

Simulation von Impakt Echo Inspektionen in Beton zur Analyse der Detektionswahrscheinlichkeit

Fabian DETHOF¹, Sylvia KEßLER¹

¹ Helmut-Schmidt-Universität/ Universität der Bundeswehr Hamburg, Hamburg

Kontakt E-Mail: dethoff@hsu-hh.de

Kurzfassung. Es ist eine große Herausforderung, für jede zerstörungsfreie Prüfung die Auffindwahrscheinlichkeit für definierte Defekte zu quantifizieren. Dies gilt insbesondere für Inspektionsverfahren im Bauwesen, die auf der Ausbreitung von elastischen Wellen beruhen, wie dem Impakt Echo Verfahren. In Beton kommt noch erschwerend dazu, dass die Ausbreitung elastischer Wellen aufgrund der mehrphasigen Natur von Beton (Poren, Gesteinskörnung, Zementmatrix) sehr komplex ist. Aus diesem Grunde wurden mittels der elastodynamischen finiten Integrationstechnik (EFIT) numerische Simulationen von Impakt Echo Inspektionen durchgeführt, um die Faktoren zu bestimmen, die das Messergebnis und damit auch maßgeblich die Detektierbarkeit beeinflussen.

In dieser Arbeit werden die Einflüsse diverser Parameter bei Impakt Echo Inspektionen numerisch untersucht. Bei diesen Messungen ist das Wellenfeld besonders komplex, da neben den immer generierten Kompressions-, Scher- und Oberflächenwellen auch Lambwellen auftreten, deren Resonanzfrequenz am Ende auch gemessen werden soll. Auch wenn die Dimensionen der Streukörper klein im Verhältnis zur Wellenlänge sind, zeigen die Simulationsergebnisse, dass mehrere der getesteten Parameter, wie unter anderem der Porengehalt und der Anteil an Gesteinskörnung, das Messergebnis beeinflussen. Um den Mehrwert numerischer Simulationen bei komplexen Geometrien aufzuzeigen wurden reale Messungen an einem Probekörper nachsimuliert und miteinander verglichen. Dabei wurde auch untersucht, wie es am besten gelingen kann, das Rauschen, dem alle Messungen unterlegen sind, numerisch nachzubilden.

Einführung

Die Impakt Echo Messung gehört zu den am einfachsten durchzuführenden ZfP-Verfahren. Gleichzeitig ist die Auswertung jedoch keinesfalls trivial. Im Bauwesen ist Impakt Echo aufgrund seiner großen Wellenlängen und der damit verbundenen großen Eindringtiefe besonders zur Untersuchung dickerer, plattenähnlicher Bauteile geeignet. Anders als bei metallischen Komponenten spielen vor allem Streueffekte, die zusätzlich neben den Geometrieeffekten bei der Messung auftreten, eine deutlich größere Rolle. Dies liegt in erster Linie daran, dass das untersuchte Material, Beton, eine stark heterogene Mesostruktur besitzt. Neben der Zementmatrix und der Gesteinskörnung ist ein Teil des Volumens mit Poren gefüllt, in denen sich Luft oder Wasser befinden kann, zudem kann zusätzlich auch eine Bewehrung vorliegen. Ziel dieser Arbeit ist es zu demonstrieren, dass numerische Simulationen durchaus in der Lage sind, reale Messungen an komplexen Betonprobekörpern



nachzubilden, sowie auch aufzuzeigen, wo ihre Grenzen liegen und welche Faktoren für die Simulationen besonders entscheidend sind. Des Weiteren soll untersucht werden, wie gut man das bei einer Messung auftretende Rauschen, welches durch die Geometrie und interne Streuung an Gesteinskörnung und Poren auftritt, durch die Generierung eines numerischen Betons approximieren kann, sodass man die Simulationen in der Zukunft auch für Analysen der Probability of Detection (PoD) verwenden kann. Die hier vorgestellte Arbeit ist Teil des WIPANO-Projektes „Normung für die probabilistische Bewertung der Zuverlässigkeit für zerstörungsfreie Prüfverfahren“ [1].

1. Simulationsvorbereitungen

1.1 Elastodynamische Finite Integrationstechnik (EFIT)

Für die numerischen Simulationen wird die Elastodynamische Finite Integrationstechnik (EFIT) verwendet [2]. Dabei handelt es sich um einen finite Differenzen Code auf einem dualen Grid. Durch die Lösung der Integralform der Wellengleichung ist dieser Code besonders robust, was bei stark heterogenen Ausbreitungsmedien wie Beton besonders wichtig ist [3]. Auch hat EFIT in vergangenen Studien bewiesen, dass sowohl Ultraschall- als auch Impakt Echo Messungen in betonähnlichen Medien hiermit simuliert werden können [4], [5].

1.2 Numerischer Beton

Um die Streueffekte, die elastische Wellen bei der Ausbreitung in Beton erfahren, möglichst realitätsgetreu nachbilden zu können, ist es auch nötig, die Mesostruktur des Betons numerisch abzubilden. In EFIT werden kartesische Gitter genutzt, wobei die Materialparameter Dichte ρ , sowie die beiden Lamé-Parameter λ , μ direkt einer Gitterzelle zugeordnet werden. Aus diesem Grunde ist ein Meshing hier nicht erforderlich. Um die Gesteinskörnung und Poren zu generieren, wurde in dieser Arbeit der Ansatz von Schubert & Köhler [6] gewählt: Die Gesteinskörnung und Poren werden als Ellipsoide approximiert, die eine zufällige räumliche Position und Orientierung besitzen. Die Größenverteilung der Gesteinskörnung folgt dabei der für den Beton verwendeten Sieblinie. Da das Rechengebiet für Impakt Echo Simulationen z.T. sehr groß sein muss, kann es sein, dass ein Teil der kleineren Gesteinskörnung, sowie Mikroporen nicht räumlich aufgelöst werden können. Deshalb werden in den folgenden Simulationen nur Gesteinskörnung und Poren, die in ihrem Durchmesser größer als die räumliche Diskretisierung sind, berücksichtigt. Ein Beispiel für die Diskretisierung eines Betons mit 2 mm räumlicher Auflösung und einer Sieblinie A/B 16 ist in Abb. 1 zu sehen.

2. Einflussfaktoren

2.1 Numerische Einflussfaktoren

Die Simulation von Impakt Echo Messungen ist nicht trivial und man muss an einigen Stellen Approximationen vornehmen: Bei einer gewöhnlichen Impakt Echo Messung erfolgt die Anregung zumeist per Hand über einen, an einem Metallstab befestigten Impaktor. Der dabei resultierende Kraftverlauf lässt sich gut über eine halbe Sinusschwingung approximieren [7]. Für die Simulation ist so ein Wavelet als Anregungssignal allerdings nur bedingt geeignet, da die Bandbreite aufgrund der Nicht-Differenzierbarkeit am Ende des Signals sehr hoch ist. Daher wird hier auf ein Gauß'sches Wavelet $f(t) = e^{\omega t - 2\pi} e^{-0.5(\omega t - 2\pi)^2}$ zurückgegriffen

[8], da es recht kurz ist und trotzdem eine relativ geringe Bandbreite besitzt. So können durch numerische Dispersion entstehende Artefakte vermieden werden. Die Verwendung anderer Wavelets mit diesen Eigenschaften wäre aber auch möglich.

Falls man in seiner Simulation nicht das gesamte, untersuchte Bauteil abbilden möchte, ist es möglich, die Simulation über schwach reflektierende Ränder auf einen kleineren Bereich zu beschränken. In EFIT lassen sich solche Ränder z.B. über die Einführung sogenannter Perfectly Matched Layer (PML) realisieren [9]. Unsere Erfahrungen haben gezeigt, dass es für die numerische Stabilität dieser Ränder zu empfehlen ist, freie Ränder (wie z.B. Poren) in diesen Bereichen zu vermeiden. Auch sollte auf Inhomogenitäten, wie Gesteinskörnung in den Randbereichen, verzichtet werden. Des Weiteren ergaben unsere Simulationen, dass auch die lateralen Dimensionen des Rechengebietes mehr als doppelt so groß sein sollten wie die Dicke der Platte, da sich andernfalls keine Lambwellen ausbilden und sich die gesuchte Resonanzfrequenz nicht einstellt.

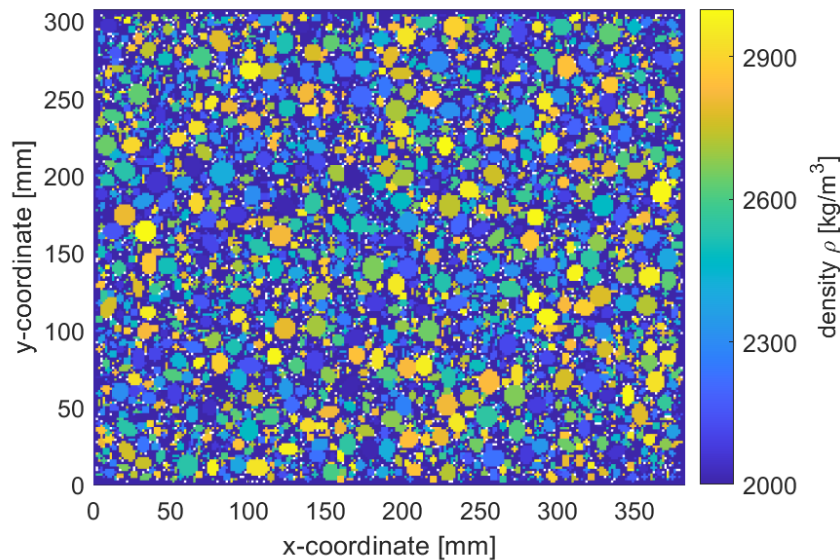


Abb. 1. Darstellung des numerischen Betons anhand der Dichtevariation. Hierbei wurde eine A/B16 Sieblinie verwendet. Poren werden in weiß dargestellt, da hierfür ein Vakuum (freier Rand) angenommen wurde.

2.2 Physikalische Einflussfaktoren

Die Impakt Echo Messung ist besonders in Beton physikalisch hochkomplex. Ein eingespeistes, bandbegrenztes Signal bildet durch Mehrfachreflexionen an zwei gegenüberliegenden freien Rändern eine stehende (Gruppengeschwindigkeit Null) Lambwellenmode aus. Dabei treten überall im Beton Reflexionen und Streuungen auf. Vorangegangene numerische Simulationen haben gezeigt, dass dabei besonders Poren aufgrund ihres hohen Impedanzkontrastes einen großen Einfluss auf das Streuverhalten elastischer Wellen in Beton haben [4]. Rein physikalisch betrachtet ist jeder Streukörper für die elastischen Wellen ein Hindernis, welche den direkten Laufweg der Welle zum Teil blockiert und damit die mittlere, zurückgelegte Weglänge erhöht. Betrachtet man nun die vielverwendete Formel zur Bestimmung der Resonanzfrequenz bei der Impakt Echo Messung:

$$f = \frac{\beta c_p}{2d} \quad (1)$$

Wobei β der Lambwellenkorrekturfaktor (ca. 0,96), c_p die P-Wellen-Phasengeschwindigkeit und d die Dicke der Platte ist, stellt man fest, dass sich bei nicht exakt orthogonal zu den Randflächen verlaufenden Wellen, die „scheinbare Dicke“ der Platte vergrößert und somit eine geringere Resonanzfrequenz zu erwarten wäre. Dieser Einfluss ist beispielhaft in Abb.2 dargestellt. In diesem Szenario wurde jeweils einmal die Impakt Echo Messung an einer homogenen Platte und in einer Platte nur mit Gesteinskörnung simuliert. Bei letzterer wurden nur die Dichten der Gesteinskörnung variiert und die Lamé-Parameter so angepasst, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeiten denen in der Zementmatrix entsprechen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeiten sind also in beiden Fällen gleich und überall im Rechengebiet konstant. Die Dichte wurde jedoch deutlich stärker variiert als es in der Realität der Fall ist, um den Impedanzkontrast zu erhöhen und den Frequenzverschiebungseffekt besser zu demonstrieren. In Abb.2 erkennt man weiterhin, dass dieser Effekt auch von der gewählten Auflösung abhängig ist. Um dies genauer zu untersuchen, wurde das zurückgestreute Signal einer einfallenden ebenen Welle und einem Zylinderförmigen Streukörper untersucht. Die dabei verwendeten Materialparameter sind in Tabelle 1 aufgeführt. In einem für die Impakt Echo Messung realistischen Streuszenario (Signalfrequenz: 10 kHz, Streukörperdurchmesser: 16 mm) ist zu erkennen (Abb.3), dass die Amplitude der zurückgestreuten Signale mit feinerer Auflösung abnimmt. Bei einer Auflösung von beispielsweise 2,5 mm liegt die zurückgestreute Amplitude 20% über der bei einer Auflösung von 0,5 mm. Die erhöhte Streuamplitude bei gröberer Auflösung kann eine mögliche Erklärung für die Auflösungsabhängigkeit der Resonanzfrequenz in diesem Falle sein. Auch bei der qualitativen Generierung von Noise sollte dieser Effekt berücksichtigt und ggf. über den Anteil der Gesteinskörnung angepasst werden. Der Effekt der Frequenzverschiebung muss ebenfalls berücksichtigt werden, wenn man Poren ins Medium einbringen möchte. Hier tritt dieser Effekt noch verstärkter auf, da man bei der Zugabe kleiner Poren bei sehr großen Wellenlängen die mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit und somit auch die Resonanzfrequenz zusätzlich um den Porenanteil verringert.

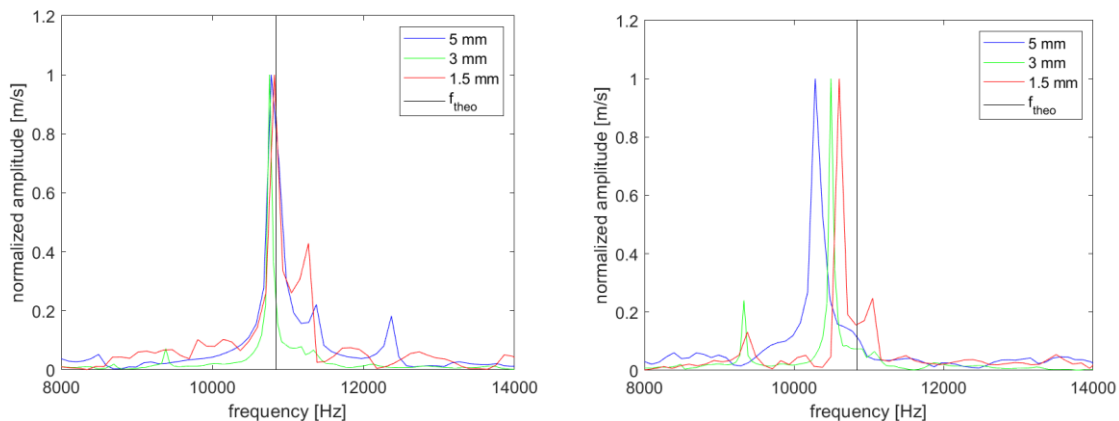


Abb. 2. Darstellung der Frequenzspektren einer Impakt Echo Simulation an einer 20 cm dicken Platte mit $c_p = 4519$ m/s, $c_s = 2712$ m/s und $\rho = 2294$ kg/m³ bei unterschiedlicher räumlicher Auflösung. Im linken Plot ist die Platte homogen, rechts befindet sich 53 vol. % Gesteinskörnung mit derselben Ausbreitungsgeschwindigkeit, aber einer variablen Dichte $\rho = 2294 \pm 1700$ kg/m³.

3. Nachsimulieren von Messdaten

Im nachfolgenden Kapitel wurden reale Impakt Echo Messungen an einem Probekörper des Florida Department of Transportation (FDOT) nachsimuliert, welcher in Abb.4 zu sehen ist.

Dieser ist 2,1 m breit, 1,5 m hoch und in verschiedene Segmente unterteilt, die eine Dicke zwischen 17 cm und 51 cm aufweisen. Eine Bewehrung ist in diesem Probekörper nicht vorhanden. Im Vorfeld der Messung wurden die P-Wellengeschwindigkeit auf $c_p = 4519$ m/s, sowie die S-Wellengeschwindigkeit auf $c_s = 2712$ m/s bestimmt. Die mittlere Dichte des Probekörpers beträgt 2293 kg/m^3 [10].

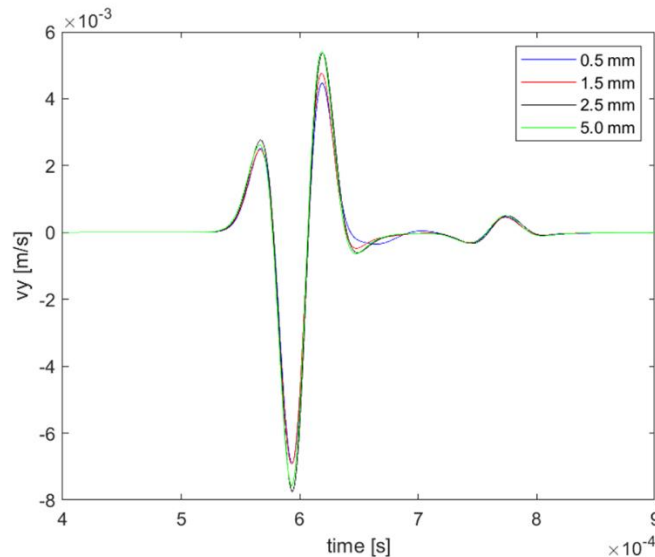


Abb. 3. Darstellung der Echosignale einer Streuung eines Impakt Echo Signals an dem im Beton vorherrschenden Größtkorn.

Tabelle 1. Simulationsparameter für den Test der Streuamplituden.

Medium	Dichte [kg/m ³]	P-Wellengeschwindigkeit [m/s]	S-Wellengeschwindigkeit [m/s]
Zylinder	3800	6000	4000
Umgebungsmaterial	2500	4000	2400
Geometrie	Frequenz [kHz]	Zylinderradius [mm]	Entfernung zum Streukörper [m]
	10	8	1

Um bei der Simulation Streuung zwischen der Zementmatrix und der Gesteinskörnung zu erzielen, müssen die jeweiligen Materialparameter angepasst werden. Da insbesondere die Ausbreitungsgeschwindigkeiten die Resonanzfrequenz kontrollieren, wurden für Zementmatrix und Gesteinskörnung dieselben, experimentell bestimmten Geschwindigkeiten angesetzt. Bei der Dichte wurde der Wert für die Zementmatrix auf 2293 kg/m^3 festgesetzt. Für die Gesteinskörnung wurde eine gleichverteilte Dichte zwischen 1294 kg/m^3 und 3294 kg/m^3 angesetzt, sodass im Mittel der experimentell ermittelte Wert erreicht wird. Der daraus resultierende maximale Reflexionskoeffizient liegt damit bei 0,27, was je nach verwendeter Gesteinskörnung ein realistischer Wert sein kann. Für die Größenverteilung der Gesteinskörnung wurde eine Sieblinie A/B mit einem Größtkorn von 16 mm gewählt. Um möglichst alle Geometrieeffekte mit zu berücksichtigen, die bei dieser Simulation auftreten, wird eine 3D-Simulation des gesamten Probekörpers durchgeführt. Die räumliche Auflösung betrug dabei 1,5 mm. Damit erhält man insgesamt $1406 \times 1006 \times 346$ (489 Mio.) Gitterzellen (mit den 3 äußersten Gitterzellen werden jeweils die freien Ränder simuliert). Die Rechnungen wurden allesamt auf einem High Performance Computer (HPC)

bei 160 gleichzeitig laufenden Prozessen durchgeführt. Da die Auflösung auf 1,5 mm gewählt wurde, wurden alle Poren jeweils nur über eine Gitterzelle erzeugt. Das Gesamtporenvolumen betrug bei den Simulationen 1 vol. %, während der Anteil an Gesteinskörnung bei 53 vol. % lag. Letzteres entspricht dem Anteil an räumlich auflösbarer Gesteinskörnung, wenn dessen Anteil bei 75 vol. % läge, was für Beton ein realistischer Wert ist. Als Anregungssignal wurde hier ein Gauß'sches Wavelet gewählt. Die Signalmittenfrequenz betrug für den ersten und dritten Messpunkt 5 kHz und für die anderen jeweils 8 kHz. Die Anregung und Signalaufnahme geschahen beide an der ebenen Rückseite des Probekörpers.

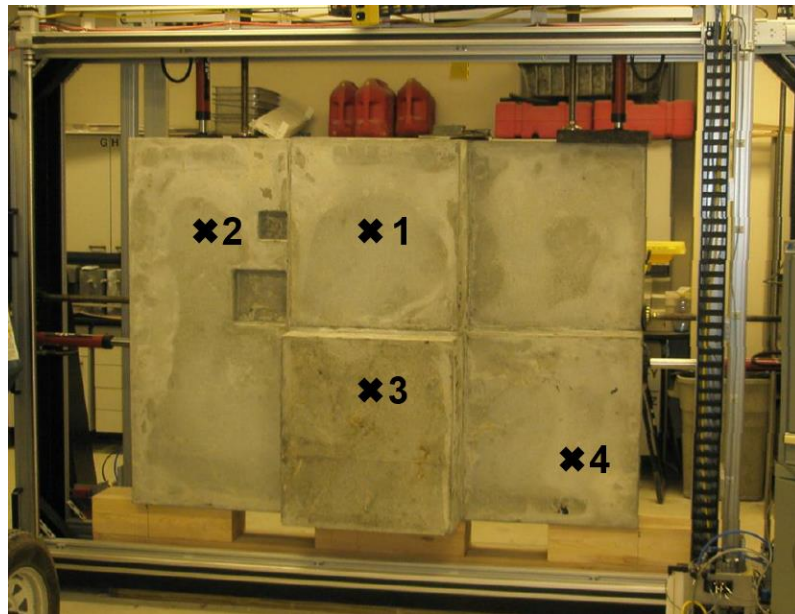


Abb. 4. Darstellung des Probekörpers, an dem die Messdaten erhoben wurden. Die Messpunkte zu den nachsimulierten Einzelmessungen sind mit schwarzen Kreuzen markiert. Adaptiert aus [10] übernommen.

Um die Simulations- und Messresultate besser miteinander vergleichen zu können, wird bei beiden Datensätzen die Oberflächenwelle entfernt. Anschließend wird ein 3 kHz Hochpassfilter angewendet, da insbesondere in den Messdaten eine tieffrequente Geräteresonanz zu erkennen ist. Zuletzt werden beide Datensätze noch mit einem Tukey-Fenster multipliziert um Artefakte bei der Fourier-Transformation zu vermeiden. Die prozessierten Simulations- und Messresultate sind für die in Abb.4 markierten Punkte in Abb.5 gemeinsam dargestellt. Zusätzlich wurde eine schwarze, vertikale Linie dort gezogen, wo man laut Gleichung 1 die Resonanzfrequenz erwarten würde. Es ist zu erkennen, dass für alle 4 überprüften Messpunkte die Resonanzfrequenzen, die am nächsten an dem theoretischen Wert liegen, in Messung und Simulation sehr gut miteinander übereinstimmen. Weiterhin stimmen auch mehrere kleinere Peaks überein, wie es beispielsweise für Messpunkt 3 bei 10,5 kHz der Fall ist. Hierbei ist davon auszugehen, dass es sich um durch Geometrieeffekte hervorgerufene Resonanzpeaks handelt, da das Streurauschen nur qualitativ betrachtet werden sollte. Auch ist auffällig, dass obwohl bei der Messung zum Teil eine Abweichung der Resonanzfrequenz vom theoretischen Wert um mehrere 100 Hz vorliegt (s. Messpunkt 1), die Resonanzfrequenz der Simulation mit der der Messung übereinstimmt. Hierin liegt der Mehrwert der Simulationen, da eine solche, durch die Geometrie hervorgerufene Frequenzverschiebung nicht durch die klassische Lambwellentheorie für Platten beschrieben werden kann. Der Fehler, der ansonsten bei der Bestimmung der Plattendicke gemacht werden würde, läge für Messpunkt 1 bei 5 cm (41,9

cm statt 36,9 cm). Alle tatsächlichen und errechneten Plattendicken sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Auch das Rauschniveau, in dem vom Wavelet abgedeckten Frequenzbereich (4 – 15 kHz) liegt auf einem Niveau, das dem echter Messungen sehr nahe kommt. Eine gewisse Übertragbarkeit zwischen Simulation und Messung ist daher gegeben. Für die Zukunft sind deshalb Simulationsreihen geplant, an denen die Detektionswahrscheinlichkeit (PoD) verschiedener Defektarten und -größen untersucht werden sollen.

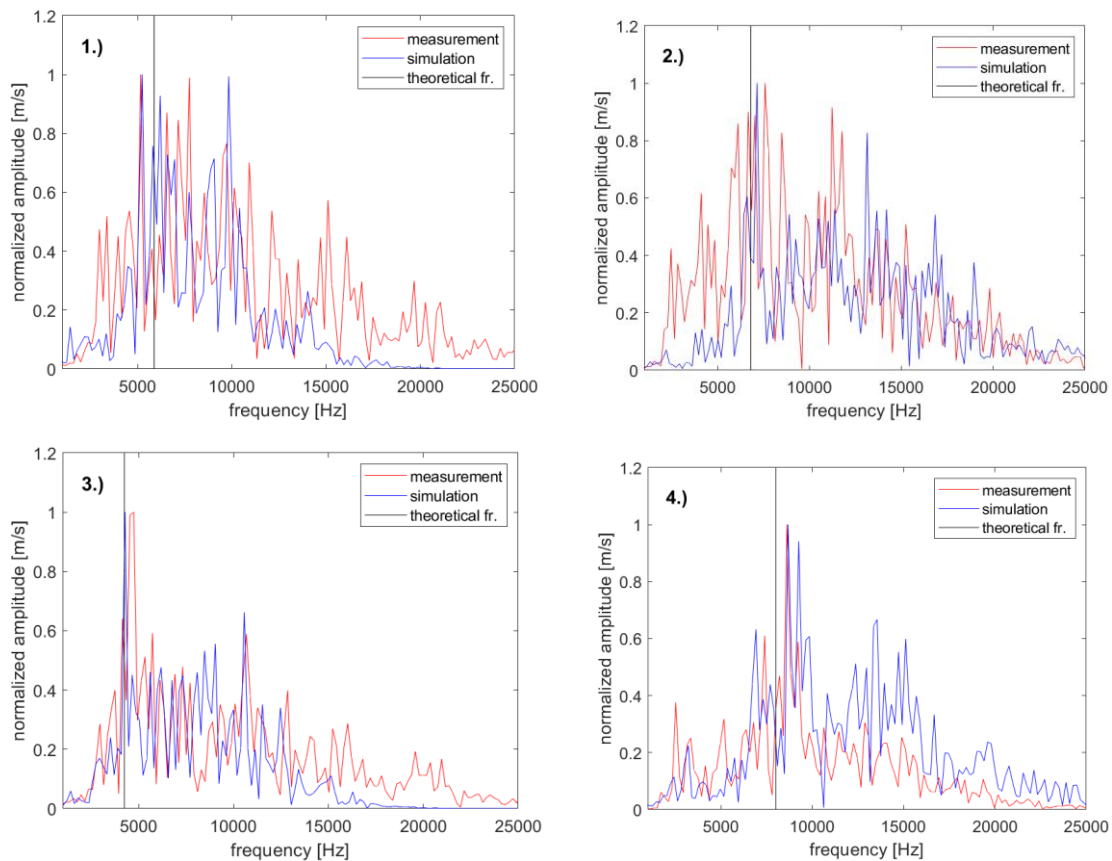


Abb. 5. Vergleich der Simulationsergebnisse (blau) mit den Messdaten (rot) an vier zufällig gewählten Messpunkten. Die zugehörigen Messpunkte sind in Abb. 4 eingezeichnet. Mit schwarz ist der über die experimentell bestimmte P-Wellengeschwindigkeit und die bekannte Dicke errechnete theoretische Wert für die Resonanzfrequenz eingezeichnet.

Tabelle 2. Tatsächliche Plattendicke und aus den Mess- und Simulationsdaten errechnete Plattendicke.

Messpunkt	Plattendicke	Aus Messwerten errechnete Dicke	Aus Simulationsdaten errechnete Dicke
1	36,9 cm	41,9 cm	41,3 cm
2	31,9 cm	28,6 cm	30,3 cm
3	51,0 cm	45,7 cm	50,6 cm
4	27,1 cm	25,1 cm	24,9 cm

4. Zusammenfassung

Es wurden die für die Simulation von Impakt Echo Messungen in Beton relevanten Einflussfaktoren identifiziert und systematisch untersucht. Dabei wurde aufgezeigt, dass numerische Simulationen in der Lage sind, auch komplexe Geometrieeffekte realitätsnah abzubilden, sodass sich auch geometriebedingte Frequenzverschiebungen damit nachvollziehen lassen können. In diesem Sinne können numerische Simulationen für die Inspektion von Strukturen mit bekannten Abmessungen einen zusätzlichen Mehrwert bieten. Für die Zukunft sind deshalb Studien zur Untersuchung der Detektionswahrscheinlichkeit mithilfe der EFIT-Simulationen geplant.

Referenzen

- [1] D. Kanzler, V. K. Rentala, M. Bertovic, V. Tkachenko, T. Heckel, J. Given, S. Keßler, F. Dethof, A. Jüngert und J. Vrana, „Lasst uns mal POD standardisieren!“, in *DGZfP Jahrestagung*, Kassel, 2022.
- [2] P. Fellinger, R. Markein, K. Langenberg und S. Klaholz, „Numerical modeling of elastic wave propagation and scattering with EFIT—elastodynamic finite integration technique“, *Wave motion*, Nr. 21(1), pp. 47-66, 1995.
- [3] F. Schubert und B. Köhler, „Three-dimensional time domain modeling of ultrasonic wave propagation in concrete in explicit consideration of aggregates and porosity“, *Journal of computational acoustics*, Nr. 9(04), pp. 1543-1560, 2001.
- [4] F. Schubert und B. Köhler, „Ten lectures on impact-echo“, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Nr. 27(1), pp. 5-21, 2008.
- [5] K. Nakahata, G. Kawamura, T. Yano und S. Hirose, „Three-dimensional numerical modeling of ultrasonic wave propagation in concrete and its experimental validation“, *Construction and Building Materials*, Nr. 78, pp. 217-223, 2015.
- [6] F. Schubert und B. Köhler, „Numerical time-domain simulation of diffusive ultrasound in concrete“, *Ultrasonics*, Nr. 42(1-9), pp. 781-786, 2004.
- [7] W. Goldsmith, *Impact: the theory and physical behavior of colliding*, E. Arnold, 1960.
- [8] H. Chai, K. Liu, A. Behnia, K. Yoshikazu und T. Shiotani, „Development of a tomography technique for assessment of the material condition of concrete using optimized elastic wave parameters“, *Materials*, Nr. 9(4), p. 291, 2016.
- [9] D. Komatitsch und R. Martin, „An unsplit convolutional perfectly matched layer improved at grazing incidence for the seismic wave equation“, *Geophysics*, Nr. 72(5), pp. SM155-SM167, 2007.
- [10] D. Hiltunen, D. Algernon und Ferraro, „Validation of nondestructive testing equipment for concrete“, University of Florida, 2010.