

Fast Impact-Echo Scanner: Mit IE schnell und kontaktfrei große Bauteile untersuchen

Robin GROSCHUP¹, Christian U. GROSSE¹, Stephan FREUDENSTEIN¹,
Marko WIELAND², Christoph BECKER²

¹ Technische Universität München,

² Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach

Kontakt E-Mail: robin.groschup@tum.de, zfp@cbm.bgu.tum.de

Kurzfassung. Für den messtechnischen Nachweis von Delaminationen und horizontalen Rissen in plattenförmigen Betonstrukturen stehen nur eingeschränkt praxistaugliche Geräte zur Verfügung. Konventionelle Inspektionsverfahren wie z. B. Bohrkernbeprobungen oder manuelles Abklopfen können aufgrund des begrenzten Stichprobenumfangs oft keine ausreichenden Informationen liefern. Es gibt zwar ZfP-Verfahren und -Geräte, welche die genannten Schädigungen abbilden können, sie sind für den großflächigen Einsatz jedoch oft zu zeit- und kostenintensiv.

Deshalb wurde ein scannendes Prüfgerät auf Basis des Impakt-Echo-Verfahrens (IE) entwickelt. Bei IE werden Strukturschwingungen aufgezeichnet und interpretiert, die sich nach einem mechanischen Impakt ausbilden. Das Verfahren ist sensitiv auf strukturelle Schädigungen, lässt sich aber auch zum Nachweis von Plattendicken und zur Ableitung von Materialparametern einsetzen.

Die Grundvoraussetzung zum scannenden Einsatz des Verfahrens ist eine kontaktfreie Aufzeichnung der relevanten Strukturantwort. Dies wurde im hier vorgestellten Ansatz durch ein luftgekoppeltes Messprinzip ermöglicht. Das Gerät ist aktuell optimiert für den Einsatz auf Fahrbahndecken aus Beton (Autobahnen und sonstige Verkehrsflächen). Das Messprinzip bietet aber auch Potenzial für andere Objekte und Messaufgaben, wo scannende Messungen notwendig sind.

1. Einführung

Um messtechnisch begründete Informationen über die strukturelle Substanz von Bauwerken zu erhalten, die über stichprobenhafte Messungen hinausgehen, sind ZfP-Verfahren notwendig, die sich in scannender Betriebsweise und somit zeit- und kosteneffizient anwenden lassen. Die Verfügbarkeit von scannenden Verfahren zur ZfP von Beton und Stahlbeton beschränkt sich aktuell hauptsächlich auf Verfahren mit elektrischem, magnetischem bzw. elektromagnetischem Messprinzip (z. B. Impulsradar, Potentialfeldmessung mit Radelektroden). Scannende Anwendungen auf Basis von anderen Messprinzipien beruhen oft auf einem Stop-and-Go-Betrieb und sind deshalb messtechnisch aufwendig, da z. B. Scannerrahmen installiert, oder Prüfköpfe wiederholt angekoppelt werden müssen.

Innenliegende Risse mit geringen Öffnungsweiten in Betonkörpern können aufgrund von Beschränkungen im Auflösungsvermögen in der Regel nicht mit elektromagnetischen Verfahren abgebildet werden. Solche Schadensbilder können dagegen gut mit elastischen



Wellen, die direkt mit der Schädigung wechselwirken, erfasst werden. Die Ultraschall-Technik beruht auf elastischen Wellen und ist damit prinzipiell sehr gut zur Abbildung von Rissen geeignet. Sie ist jedoch nur sehr aufwendig in scannender Weise einsetzbar. Deshalb beschränkt sich die Anwendung dieses Verfahrens in der Praxis oft auf ausgewählte Bereiche. Eine Extrapolation der lokalen Befunde auf nicht direkt durch die Messung erfasste Bereiche ist in der Regel nicht möglich.

Das Impakt-Echo-Verfahren [1-2] nutzt ebenfalls elastische Wellen (wie Ultraschall), bietet aber aufgrund der zugrunde liegenden physikalischen Prinzipien großes Potenzial, um ein Messgerät zur Anwendung in kontinuierlicher Messfahrt von einer bewegten Plattform aus zu erstellen.

Der folgende Beitrag beschreibt einen Prototyp auf Basis des Impakt-Echo-Prinzips mit luftgekoppelter Sensorik [3-6] und exemplarische Anwendungen. Hauptsächliche Zielsetzung des entwickelten Gerätes war die Detektion horizontaler Risse und Delaminationen im Inneren von Betonfahrbahndecken in scannender Betriebsweise. Das Gerät bzw. das implementierte Verfahren kann aber auch bei anderen Objekten und für andere Fragestellungen zum Einsatz kommen.

2. Impakt-Echo: messtechnisches Abklopfen

2.1 Grundlagen

Impakt-Echo (IE) kann als messtechnische Umsetzung einer „Klopfprüfung“ aufgefasst werden. Beim IE-Verfahren werden durch einen mechanischen Impakt (z.B. Schlag mit Hammer, Aufprall einer Stahlkugel) auf der Oberfläche des zu untersuchenden Bauteils elastische Wellen angeregt. Die durch diese Wellen erzeugten Schwingungen an der Bauteiloberfläche werden bei der klassischen Anwendung von IE mit einem Sensor, der in der Nähe des Impakts angebracht wird, gemessen. Zur Auswertung und Interpretation werden diese Signale dann in den Frequenzbereich transformiert. Aus der Lage von Frequenzmaxima in den erzeugten Signalspektren kann auf strukturelle Eigenschaften wie Plattendicken oder Fehlstellen geschlossen werden. Damit kann man IE der Verfahrensgruppe der Lokalen Akustischen Resonanz-Spektroskopie (LARS) zuordnen [7]. Von besonderer Relevanz ist dabei die Ausbildung einer sog. „Dickenresonanz“ bei plattenförmigen Strukturen. Bei früheren Erklärungen dieses Messeffekts ging man von mehrfach zwischen Plattenober- und -unterseite reflektierten P-Wellen (Kompressionswellen) aus. Physikalisch korrekter ist die Erklärung über die Theorie der Lambwellen, wo die Dickenresonanz als Frequenz einer symmetrischen Plattenwelle beschrieben werden kann [8].

In Bezug auf die Detektion von Schäden, insbesondere von horizontalen Rissen und Delaminationen (auch kompletten Hohllagen von Plattenteilen) ergibt sich ein weiterer durch den Impakt hervorgerufener Messeffekt: Lokal begrenzte Bereiche können zu flexuralen Schwingungen (Biegeschwingungen) angeregt werden [9]. Für ingenieurbautechnisch relevante Dimensionen von Plattendicken und Störstellen haben diese Schwingungen in der Regel tiefere Frequenzen als die Dickenresonanz (Abb. 1). Die beschriebenen Messeffekte bei IE lassen sich somit für eine Schadensdetektion nutzen:

Weisen die Messdaten ein klar erkennbares Frequenzmaximum auf, das mit der Dickenresonanz korreliert, so ist von einer ungestörten Plattenstruktur auszugehen.

Dominieren tiefere Frequenzen das Messsignal, können flexurale Vibrationen aufgrund delaminierter Bereiche vorliegen.

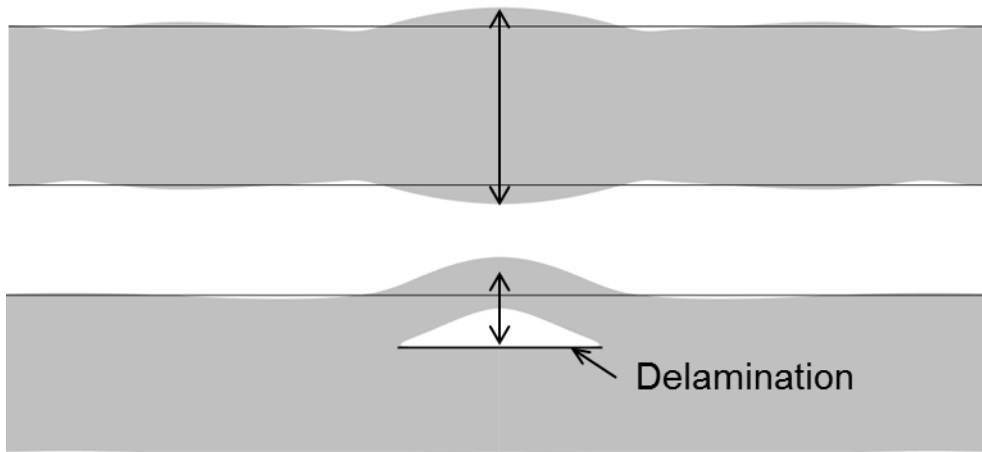


Abb. 1. Oben: Plattenschwingung der Dickenresonanz bei ungestörter Struktur nach Impaktanregung. Unten: Biegeschwingung eines delaminierten Bereichs nach Impaktanregung.

Bei den für IE typischen Frequenzen ergibt sich außerdem ein messtechnischer Vorteil: die relevanten Frequenzen befinden sich im Luftschallbereich und die bei typischen Impaktormassen auftretenden Energien verursachen eine messbare Schallabstrahlung des Körperschalls aus dem Betonkörper in die Luft. Dadurch können die für IE relevanten Signale auch mit Mikrofonen aufgezeichnet werden, die keinen direkten Kontakt zur Oberfläche benötigen. Bei der Aufzeichnung des Luftschalls ergeben sich zwar nachteilige Effekte durch Umgebungslärm und Geräusche der Apparatur selbst, durch ein optimiertes Sensordesign [10] ist es aber trotzdem möglich die relevanten Signale auch unter Betriebsbedingungen auf Autobahnen mit ausreichendem SNR (Signal-zu-Rausch-Verhältnis) aufzuzeichnen.

Bei der Entwicklung des Sensorelements und zur Ermittlung zu erwartender Messeffekte bei Delaminationen erwiesen sich numerische Simulationen als sehr hilfreich. Durch die Kopplung der elastischen Wellenausbreitung im Betonkörper mit der Schallausbreitung in Luft kann das abgestrahlte Luftschallfeld illustriert und vermessen werden (Abb. 2).

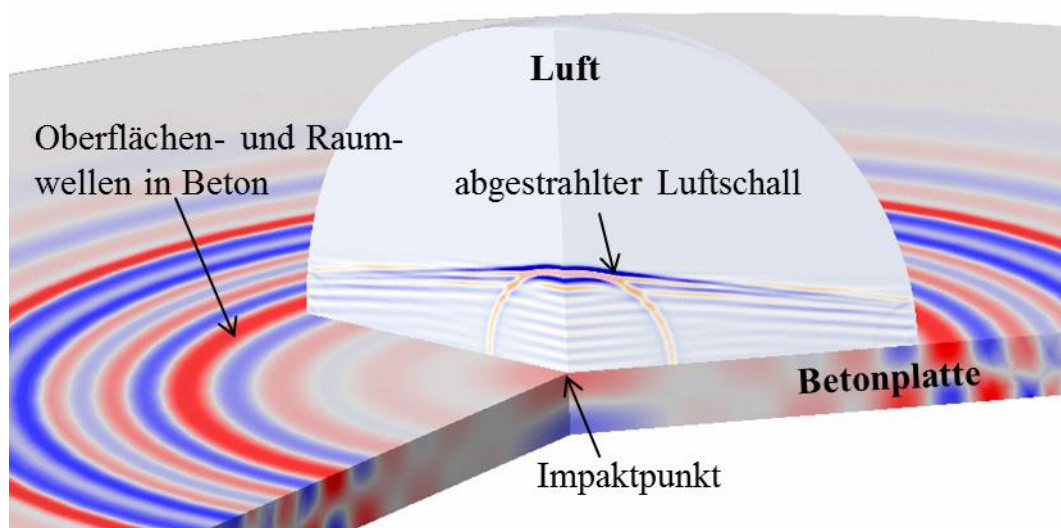


Abb. 2. Simulation der Wellenausbreitung in Beton und der Schallabstrahlung in Luft anhand eines radialsymmetrischen Materialmodells.

2.2 Prototyp Scanner

Mit speziell auf die Messaufgabe abgestimmten Mikrofonarrays und automatisierten Impaktgebern, die reproduzierbare und sich schnell wiederholende Einzelsignale anregen, wurde der Prototyp (Abb. 3) eines modularen Scannersystems realisiert, der in der aktuellen Ausbaustufe bis zu drei parallele Messspuren aufzeichnen kann. Ein Wegsensor erlaubt eine positionsgesteuerte Programmierung von Impaktanregung und Messintervallen. Über ein RTK-GPS-System ist auch über lange Messstrecken eine hinreichend genaue Positionsbestimmung möglich. Zusätzliche optional einsetzbare Sensorik, wie Kameras und Lasersensoren erlauben eine Lokalisierung von Fugen und liefern Informationen über den allgemeinen Zustand der Oberflächen. In den positionsreferenzierten Kamerabildern können so Materialvariationen (wie z.B. Ausbesserungsstellen) identifiziert und mit den Messdaten abgeglichen werden.

Die Prüfgeschwindigkeit (und damit das Messraster) muss auf die zu erwartenden Fehlergrößen abgestimmt werden. Außerdem ist sie durch die maximal mögliche Impaktfrequenz limitiert. In der aktuellen Entwicklungsstufe des Geräts kann mit Schrittgeschwindigkeit geprüft werden. Eine Erhöhung der Messgeschwindigkeit ist das Ziel aktueller Entwicklungsarbeiten.



Abb. 3. Impakt-Echo-Scanner-Prototyp beim Einsatz auf einer Betonfahrbahn.

3. Anwendungsbeispiele

3.1. Risse im Fugenbereich von Betonfahrbahnen

Ein relevantes Schadensbild von Fahrbahndecken aus Beton sind horizontale Risse im Fugenbereich. Solche Risse können verschiedene Ursachen haben, wie z. B. Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) oder thermische und mechanische Beanspruchung. Der entwickelte Prototyp konnte an Fahrbahndecken verschiedener Bauweisen mit Verdacht auf solche horizontale Rissbildungen im Fugenbereich zur Anwendung gebracht werden. Abb. 4 (links) zeigt das Messergebnis einer Messung über eine Querscheinfuge hinweg. Anzeigen der Dickenresonanz bei ca. 9 kHz werden durch tieffrequente Anzeigen an der

Fuge unterbrochen. Die tieffrequente Anzeige kann als Indiz auf eine flexurale Schwingungsform eines delaminierten Bereichs interpretiert werden.

Als Negativbefund (keine Rissanzeige) zeigt Abb. 4 (rechts) eine Messung an einer Fuge ohne Rissbildung. Hier zeigt sich die Dickenresonanz über die Position der Fuge hinweg. Es ist keine tieffrequente Anzeige sichtbar.

Die Befunde konnten an diesen Messstellen sowohl mit Ultraschallmessungen in Übereinstimmung gebracht als auch exemplarisch durch Bohrkernbeprobungen verifiziert werden. (Abb. 5).

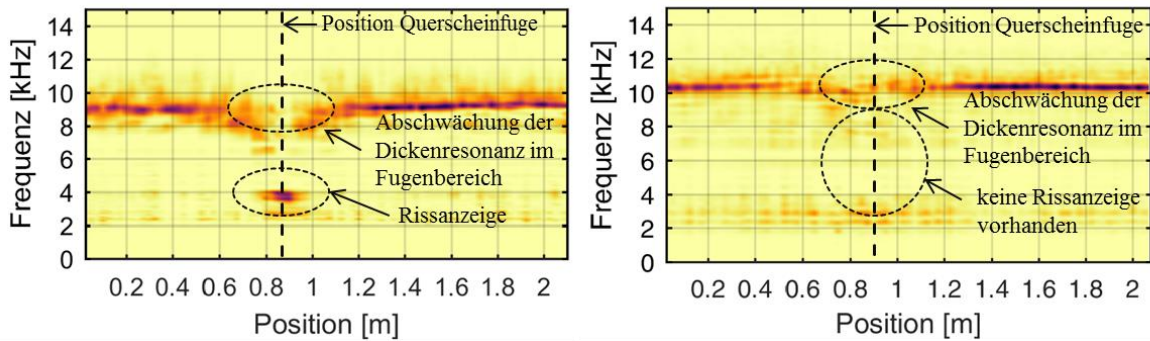


Abb. 4. Messergebnisse an Fahrbahnplatten mit ca. 20 cm Plattendicke. Darstellung der Messfrequenz in Abhängigkeit von der Position. Die gestrichelte Linie markiert die Position der Querscheinfugen. Links: Messung an Fuge mit horizontaler Rissbildung, rechts: Messung an Fuge ohne Rissbildung.



Abb. 5. Innenwand eines Bohrlochs an Fuge mit horizontaler Rissbildung ausgehend vom Kerbschnittgrund. Vor der Bohrung durchgeführte Messung an dieser Fuge s. Abb. 4, links.

3.2 Delaminationen an Brückenplatte

Neben den oben gezeigten Fällen, bei denen die Schadensbilder auf Fugenbereiche konzentriert sind, gibt es natürlich auch Anwendungsszenarien, bei denen eine kontinuierliche Erfassung von Messdaten notwendig ist. Dies gilt z.B. für Brückenbauwerke wo die Lokalisierung flächiger Delaminationen das Detektionsziel darstellt.

Im Rahmen eines Piloteinsatzes des IE-Scanners wurden auf einem Brückenbauwerk zusammenhängende Linienscans mit insgesamt ca. 7 km Messspurlänge aufgezeichnet.

Die Messergebnisse konnten automatisch ausgewertet werden. Anzeigen, die auf Delaminationen schließen lassen (d. h. hohe Amplitudenwerte unterhalb der Frequenz der Dickenresonanz) wurden segmentiert und in ein CAD-basiertes Schadenskataster übertragen. So ist ein Abgleich mit konventionell gewonnenen Informationen zum Bauwerkszustand möglich (Abb. 6). Der Bauwerkseigner kann die Messergebnisse somit zielgerichtet z. B. zur Planung von Instandsetzungsmaßnahmen verwerten.

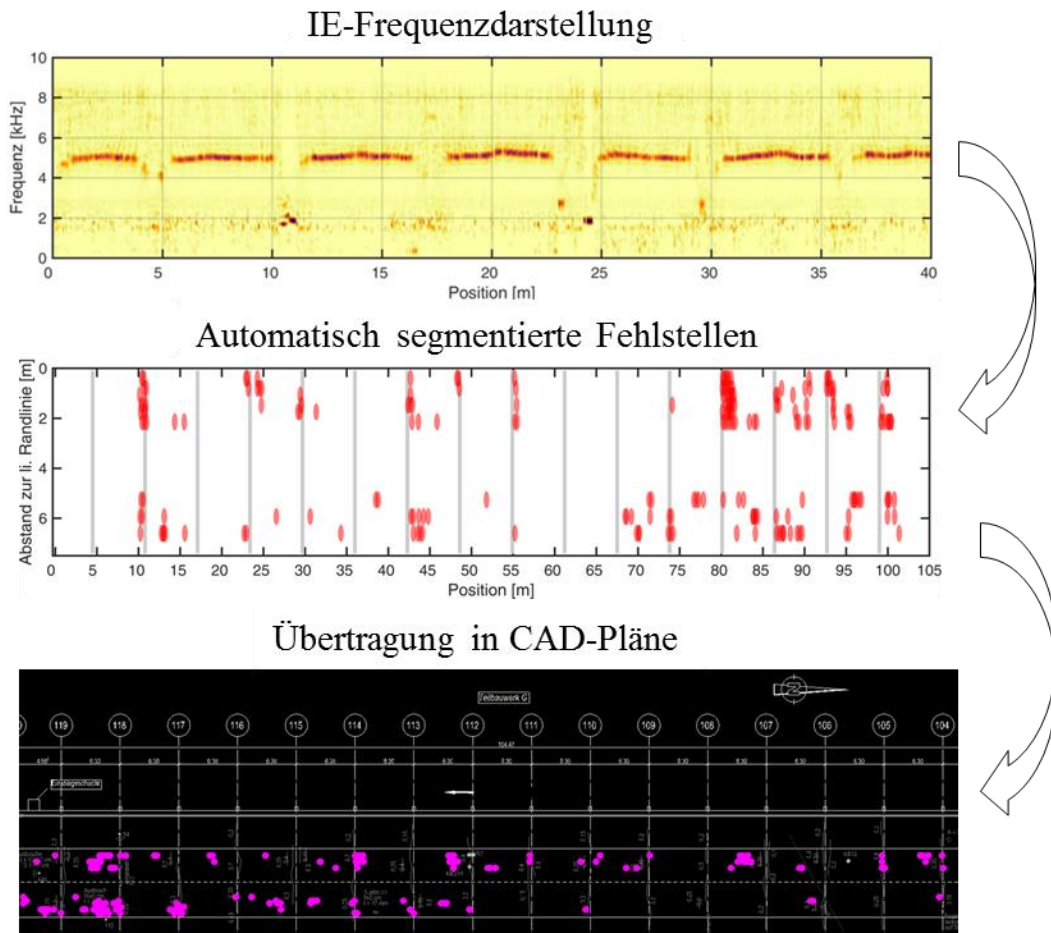


Abb. 6. Exemplarische Illustration der automatisierten Auswertung ausgehend von Impakt-Echo-Daten zu CAD-basiertem Schadenskataster.

4. Zusammenfassung

Mit dem hier entwickelten System steht ein feldtaugliches ZfP-Gerät für Betonstrukturen zur Verfügung, welches auf Basis des Impakt-Echo-Verfahrens kleinräumige Rissbildungen und Delaminationsstörungen in scannender Weise abbilden kann. Es stellt somit eine wesentliche Verbesserung bestehender Prüftechnik dar. Bisher waren messtechnische Nachweise von oberflächlich nicht sichtbaren Rissbildungen hauptsächlich mit Ultraschalltechnik durchführbar und mit hohem Zeitaufwand verbunden.

Bei Einsatz des IE-Scanners können in praxisingerechten Messzeiten aussagekräftige Informationen über den Bauwerkszustand gewonnen werden.

Aufgrund des physikalischen Messprinzips sind für den Praxiseinsatz gewisse Einschränkungen zu beachten. Bei Vorliegen mehrerer horizontaler Rissebenen trägt nur die oberste Rissebene zum Messeffekt bei. D.h. das Verfahren kann bei Detektion einer Rissbildung keine Aussage darüber liefern, ob unter einem detektierten Riss noch weitere Rissebenen vorliegen.

Der entwickelte Scanner lässt sich in der aktuellen Entwicklungsstufe in Schrittgeschwindigkeit betreiben. Die maximal mögliche Messgeschwindigkeit muss dabei auf das Detektionsziel angepasst werden. Eine Erhöhung der Scangeschwindigkeit und die Bestimmung von Detektionswahrscheinlichkeiten (Probability of Detection, POD) sind Gegenstand aktueller Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten.

Die luftgekoppelte IE-Messtechnik könnte auch an anderen Strukturen zur Klärung struktureller Eigenschaften Anwendung finden. So wäre z. B. der Einsatz zur Detektion von

Delaminationen in Fahrbahnaufbauten aus Asphalt denkbar. Hierzu müsste vor allem durch eine Modifikation der Impaktormassen der Frequenzbereich der Anregung angepasst werden. Auch die Ableitung von Materialparametern (z. B. dynamischer E-Modul) ist mit impakt-basierten Messungen möglich.

Außerdem wäre ein Einsatz zur Detektion korrosiv bedingter Delaminationseffekte (bei Brücken, Parkdecks, Tiefgaragen), zur Dickenmessung (z. B. Bodenplatten, Tunnelinnenschalen) und der Einsatz zur Qualitätssicherung von Betonstrukturen, bei denen Materialverbünde oder Hinterfüllungen überprüft werden müssen (z. B. Tübbinge im Tunnelbau), möglich. Hier erscheinen eine Weiterführung der Entwicklungsarbeiten und eine Anpassung auf die speziellen Prüfsituationen auch wirtschaftlich sinnvoll, da für viele Anwendungen keine scannend einsetzbaren, zerstörungsfreien Prüfverfahren zur Verfügung stehen.

Danksagung

Die dem Artikel zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur unter FE-Nr. 08.0238/2015/CRB durchgeführt. Wir danken der Bundesanstalt für Straßenwesen für die Förderung der Forschungsarbeiten sowie den Expertinnen und Experten des Betreuungsausschusses für die hilfreichen Hinweise. Die Verantwortung für den Inhalt des Artikels liegt allein bei den Autoren.

Weiterhin bedanken wir uns bei der Niedersächsischen Landesbehörde für Straßenbau und Verkehr und dem Ingenieurbüro Inros Lacker für die Erlaubnis zur Präsentation der Ergebnisse von Messungen an einem Brückenbauwerk. Zudem sind wir dem Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der Technischen Universität München für die vielfältige Unterstützung dankbar und insbesondere Herrn Sebastian Münchmeyer für die fachkundige Mithilfe bei der technischen Realisierung des IE-Scanners.

Referenzen

- [1] Sansalone, M.J. und Carino, N.J. (1986). Impact-echo: A method for flaw detection in concrete using transient stress waves. *National Bureau of Standards*. Rep. No. NBSIR, 86-3452.
- [2] (2011). *DGZfP-Merkblatt B11: Merkblatt über die Anwendung des Impakt-Echo-Verfahrens zur Zerstörungsfreien Prüfung von Betonbauteilen; Ausgabe 2011-04*. Berlin: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP).
- [3] Groschup, R. und Grosse, C.U. (2015). *Enhancing Air-Coupled Impact-Echo with Microphone Arrays*. Tagungsband *Proceedings of the 2015 International Symposium on Non-Destructive Testing in Civil Engineering, NDT-CE*. Berlin.
- [4] Groschup, R. und Grosse, C.U. (2016). Mikrofon-Array-Technik für scannendes Impakt-Echo-System – ein neuer messtechnischer Ansatz zur schnellen automatisierten Inspektion von Betonbauteilen. *Ernst & Sohn Special 2016 Messtechnik im Bauwesen*. 49-54.
- [5] Zhu, J.Y. und Popovics, J.S. (2006). Air-coupled impact-echo method for NDT of concrete. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vols 25A and 25B*. 820, 1351-1357.
- [6] Zhu, J.Y. und Popovics, J.S. (2007). Imaging concrete structures using air-coupled impact-echo. *Journal of Engineering Mechanics-Asce*. 133(6), 628-640.
- [7] Grosse, C.U., Jüngert, A. und Jatzlau, P. (2018). Local Acoustic Resonance Spectroscopy. In *Handbook of Advanced Non-Destructive Evaluation* (N. Ida and N. Meyendorff Hrsg.). Heidelberg: Springer.
- [8] Gibson, A. und Popovics, J.S. (2005). Lamb wave basis for impact-echo method analysis. *Journal of Engineering Mechanics-Asce*. 131(4), 438-443.
- [9] Oh, T., Popovics, J.S. und Sim, S.H. (2013). Analysis of vibration for regions above rectangular delamination defects in solids. *Journal of Sound and Vibration*. 332(7), 1766-1776.
- [10] Groschup, R. und Grosse, C.U. (2015). MEMS Microphone Array Sensor for Air-Coupled Impact-Echo. *Sensors*. 15(7), 14932-14945.