

# Betonbauteiluntersuchungen mit dem Impact-Echo-Verfahren in Luftankopplung und in kontinuierlicher Bewegung

Daniel ALGERNON, Hardy ERNST, Klaus DRESSLER  
SVTI – Schweizerischer Verein für technische Inspektionen  
Kontakt: daniel.algernon@svti.ch

**Kurzfassung.** Das Impact-Echo (IE)-Verfahren wird im Bauwesen zur Dickenmessung und Inspektion von Betonbauteilen angewendet. Hierbei werden die Vielfachreflexionen mechanisch (impact) angeregter elastischer Wellen im Frequenzbereich analysiert. Während in herkömmlichen Anwendungen trocken angekoppelte Schwingungsaufnehmer verwendet werden, bietet der berührungslose Einsatz von Mikrofonen erhebliche Vorteile. Insbesondere durch die erzielten Fortschritte in der entsprechenden Signalverarbeitung ergeben sich hier neue Möglichkeiten. Der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit wird gegenüber der bisherigen Anwendung mit Kontaktsensoren deutlich verringert. Die auf Beton oft schwierige und zeitaufwendige Ankopplung des Sensors entfällt, wodurch sehr zeitoptimierte Messungen in kontinuierlicher Bewegung durchgeführt werden können. Insgesamt kann auf diese Weise sowohl die Einsetzbarkeit als auch die Wirtschaftlichkeit des IE-Verfahrens deutlich gesteigert werden. Der derzeitige Kenntnisstand wurde in einem auf Rollen gleichmäßig entlang der Bauteiloberfläche geführten Messaufbau implementiert, anhand dessen die Funktionalität und Effizienz der berührungslosen Messung an unterschiedlichen Testobjekten demonstriert wird.

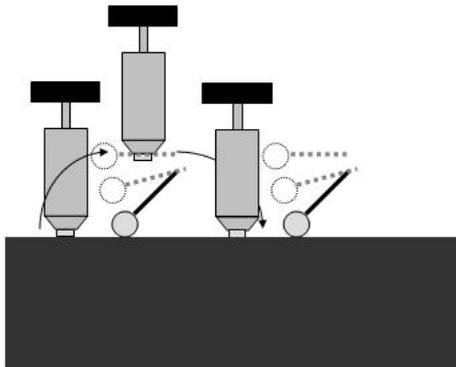
## 1 Einleitung

Moderne akustische ZfP-Verfahren haben im Bauwesen zur Prüfung von Betonbauteilen zunehmend Einzug erhalten. Eine wesentliche Herausforderung ist hierbei das inhomogene grobkörnige Gefüge des Betons, bestehend aus Zement, Kies, Sand und Luftporen sowie den eingelegten Armierungseisen. Daher ist man bei der Verwendung akustischer Verfahren auf entsprechend große Wellenlängen bzw. tiefe Frequenzen angewiesen. Ein relativ weit verbreitetes Verfahren in diesem Bereich ist Impact-Echo, welches Mitte der 1980er Jahre am U.S. National Bureau of Standards erfunden und fortan weiterentwickelt wurde [3,4]. 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 Bauteilinnern sowie zur Untersuchung von Spankanälen (Vorspannung mit nachträglichem Verbund) eingesetzt [1,2].

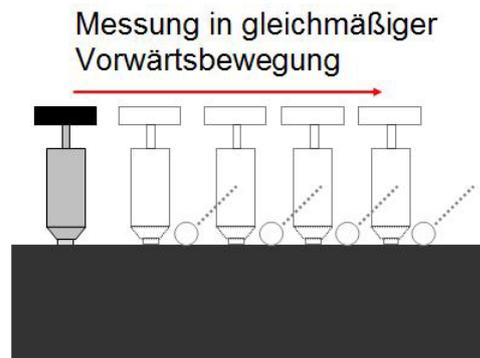
Inzwischen sind jedoch insbesondere durch die Entwicklung trocken angekoppelter Prüfköpfe die Ultraschall Puls-Echo-Verfahren in den Vordergrund getreten. Obgleich die Leistungsfähigkeit dieser Verfahren schon ein beachtliches Maß erreicht hat, sind der Zeit- und damit der entsprechende Personalaufwand noch beträchtlich. Demzufolge sind der Größe der Messflächen Grenzen gesetzt sind. Der erhebliche Zeitaufwand für die Messungen kommt hauptsächlich daher, dass die entsprechenden Prüfköpfe (Ultraschall)



oder Sensoren (Impact-Echo) zwischen den einzelnen Messpositionen des Rasters angehoben und erneut an die Messoberfläche gedrückt werden müssen (Abbildung 1). Für die wirtschaftliche Inspektion auch größerer Messflächen wäre ein kontinuierlich verfahrbares, relativ schnelles und dabei dennoch kostengünstiges Messverfahren erforderlich (Abbildung 2). Der Einsatz einfacher Mikrofone als berührungslose Sensoren hat hierfür grundsätzlich neue Möglichkeiten eröffnet [5,6,7,8,9,10,11,12]. Für die praktische Umsetzung stellt jedoch die Elimination störender Einflüsse eine weitere Aufgabe dar. Ein bereits erprobter und erfolgversprechender Ansatz beruht auf der Kombination der Signale mehrerer Mikrofone und entsprechender Signalverarbeitung [13]. Dadurch besteht eine Basis für die zeitoptimierte Messung in kontinuierlicher Bewegung.



**Abbildung 1:** Zeitaufwendiges Anheben und Absetzen des Messkopfes für die Messung entlang eines Rasters („scannend“).



**Abbildung 2:** Langfristiges Ziel: Messung in gleichmäßiger Vorwärtsbewegung

## 2 Impact-Echo (IE)

### 2.1 Prinzip

Die Funktionsweise von IE 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 für gewöhnlich 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 mehrfach reflektiert. Dies führt zu einem periodischen Signal am dicht neben der Anregung platzierten Sensor.

Für die Auswertung werden die aufgenommenen Zeitsignale durch eine Fast Fourier Transformation (FFT) in den Frequenzbereich transformiert. Unter der Voraussetzung eines periodischen Vorganges lässt sich die Dicke des Bauteils bzw. die Fehlstellentiefe bei Kenntnis der Longitudinalwellengeschwindigkeit aus der Wiederholungsfrequenz berechnen:

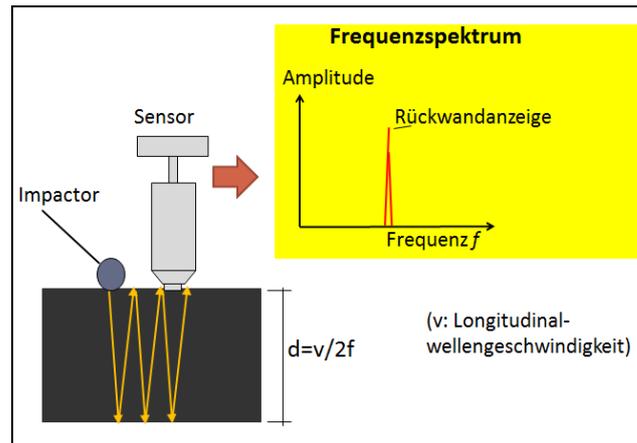
$$(Gl.1) \quad 2d = c_L \cdot T = \frac{c_L}{f} \Leftrightarrow \boxed{d = \frac{c_L}{2f}}$$

$c_L$  : Longitudinalwellengeschwindigkeit

$d$  : Dicke der Schicht

$T$  : Periodendauer

$f$  : Frequenz

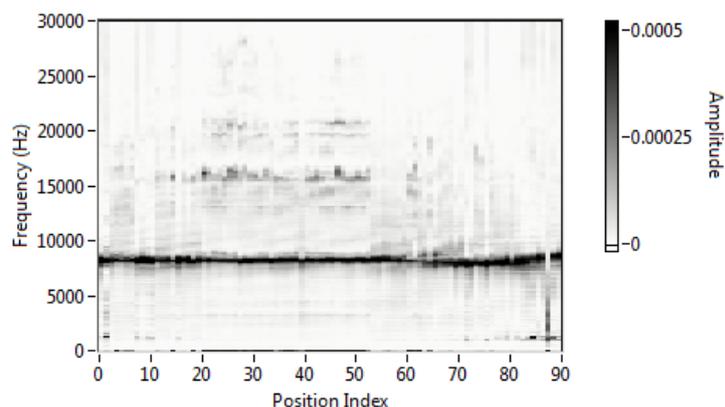


**Abbildung 3:** Funktionsweise des Impact-Echo-Verfahrens

## 2.2 Bildgebung

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 Nebeneinanderreihen der Plots sämtlicher Punkte entlang einer Messlinie erhält man – vor dem Hintergrund, dass sich jeder Frequenzwert gemäß Gleichung 1 einer Tiefe zuordnen lässt – 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 (Abbildung 4).

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



**Abbildung 4:** 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.

### 3 Impact-Echo in Luftankopplung

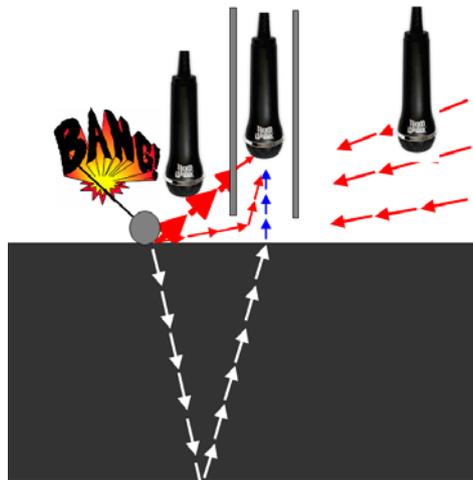
#### 3.1 Mikrofone als Impact-Echo Sensoren

Vor allem im relativ niedrigen Frequenzbereich bis etwa 12 kHz stellen Mikrofone eine attraktive und vergleichsweise kostengünstige Möglichkeit zur Aufzeichnung akustischer Wellen 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.



**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.

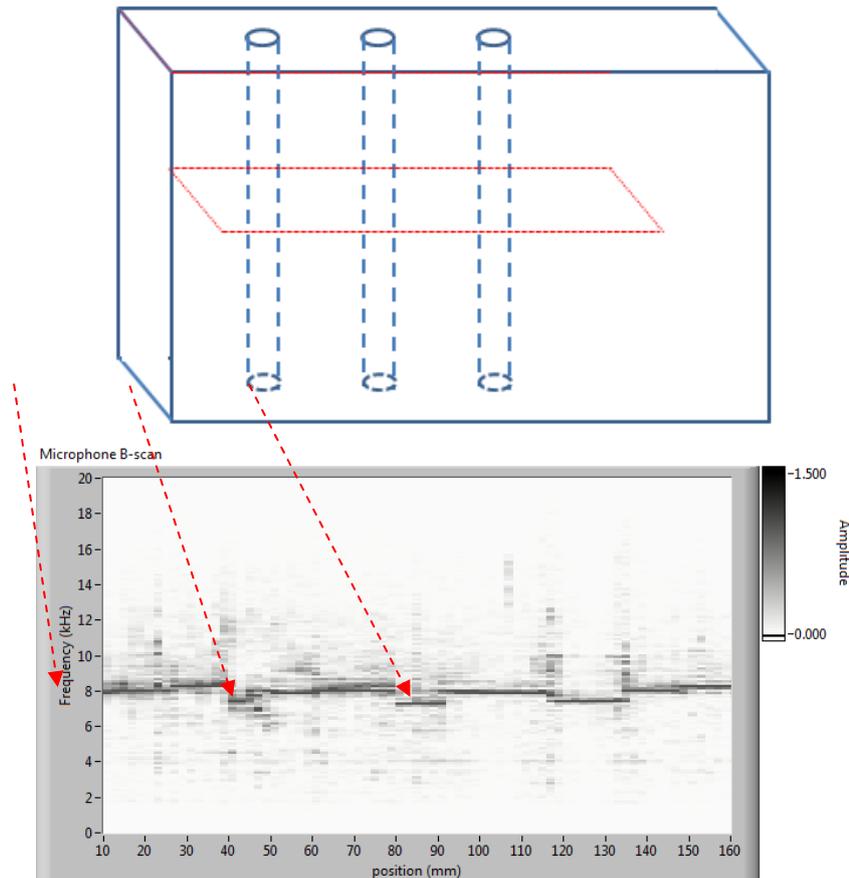
Durch eine kombinierte Messanordnung (Array), bestehend aus einem akustisch geschirmten Mikrofon und zusätzlichen Referenzmikrofonen kann die Empfindlichkeit gegenüber Störeinflüssen deutlich verringert werden (Abbildung 6).



**Abbildung 6:** Prinzip für Einsatz von Mikrofonen als Impact-Echo-Sensoren. 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.

Die grundsätzliche Funktionalität dieser Vorgehensweise wurde u.a. an dem in Abbildung 7 als vereinfachte Skizze dargestellten Probekörper der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) mit den Abmessungen 2.00/2.00/0.30 m und darin einbetonierten Hüllrohren demonstriert. Im B-Bild (Impactechogramm) einer die Hüllrohre kreuzenden Messlinie ist die laterale Position der Rohre anhand der Verschiebung der Rückwandanzeige hin zu tieferen Frequenzen [1] sehr gut erkennbar.

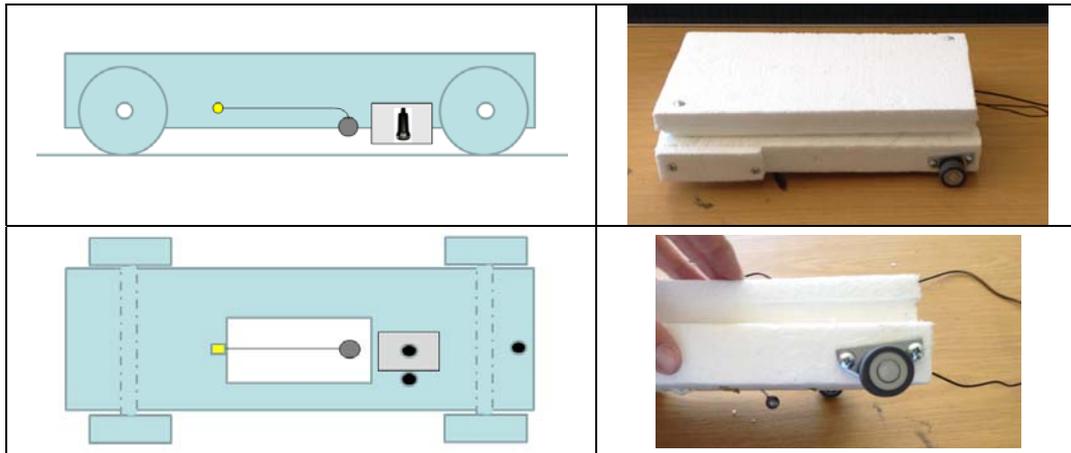
Die Qualität der Messdaten, insbesondere das Signal/Rausch-Verhältnis, ist dabei mit der Qualität herkömmlicher Kontaktsensoren durchaus vergleichbar, so dass hier der Einsatz von Mikrofonen eine äquivalente Alternative bei gleichzeitiger Nutzung der damit verbundenen Vorteile und Möglichkeiten von Mikrofonmessungen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



**Abbildung 7:** 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 der herkömmlicher Kontaktsensoren durchaus vergleichbar.

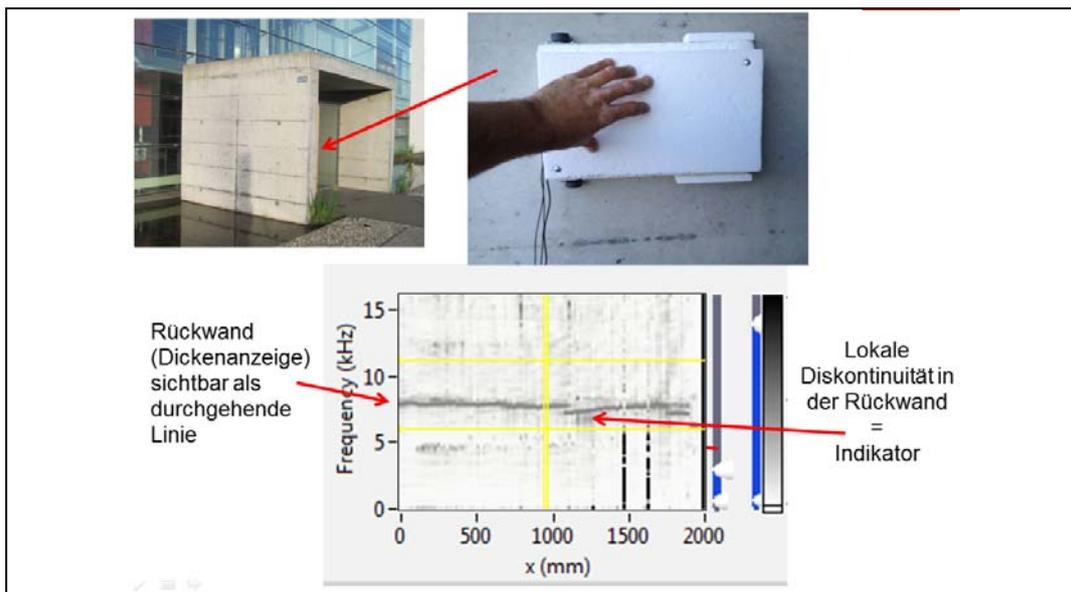
### 3.2 Demonstrationsmodell für Messungen in kontinuierlicher Bewegung

Die im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Messanordnung wurde in einem Demonstrationsmodell (Abbildung 8) umgesetzt, welches auf Rollen manuell entlang der Messfläche geführt wird und mittels einer Mechanik in konstantem Messpunktabstand eine Stahlkugel von 10 mm Durchmesser auf die Betonoberfläche schlägt.



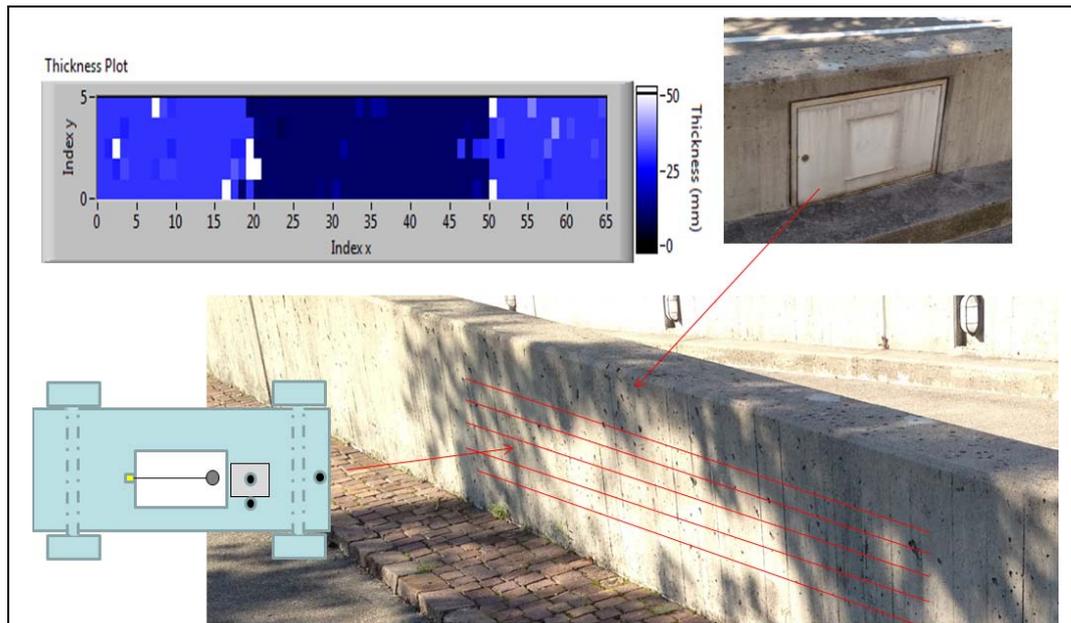
**Abbildung 8:** Demonstrationsmodell des Rollscanners

Die Abbildung 9 zeigt Messungen an einer Testwand mit einem einbetonierten Entwässerungsrohr. Der B-Scan wurde durch Mittelung der B-Scans mehrerer paralleler Messlinien erhalten um auf diese Weise das Signal-Rausch-Verhältnis zusätzlich zu verbessern. Hierin bildet sich die Anzeige der Rückwand deutlich ab. Anhand einer Diskontinuität in Form einer lokalen Verschiebung der Rückwandanzeige zu tieferen Frequenzen hin lässt sich die Lage des Hüllrohres klar erkennen.



**Abbildung 9:** Exemplarische Messlinie entlang einer Testwand mit einbetoniertem Entwässerungsrohr

Abbildung 10 zeigt Dickenmessungen entlang einer Testwand mit einer Aussparung, d.h. einem Bereich verminderter Dicke. Es wurden fünf Messlinien aufgenommen, welche den Bereich der Aussparung kreuzen. Im Dickenplot sind die unterschiedlichen Dickenbereiche gut erkennbar.



**Abbildung 10:** Exemplarische Dickenmessung entlang einer Testwand mit Aussparung

#### 4 Schlussfolgerung

Mikrofone bieten ein vielsprechendes Mittel für die Anwendung des Impact-Echo Verfahrens in kontinuierlicher Bewegung. Durch Anwendung von Signalverarbeitungsmethoden basierend auf dem Vergleich der Signale akustisch geschirmter mit denen nicht-geschirmter Mikrofone wird die Praktikabilität deutlich erhöht. Es ist gelungen, dieses Prinzip in einem Demonstrationsmodell umzusetzen und Impact-Echo Daten in kontinuierlicher Bewegung aufzunehmen.

Durch die an sich berührungslose Messung ist das Verfahren grundsätzlich deutlich weniger von der Oberflächenbeschaffenheit abhängig als es für die herkömmliche Anwendung mit Kontaktsensoren der Fall ist. In der Praxis hängt dies jedoch zusätzlich noch von der „Geländegängigkeit“ der Verfahrensvorrichtung ab. Darüber hinaus erfolgt die Anregung weiterhin konventionell durch mechanischen Schlag der Stahlkugel auf die Bauteiloberfläche, so dass auch hier eine gewisse Abhängigkeit vom Zustand der Oberfläche besteht, auch wenn diese vergleichsweise gering ist.

Dem Signalverarbeitungsalgorithmus in Zusammenhang mit der Messanordnung kommt hinsichtlich der Funktionalität eine Schlüsselfunktion zu. Die weitere Verbesserung und Erhöhung der Stabilität der Signalverarbeitung wird weiterhin Gegenstand der zukünftigen Entwicklung des Verfahrens sein.

Bislang wurde eine Messanordnung bestehend aus zwei bis drei Mikrofonen erprobt. Durch die Erweiterung um zusätzliche Mikrofone kann wahrscheinlich eine weitere Verbesserung erzielt werden, jedoch erhöht dies auch die Komplexität insbesondere für den Auswertungsalgorithmus und bedarf somit der nötigen Sorgfalt und Vorsicht.

Mit dem Demonstrationsmodell lassen sich derzeit Messgeschwindigkeiten von etwa 1 Messung/Sekunde erzielen, was bereits deutlich über der Messgeschwindigkeit liegt, die mit Kontaktsensoren auch in Zusammenhang mit automatisierten Messsystemen bislang erreicht wird. Dennoch stellt eine weitere Steigerung der Messgeschwindigkeit ein wichtiges Entwicklungsziel dar.

## Referenzen

1. Wiggemhauser, 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. Wiggemhauser: 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.