; Wöstmann, J.; Krause, M.; Streicher, D. und B. Milmann, *Bewertung von Radar- und Ultraschalldaten mit Hilfe der Datenfusion*, in: DGZfP-Jahrestagung 2007, Fürth, 14.-16.Mai 2007, Berichtsband BB 104 – CD, Berlin, Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, 2007.
- [5] Sandmeier, K.-J.: *Non-destructive testing of concrete with electromagnetic and acoustic-elastic waves: data analysis*, in *Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures, Volume 2: Non-destructive testing methods*, editors: Ch. Maierhofer, H.-W. Reinhardt, G. Dobmann, Cambridge, UK, Woodhead Publishing in Materials, 2010, S. 125-143.
- [6] Schumann, H.; Müller, W.: *Visualisierung*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2000.