

# Signalverarbeitungsmethoden zur Anwendung des Impact-Echo-Verfahrens mit Luftankopplung in Array-Anordnung

Daniel ALGERNON, Hardy ERNST, Klaus DRESSLER  
SVTI – Schweizerischer Verein für Technische Inspektionen, Nuklearinspektorat

Kontakt: daniel.algermon@svti.ch

**Kurzfassung.** Impact-Echo ist ein akustisches Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von Betonbauteilen, bei dem elastische Wellen durch den Aufprall eines Hammers auf der Messoberfläche erzeugt werden und deren vielfache Reflektionen über die Zeit aufgezeichnet und im Frequenzbereich ausgewertet werden. Während bei der herkömmlichen Einsatzweise mit Kontaktsensoren die saubere Ankopplung des Messkopfes an der jeweiligen Messstelle einen erheblichen Zeitaufwand bedeutet und eine gleichmäßige Ankopplung aufgrund der rauen Struktur des Betons nur schwer zu gewährleisten ist, stellt der Einsatz von Mikrofonen eine vielversprechende Alternative dar. Der praktische Einsatz wird jedoch durch Umgebungsstörgeräusche und insbesondere durch das Aufprallgeräusch, d.h. die Schallwelle, die nicht das Bauteil durchläuft sondern auf direktem Wege vom Ort des Aufpralls zum Mikrofon gelangt, erheblich erschwert. Bisher wurde vor allem durch mechanische Barrieren versucht, das Mikrofon gegenüber solchen Störeinflüssen abzuschirmen. Dieser Beitrag beschreibt ein Verfahren, das es durch entsprechende geometrische Anordnung von mindestens zwei Mikrofonen und lediglich teilweise mechanische Schirmung eines einzelnen Mikrofons möglich macht, den Einfluss von Störungen rechnerisch auf ein Minimum zu reduzieren. Der verwendete Algorithmus basiert dabei vor allem auf der Identifikation der direkten Luftwelle durch Korrelation im Zeitbereich sowie Vergleich der normierten Spektren im Frequenzbereich.

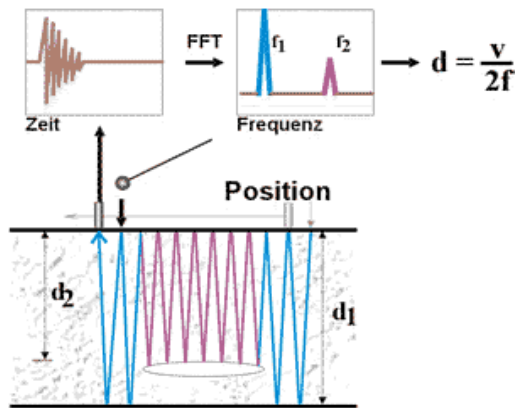
## 1 Einleitung

### 1.1 Impact-Echo

Das Impact-Echo (IE)-Verfahren wird seit vielen Jahren zur Prüfung von Betonbauteilen eingesetzt ([1],[2]). 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) weltweit eingesetzt.

Als akustisches Verfahren beruht IE auf der Nutzung elastischer Wellen, welche durch den Aufprall einer kleinen Stahlkugel (Durchmesser ca. 8 mm, variierend je nach Prüfaufgabe) auf der Bauteiloberfläche erzeugt werden. Diese durchlaufen das Bauteil und werden an Grenzflächen wie der Bauteilrückwand oder Fehlstellen im Bauteilinneren reflektiert. Die reflektierten Wellen werden durch einen nahe am Aufprallpunkt platzierten Sensor aufgenommen und über die Zeit aufgezeichnet (Zeitsignal). Eine Besonderheit des

Impact-Echo-Verfahrens besteht darin, dass es auf der Auswertung der Vielfachechos (Resonanzen) beruht. Um diese deutlich erkennbar zu machen, wird das Zeitsignal mittels einer Fast-Fourier-Transformation (FFT) in den Frequenzbereich transformiert, wo besagte Vielfachreflexionen bzw. Resonanzen als ausgeprägte Anzeigen erkennbar werden.



**Abbildung 1:** Funktionsweise des Impact-Echo-Verfahrens  
(BILDQUELLE: BAM, Fachgruppe VIII.2)



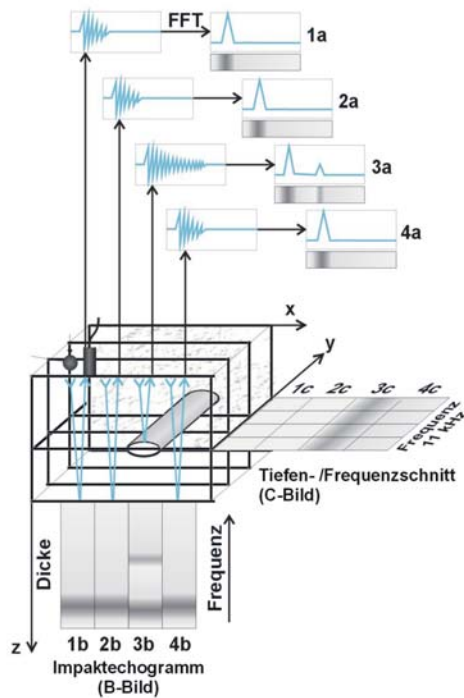
**Abbildung 2:** Manuelle Impact-Echo-Messungen mit herkömmlichem Kontaktsensor

Um von einer Anzeige bei einer Frequenz  $f$  auf die Tiefe  $d$  des entsprechenden Reflektors zurückzuschließen, wird bei einer Schallgeschwindigkeit  $v$  in Beton folgende einfache Beziehung zugrunde gelegt:

$$d = \frac{v}{2f}. \quad (\text{Gleichung 1})$$

Bei dem IE-Verfahren werden die Messdaten punktweise 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 ([3], [4]).

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

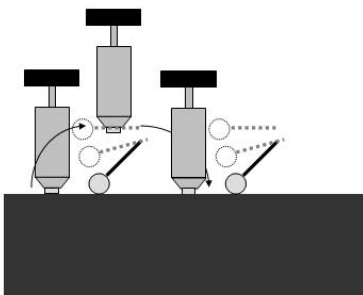


**Abbildung 3:** Prinzip der Datenvisualisierung. Für jeden Punkt wird das Frequenzspektrum streifenförmig als Graustufenplot dargestellt; durch Aneinanderreihung der Streifen sämtlicher Messpunkte einer Linie wird somit ein Querschnitt (Frequenz-B-Bild) durch das Bauteil entlang der Linie erhalten. Durch die B-Bilder paralleler Linien lässt sich ein Tiefenschnitt parallel zur Oberfläche erzeugen, der als C-Bild bezeichnet wird.  
(BILDQUELLE: BAM, Fachgruppe VIII.2)

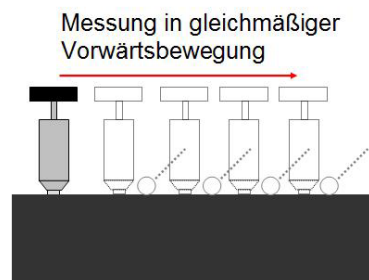
## 1.2 Luftankopplung

Der Einsatz berührungsloser, d.h. luftangekoppelter Sensoren ([5]-[15]) 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 (Abbildung 4) entfällt und eine kontinuierliche Bewegung (Abbildung 5) des Messkopfes, etwa auf einer auf Rollen gelagerten Plattform, somit durchaus denkbar ist.

Da die Anregung hingegen nur geringen Aufwand macht, kann diese weiterhin über Kontakt, d.h. Aufprall einer Stahlkugel, erfolgen.



**Abbildung 4:** Zeitaufwendiges Anheben und Absetzen des Messkopfes für die Messung entlang eines Rasters („scannend“).



**Abbildung 5:** Langfristiges Ziel: Messung in gleichmäßiger Vorwärtsbewegung



**Abbildung 6:** Beispiele für einsetzbare Mikrophontypen. Links: Elektret-Kondensatormikrofon mit einem Frequenzgang von 50 – 16000 Hz, rechts: Präzisionskondensatormikrofon mit einem Frequenzgang von 4 – 20000 Hz.

Der Einsatz von Mikrofonen anstelle von Kontaktsensoren wird jedoch durch Umgebungsgeräusche, Geräusche aus der Verfahrmeechanik und insbesondere durch die direkte Luftwelle des Aufpralls der Stahlkugel auf der Betonoberfläche erschwert, wie in den nachfolgenden Abschnitten ausführlicher erklärt wird. Durch den 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 Verfahrmeechanik eingesetzt wird, welche je nach Verfahrgeschwindigkeit zusätzlich erhebliche Störgeräusche erzeugt. Um das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern kann eine kombinierte Messanordnung (Array) mit entsprechender Signalverarbeitung zielführend sein, was in diesem Beitrag näher behandelt werden soll.

## 2 Mikrofone als Sensoren für Impact-Echo-Messungen

### 2.1 Problemstellung

Für die im Folgenden beschriebenen Versuche wurden die in Abbildung 6 abgebildeten Mikrophontypen eingesetzt. Dabei handelt es sich um Kondensatormikrofone mit einem Frequenzgang von 50 – 16000 Hz bzw. 4 – 20000 Hz.

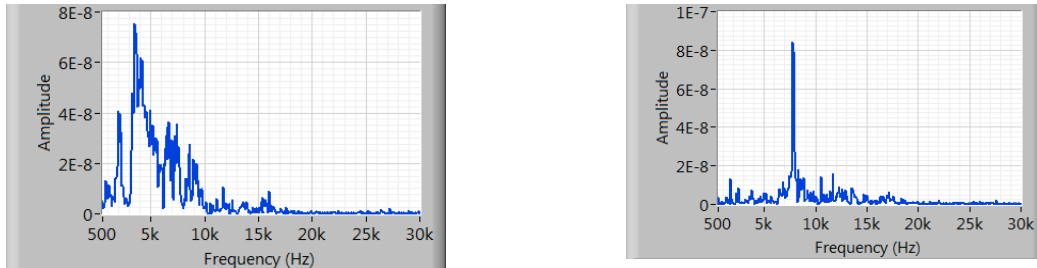
Als Testkörper wurden die ungestörten Bereiche (d.h. Bereiche ohne Einbauten) der in Abbildung 7 dargestellten Wand verwendet.



**Abbildung 7:** Testwand aus Beton mit einer Dicke von  $d = 30$  cm. Alle Messungen wurden in ungestörten Bereichen, d.h. Bereichen ohne Einbauten wie beispielsweise Entwässerungsröhren durchgeführt.

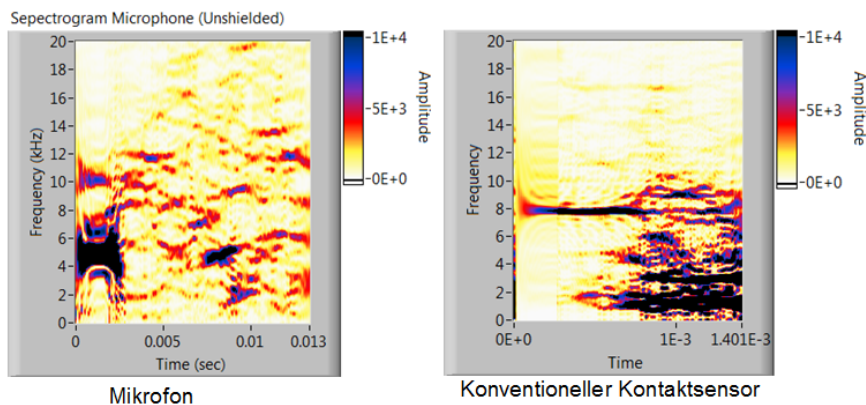
Beim Gebrauch des bloßen Mikrofons als Sensor zeigt sich bei Impact-Echo Messungen, dass dies wenig zielführend ist. Exemplarisch zeigt Abbildung 8 eine

Gegenüberstellung von Messungen mit einem bloßen Mikrofon ohne Abschirmung (links) und dem an derselben Stelle aufgenommenen Signal mit herkömmlichem Kontaktsensor (Referenz). Während der Kontaktsensor (rechts) eine deutliche Rückwandanzeige bei ca. 7.5 kHz liefert, ist diese bei der Mikrofonmessung (links) von Störanzeigen hoher Amplitude überlagert und somit nicht als solche erkennbar.



**Abbildung 8:** Gegenüberstellung einer exemplarischen Messung an der 30 cm dicken Testwand mit einem bloßen Mikrofon ohne Abschirmung (links) und dem an derselben Stelle aufgenommenen Signal mit herkömmlichem Kontaktsensor (Referenz). Während der Kontaktsensor (rechts) eine deutliche Rückwandanzeige bei ca. 7.5 kHz liefert, ist diese bei der Mikrofonmessung (links) von Störanzeigen mit deutlich höherer Amplitude überlagert und somit nicht als solche erkennbar.

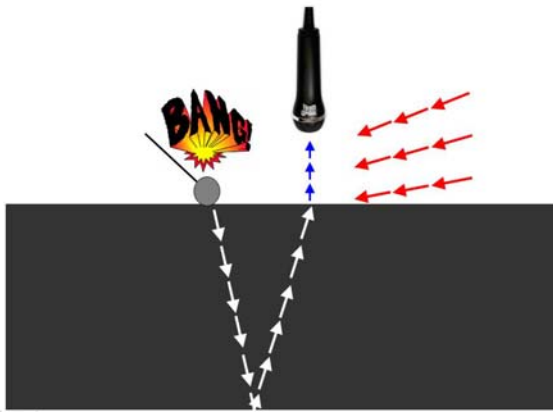
Insbesondere zeigt auch der exemplarische Vergleich (Abbildung 9) der Spektrogramme (Short Time Fourier Transformation) von Messungen mit bloßem Mikrofon (ohne Abschirmung) und Referenzmessungen mit herkömmlichem Kontaktsensor die starke Beeinflussung der Mikrofonmessungen durch Störeinflüsse. Die Spektrogramme in Abbildung 9 sind normiert um die Dämpfung des Signals auszugleichen. Durch die Normierung ist für jeden Zeitpunkt die Summe der Amplituden über den dargestellten Frequenzbereich gleich. Während mit herkömmlichem Kontaktsensor (rechts) ein Spektrogramm erhalten wird, welches bei ca. 8 kHz (Rückwandanzeige) eine über relativ lange Dauer deutliche Anzeige enthält. Diese geht aus dem Spektrogramm der Mikrofonmessung nicht hervor, vielmehr ist gerade der Bereich kurz nach der Anregung (ca. 0 - 0.003 ms) von Anzeigen um eine Frequenz von etwa 5 kHz herum dominiert.



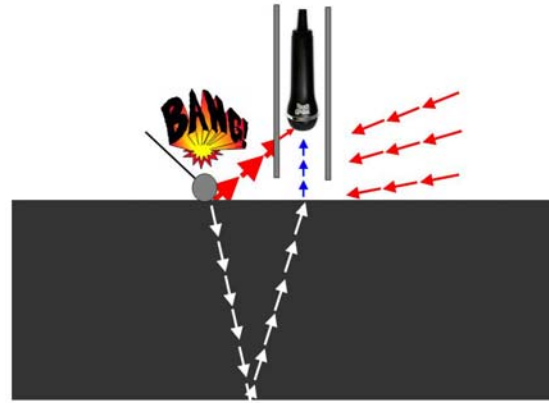
**Abbildung 9:** Exemplarische Gegenüberstellung der Spektrogramme von Messungen mit bloßem Mikrofon (links) (ohne Abschirmung) und herkömmlichem Sensor (rechts) (Referenz). Die Spektrogramme sind normiert um die Dämpfung des Signals auszugleichen. Durch die Normierung ist für jeden Zeitpunkt die Summe der Amplituden über den dargestellten Frequenzbereich gleich.

Dies ist vor allem auf die direkte Luftwelle zurückzuführen, welche durch das Geräusch des Aufpralls der Stahlkugel auf der Bauteiloberfläche entsteht. Diese durchläuft den Beton nicht sondern gelangt auf direktem Wege zum Mikrofon und besitzt eine entsprechend hohe Amplitude, wie es in Abbildung 10 skizziert ist.





**Abbildung 10:** Mikrofonmessung ohne Abschirmung. Die das Bauteil durchlaufende Welle (Nutzsignal) gelangt mit vergleichsweise geringer Amplitude zum Mikrofon, während die auf direktem Wege vom Ort des Aufpralls durch die Luft zum Mikrofon laufende Welle (direkte Luftwelle) eine sehr hohe Amplitude hat und somit das Nutzsignal störend überlagert.



**Abbildung 11:** Abschirmung der direkten Luftwelle durch eine mechanische Barriere. Der Störeinfluss wird je nach Art der Abschirmung deutlich verringert, kann jedoch nicht komplett eliminiert werden. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn ein Spalt zwischen der Abschirmung und der Betonoberfläche verbleibt, wie es bei einer Messung in kontinuierlicher Bewegung der Fall ist.

## 2.2 Mechanische Abschirmung der direkten Luftwelle

Die direkte Luftwelle kann durch eine mechanische Abschirmung in Form einer Aluminium-Kunststoff Sandwichkonstruktion deutlich reduziert werden, wird jedoch je nach Art der Abschirmung dennoch die Messung beeinflussen, wenn auch in abgeschwächtem Maße (Abbildung 11). Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn ein Spalt zwischen der Abschirmung und der Betonoberfläche verbleibt, wie es bei einer Messung in kontinuierlicher Bewegung zwangsläufig der Fall wäre.

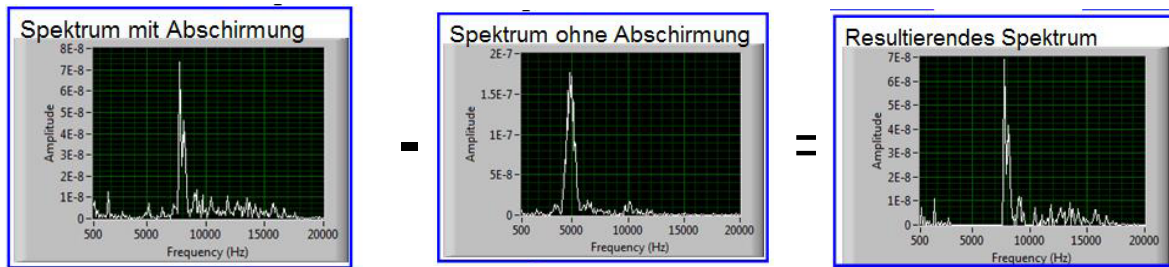
## 2.3 Kombination von Sensoren und digitale Signalverarbeitung

Da wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben eine komplette Abschirmung der direkten Luftwelle nicht immer ohne weiteres realisierbar ist, soll ein rechnerischer Ansatz gewählt werden um Störeinflüsse auf ein Minimum zu reduzieren bzw. das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern.

Der gewählte Ansatz beruht auf der gleichzeitigen Messung mit Mikrofonen, mit und ohne Abschirmung, dicht neben der Anregung und etwas weiter davon entfernt.

## 2.4 Vergleich der Signale im Frequenzbereich

Durch den Vergleich der Frequenzspektren der Messungen mit Abschirmung sowie ohne, lässt sich das Signal-Rausch-Verhältnis bereits deutlich verbessern. Dieser Vergleich besteht im Wesentlichen aus der Normierung der beiden Spektren (Summe aller Amplituden über den betrachteten Frequenzbereich ist gleich für beide Spektren) und anschließende Subtraktion des Frequenzspektrums aus der Messung ohne Schirmung vom Frequenzspektrum aus der Messung mit Abschirmung (Abbildung 12). Hierbei wird angenommen, dass das Nutzsignal in beiden Signalen in gleichem Maße enthalten ist und in der Messung ohne Abschirmung lediglich der Störanteil größer ist. Durch die Differenzbildung wird dieser daher vom Nutzsignal abgezogen. Aufgrund der vorangegangenen Normierung wird hingegen der Nutzsignalanteil durch die Differenzbildung kaum verändert.



**Abbildung 12:** Exemplarische Darstellung der Differenzbildung. Das Frequenzspektrum aus der Messung ohne Abschirmung wird von dem Frequenzspektrum aus der Messung mit Abschirmung abgezogen, mit dem Ziel so den Störsignalanteil auf ein Minimum zu reduzieren und lediglich das Nutzsignal zu erhalten. Hierfür ist eine vorangehende Normierung der Frequenzspektren erforderlich.

## 2.5 Vergleich der Signale durch Kreuzkorrelation im Zeitbereich

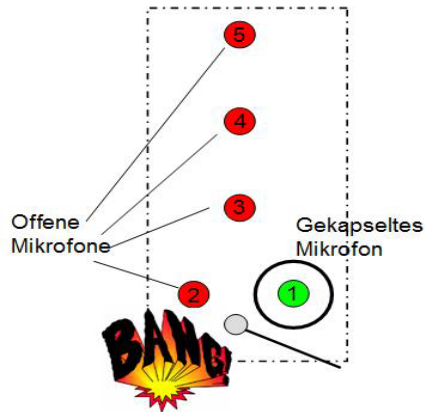
Der Vergleich der Signale im Zeitbereich dient der Identifikation und Eliminierung der Störanteile im ursprünglichen Zeitsignal noch bevor das Signal in den Frequenzbereich transformiert wird.

Hierbei soll möglichst eine zeitliche Trennung von Nutzsignal- und Störsignalanteil erzielt werden, wofür zwei Mikrofone in unterschiedlichem Abstand zur Anregung platziert werden. Ziel ist es, den eigentlichen Störsignalanteil zu verstärken und dadurch zu identifizieren. Die grundlegende Annahme ist dabei, dass die Amplitude des Störsignalanteils wesentlich größer ist als die des Nutzsignals.

Durch eine Kreuzkorrelation des Signals von Mikrofon 1 mit dem von Mikrofon 2 kann die Verschiebung des Störsignalanteils in den beiden Signalen ermittelt werden. Durch anschließende Korrektur dieser Verschiebung und Addition der beiden Signale wird somit der Störsignalanteil aufgrund der phasengleichen Überlagerung verstärkt, wohingegen der Nutzsignalanteil in aller Regel nicht phasengleich überlagert wird und sich somit verringert. Durch den Einsatz einer größeren Anzahl von Mikrofonen kann dieser Effekt entsprechend verstärkt und der Störsignalanteil extrahiert werden. Durch eine anschließende Kreuzkorrelation des so bestimmten Störsignals mit dem ursprünglichen Signal (vorzugsweise des Mikrofons, welches am dichtesten an der Anregung platziert ist) kann nun in diesem die genaue Lage des Störsignals bestimmt und letzteres entsprechend subtrahiert werden. Das resultierende Signal wird dann wie gewöhnlich in den Frequenzbereich transformiert.

## 2.6 Array-Anordnung

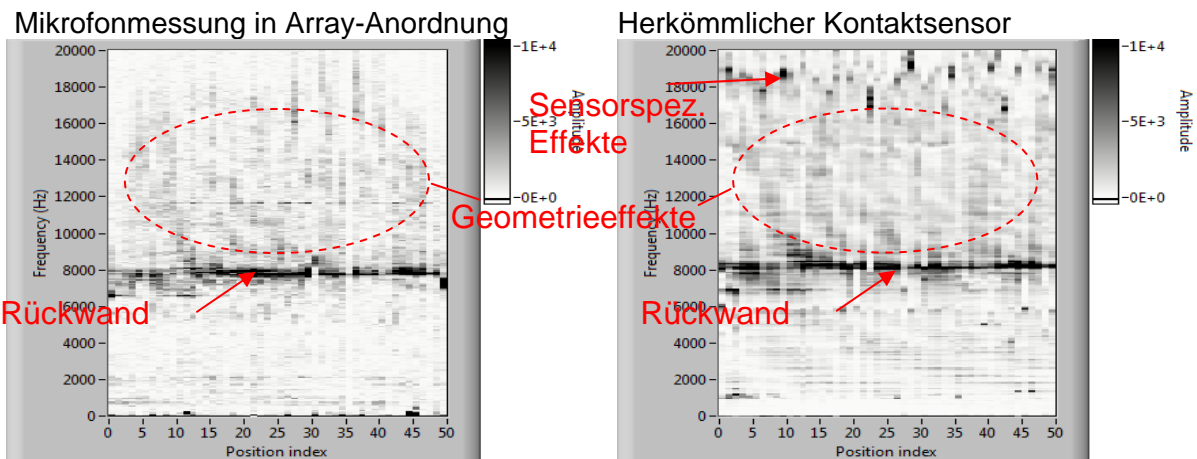
In der Abbildung 13 ist die zum Einsatz gekommene Anordnung der Mikrofone (Array) dargestellt. Dabei ist lediglich ein Mikrofon abgeschirmt (Mikrofon 1) und befindet sich dicht neben der Anregung. Ebenso dicht ist Mikrofon 2 platziert, jedoch ohne Abschirmung. Zwischen diesen beiden Mikrofonen erfolgt ein Vergleich im Frequenzbereich. Zusätzlich werden weitere Mikrofone (Mikrofone 3-5) in unterschiedlichen Abständen zur Anregung platziert. Zwischen diesen sowie Mikrofon 2 wird der Vergleich im Zeitbereich vollzogen. Die Kombination aus Vergleich im Zeitbereich sowie im Frequenzbereich liefert letztendlich das resultierende Signal.



**Abbildung 13:** Beispiel für mögliche Array-Anordnung von Mikrofonen, bestehend aus einem abgeschirmten Mikrofon (1) und vier offenen Mikrofonen (2-5).

### 2.7 Anwendung auf eine gesamte Messlinie (B-Scan)

Die beschriebene Vorgehensweise wurde angewendet auf Messlinien bestehend aus 50 Messpunkten im Abstand von 20 mm entlang der Testwand (Abbildung 7). Exemplarisch ist in Abbildung 14, links für eine Messlinie das resultierende B-Bild dargestellt und dem entsprechenden Referenz-B-Bild des herkömmlichen Kontaktsensors gegenübergestellt. Hierin zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Mikrofonmessung mit der Referenz; die Rückwandanzeige ist klar erkennbar. Darüber hinaus sind Geometrieeffekte, d.h. Anzeigen aus Reflexionen an den Kanten des Bauteils, erkennbar. Während die Messungen mit herkömmlichem Sensor bei ca. 19 kHz sensorspezifische Artefakte aufweisen, treten diese bei der Mikrofonmessung nicht auf.



**Abbildung 14:** 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.

## 3 Schlussfolgerung

Bei der vorgeschlagenen Vorgehensweise der Nutzung einer Kombination mehrerer Mikrofone, welche nur zum Teil eine mechanische Abschirmung besitzen, und Anwendung schnell durchführbarer Signalverarbeitungsoperationen konnten Ergebnisse erzielt werden, die in ihrer Qualität mit denen herkömmlicher Kontaktsensoren vergleichbar sind. Mikrofonmessungen haben hingegen den bedeutenden Vorteil, dass sie sehr geringe



Anforderungen an die Oberflächenbeschaffenheit stellen und zudem sehr schnelle Messungen ermöglichen.

Hinsichtlich der Wahl des Mikrofon-Arrays stellt die gewählte Anordnung lediglich eine Möglichkeit dar, andere Anordnungen sind denkbar. Auch ist die Anzahl der eingesetzten Mikrofone nicht zwingend, jedoch erhöht eine Vergrößerung der Anzahl das Signal-Rausch-Verhältnis entsprechend, wodurch auch mit vergleichsweise kostengünstigen Mikrofonen gute Ergebnisse erzielt werden können.

## Referenzen

- [1] 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.
- [2] Sansalone, M.J. and Streett, W.B., 1997, *Impact-echo – Nondestructive Evaluation for Concrete and Masonry*, Bullbier Press, Ithaca, NY.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [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] Popovics, J.S. and Zhu, J., “Data for inspecting concrete using non-contact sensors,” in 5th *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, Sept., 2003, Berlin, Germany.
- [10] Popovics, J.S. and Zhu, J., “Crack depth measurement in concrete using surface wave transmission,” in *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 22, American Institute of Physics, 2003, Melville, NY.
- [11] 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.
- [12] Gibson, A. and Popovics, J. S., 2005, Lamb Wave Basis for Impact-Echo Method Analysis: *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 131, 438-443.
- [13] 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.
- [14] Zhu, J. and Popovics, J. S., 2005, Non-contact imaging for surface-opening cracks in concrete with air-coupled sensors: *Materials and Structures*, 38, 801-806.
- [15] 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.