

# Untersuchung von Betonbauteilen mit dem Impact-Echo-Verfahren in Luftankopplung

Daniel ALGERNON, Hardy ERNST, Klaus DRESSLER  
SVTI Schweizerischer Verein für technische Inspektionen, Nuklearinspektorat  
Richtistrasse 15, 8304 Wallisellen, Schweiz  
Kontakt: daniel.algernon@svti.ch

**Kurzfassung.** Impact-Echo ist ein akustisches Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von Betonbauteilen. Durch den Aufprall einer kleinen Stahlkugel auf der Bauteiloberfläche werden elastische Schallwellen erzeugt und die sich ausbildenden Resonanzen ausgewertet. Insbesondere die Anwendung bildgebender Auswertungsmethoden hat viel zum erfolgreichen Einsatz dieses Verfahrens beigetragen.

Die Auflösung der erhaltenen Bilder steht in direktem Zusammenhang mit der Dichte des Messrasters, jedoch macht ein enges Messraster die Prüfung entsprechend zeitaufwendig, insbesondere wenn herkömmliche Kontaktsensoren eingesetzt werden, welche an jedem Messpunkt erneut angekoppelt werden müssen. Der Einsatz von berührungslosen Mikrofonen stellt hier eine vielversprechende Alternative dar, da diese in kontinuierlicher Bewegung über die Messfläche geführt werden können. Bislang stellte jedoch die Empfindlichkeit gegenüber Umgebungsgeräuschen wie insbesondere der Verfahrapparatur sowie des Aufprallgeräuschs der Kugel selbst ein Problem dar. Durch Signalverarbeitungsmethoden in Verbindung mit einer Kombination von zwei oder mehr Mikrofonen lässt sich die Messung jedoch sehr robust gegenüber diesen Störeinflüssen gestalten, wodurch die Grundlage für schnelle und entsprechend wirtschaftliche Impact-Echo-Prüfungen ohne Qualitätseinbußen geschaffen wird. Anwendungsgebiete sind hierbei Dickenmessungen, Lokalisierung konstruktiver Einbauten, Detektion von Ablösungen und innerer Fehlstellen und Messungen zur Bestimmung der elastischen Materialeigenschaften.

## Einleitung

### 1.1 Impact-Echo

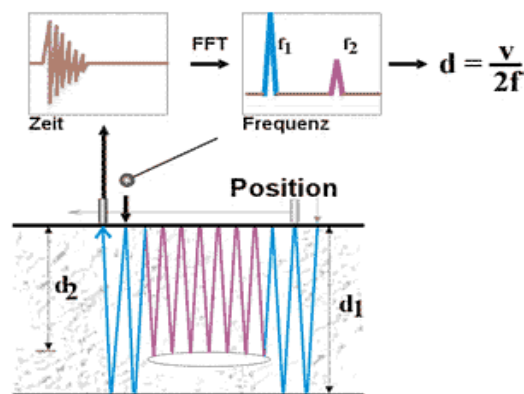
Das Impact-Echo (IE)-Verfahren wird seit vielen Jahren zur Prüfung von Betonbauteilen eingesetzt [1]. Hauptanwendungsgebiete sind Dickenmessungen von Bauteilen, welche nur einseitig zugänglich sind und die Lokalisierung von Ablösungen. Ebenso wird das Verfahren zur Ortung vorwiegend flächiger Fehlstellen im Bauteilinneren sowie zur Untersuchung von Spannkämen (Vorspannung mit nachträglichem Verbund) eingesetzt.

Die Funktionsweise dieses akustischen Verfahrens beruht auf der Analyse von Vielfachreflexionen nach einer mechanischen Impulsanregung. Das Prinzip sei anhand von Abbildung 1 erklärt: die Anregung erfolgt mit einem Impulshammer oder einer Stahlkugel, die Signalaufnahme mit einem auf der Oberfläche angekoppelten Schwingungsaufnehmer. Befindet sich im Bauteil eine zur Oberfläche parallele, den Schall reflektierende Schicht, so

wird der Schallimpuls zwischen den beiden Schichtgrenzen vielfach reflektiert. Dies führt zu einem periodischen Signal am dicht neben der Anregung platzierten Sensor. Unter der Voraussetzung eines periodischen Vorganges lässt sich die Dicke des Bauteils bzw. die Fehlstellentiefe bei Kenntnis der Longitudinalwellengeschwindigkeit aus der Wiederholungsfrequenz berechnen:

$$2d = c_L \cdot T = \frac{c_L}{f} \Leftrightarrow \boxed{d = \frac{c_L}{2f}}$$

$c_L$  : Longitudinalwellengeschwindigkeit  
 $d$  : Dicke der Schicht  
 $T$  : Periodendauer  
 $f$  : Frequenz



**Abbildung 1:** Funktionsweise des Impact-Echo-Verfahrens (BILDQUELLE: BAM)

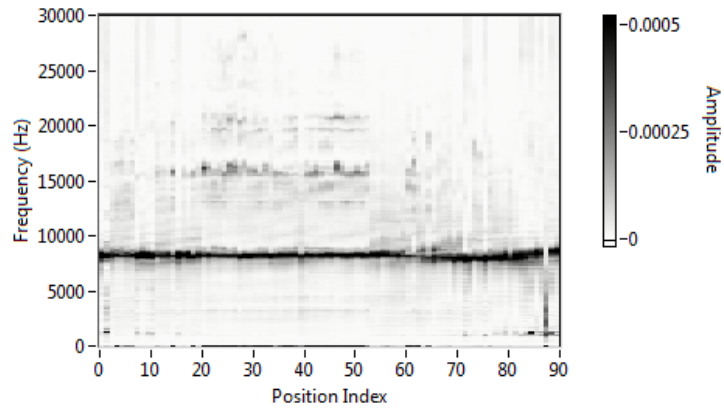
Für die Auswertung werden die aufgenommenen Zeitsignale in den Frequenzbereich transformiert. Das erfolgt über eine Fast Fourier Transformation (FFT), durch die sich das Frequenzspektrum des Signals bestimmen lässt.

Voraussetzung für den Einsatz des Impact-Echo-Verfahrens ist, dass zwischen denen in ausreichendem Maße Schallenergie mehrfach reflektiert wird, weshalb flächige Bauteilgeometrien von Vorteil sind.

### 1.2 Bildgebende Darstellung (Schnittbilder)

Bei dem IE-Verfahren werden die Messdaten punktwise aufgenommen. Für jeden Messpunkt erhält man ein Zeitsignal mit seinem zugehörigen Fourier-Leistungsspektrum (Frequenzspektrum). Auf der Bauteiloberfläche werden Linien bzw. Raster mit einer Vielzahl von Punkten festgelegt, entlang derer die Messungen durchgeführt werden. Um eine bildgebende Auswertung zu ermöglichen, wird das Frequenzspektrum jedes Messpunktes als Graustufenplot dargestellt. Durch Aneinandersetzen der Plots sämtlicher Punkte entlang einer Messlinie erhält man – vor dem Hintergrund, dass jede Frequenz gemäß Gleichung 1 einer Tiefeninformation entspricht – im Prinzip einen Querschnitt durch das Bauteil entlang der Messlinie. In Anlehnung an die Terminologie in der Ultraschalltechnik bezeichnet man diesen als Frequenz-B-Bild bzw. Impact-Echogramm.

Für jede Messlinie wird eine auf diese Weise ein zweidimensionale, durch parallele Anordnung mehrerer Messlinien folglich eine dreidimensionale Information über das Bauteil erhalten.

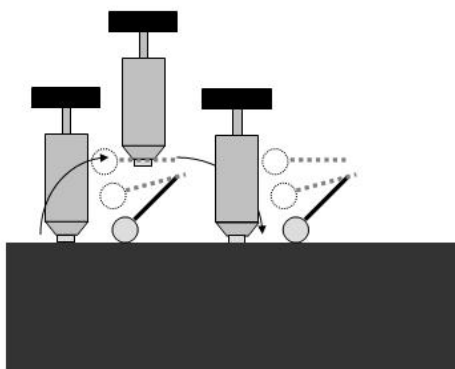


**Abbildung 2:** Beispiel eines Impact-Echo B-Bildes (Impactechogramm). Für jeden Punkt wird das Frequenzspektrum streifenförmig als Graustufenplot dargestellt; durch Aneinanderreihung der Streifen sämtlicher Messpunkte einer Linie wird somit ein Querschnitt (Frequenz-B-Bild) durch das Bauteil entlang der Linie erhalten.

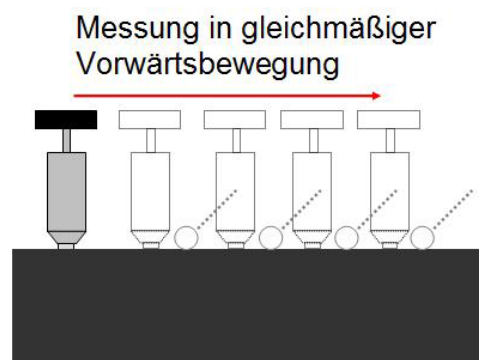
## 2. Luftankopplung

### 2.1 Motivation

Der Einsatz berührungsloser, d.h. luftangekoppelter Sensoren [5]-[12] ist insofern vielversprechend, dass dadurch die Ankopplung auf den oft rauen und unebenen Betonoberflächen erspart bleibt. Vor allem aber kann durch diese Form der Ankopplung der Zeitaufwand für die Durchführung von Impact-Echo-Messungen erheblich verringert werden, da das Anheben und Absetzen des Messkopfes entfällt und eine kontinuierliche Bewegung (Abbildung 4) des Messkopfes, etwa auf einer auf Rollen gelagerten Plattform, somit durchaus denkbar ist.



**Abbildung 3:** Zeitaufwendiges Anheben und Absetzen des Messkopfes für die Messung entlang eines Rasters („scannend“).



**Abbildung 4:** Langfristiges Ziel: Messung in gleichmäßiger Vorwärtsbewegung

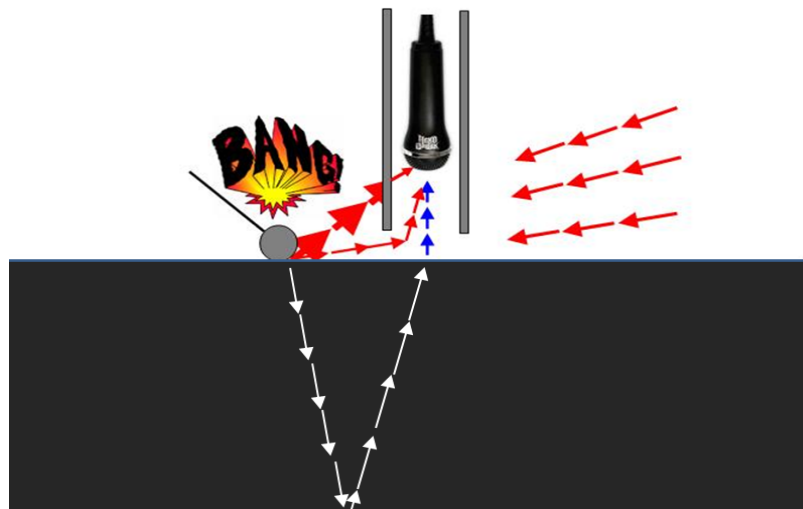
## 2.2 Einsatz von Mikrofonen

Vor allem im relativ niedrigen Frequenzbereich bis etwa 12 kHz stellen Mikrofone eine attraktive und vergleichsweise kostengünstige Möglichkeit zur Aufzeichnung von Schwingungen dar. Der Einsatz von Mikrofonen anstelle von Kontaktsensoren wird jedoch durch Umgebungsgeräusche, Geräusche aus der Verfahrmechanik und insbesondere durch die direkte Luftwelle des Aufpralls der Stahlkugel auf der Betonoberfläche erschwert. Durch Einsatz einer entsprechenden Abschirmung kann hier bereits eine Verbesserung erzielt werden, die Störeinflüsse können jedoch nicht immer in ausreichendem Masse eliminiert werden. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn eine entsprechende Verfahrmechanik eingesetzt wird, welche je nach Verfahrgeschwindigkeit zusätzlich erhebliche Störgeräusche erzeugt.



**Abbildung 5:** Beispiele für einsetzbare Mikrofontypen. Links: Elektret-Kondensatormikrofon mit einem Frequenzgang von 50 - 16000 Hz, rechts: Präzisionskondensatormikrofon mit einem Frequenzgang von 4 - 20000 Hz.

Um das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern kann eine kombinierte Messanordnung (Array) mit entsprechender Signalverarbeitung zielführend sein [13].



**Abbildung 6:** Prinzipskizze für den Einsatz von Mikrofonen als Sensoren für Impact-Echo. Ziel ist die Registrierung der im Bauteil reflektierten (weiß dargestellt) Welle, welche durch die Luft (blau dargestellt) zum Mikrofon gelangt. Störend (rot dargestellt) wirken dabei die direkte Luftwelle des Aufprallgeräusches sowie Umgebungsgeräusche. Durch eine akustische Abschirmung lassen sich die Störeinflüsse verringern.

## 3. Demonstration

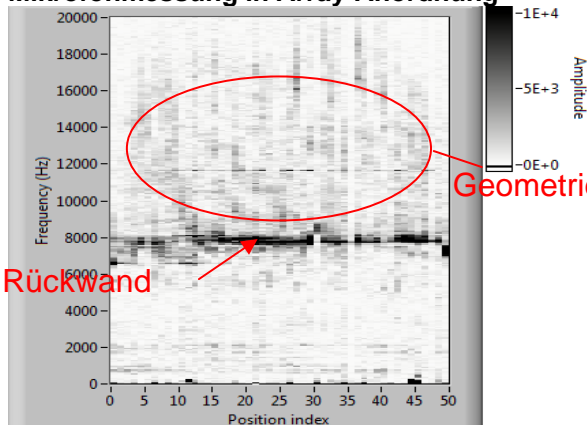
Die beschriebene Vorgehensweise wurde angewendet auf eine Messlinie bestehend aus 50 Einzelpunkten im Abstand von 20 mm entlang einer 30 cm dicken Testwand (Abbildung 7). Das resultierende B-Bild ist in

Abbildung 8, links dargestellt und dem B-Bild des herkömmlichen Kontaktsensors (Referenz) gegenübergestellt. Hierin zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Mikrofonmessung mit der Referenz; die Rückwandanzeige ist klar erkennbar. Ebenso zeichnen sich die Geometrieeffekte, d.h. Anzeigen aus Reflexionen an den Kanten des Bauteils, in noch erkennbarer Weise ab.

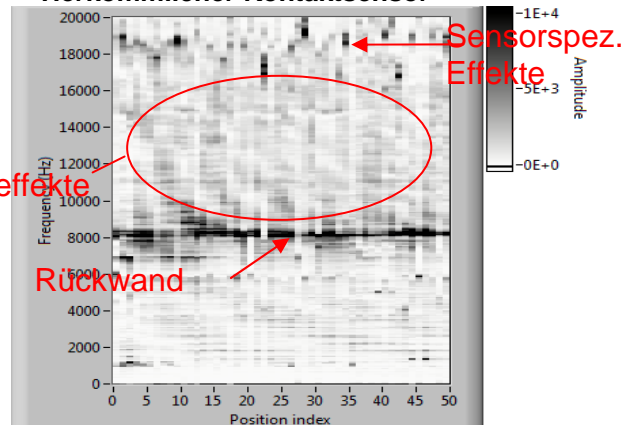


**Abbildung 7:** 30 cm dicke Testwand aus Beton. Alle Messungen wurden in ungestörten Bereichen, d.h. Bereichen ohne Einbauten wie beispielsweise Entwässerungsrohren durchgeführt.

**Mikrofonmessung in Array-Anordnung**



**Herkömmlicher Kontaktsensor**

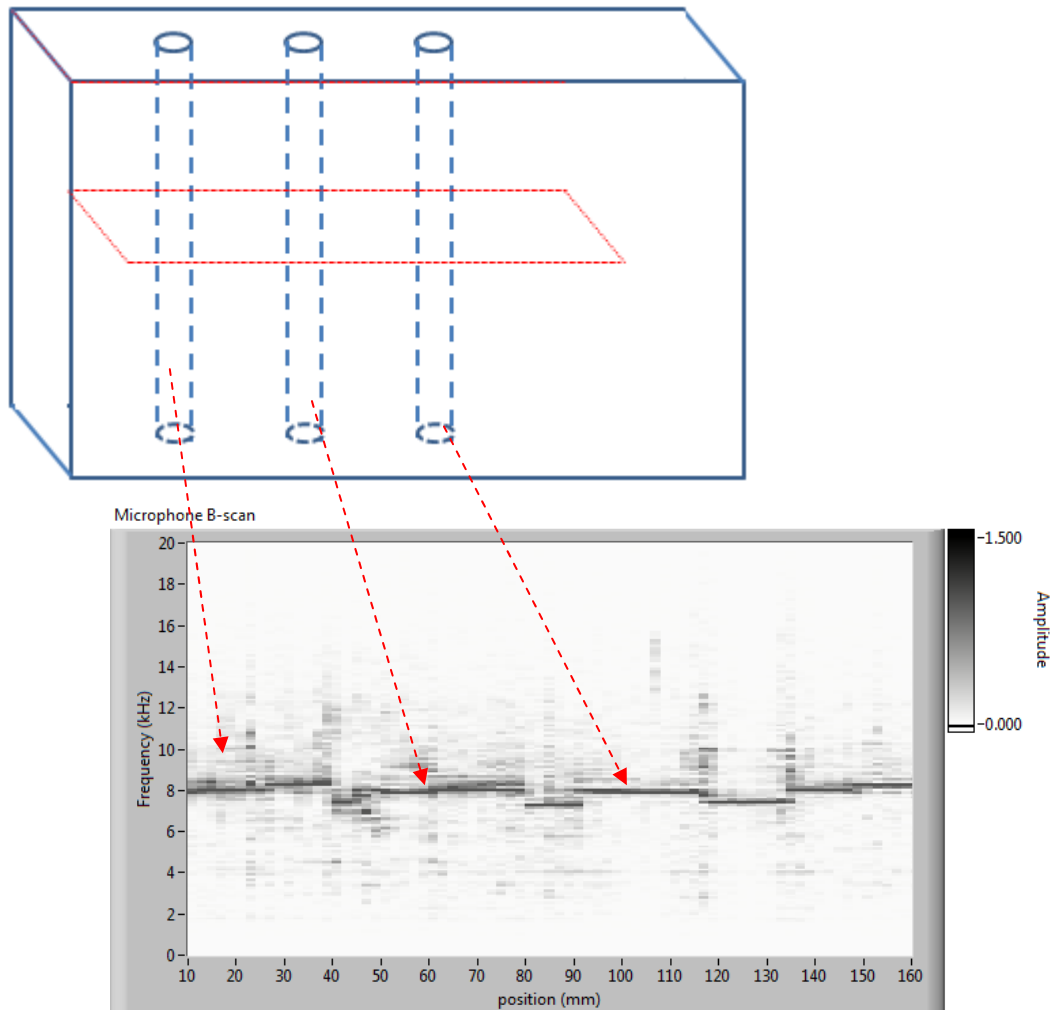


**Abbildung 8:** Gegenüberstellung des resultierenden B-Bildes bei Mikrofonmessung in Array-Anordnung (links) und Messung mit herkömmlichem Kontaktsensor (rechts). Die Bauteilrückwand ist klar erkennbar, aber auch Geometrieeffekte sind noch erkennbar. Die sensorspezifischen Effekte, welche bei dem Kontaktsensor bei ca. 19 kHz erkennbar sind, treten bei der Mikrofonmessung nicht auf.

Abbildung 9 zeigt die vereinfachte Skizze eines Probekörpers der BAM mit den Abmessungen 2.00/2.00/0.30 m und einbetonierten Hüllrohren sowie das B-Bild (Impactechogramm) einer an diesem Probekörper unter Verwendung von Mikrofonen aufgenommenen Impact-Echo-Messlinie.

Die laterale Position der Rohre ist anhand der Verschiebung der Rückwandanzeige hin zu tieferen Frequenzen [1] im B-Bild deutlich erkennbar.

Die Qualität der Messdaten, insbesondere das Signal/Rausch-Verhältnis, ist dabei mit der Qualität herkömmlicher Kontaktsensoren durchaus vergleichbar, so dass hier der Einsatz von Mikrofonen eine äquivalente Alternative bei gleichzeitiger Nutzung der damit verbundenen Vorteile und Möglichkeiten von Mikrofonmessungen darstellt.



**Abbildung 9:** B-Bild (Impactechogramm) einer Mikrofonmessung an einem Probekörper mit drei eingebauten Hüllrohren. Die laterale Position der Rohre ist im B-Bild aufgrund der scheinbar verschobenen Rückwandanzeige zu niedrigeren Frequenzen deutlich erkennbar. Die Qualität der Messdaten ist mit jener herkömmlicher Kontaktsensoren durchaus vergleichbar.

#### 4. Schlussfolgerung und Ausblick

Mikrofone als kontaktfreie Sensoren erweisen sich als gut geeignet für Impact-Echo-Messungen im niedrigen Frequenzbereich (Reflektoren mit einer Tiefe von mindestens 15 cm). Da eine Sensorankopplung hierbei entfällt, werden grundsätzlich auch Messungen auf rauen und ungleichmäßigen Oberflächen ermöglicht.

Eine wesentliche Voraussetzung für den Einsatz von Mikrofonen für Impact-Echo ist die Verringerung des Einflusses akustischer Störungen insbesondere durch die direkte Luftwelle des Aufprallgeräusches der Kugel auf der Oberfläche. Neben dem Einsatz einer einfachen akustischen Abschirmung stellen kombinierte Messanordnungen im Zusammenhang mit Signalverarbeitungsmethoden dabei eine wichtige Rolle. Diese haben insbesondere zum Ziel, schnelle Messungen durch gleichmäßig bewegte Apparaturen zu ermöglichen und die dabei auftretenden Störgeräusche zu eliminieren.

## Referenzen

1. Wiggenhauser, H..Duct inspection using scanning impact-echo. in International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlin, Germany, September 2003, (DGZfP, Berlin, 2003), Proceedings on BB 85-CD, V101.
2. Tinkey, Y., Olson, L. & H. Wiggenhauser: Impact Echo Scanning for Discontinuity Detection and Imaging in Posttensioned Concrete Bridges and Other Structures. *Materials Evaluation* 63 (2005) 1, pp. 64-69.
3. Carino, N. J., Sansalone, M. and Hsu N. N., 1986, A Point Source-Point Receiver, Pulse-Echo Technique for Flaw Detection in Concrete: *ACI Materials Journal*, 83, 199–208.
4. Sansalone, M.J. and Streett, W.B., 1997, *Impact-echo – Nondestructive Evaluation for Concrete and Masonry*, Bullbire Press, Ithaca, NY.
5. Zhu, J., *Non-Contact NDT of Concrete Structures Using Air-Coupled Sensors*. Dissertation, University of Illinois, Urbana-Champaign, 2005.
6. Zhu, J. and J. Popovics: Imaging Concrete Structures Using Air-Coupled Impact-Echo. *Journal of Engineering Mechanics*. 133, 628 (2007).
7. Kee, S.H., Fernández-Gómez, E., and Zhu, J., “Evaluating surface-breaking cracks in concrete using air-coupled sensors”, *ACI Materials Journal*, in press, 2011.
8. Zhu, J., and Popovics, J.S., “Air-Coupled Impact-Echo Imaging of Concrete Structures,” 6th International Symposium on NDT in Civil Engineering (NDT-CE 2006), Aug. 2006, St.Louis, MO.
9. Ryden, N., Lowe, M., Cawley, P. and Park, C., 2006, Non-contact surface wave measurements using a microphone: *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2006)*, Seattle, April 2-6, 2006.
10. Gibson, A. and Popovics, J. S., 2005, Lamb Wave Basis for Impact-Echo Method Analysis: *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 131, 438-443.
11. Zhu, J. and Popovics, J. S., 2001, Non-contact detection of surface waves in concrete using an air-coupled sensor: *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 20B, edited by D.O. Thompson and D.E. Chimenti, 1261-1268. American Institute of Physics, Melville, NY.
12. Popovics, J. S. and Zhu J., 2006, Air-coupled impact-echo imaging of concrete decks and slabs: in *Proceedings of the 2006 Highway Geophysics Conference*, edited by N. Anderson. The University of Missouri-Rolla, Rolla Mo.
13. Algernon, D., Ernst, H. and K. Dressler: Signalverarbeitungsmethoden zur Anwendung des Impact-Echoverfahrens mit Luftankopplung in Array-Anordnung. *DGZfP-Jahrestagung 2011*.