



# Strukturbestimmung von Betonbauteilen – Ergebnisse einer Forschergruppe der Deutschen Forschungsgemeinschaft

H.-W. REINHARDT, C.U. GROSSE, Universität Stuttgart

**Kurzfassung.** Von 2001 bis 2007 wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) in Bonn eine Forschergruppe eingerichtet, die sich mit der zerstörungsfreien Strukturbestimmung von Betonbauteilen mit akustischen und elektromagnetischen Echo-Verfahren befasst hat. Die Gruppe bestand aus sieben Institutionen, die zu den anerkannten Forschungsstellen auf dem Gebiet der Zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) im deutschsprachigen Raum zählen, sowie neun Mitgliedern einer Unterstützerguppe, die im Wesentlichen die privatwirtschaftlichen Interessen an diesem Forschungsprojekt vertrat, jedoch keine Förderung von Seiten der DFG erhielt.

Das Ziel der Forschergruppe FOR 384 war, die Verfahren zur Strukturaufklärung von Betonbauteilen auf einen Entwicklungsstand zu heben, der ihre systematische Anwendung zur zerstörungsfreien Bauwerksdiagnose ermöglicht und auf die Validierung für möglichst viele Prüfaufgaben hinführt. Einige ausgewählte Ergebnisse werden im Folgenden präsentiert.

## 1. DFG-Projektrahmen

Das Ziel der DFG-Forschergruppe „Zerstörungsfreie Strukturbestimmung von Betonbauteilen mit akustischen und elektromagnetischen Echo-Verfahren“ war die Anhebung des Entwicklungsstands der Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen im Hinblick auf die systematische Anwendung bei der Bauwerksdiagnose, insbesondere

- Identifikation und Quantifizierung der wesentlichen Einflussparameter und deren Auswirkungen (auch in Kombination) auf die Leistungsfähigkeit der Verfahren für typische Baukonstruktionen,
- Entwicklung von kombinierten Methoden für den Einsatz der ZfPBau-Verfahren, auch unter Einbindung von Simulationsrechnungen und Modellierung,
- Entwicklung und Weiterentwicklung neuer Verfahren für das Bauwesen.

Am Projekt haben die folgenden Institutionen teilgenommen:

- I Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)  
Unter den Eichen 87, 12200 Berlin  
Fachgruppe VIII.2: Zerstörungsfreie Schadensdiagnose und Umweltmessverfahren  
Dr. H. Wiggenhauser, Dr. Chr. Maierhofer, Dr. M. Krause
- II Fraunhofer Gesellschaft IZFP – Institutsteil Dresden (EADQ)  
Krügerstraße 22, 01326 Dresden  
Dr. Bernd Köhler, Dr. Frank Schubert

- IV Materialforschungs- und –prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar (MFPA)  
 Amalienstr. 13, 99423 Weimar  
 Prof. Dr. J. Bergmann, Dipl.-Ing. M. Schickert
- V Technische Universität Darmstadt (UDa)  
 Institut für Massivbau, Petersenstr. 12, 64287 Darmstadt  
 Dr. Otto Kroggel
- VI Universität Dortmund (UDo)  
 Lehrstuhl für Werkstoffe des Bauwesens  
 August-Schmidt-Str. 8, 44227 Dortmund  
 Prof. Dr.-Ing. J. Neisecke, Prof. Dr.-Ing. B. Middendorf, Dipl.-Ing. A. Glaubitt
- VII Universität Kassel (UKa)  
 Fachbereich Elektrotechnik  
 Wilhelmshöher Allee 71-73, 34121 Kassel  
 Prof. Dr. K.J. Langenberg, Dr. Klaus Mayer
- VIII Universität Stuttgart (USt)  
 Institut für Werkstoffe im Bauwesen  
 Pfaffenwaldring 4,  
 70550 Stuttgart  
 Prof. Dr. Hans-Wolf Reinhardt, PD Dr. Chr. Große, Dipl.-Ing. R. Beutel

Kooperierendes Institut:

Fraunhofer Gesellschaft IZFP Saarbrücken  
 Institut für zerstörungsfreie Prüfung (IZFP) der FhG  
 Universität, Gebäude 27, 66123 Saarbrücken  
 Prof. Dr. G. Dobmann

Unterstützergruppe (Industriepartner)

Acoustic Control Systems, Moskau  
 Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach  
 Deutsche Bahn AG, München  
 DYWIDAG Systems Int., München und Willich  
 Dr. Hillger-Ingenieurbüro, Braunschweig  
 Hochtief AG, Mörfelden-Walldorf  
 GE Inspection Technologies (früher: Agfa NDT), Hürth  
 POLYTEC GmbH, Waldbronn  
 Robert Bosch GmbH, Leinfelden-Echterdingen

Organisatorisch wurde das Projekt in fünf Arbeitspakete aufgeteilt:

- A: Ultraschall-Echo  
 A1 Referenzsysteme (U Dortmund)  
 A2 Ausbreitungsverhalten (TU Darmstadt)  
 A3 Scannende und fokussierende Systeme (FhG-IZFP/BAM)
- B: Impact-Echo  
 B1 Visualisierung (BAM)  
 B2 Impact-Echo für Betonanwendungen (U Stuttgart)

- C: Radar
  - C1 Ortung von mehrlagiger Bewehrung (BAM)
  - C2 Übertragungsfunktion von elektromagnetischen Verfahren (BAM)
- D: Signalverarbeitung, Rekonstruktion und Modellierung
  - D1 Signalverarbeitung und Rekonstruktion (MFPA Weimar)
  - D2 Modellierung (Universität Kassel/FhG-EADQ)
  - D3 Kombinierte Verfahren, Data Fusion (BAM)
- E: Quantitative Verfahrensbewertung (Performance Demonstration) (U Stuttgart)

Die Forschergruppe startete 2001 und endete 2007. Im Folgenden werden einige Verfahren exemplarisch beleuchtet.

## 2. Beispielhafte Darstellung von ZfP-Verfahren

Es war lange der Wunsch vieler Ingenieure, den Erhärtungsverlauf von Beton und den Zustand eines Bauwerks zerstörungsfrei zu bestimmen. Ersteres vor allem deshalb, um unmittelbar während der Errichtung eines Bauwerks die Eigenschaften des Betons zu kennen und entsprechende Maßnahmen ergreifen zu können, und letzteres, um die Tragfähigkeit eines Bauwerks bei Vorhandensein von Unregelmäßigkeiten abschätzen zu können. Es gibt mehrere Beispiele für zerstörungsfreie Prüfungen während der Bauausführung, z. B. kann mittels *Ultraschall* das Erstarren und Erhärten von Beton verfolgt werden (Bild 1). Entsprechend den Messergebnissen kann dann eine Gleitschalungsbaustelle so gesteuert werden, dass Beton immer verarbeitbar ist und dass die Gleitgeschwindigkeit optimal wird. Bei der Herstellung von Tunnelinnenschalen kann die Dicke der Schale mittels Impact-Echo gemessen werden. Seitdem diese Methode in der Praxis angewendet wird, sind die Bauunternehmer besonders vorsichtig und die Zahl der Minderdicken ist zurückgegangen.

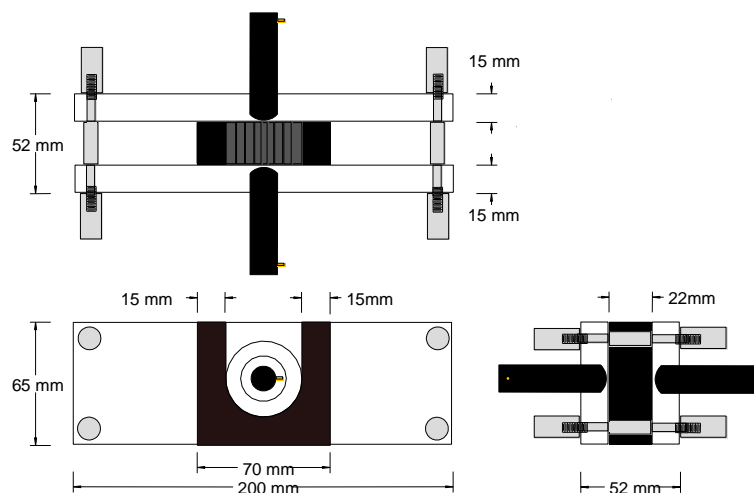


Bild 1. FreshCon-Behälter mit Ultraschall-Sender und -Empfänger (Universität Stuttgart)

Eine besondere Anwendung des Ultraschall-Verfahrens nützt den sog. Kaiser-Effekt aus, nämlich die Erkenntnis, dass Schallereignisse, die von Bruchgeräuschen herrühren, bei einer Wiederbelastung erst dann auftreten, wenn die Erstbelastungshöhe überschritten wird. Diese Erscheinung kommt zustande, wenn Mikrorisse erst bei einer Belastung über dem vorangegangenen Niveau wachsen. Ein ähnlicher Effekt tritt beim Durchgang von Ultraschall auf, der durch Mikrorisse geschwächt wird. An vorbelasteten Bauteilen lässt sich mit Ultraschalltransmission feststellen, wie hoch die vorangegangene Belastung war. Der Beton zeigt ein sogenanntes Lastgedächtnis.

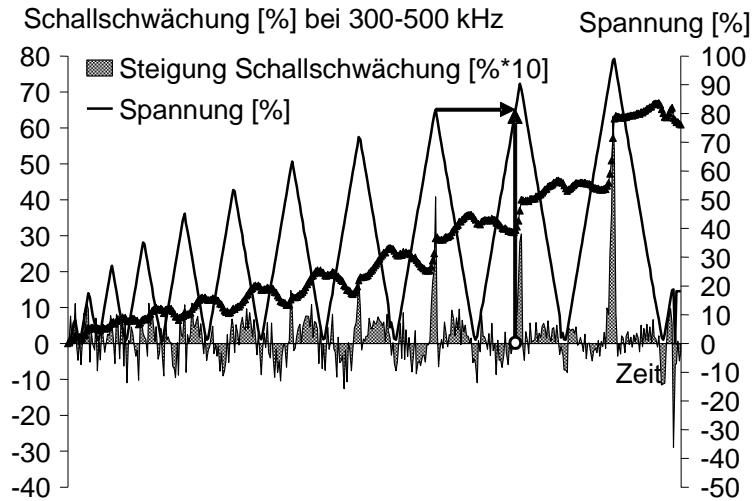


Bild 2. Charakteristischer Verlauf der Schallschwächung für Normalbeton ( $w/z$ - Wert: 0,55, Sieblinie: AB8) bei einaxialer Druckbelastung mit Entlastungsschritten (TU Darmstadt).

Beim *Impact-Echo-Verfahren* wird an der Oberfläche durch einen Stoß eine elastische Welle erzeugt, die an der Gegenseite oder an einer Hohlstelle reflektiert wird und eine stehende Welle ergibt. Die Frequenz dieser Welle wird analysiert. Sie ist umgekehrt proportional zur Dicke des Bauteils oder Tiefe der Hohlstelle. Zur Auswertung wird noch die Geschwindigkeit der Welle benötigt. Die Impact-Echo- und Ultraschallverfahren können auch zur Bestimmung des Erstarrens und Erhärtens von zementgebundenen Massen verwendet werden. Je nach Zustand ändert sich die Schallgeschwindigkeit. Damit wird die Schallgeschwindigkeit ein Indikator des Erhärtens, da diese von Elastizitätsmodul, Dichte und Querdehnzahl abhängt. Indirekt wird also die Erhärtung hauptsächlich über die Entwicklung des E-Moduls abgeschätzt.

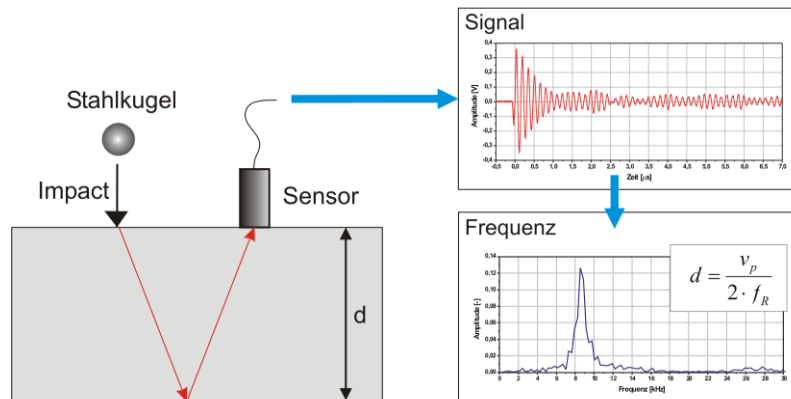
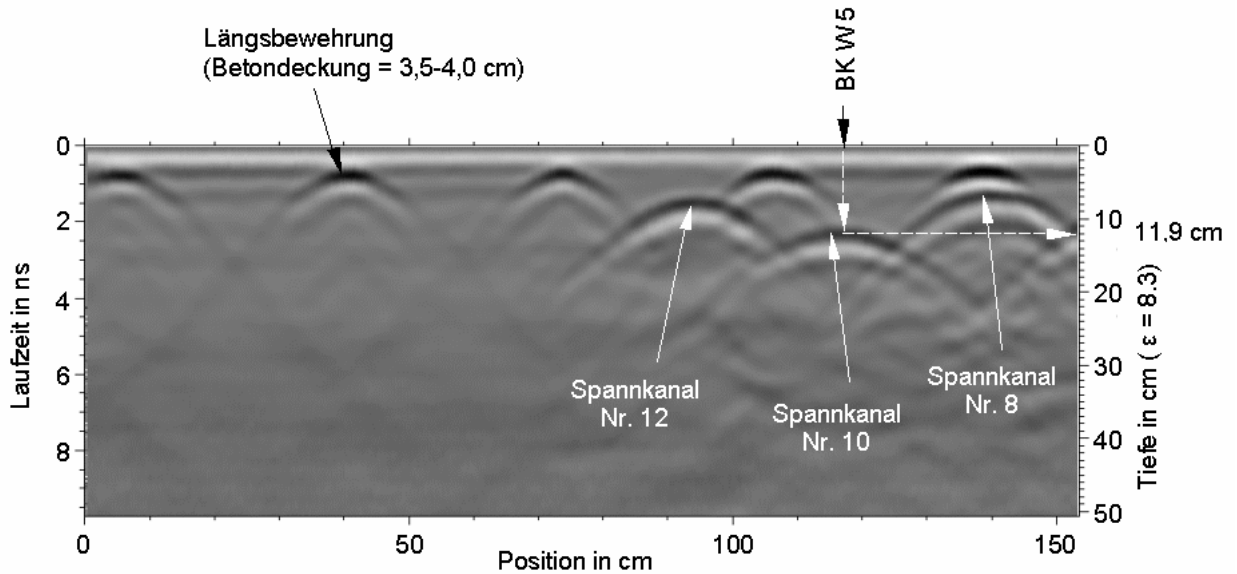


Bild 3. Impact-Echo-Verfahren, Prinzip.

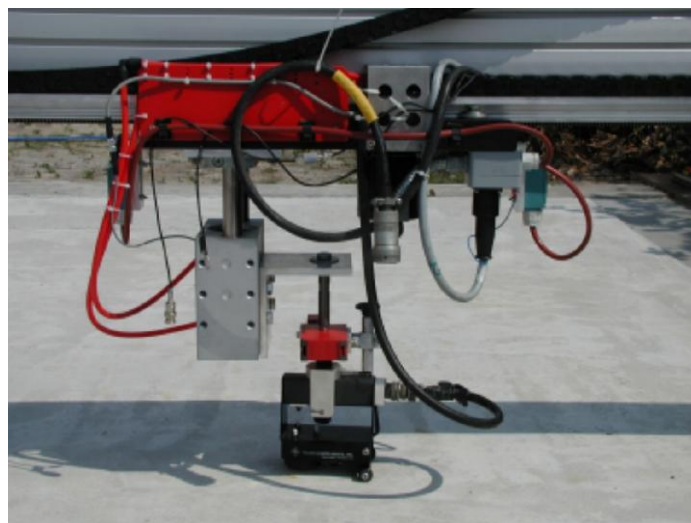


Bild 4. Impact-Echo-Gerät (Universität Stuttgart).

Das *Impuls-Radar-Verfahren* wurde ursprünglich in der Geophysik zur Erkundung von Bodenschichten eingesetzt. Mittlerweile wurde es zu einem zuverlässigen Verfahren im Betonbau weiterentwickelt. Es eignet sich besonders zur Ortung von Stahl (Bewehrungsstahl, Spannstahl, Hüllrohre), von Hohlstellen im Beton und von Durchfeuchtungen. Überall dort, wo sich die dielektrischen Eigenschaften des Mediums ändern, treten Reflexionen der elektromagnetischen Wellen auf, die detektiert werden können. Die Eindringtiefe der Wellen beträgt bei einer 1,5 GHz-Antenne ca. 300 mm, die Tiefenauflösung liegt in der Größenordnung von 20 mm. Die Tiefenlage von Spanngliedern kann sogar mit einer Toleranz von 10 mm ermittelt werden. Ein Vorteil des Verfahrens ist die schnelle Durchführbarkeit und die automatische Auswertung der Messdaten.



*Bild 5. Radargramm einer manuell aufgenommenen Messspur (1,5 GHz-Antenne) entlang einer senkrechten Messlinie (von oben nach unten) am Hohlkastensteg einer Autobahnbrücke. An der Position des Spannglieds Nr. 10 wurde nachträglich der Bohrkern BK W5 gezogen (BAM).*



*Bild 6. Am Scannersystem montierter IE-Messkopf der BAM.*

Die ZfP-Methoden im Bauwesen sind mittlerweile automatisiert. Prüfkörper können mit *Robotern* zielgenau an die jeweiligen Koordinaten gefahren und appliziert werden. Die Datenaufnahme erfolgt automatisch in vorgegebenen Intervallen und die Daten werden in ei-

ner Datenbank gespeichert. Mit Hilfe statistischer Methoden werden die Daten ausgewertet. Auf diese Weise lassen sich Hüllrohre, Verpressfehler und Geometriesprünge orten und mit einer ermittelten Toleranz darstellen. Mit ZfP-Verfahren lassen sich auch Fundamente und Pfahlgründungen orten und vermessen, die sich z. B. für eine Weiterverwendung im Bestand nutzen lassen.



Bild 7. NDT Stepper (BAM)

Wenn man mit zwei oder mehr Verfahren am selben Objekt misst, kann man die Datenqualität deutlich verbessern, wenn man die Daten verschmilzt (engl. Datafusion). Dazu muss das Messraster identisch sein. Besonders geeignet ist *Datafusion* bei automatisierten Messungen, wenn der Messsensor punktgenau positioniert werden kann. Die Datafusion wird bei Messungen an Spannbetonbrücken gezeigt, an denen mit Radar und Ultraschall getrennt gemessen wurde. Auch die Kombination von Ultraschall und Impact-Echo führt zu erfolgreichen Ergebnissen.

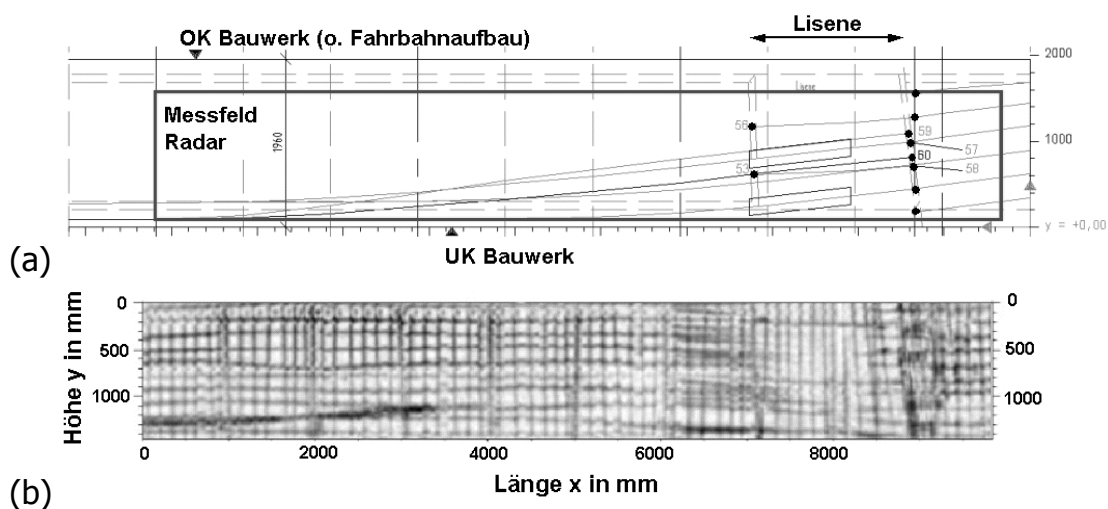


Bild 8. Radar - (a) Längsschnitt des Hohlkastensteges mit Kennzeichnung des untersuchten Messfeldes, (b) aus 3D-rekonstruierten und fusionierten Daten generiertes SAFT-C-Bild in einer Mess-tiefe von 7,5 cm (BAM).

Ein wesentlicher Fortschritt in der *Auswertung von Daten* von elektromagnetischen und elastischen Wellen wird dadurch erzielt, dass die Wellen mathematisch dargestellt werden, insbesondere wenn sie sich in inhomogenen Medien ausbreiten oder durch geometrische Hindernisse beeinflusst werden. Geometrische Hindernisse und Inhomogenitäten im Beton sind Quellen eines Streufelds. Zur Erzeugung synthetischer Streufelddaten werden die jeweiligen Wellenfeldgleichungen für vorgegebene Quellen und Materialinhomogenitäten numerisch gelöst. Dazu stehen verschiedene mathematische Verfahren zur Verfügung. Die exakte mathematische Theorie und die Anwendung auf elektromagnetische Wellen (Radar) und akusto-elastische Wellen (Ultraschallecho) wurden in einem umfangreichen Teilprojekt durch die Universität Kassel behandelt.

### 3. Modellierung

Die mathematische *Modellierung* wird heute zur Verifizierung und Erhöhung der Abbildungsqualität von Ergebnissen der Ultraschallechoprüfung verwendet. Dazu werden Messungen durchgeführt, die im Ergebnis vermuten lassen, dass sich im Innern von Betonbauteilen Störkörper befinden, z. B. Bewehrungsstäbe, Spannglieder, Hohlstellen, Delamination o.a. In einem zweiten Schritt wird die vermutete Geometrie der Störkörper in einem 3D-Bild dargestellt, das als Ausgangspunkt für die mathematische Abbildung dient. Auf diese Weise können Messergebnisse deutlich besser (schärfer) dargestellt werden und sie erhöhen somit die Aussagegenauigkeit. Insbesondere können Randeinflüsse (Bild 9) sowie der Einfluss von Artefakten oder Materialinhomogenitäten (z. B. Luftporen, Bild 10) auf das Ergebnis getestet werden. Vielfach kann so bereits vor einem Messeinsatz die Überprüfbarkeit eines Objektes festgestellt werden.

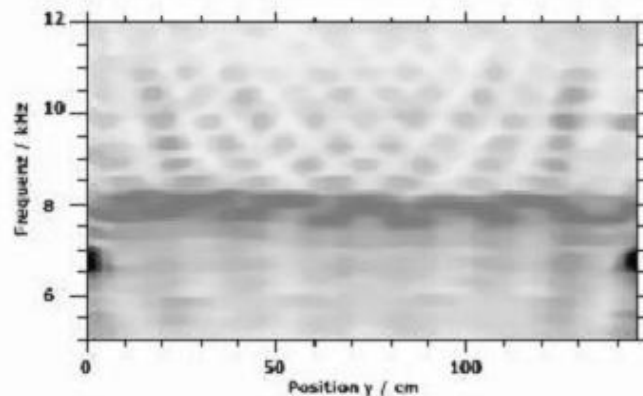
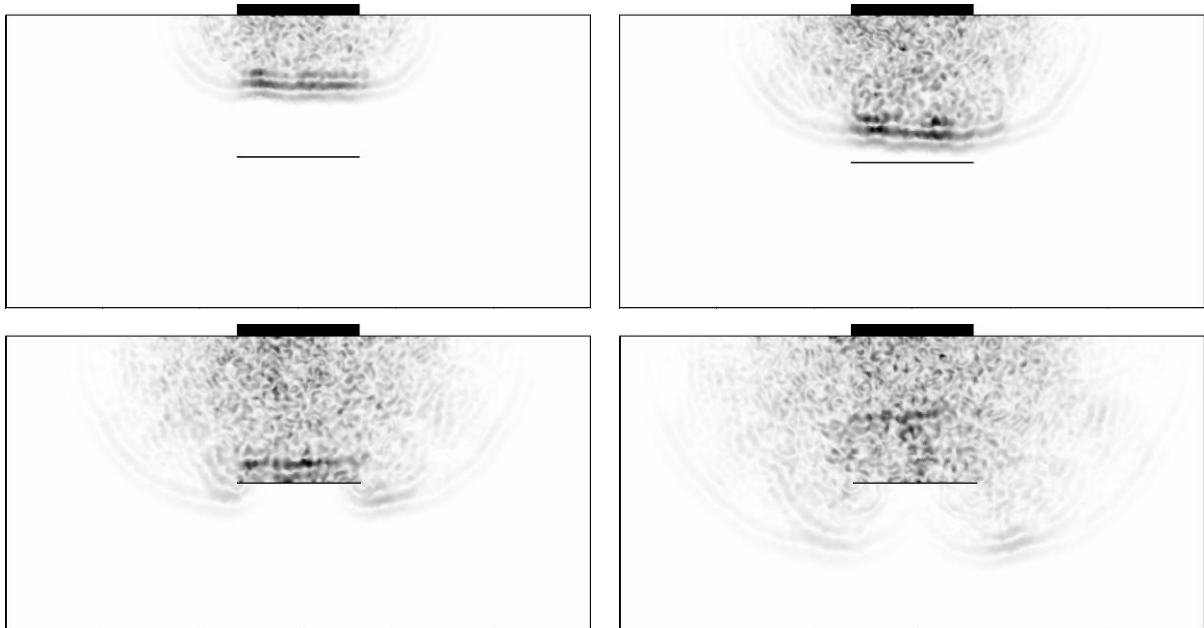


Bild 9. Geometrieeffekte in einem Querschnitts-Impact-Echogramm (B-Scan) (IZFP).

Außerdem wird beispielsweise die Aussagekraft von wellenbasierten Echo-Verfahren durch die Kombination von flächig scannender Messung, dreidimensionaler Rekonstruktion und der Modellierung der Ausbreitung elastischer und elektromagnetischer Wellen im Verbundwerkstoff Stahlbeton bzw. Spannbeton erhöht. Inzwischen ist ein solcher Stand erreicht, dass die Verfahren routinemäßig im Bauwerksmanagement eingesetzt werden können. Da jedes Bauwerk im Grunde ein Unikat ist, ergeben sich allerdings bei vielen Anwendungen immer wieder neue Herausforderungen.



*Bild 10. 2D-EFIT-Modellierung elastischer Wellen: Das von einer endlichen Apertur abgestrahlte Wellenfeld wird an einem oberflächenparallelen Riss in inhomogenem Material mit 2% Luftporenanteil gestreut (UKa).*

#### **4. Ausblick**

Die Forschergruppe hat in den 6,5 Jahren ihrer Laufzeit die ZfP im Bauwesen ein Stück weitergebracht, hauptsächlich auf den Gebieten Modellierung, Datenauswertung und Datenfusion. Es hat sich gezeigt, dass durch Kombination von flächenscannenden Messungen und Datenrekonstruktion ein Genauigkeitsgewinn erzielt werden kann. Daneben wurde die Automatisierung der Messmethoden weitergetrieben, die vor allem bei größeren flächigen Messaufgaben einen deutlichen Zeitgewinn erbringt. Diese Ergebnisse, die mittels Prototypen und an ausgewählten Messaufgaben gewonnen wurden, sollten vertieft und standardisiert werden, damit sie schließlich in routinemäßiger ZfP verwendet werden können.

#### **5. Dank**

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) sei aufrichtig für die kontinuierliche Förderung gedankt. Für die konstruktive Zusammenarbeit mit allen an der Forschergruppe beteiligten Personen bedanken sich die Autoren herzlich.

#### **5. Literatur**

Eine Übersicht über die Ergebnisse der Forschergruppe 384 geben folgende Veröffentlichungen:

- Reinhardt, H.-W. et al. Echo-Verfahren in der zerstörungsfreien Zustandsuntersuchung von Betonbauteilen. Bergmeister, K., Wörner, J.-D. (Hrsg.) Betonkalender 2007, Ernst & Sohn Berlin 2007, S. 481-595.
- DFG-Forschergruppe 384, Abschlussbericht und Ergänzungsband für die Jahre 2001 bis 2007, Universität Stuttgart 2007.