

Neue Ansätze zur Anwendung der Impakt-Echo-Methode

Robin GROSCHUP *, Christian U. GROBE *

* Technische Universität München, Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung
Baumbachstr. 7, 81245 München, robin.groschup@tum.de, grosse@tum.de

Kurzfassung. Die Impakt-Echo-Methode wird als messtechnisch einfach umzusetzendes Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung häufig bei der Untersuchung von Betonbauteilen eingesetzt. In der Praxis ergeben sich bei dem Verfahren oftmals Einschränkungen aufgrund von Geometrie- oder Anregungseffekten. Deswegen wurde untersucht, wie sich solche Probleme durch eine modifizierte Anregungsmethode und eine angepasste Auswertemethode unterdrücken lassen. Es konnte gezeigt werden, dass durch eine gezielte Mehrfachanregung in der Umgebung eines Messpunkts Geometrieeffekte unterdrückt werden können. Mit diesem modifizierten Impakt-Echo-Verfahren erzeugte Signale wurden weiterführenden Analysen, wie z. B. Dämpfungsbestimmungen zur Beurteilung von Materialverbänden oder angrenzender Medien unterzogen. Die vorgeschlagenen Methoden werden durch Experimente und Simulationen überprüft.

1 Einleitung

Bei der konventionellen Durchführung von Impakt-Echo (IE) Messungen an Beton werden die durch einen mechanischen Impakt (z.B. Schlag mit Impulshammer, Aufprall einer Stahlkugel) verursachten Körperschallwellen mit einem Sensor, der in der Nähe des Impaktpunktes angebracht wird, gemessen [1,2,3]. Signalanregung und Messung erfolgen somit geometrisch gesehen an einzelnen Punkten. Das für Impakt-Echo-Messungen genutzte Wellenfeld hat allerdings eine räumlich kohärente Ausdehnung, die ungefähr der Dicke des zu untersuchenden Bauteils entspricht. Dieser Umstand lässt sich messtechnisch ausnutzen, indem mehrere Quell- bzw. Aufnehmerpunkte für eine Einzelmessung kombiniert werden. Dadurch können z. B. Geometrieeffekte wirksam unterdrückt und das Signal-Rausch-Verhältnis erhöht werden. In jüngster Zeit sind Anwendungen der IE-Methode durch die Verfügbarkeit von trocken angekoppelten Ultraschall-Arrays in den Hintergrund gerückt. Im Folgenden sollen Methoden aufgezeigt werden, mit denen die Datenqualität und Aussagekraft von Impakt-Echo-Messungen erhöht werden kann, um so das Potential der IE-Methode zur Untersuchung von Beton oder auch anderen Materialien besser ausnutzen zu können.

2 Grundlagen

2.1 Das Impakt-Echo-Signal

Die Impakt-Echo-Methode beruht auf der Messung elastischer Wellen, die durch einen mechanischen Impakt in einem plattenförmigen Bauteil hervorgerufen werden. Der aufgezeichnete zeitliche Verlauf der Bewegung der Bauteiloberfläche wird zur Auswertung in den Frequenzbereich transformiert. Der traditionelle Ansatz zur Erklärung der beobachteten Wellenformen beruht auf der vereinfachenden Annahme mehrfach reflektierter Longitudinalwellen (P- bzw. Kompressionswellen), die zwischen den Begrenzungsflächen eines plattenförmigen Bauteils hin und herlaufen. Aus der zeitlichen Wiederholfrequenz dieser Mehrfachreflexion wird dann auf die Bauteildicke geschlossen. Genauere Analysen der Wellenausbreitung in Platten erklären das Signal, das in IE-Messungen ausgewertet wird, als symmetrische Lambwellenmode (S1 Mode) [4,5]. Theoretisch existieren in Platten unendlich viele Lambwellenmoden. Jedoch weist die S1 Mode die mit Abstand größte Anregbarkeit auf. Die Besonderheit der S1 Lambwelle ist weiterhin, dass sie eine Gruppengeschwindigkeit von Null hat. Das bedeutet, dass die Energie dieser Mode nicht aus einem bestimmten Bereich um den Quellpunkt herauspropagiert, während Wellen mit Gruppengeschwindigkeiten ungleich Null Energie aus dem Quellbereich heraus abstrahlen. Aus der Lambwellen-Theorie ergibt sich auch der Korrekturfaktor β , der in der fundamentalen IE-Gleichung Verwendung findet:

$$f_R = \frac{\beta \cdot c_p}{2 \cdot d}$$

wobei f_R die Frequenz der gemessenen Schwingung, c_p die Geschwindigkeit der Longitudinalwelle (P-Welle) im Baustoff und d die Dicke der untersuchten Plattenstruktur bedeuten. β zeigt eine schwache Abhängigkeit von der Poissonzahl. Für Beton gilt $\beta \approx 0.96$ [4]. Aus der obigen Formel ergibt sich auch der häufigste Anwendungsfall für IE-Messungen: Bei bekannter P-Wellen-Geschwindigkeit kann auf die Dicke des Bauteils geschlossen werden. Andersherum kann bei bekannter Dicke die P-Wellengeschwindigkeit bestimmt werden. Die Frequenz f_R wird häufig auch als Plattenresonanz bezeichnet.

2.2 Geometrieeffekte

Die der Auswertung von IE-Messungen zugrundeliegende Theorie setzt unendlich ausgedehnte Plattenstrukturen voraus. Da dieser Idealfall in der Realität nie anzutreffen ist, treten beim IE-Verfahren immer sog. Geometrieeffekte auf. Diese Effekte ergeben sich v.a. durch an Seitenwänden reflektierte Oberflächen-, Longitudinal- und Scherwellen. Solche reflektierte Wellen überlagern dann das Wellenfeld der S1-Lambwelle. D.h. die aufgezeichnete Bewegung der Oberfläche am Messpunkt wird nur im Idealfall einer unendlich ausgedehnten Platte von der S1 Welle dominiert. In der Realität besteht die aufgezeichnete Wellenform immer aus einer Überlagerung verschiedener Wellentypen und verschiedener an den Grenzflächen der Plattenstruktur reflektierten Körper- und Oberflächenwellen. Derartige Effekte erschweren in der Praxis eine eindeutige Interpretation der Messergebnisse.

Die Entstehung von Geometrieeffekten lässt sich gut an Simulationen der Wellenausbreitung beobachten. Abb. 1 zeigt Snapshots einer finite-Differenzen Simulation [6] einer 200 mm dicken Betonplatte, 340 Mikrosekunden nachdem auf der Oberseite bei 250 mm ein Impakt (in Form eines Gaußpulses mit Halbwertsbreite 50 μ s) ausgelöst wurde. Dargestellt ist die vertikale Partikelbewegung. In Teil A von Abb. 1 wurden über

sog. „perfectly matched layer“ (PML) Randbedingungen die Reflexionen der Seitenwände so stark gedämpft, dass die Wellenbewegungen in der Platte denen in einer unendlich ausgedehnten Platte gleichen. Ober- und Unterseite sind als stressfreie Oberflächen simuliert. Man erkennt deutlich, dass sich die Partikel im Bereich um den Impaktpunkt (mit Stern markiert) an Ober- und Unterseite der Platte in entgegengesetzte Richtungen bewegen (angezeigt durch blaue und rote Farbtöne). Diese Bewegung ist also in Bezug auf die Plattenmitte symmetrisch und entspricht somit der S1-Lambwelle. In Teil B von Abb. 1 wurde die Simulation mit freien Oberflächen auch an den seitlichen Begrenzungsflächen realisiert. Die Partikelbewegung wird zwar zum gleichen Zeitpunkt wie in Teil A dargestellt, jedoch ist die Bewegung der S1-Lambwelle nicht mehr erkennbar. Ursache ist die Überlagerung der S1-Lambwelle mit Reflexionen der Seitenwände.

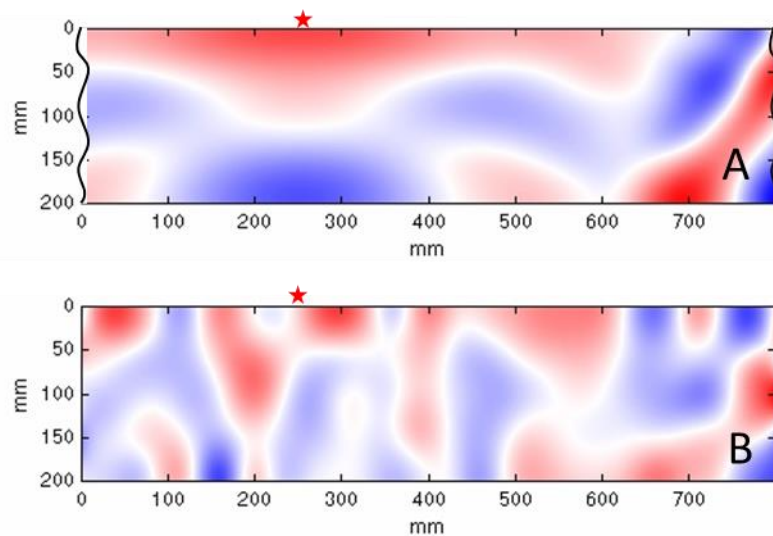


Abb. 1. Snapshots aus einer 2D-FD-Simulation [6] der vertikalen Partikelbewegung in einer 25 cm dicken Betonplatte ($c_p=4300$ m/s, Poissonzahl=0.22, Dichte 2400 kg/m³) $340 \mu\text{s}$ nachdem bei Profilkordinate 250 mm (markiert mit dem Sternsymbol) ein Impact ausgelöst wurde. A: Simulationsrechnung mit PML Randbedingungen an den seitlichen Begrenzungen. B. Simulationsrechnung in einer 800 mm breiten Platte. Bewegungen nach oben sind blau dargestellt, Bewegungen nach unten in rot.

3 Impact-Echo-Array-Methode

Um den Einfluss der beschriebenen Geometrieeffekte zu minimieren, muss im Messsignal die Energie der S1-Lambwelle erhöht werden. Wie man in der Simulation der unendlich ausgedehnten Platte erkennt (s. Abb 1. A), ist die Partikelbewegung, welche durch die S1-Lambwelle hervorgerufen wird, über einen größeren Bereich um den Impaktpunkt gleichphasig. D.h. Wellenbewegungen der S1-Mode werden an allen Punkten innerhalb eines Bereichs um den Impaktpunkt herum gleichphasig registriert. Dieser Bereich hat eine laterale Ausdehnung, die der Plattendicke entspricht. Wellen mit anderen Ausbreitungsrichtungen, also z.B. an den Seitenwänden reflektierten Rayleighwellen (Oberflächenwellen), kommen an verschiedenen Punkten der Oberfläche zu verschiedenen Zeitpunkten an. Dies lässt sich ausnutzen, indem man die Signale mehrerer Aufnehmer aus einem Bereich um den Impaktpunkt summiert. Der Anteil der S1 Wellenbewegung wird durch konstruktive Interferenz verstärkt, während sich die Anteile aller anderen Wellentypen durch destruktive Interferenz vermindern. Diese Art des Vorgehens lässt sich auch umkehren, indem anstelle der Verwendung mehrerer Aufnehmer mehrere Anregungen durchgeführt werden. Für die Praxis ergibt sich daraus der Vorteil, dass nicht mehrere Sensoren nötig sind, sondern die Anregung einfach an mehreren Punkten wiederholt werden kann. Die Signale der einzelnen Messungen können dann nachträglich aufsummiert

werden. Abb. 2 (oben) zeigt die so erzeugten Signale aus der oben beschriebenen Simulationsrechnung. In rot dargestellt ist das summierte Signal mehrerer Einzelsensoren um den Impaktpunkt, in schwarz (gestrichelt) das summierte Signal an einem einzelnen Sensorpunkt erzeugt durch wiederholte Anregungen.

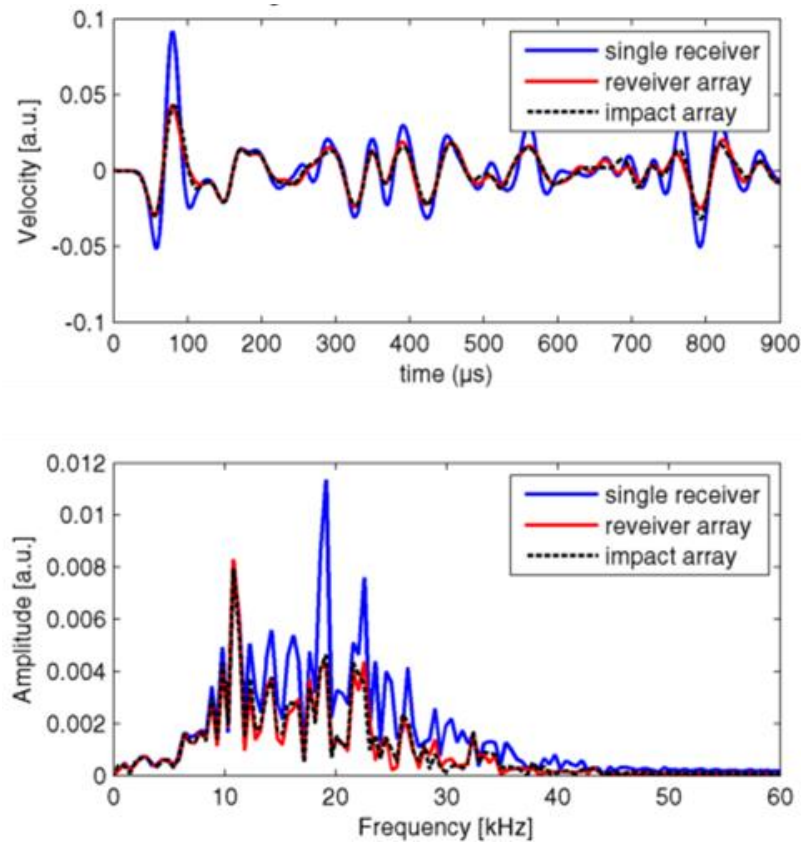


Abb. 2. Aufzeichnung der Partikelgeschwindigkeit (oben) und zugehörige FFT-Frequenzspektren (unten) der Simulation aus Abb. 1. Die blaue Kurve zeigt das Signal an einem Einzelpunkt 7.5 cm vom Impaktpunkt entfernt. Die rote Kurve zeigt das summierte Signal mehrerer Sensoren aus einem Bereich von 10 cm um den Impaktpunkt. Das schwarz gestrichelte Signal (in der Abbildung quasi Deckungsgleich mit der roten Kurve) zeigt das Signal mehrerer aufsummierter Einzelimpakts.

In diesen Summensignalen kann bei Vorliegen von Geometrieeffekten die erwartete IE Resonanzfrequenz eindeutiger bestimmt werden als bei Verwendung eines einzelnen Impakts mit einem einzelnen Aufnehmer. Bei den in der Simulation verwendeten Materialparametern ($c_p=4300$ m/s, Plattendicke $d=20$ cm) liegt nach der IE-Formel der erwartete Resonanzpeak bei 10,3 kHz. Die Messung mit dem einzelnen Sensor (blaue Kurve in Abb.2) zeigt die größte Amplitude nicht bei dieser Frequenz. Dies liegt an den erwähnten Geometrieeffekten, also der Überlagerung der S1-Lambwelle mit anderen Wellentypen (hauptsächlich reflektierten Oberflächenwellen). Betrachtet man die Spektren der Summensignale liegt das beobachtbare Frequenzmaximum eindeutig bei 10,3 kHz und entspricht somit der theoretisch erwarteten Frequenz. Das summierte Signal mehrerer Einzelsensoren (rote Kurve in Abb. 2) ist dabei fast deckungsgleich mit dem summierten Signal an einem einzelnen Sensorpunkt erzeugt durch wiederholte Anregungen (schwarz gestrichelte Kurve in Abb. 2).

In Anlehnung an Ultraschall-Array Techniken, kann dieses modifizierte Messverfahren auch als „IE-Array-Technik“ aufgefasst werden. Statt Quellen und Aufnehmern an Einzelpunkten werden mehrere Sensoren bzw. Impaktpunkte als „Arraymessungen“ in einer Messung kombiniert. Somit können also entweder durch eine Stapelung (d.h. Summation) der Signale mehrerer Einzelsensoren oder aber durch eine

Summation der Signale mehrerer einzelner Impakts die Signale der S1-Lambwelle verstärkt und Geometrieeffekte wirksam unterdrückt werden. Bei der Durchführung von praktischen Messungen ist die Methode der mehrmaligen Impaktausführung am attraktivsten, da nur ein einzelner Sensor nötig ist und mehrfach hintereinander ein Impakt ausgeführt wird. Die einzelnen Impaktanregungen müssen dabei in einem Abstand zum Sensorpunkt stattfinden, der höchstens der Plattendicke entspricht, um die mögliche laterale Auflösung einzelner Messungen nicht zu verschlechtern. Voraussetzung dafür, dass die Summation mehrerer Einzelsignale eine Verstärkung der nutzbaren S1-Welle ergibt, ist eine phasentreue Summation. D.h. die Signalaufzeichnung muss konsistent auf den Impaktzeitpunkt getriggert werden. In der Praxis lässt sich dies z.B. einfach über Impulshämmer realisieren, über deren eingebauten Kraftsensor ein Triggersignal ausgelöst werden kann.

Im Folgenden sollen exemplarisch einige Beispiele für die Anwendung dieser IE-Array-Technik vorgestellt werden.

4 Anwendungsbeispiele

4.1 IE-Messung an Platte mit ungünstigem Längenverhältnis

Besonders deutlich tritt eine Beeinflussung der IE Datenqualität durch Geometrieeffekte an Plattenstrukturen auf, deren Länge-zu-Dicke-Verhältnis kleiner oder nur wenig größer als 5 ist [1]. Abb. 3 zeigt Impakt-Echo-Signale und zugehörige Frequenzspektren von Messungen an einer $1,6 \times 1,6 \times 0,3 \text{ m}^3$ großen Betonplatte. Die Messung wurde mit einem Beschleunigungssensor durchgeführt, der zu zwei Plattenrändern einen Abstand von 50 cm hatte. Im Spektrum der Einzelpunktmessung (Abb. 3 links) ist keine einzelne Frequenz als dominant zu identifizieren. Summiert man jedoch 40 Einzelsignale, die durch mehrfache Anregungen in einem Kreis (Radius entspricht halber Plattendicke) um den Sensorpunkt herum gewonnen wurden, so zeigt das Spektrum ein eindeutiges Frequenzmaximum bei 6,9 kHz, was bei der Longitudinalwellengeschwindigkeit der Platte ($c_p = 4300 \text{ m/s}$) genau der erwarteten Plattenresonanz entspricht.

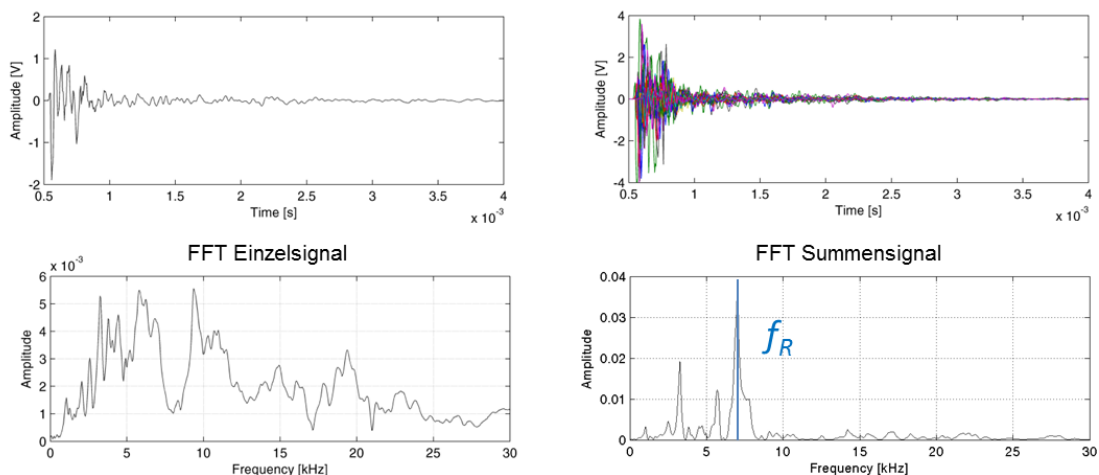


Abb. 3. Links: IE-Messsignal und zugehöriges Spektrum einer Einzelpunktmessung 50 cm entfernt von den Plattenrändern einer $1,6 \times 1,6 \times 0,3 \text{ m}^3$ großen Betonplatte. Rechts: Einzelsignale mehrerer Impakts und Spektrum der summierten Signale. Im Spektrum der summierten Signale ist nur noch ein dominantes Frequenzmaximum vorhanden, welches der erwarteten Plattenresonanz entspricht.

4.2 IE für Beton unter Brandbeanspruchung

Aufgrund der relativ tiefen Prüffrequenzen und der damit verbundenen langen Wellenlängen ist IE weniger zur exakten Lokalisation kleiner Schäden oder Fehlstellen geeignet. Jedoch ist IE in Bezug auf großräumige Änderungen der Wellengeschwindigkeit sehr empfindlich. Dies kann z.B. zur Untersuchung der Veränderung des Betongefüges unter Brandbeanspruchung interessant sein [7].

Ein Betonblock der Abmessungen $3.44 \times 1.61 \times 0.4 \text{ m}^3$ wurde durch Beflammung von unten einer definierten Temperaturentwicklung ausgesetzt (s. Abb. 4 links). An der Oberseite wurde an einem einzelnen Messpunkt während der gesamten Brandsimulation wiederholt IE-Messungen durchgeführt. Die Messungen wurden mit mehrfacher Impaktanregung auf einem Kreis um den Sensorpunkt herum ausgeführt. Gegenüber der konventionellen Durchführung der IE-Messungen mit Anregung an einem einzelnen Punkt hat sich eine deutliche Verbesserung der Datenqualität ergeben. Abb. 4 (rechts) zeigt den zeitlichen Verlauf der registrierten IE-Spektren. Der generelle Abwärtstrend des dominanten Frequenzmaximums wird durch eine Verringerung der Wellengeschwindigkeit aufgrund der Temperaturerhöhung hervorgerufen. Der unstetige Versatz im Verlauf des Frequenzmaximums bei einer Brandzeit von ca. 10 Minuten steht in Zusammenhang mit einer großflächigen Abplatzung im Bereich unterhalb des Sensors. Diese Abplatzung konnte nach dem Brandversuch visuell bestätigt werden. Man beachte, dass sich Änderungen des Frequenzmaximums nach der Abplatzung im Bereich zwischen 4.9 kHz und 4.7 kHz beobachten lassen. Eine solche Frequenz-Verschiebung kann durch eine Änderung der P-Wellengeschwindigkeit von ca. 100 m/s erklärt werden. Eine solch geringe Geschwindigkeitsveränderung wäre durch Puls-Echo-Verfahren nur schwer auflösbar, da bei Prüffrequenzen, die zur Durchschallung des 40 cm dicken Probekörpers nötig wären, die Periodendauer des Quellimpulses um ein Vielfaches länger wäre, als die Laufzeitdifferenz aufgrund der Geschwindigkeitsänderung.

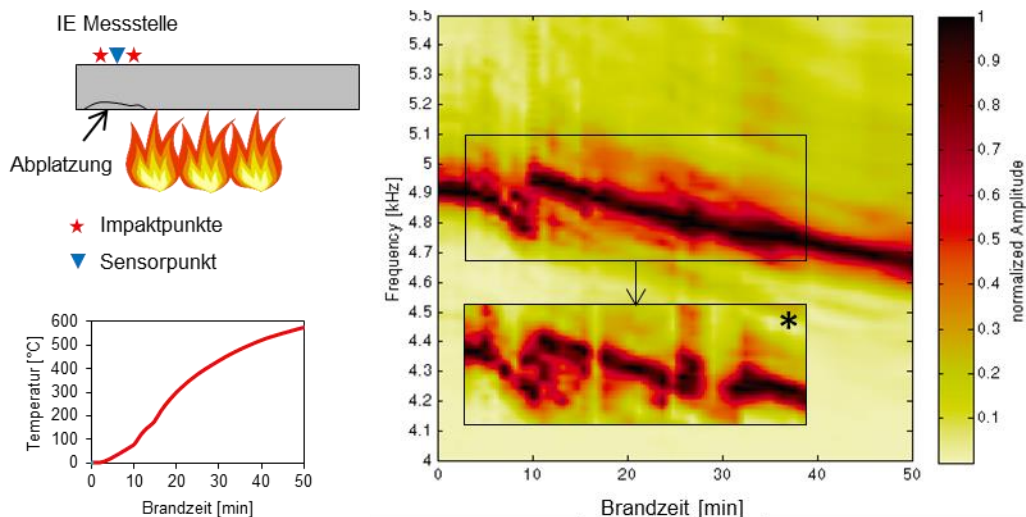


Abb. 4. Links: Versuchsaufbau eines Brandexperiments und Temperaturverlauf in 2 cm Tiefe des Probekörpers. Rechts: zeitliche Aneinanderreihung der Frequenzspektren einzelner IE-Messungen in Array-Technik während der Brandbeanspruchung. Der mit * markierte Bereich stellt die Messergebnisse dar, die mit konventioneller IE-Technik, also mit Anregung an nur einem Punkt, erhalten wurden.

4.3 IE zur Hinterfüllungsdetektion

Die S1-Lambwelle stellt eine oszillierende Partikelbewegung zwischen den Begrenzungen einer Plattenstruktur dar. An den Plattengrenzen verliert die S1-Lambwelle Energie durch

Abstrahlung von Wellenfeldern in benachbarte Medien. Deshalb beeinflusst der Impedanzkontrast zu angrenzenden Medien die Dämpfung der Plattenresonanz. Bei einem geringen Impedanzkontrast wird an einer Grenzfläche mehr Energie in das angrenzende Medium abgestrahlt, als bei einem hohen Impedanzkontrast. Somit ergibt sich je nach angrenzendem Medium für die Plattenresonanz eine charakteristische Dämpfung. Derartige Phänomene lassen sich z.B. zur Bestimmung der Hinterfüllung von Fertigbetonbauteilen mit der IE-Methode ausnutzen.

Die Dämpfung drückt sich im IE-Messsignal einerseits durch den absoluten Energieinhalt der registrierten Oszillation aus, andererseits kann eine Dämpfungsbestimmung durch Ermittlung der Halbwertsbreite des beobachteten Spektralpeaks der Plattenresonanz erfolgen [8]. Für beide Ansätze erweist sich die IE-Array-Methode mit mehrfacher Impaktausführung als zielführend. Die absolute Energie bzw. die Signalamplitude, die in einer IE-Messung registriert werden kann, hängt natürlich von der Stärke des durchgeführten Impakts ab. Desweiteren hat auch die Oberflächenbeschaffenheit an der Stelle des Sensors und des Impakts einen Einfluss auf die registrierten Signalamplituden (Ankopplungseffekte). Derartige Effekte führen dazu, dass Messungen mit Einzelanregungen hinsichtlich der enthaltenen Amplitudeninformation nur schwer oder gar nicht vergleichbar sind. Hier bietet die Anregung mit mehreren Einzelimpakts den Vorteil, dass sich bei Summation einer ausreichend großen Anzahl von Einzelsignalen Ankopplungseffekte und Variationen der Quellstärke statistisch ausgleichen. Wie groß die Anzahl an nötigen Einzelanregungen ist, um ein konsistentes Amplitudensignal zu erzeugen, muss im Einzelfall für die spezifische Messaufgabe geklärt werden. Im folgenden Beispiel, das als Modellversuch zur Hinterfüllungsdetektion von Tunneltübbingungen konzipiert war, hat sich eine Mehrfachanregung von 40 manuell ausgeführten Einzelschlägen mit einer Stahlkugel (Durchmesser 4 mm) als ausreichend erwiesen.

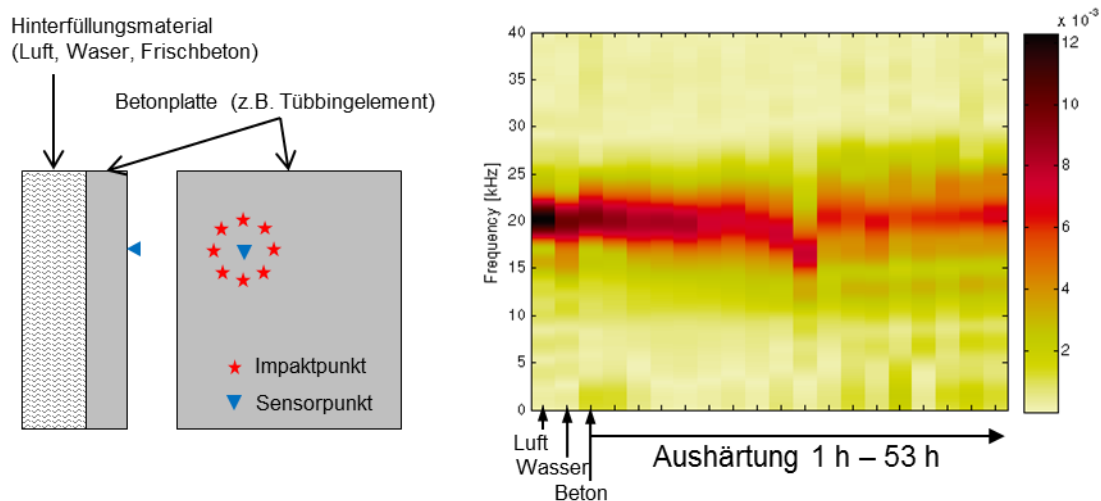


Abb. 5. Links: Laborversuchsaufbau zur Hinterfüllungsdetektion. Rechts: Amplitudengetreue Darstellung der Frequenzspektren wiederholter IE-Messungen mit den Hinterfüllungen Luft, Wasser und während der Aushärtung des Frischbetons.

Abb. 5 zeigt die Frequenzspektren wiederholt durchgeführter IE-Array-Messungen an einer Betonplatte (Abmessungen $0.4 \times 0.35 \times 0.09 \text{ m}^3$), die mit Luft, Wasser und Frischbeton hinterfüllt wurde. Zur Aufzeichnung wurde ein Beschleunigungssensor verwendet, der während der gesamten Versuchsdauer nicht entfernt wurde. Somit können sensorseitige Ankopplungseffekte vernachlässigt werden. Die Frequenzspektren der Einzelmessungen sind amplitudengetreu dargestellt. Man erkennt, dass die Amplitude des dominanten Frequenzmaximums abfällt, je steifer das Hinterfüllungsmaterial wird. Wird

die IE-Messung nicht als Array-Messung, also nur mit Anregungen an einzelnen Impaktpunkten durchgeführt, lässt sich keine konsistente Entwicklung der Maximalamplitude erkennen. In Abb. 6 wird dies durch die Darstellung der Amplitude des Frequenzmaximums an verschiedenen Anregungspunkten veranschaulicht (graue, gestrichelte Linien). Der allgemeine Abwärtstrend der Amplituden bleibt zwar erkennbar, die einzelnen Linien fluktuieren jedoch stark und würden bei Beobachtungen innerhalb kleiner Zeitabschnitte keinen eindeutigen Trend erkennen lassen. Dies liegt neben unzureichender Konstanz der Quellamplitude auch daran, dass die Energie der S1-Lambwelle zu stark von Geometrieeffekten verfälscht wird. Erst bei Summation aller Messsignale (hier 40 Einzelanregungen in einem Kreis um den Sensorpunkt) ergibt sich ein eindeutigerer Trend in der Amplitude des dominanten Spektralpeaks, wie er bei Aushärtung des Hinterfüllungsmaterials aufgrund der Zunahme der Dämpfung zu erwarten wäre. Die Amplitude des beobachteten Frequenzmaximums liefert in diesem Beispiel ein äquivalentes Ergebnis wie die Ermittlung der Dämpfung über einen Q-Faktor (Quotient aus Frequenz des Maximums im IE-Spektrum und der Halbwertsbreite des zugehörigen Spektralpeaks [8]).

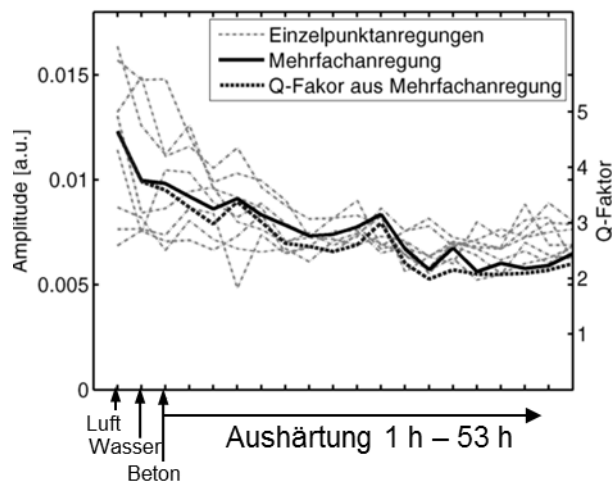


Abb. 6. Darstellung der spektralen Maximalamplituden und des Q-Faktors in Abhängigkeit verschiedener Hinterfüllungszustände (s. Versuchsaufbau Abb. 5). Graue, gestrichelte Linien: Maximalamplituden bei Impaktanregungen an verschiedenen Einzelpunkten. Schwarz durchgezogene Linie: Maximalamplitude der IE-Array-Messung (Anregung an verschiedenen Punkten um den Sensorpunkt). Schwarz gepunktete Linie: Q-Faktor nach [8].

4.4 Luftgekoppelte Impact-Echo-Messungen

Schwingungen eines festen Körpers regen im Allgemeinen Schallwellen im Medium an, das den festen Körper umgibt. Dies gilt auch für die beim IE-Verfahren erzeugten Schwingungen, die in der Luft Schallwellen erzeugen. So kann das IE-Signal auch kontaktfrei über Mikrofone aufgezeichnet werden [9,10]. Dieses Messprinzip hat besonderes Potential bei der Durchführung von scannenden IE-Messungen, da die oft zeitraubende Ankopplung eines Sensors an die Betonoberfläche entfällt. Jedoch zeichnen Mikrofone auch Umgebungsgeräusche und das Geräusch des Impact selbst auf.

Abb. 7 A zeigt die Simulation eines IE-Experiments mit Berücksichtigung der Wellenabstrahlung in die Luft. Zusätzlich zur Partikelbewegung im Beton werden hier auch die angeregten Luftschallwellen dargestellt. Die S1-Lambwelle erzeugt ebene Wellenfronten, die parallel zur Bauteiloberfläche verlaufen und senkrecht zu dieser abgestrahlt werden. Somit unterscheidet sich das erwünschte Messsignal durch die Einfallrichtung auf ein zur Messung über der Plattenstruktur angebrachtes Mikrophon. Umgebungsgeräusche haben streifende Einfallrichtungen bzw. Einfallrichtungen aus der

entgegengesetzten Richtung wie das IE-Signal. Teil B der Abb. 7 zeigt eine zu Abb. 7 A analoge Simulation, jedoch ist hier zusätzlich zur Impaktquelle noch ein Quellbereich in der Luft simuliert. Von der linken Seite wird hier Zufallsrauschen in das Modell propagiert, um den Einfluss von streifend einfallenden Umgebungsgeräuschen auf ein zur Messung eingesetztes lineares Mikrofonarray zu untersuchen. Die zugehörigen Frequenzspektren von Aufzeichnungen der Druckänderungen in der Luft sind in Abb. 8 dargestellt. Im Frequenzspektrum des Einzelmikrofons (blaue Kurve, Abb. 8) sind neben dem von der S1-Lambwelle erwarteten Frequenzmaximum bei 10,3 kHz noch viele weitere Frequenzmaxima zu erkennen, die von den Umgebungsgeräuschen verursacht werden und eine Interpretation stark erschweren. Durch eine Summation der Signale eines Mikrofonarrays werden diese Störsignale wirksam unterdrückt (rote Kurve, Abb. 8). Die Unterdrückung der Nebengeräusche erfolgt durch die Richtcharakteristik einer Anordnung aus mehreren Mikrofonen [11]. Bereits einfache lineare Mikrofonarrays ermöglichen eine Abschwächung von Signalen, die in Richtung der Erstreckung des Arrays laufen um 15 dB. Mit komplexeren Mikrofonanordnungen sind leicht Abschwächungen um 20 dB oder mehr außerhalb einer gewünschten Einfallsrichtung möglich (Abb. 9).

Auch wenn die hier gezeigte Simulation Amplitudeneffekte nicht absolut realitätsgetreu abbildet - die Amplitude des durch die Luft laufenden akustischen Teil des Impakts und die Stärke von Nebengeräuschen hängen stark von der individuellen Messumgebung ab - kann die gezeigte Simulation doch das Potential von Array-Verfahren für luftgekoppelte IE Messungen aufzeigen. In realen Messaufbauten können außerdem noch weitere Maßnahmen wie z.B. schalldämmende Maßnahmen um das Mikrofon, oder Reflektoren eingesetzt werden.

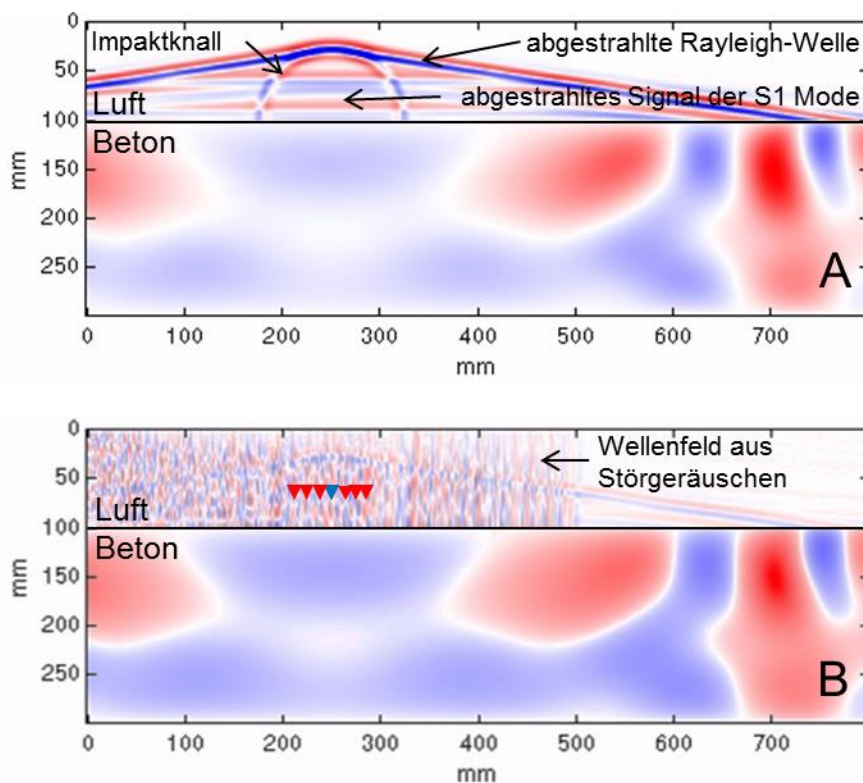


Abb. 7. A: Snapshot einer IE-Simulation in einer Betonplatte mit Abstrahlung von Wellenenergie in die umgebende Luft. B: wie A jedoch mit Nebengeräuschen aus Zufallsrauschen in Form ebener Wellenfronten, die von links nach rechts in das Modell propagieren. Die Dreiecke markieren Mikrofonpositionen deren Signale für die Spektren in Abb.8 verwendet werden.

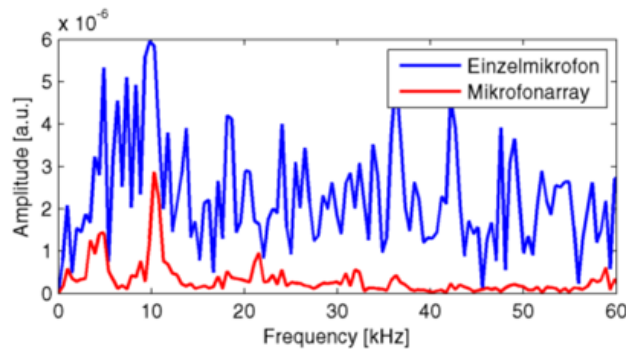


Abb. 8. Frequenzspektren der Simulationsrechnung aus Abb. 7 B. Blaue Kurve: Spektrum des Signals eines einzelnen Messmikrofons (blaues Dreieck in Abb. 7 B). Rote Kurve: Spektrum des Summensignals eines Mikrofonarrays (rote Dreiecke in Abb. 7 B).

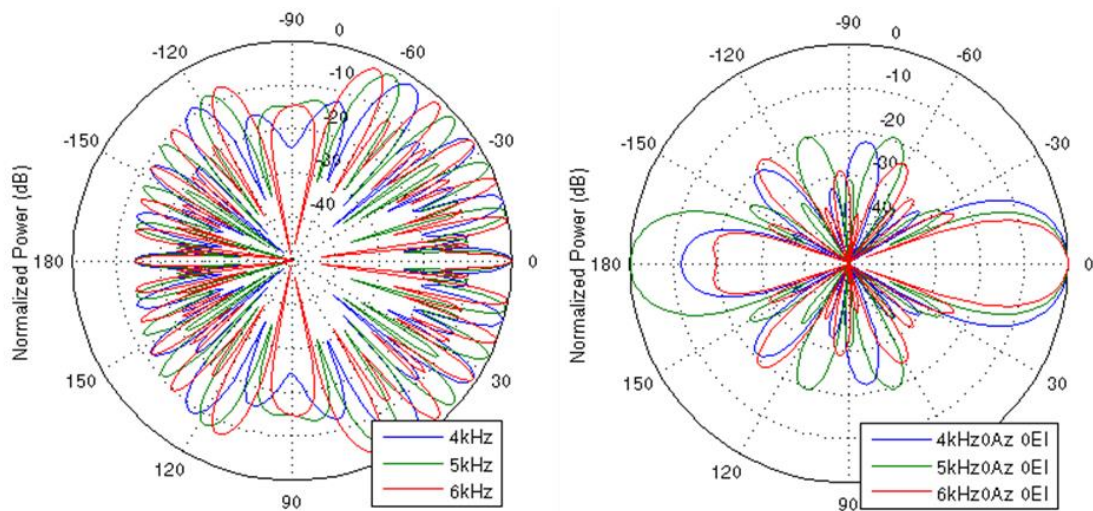


Abb. 9. Links: Richtcharakteristik eines einfachen linearen Mikrofonarrays. Rechts: Richtcharakteristik eines komplexeren Mikrofonarrays mit konzentrischer Anordnung mehrerer Mikrofone.

5 Zusammenfassung

Anhand von Simulationen und Praxisbeispielen wurde gezeigt, wie durch messtechnisch einfach umzusetzende Maßnahmen die Datenqualität und Interpretierbarkeit von IE-Messungen deutlich gesteigert werden kann. Eine Verbesserung gegenüber der konventionellen Messmethode mit einzelnen Quell- und Sensorpunkten kann durch gezielte Ausnutzung der räumlichen Ausdehnung des kohärenten Bereichs der S1-Lambwellenmode erreicht werden. Das Nutzsignal von IE-Messungen kann sowohl durch gleichzeitige Aufzeichnung mit mehreren Sensoren als auch durch eine mehrmalige Impaktanregung in der Umgebung eines Einzelsensors signifikant gegenüber Störeinflüssen (z.B. Geometrieeffekten) verstärkt werden. Das vorgeschlagene IE-Array-Verfahren eignet sich besonders für Messaufgaben, bei denen keine genaue Lokalisation von Fehlstellen notwendig ist, sondern eine genaue Geschwindigkeitsbestimmung oder Dickenmessung von Interesse ist. Weiterhin wurde gezeigt, dass bei mehrmaliger Anregung auch die Signalamplituden im IE-Signal sinnvoll interpretiert werden können. Dadurch sind Anwendungen im Bereich der Detektion von Hinterfüllungen von Betonelementen möglich (z.B. Hinterfüllung von Tübbingungen im Tunnelbau). Auch bei luftgekoppelten IE-Messungen sind Array-Ansätze sinnvoll einsetzbar, da bei der Verwendung von Mikrofonarrays gleichzeitig eine Verstärkung des Nutzsignals und eine Abschwächung von Umgebungsgeräuschen erreicht werden kann.

Danksagung

Für die Durchführung des Brandversuchs danken wir der MFPA Leipzig; Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig GmbH.

Referenzen

- [1] Sansalone, M., Streett, W.B.: Impact-Echo: Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry. Bullbrier Press, Jersey Shore (1997)
- [2] DGZFP-Merkblatt B11: Merkblatt über die Anwendung des Impakt-Echo-Verfahrens zur Zerstörungsfreien Prüfung von Betonbauteilen, März 2011, 37 Seiten, Deutsche Gesell. für Zerst.freie Prüfung, Berlin: DGZFP (2011)
- [3] Große, C. U., Wigenhauser, H., Algernon D., Schubert, F., Beutel, R.: Impact-Echo - Stand der Technik und Anwendungen des Verfahrens, Hefte des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, DAfStb, Heft 565, Berlin, S. 17-24, (2006)
- [4] Gibson, A., Popovics, J.S.: Lamb wave basis for impact-echo method analysis. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 131(4), 438–443 (2005)
- [5] Prada, C., Cloennec, D., Royer, D.: Local vibration of an elastic plate and zero-group velocity Lamb modes, The Journal of the Acoustical Society of America, 124 (1), 203–12 (2008)
- [6] Bossy, E., Talmant, M., Laugier, P.: Three-dimensional simulations of ultrasonic axial transmission velocity measurement on cortical bone models, The Journal of the Acoustical Society of America, 115, 2314-2324 (2004)
- [7] Richter, R., Grosse, C.: Experimentelle Untersuchungen zur Entwicklung eines 4D-P-Wellen-Geschwindigkeitsmodelles von hochfestem Beton unter Brandbeanspruchung. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, Graz (2012)
- [8] Ryden, N., Aurell, O., Nilsson, P., Hartlén, J.: Impact Echo Q-Factor Measurements Towards Non-Destructive Quality Control of the Backfill in Segmental Lined Tunnels, Nondestructive Testing of Materials and Structures, RILEM Bookseries, Springer Netherlands (2013)
- [9] Zhu, J., Popovics, J.S. Imaging Concrete Structures Using Air-Coupled Impact-Echo, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 133, No. 6 (2007)
- [10] Holland, S.D., Chimenti, D.E.: Air-coupled acoustic imaging with zero-group-velocity Lamb modes. Applied Physics Letters. 83(13), 2704–2706 (2003)
- [11] Brandstein, M., Ward, D.: Microphone Arrays – Signal Processing Techniques and Applications, ISBN 3-540-41953-5 Springer- Verlag, Cambridge MA, USA – London, UK (2001)