

Diffusion von Ultraschallwellen durch Beton während monoton steigender Druckversuche

Raúl Beltrán¹, Steffen Marx²

¹ *Institut für Massivbau, Leibniz Universität Hannover, E-Mail: beltran@ifma.uni-hannover.de*

² *Institut für Massivbau, Technische Universität Dresden, E-Mail: Steffen.Marx1@tu-dresden.de*

Einleitung

Beton ist ein sehr heterogenes Verbundmaterial, das sich aus einer Zementmatrix, Zuschlägen und Lufteinschlüssen zusammensetzt. Demzufolge ergibt sich während der Ausbreitung von Ultraschallwellen in Beton eine komplexe Mehrfachstreuung. Die Wahl eines geeigneten Ansatzes zur Beschreibung der Mehrfachstreuung hängt vom Verhältnis zwischen der mittleren Größe der heterogenen Partikeln R und der Wellenlänge λ . Dieses Verhältnis wird als mittlere freie Weglänge L bezeichnet. Im Fall eines Maßstabs mit einer Abmessung größer als die mittlere freie Weglänge und zahlreichen Poren und Zuschlägen ist es zu erwarten, dass die Welle stark randomisiert wird. Als Ergebnis kann aus der Ausbreitung elastischer Spannungswellen in Beton ein diffuser frequenzabhängiger Energietransport entstehen. Dieser diffuse Energietransport ähnelt sich an die klassische brownische Molekularbewegung [1]. Allerdings ist die Beschreibung des Energietransportes elastischer Wellen in Festkörpern mit einer Diffusionsgleichung unter Umständen nicht konkret genug, weil in der Gleichung davon ausgegangen wird, dass die Wellen Ihre Phaseninformationen komplett verloren haben. Diese Annahme trifft aufgrund der kohärenten Rückstreuung nicht ganz zu, weil eine mehrfach gestreute Welle die Lösung einer Wellengleichung ist [2]. Die Messung der Rückstreuung kann wie in der Festkörperphysik verwendet werden, um Information über die Eigenschaften des Ausbreitungsmediums zu gewinnen. Allerdings ist die Messung der Rückstreuung insbesondere bei stark dispersiven Materialien wie Beton nicht immer praktikabel. Die Anwendung von Messungen von mehrfachgestreuten diffusen Ultraschallwellen wurde bereits zur Bestimmung der Eigenschaften bei Materialien, die eine komplexe Mikrostruktur besitzen, eingesetzt [3].

Bei einem Betonprobekörper unter Einwirkung mechanischer Lasten konzentrieren sich zuerst die Spannungen in der Umgebung von Materialdefekten oder Grenzflächen in der Mikroskala und zerstören die Bindungen zwischen einzelnen Molekülen in der Gitterstruktur des Materials. Bei zunehmender mechanischer Last wachsen und vereinen sich die Mikrorisse, welches zur Entstehung von Makrorissen führt. Während dieses Prozesses wird die Gitterstruktur des Stoffes, die als Ausbreitungsmedium für die Spannungswellen eines Ultraschallimpulses dient, fortschreitend geändert. Die These dieser Arbeit ist die fortschreitende Veränderung des Ausbreitungsmediums, die auf eine Materialschädigung hindeutet. Diese sollen mit den Modellparametern der diffusen Ausbreitung von Ultraschallwellen beschrieben werden. Ziel der vorliegenden Untersuchung ist die Überwachung der Schädigung des Betons mithilfe der

Veränderung der Modellparameter der eindimensionalen Diffusionsgleichung, um die zugrunde liegende Physik des Schädigungsvorgangs in Beton zu erforschen und auf diese Weise eine innovative Methode zur zerstörungsfreien Prüfung von Betonbauwerken zu erschließen. Die Herausforderung bei der Überwachung von Betontragwerke mit Ultraschall besteht darin, die Schädigung der Mikrostruktur des Betons unter Belastung zu detektieren, bevor es Risse an der Oberfläche entstehen. Jedoch ist die Interpretation der Ergebnisse aus einer Ultraschallmessung nicht trivial, da der Beton eine komplexe Mehrfachstreuung der Ultraschallwellen aufweist.

Die Zustandsbewertung von Betonbauwerken mittels zerstörungsfreier Prüfung und die Überwachung von Degradationsprozessen in Betonbauteilen werden im Bauwesen zunehmend angewendet, um die Entwicklung der Schädigung im Bauwerk zu bestimmen. Für die Messtechnische Erfassung der Schädigung im Beton wurde in der jüngeren Vergangenheit beispielsweise neben der Entwicklung der Gruppengeschwindigkeit bei der Ausbreitung von Ultraschallwellen [4,5], auch die Dissipationsenergie [6] verwendet. Weitere zerstörungsfreie Prüfmethode wurden bereits eingesetzt um den Schädigungszustand vom Beton zu bestimmen wie beispielsweise Wellenspektroskopie [7], Schwingungsmethoden [8] sowie nichtlineare akustischen Methoden [9].

Die Anwendung der Diffusionsparameter zur Charakterisierung des Ausbreitungsverhalten im Beton bietet den Vorteil, im Vergleich zu den o.g. Methoden, eindeutige Information über die Veränderung der Mikrostruktur des Materials während der fortlaufenden Schädigung zu liefern. Außerdem ist es unter Anwendung der Diffusionstheorie bei einer Messreihe möglich, die Entwicklung der Schädigung im Beton in mehreren Skalen zu analysieren, je nachdem welche Frequenz und Wellenlänge für die Auswertung berücksichtigt wird. Außerdem können auch Frequenzbereiche, die von Störgeräuschen wie Betriebs- und Umwelteinflüsse, außer Betracht gelassen werden. In diesem Beitrag wird der Zusammenhang zwischen der Veränderung der Modellparameter, der Diffusionsgleichung und die zunehmende Schädigung eines Betonprobekörpers analysiert.

Die Erforschung akustischer diffusen Wellen hat bereits eine lange Geschichte, die mit den Arbeiten über die Diffusion von Wallace Clement Sabine angefangen haben [10]. Sein innovativer Ansatz bestand darin, den Klang in einem Saal als einen diffusen Energiekörper, statt des klassischen geometrischen Ansatzes für die Ausbreitung akustischer Wellen zu betrachten. Die Anwendung der Theorie der diffusen Felder von der Ausbreitung von Ultraschallwellen

in Festkörper hat Ende der 70er Jahre angefangen und erforderte sowohl theoretische als auch experimentelle Arbeiten. Die Ergebnisse der Arbeiten von Egle, Weaver und Guo [11-14] zeigten, dass ein diffuses Ultraschallfeld über seine spektrale Energieverteilung in Abhängigkeit der Frequenz, Raum und Phasenraum charakterisiert werden kann. Diese Ideen bilden die Grundlage der komplexen Theorie des Strahlungstransportes. In der daraus abgeleiteten Theorie des Diffusen Transports wird das Konzept der spezifischen Intensität als die Verteilung der Intensität je nach Richtung, Mode und Position während der Streuung [15] definiert. Später wurde mathematisch nachgewiesen, dass die Korrelation diffuser Wellenfelder wie beispielsweise aus einer Ultraschallmessung, grundsätzlich Green'sche Funktionen der Wellengleichung zugleich sind [16]. Bei dem Extremfall, dass die Intensität des Energieflusses sich langsam im Raum in einem Maßstab der mittleren freien Weglänge verändert, kann man die komplizierte Gleichung der Theorie des Strahlungstransports in die einfache Diffusionsgleichung vereinfacht darstellen. Forscher wie Weaver [3,] und Turner [17] haben so die Diffusionsgleichung für den Fall der Ausbreitung elastischer Wellen in Festkörper mit Mikrostruktur adaptiert, worauf die vorliegende Untersuchung basiert. Dieser Ansatz ist eine vielversprechende Methode zur Charakterisierung der Materialeigenschaften und wurde bereits an stationären unbelasteten Beton angewendet [18-20]. In diesem Aufsatz werden die diffusen Felder einer Ultraschallmessung eingesetzt, um die Schädigung des Betons unter Druckbeanspruchung zu charakterisieren. Zu diesem Zweck wird nach dem Ansatz der Theorie des Diffusen Transportes eine Gleichung angewendet, die für die Ausbreitung von Ultraschallwellen durch Festkörper mit Mikrostruktur angepasst wurde [3].

$$D\nabla^2\langle E(x, y, z, t) \rangle - \frac{\partial}{\partial x}\langle E(x, y, z, t) \rangle - \sigma\langle E(x, y, z, t) \rangle = -f(x, y, z, t) \quad (1)$$

In dieser Gleichung repräsentiert D und die σ jeweils die Diffusität- und die Dissipationskoeffizienten, $\langle E(x, y, z, t) \rangle$ und $f(x, y, z, t)$ repräsentieren die mittlere Dichte der Ultraschallenergie und die äußere Energiequelle am Ursprung. Die Koordinaten des dreidimensionalen kartesischen Systems werden als (x, y, z) bezeichnet und t ist die Zeit. Die Lösung der Gleichung (1) ist

$$\langle E(x, y, z, t) \rangle = \frac{E_0}{8(D\pi t)^{3/2}} \exp\left(-\frac{d^2}{4Dt} - \sigma t\right) \quad (2)$$

Diese Gleichung kann in einer logarithmischen Form ausgedrückt werden:

$$\ln\langle E(x, y, z, t) \rangle = A - \frac{3}{2} \ln Dt - \sigma t \quad (3)$$

Wobei A ist eine Konstante, die mit der anfänglichen Energiefluss verknüpft ist. Die Diffusität D kann als eine Funktion der Schallgeschwindigkeit c und der mittleren freien Weglänge L ausgedrückt werden.

$$D = \frac{cL}{3} \quad (4)$$

Die Größe $\frac{d^2}{4D}$ stellt die frequenzabhängige Diffusität dar und ist eine Eigenschaft der Mikrostruktur des Materials. Die Dissipation σ beschreibt den experimentellen Abfall der Energie zu späteren Zeiten. Sie charakterisiert die viskoelastischen Eigenschaften des Materials und ist mit der spezifischen Absorption der Energie im Probekörper verknüpft. Es ist zu erwarten, dass die Schädigung des Betons die Werte der Diffusität und Dissipation verändert.

Experimentelle Untersuchungen

Für diese Untersuchungen wurden Betonprobekörper Durchmesser 100mm und Höhe 300mm aus hochfestem Beton C120 getestet (s. Abbildung 1).

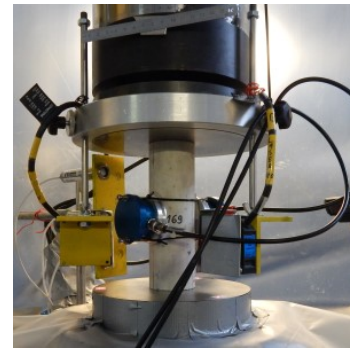


Abbildung 1: Betonprobekörper mit Ultraschallsensoren bei einem monotonsteigenden Druckversuch

Bei laufendem Druckversuch werden Ultraschallmessungen jede Sekunde durchgeführt, um die Schädigungsprozesse im Beton zu erfassen. Die Transmissionsmessung erfolgt mit zwei breitbandigen Ultraschallwandler UP-250 (Mittelfrequenz 230 kHz). Es wurden ca. 200 Messungen während eines Druckversuchs aufgezeichnet. Auf der Abbildung 2 wird ein Ultraschallsignal bei unbelastetem Probekörper dargestellt. Im Laufe des Versuchs wird sich dieses Signal fortlaufend verändert, worauf auf die Schädigung der Betonstruktur schließen kann.

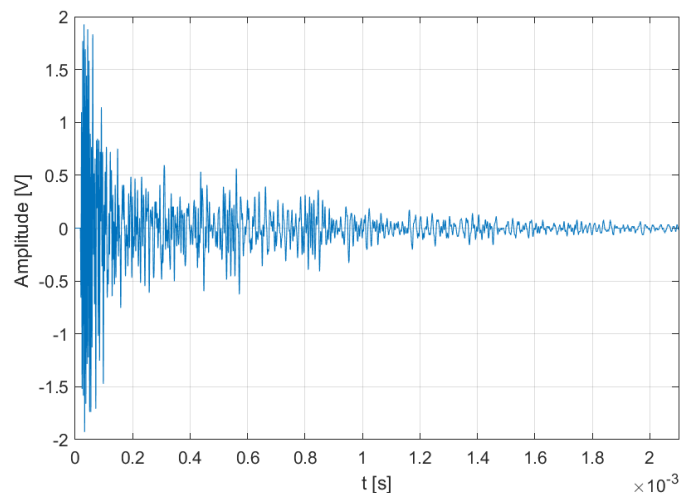


Abbildung 2: Signal im Zeitbereich einer Ultraschallmessung Abtastarate = 4,8 MHz

Für die Auswertung der Energiedichte nach der Diffusionstheorie wurde das Signal in 100 Intervalle unterteilt. In jedem Bereich wird eine Fast Fourier Transformation (FFT) durchgeführt. Um die scharfen Übergänge an den Grenzbereiche der Intervalle zu vermeiden, wird die Fensterfunktion von Hanning angewendet. Das Integral über jedem Fenster ergibt einen Wert, der proportional zur Energiedichte des Intervalls ist. Dieser Wert wird in der Darstellung in Zusammenhang mit der Mittenfrequenz des Intervalls dargestellt (Abbildung 3).

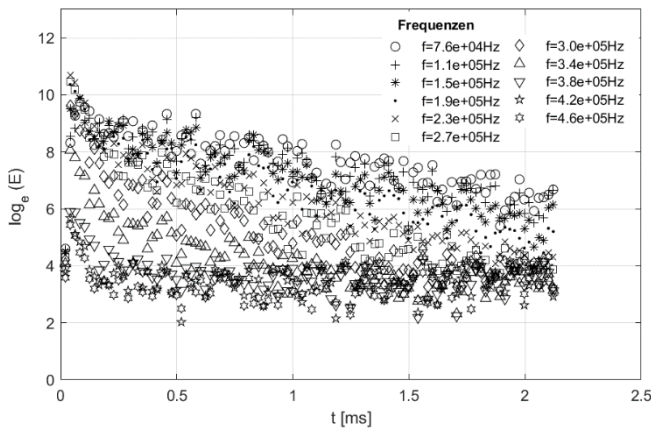


Abbildung 3: Spektrale Energiedichte für verschiedene Frequenzintervallen

Aus der Analyse der Frequenzen wird beispielhaft die Entwicklung der Energiedichte mit der Zeit innerhalb einer Messung für ein Frequenzintervall [130-170] kHz mit einer Mittenfrequenz von 150 kHz in der Abbildung 4 dargestellt. Der Energiedichte $\langle E \rangle$ ist nun statisch repräsentativ, da die Wellenausbreitung in einem heterogenen Körper als ein stochastischer Prozess bezeichnet werden kann. Die Varianz der Berechneten Energiedichte kann mithilfe einer Frequenzanalyse berechnet werden. Die Varianz wird wie folgt definiert. [21]

$$\text{Var} \langle E \rangle = 1/(\Delta f \cdot \Delta t)^{1/2} \quad (5)$$

Für den Fall einer Ultraschallmessung ist $\Delta f = 160$ kHz und $\Delta t = 200 \cdot \frac{1}{4,8 \cdot 10^6} = 4,17 \cdot 10^{-5}$ s. So ergibt die Varianz $\text{Var} \langle E \rangle = 0,39$

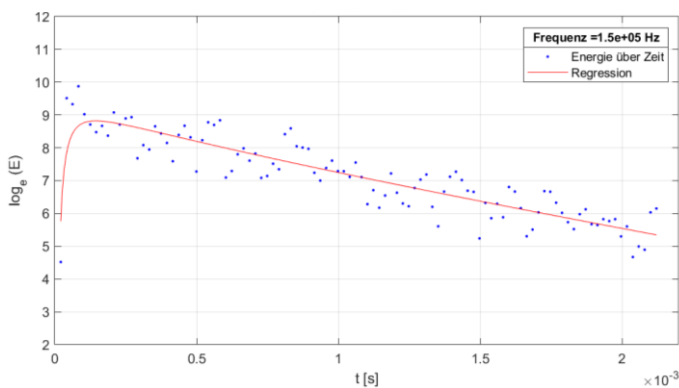


Abbildung 4: nichtlineare Kurvenanpassungen zur Diffusionsgleichung

Für die Daten der Verteilung der Energiedichte wird eine nichtlineare Kurvenanpassung mit der Methode der kleinsten

Quadrate an den Datensatz durchgeführt. Die Parameter, die die Regression bestimmen, sind die schon erwähnten A , D und σ .

In der Abbildung 5 und 6 ist die Entwicklung der Diffusität und der Dissipation über die Versuchsdauer dargestellt.

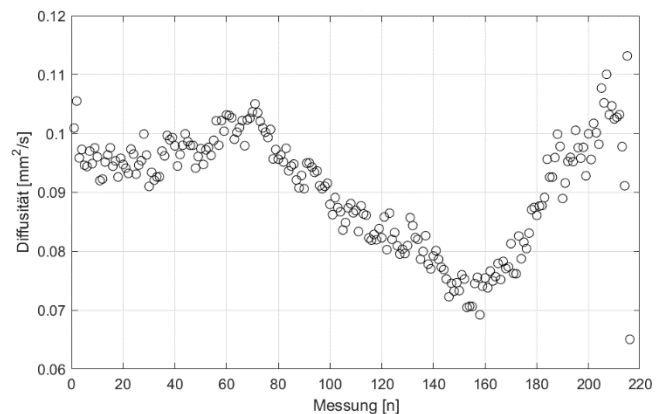


Abbildung 5: Diffusität $\frac{d^2}{4D}$

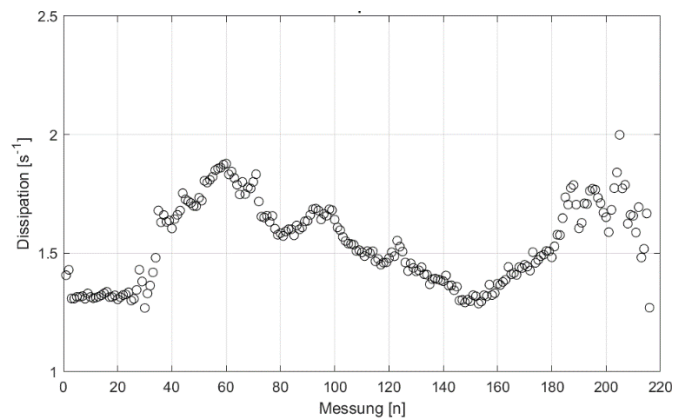


Abbildung 6: Dissipation σ .

Ergebnisse

In der vorliegenden Untersuchung wurde der Einfluss der Schädigung auf die Ausbreitung der Energie von Ultraschallwellen in Beton untersucht. Die Analyse der Ergebnisse gibt Hinweise über die Entwicklung der Schädigung in Beton. Es ist zu erwarten, dass mit zunehmender Schädigung der Modellparameter D abnimmt. Das bedeutet, dass die Energie aufgrund der Schädigung der Mikrostruktur einen schweren und mühevollen Weg zwischen Sender und Empfänger zurückzulegen hat. In einer ersten Phase bis $n=60$ nimmt jedoch der Modellparameter D zu, was auf eine Verfestigung des Betons hindeutet. Ab ca. $n=150$ wird bereits das Versagen der Probekörper mit der Abnahme der Modellparameter D angekündigt. Dissipation σ stellt die Energieverluste im Probekörper dar und ist nach den Untersuchungen von Becker et al. [22] eher mit den viskoelastischen Eigenschaften der Zementpaste als mit der Qualität der Bindung zwischen Zementpaste und Gesteinskörner verknüpft. Untersuchungen der Veränderung der Dissipation unterlaufender Belastung sind bisher unbekannt. Am Anfang des Versuches steigen die Energieverluste an und danach gehen wieder runter, was auf eine Verfestigung und nachfolgende Entfestigung des Materials hindeutet. Ab ca. 70% der Bruchlast nimmt die

Dissipation bis zum Bruch wieder zu. Diese Beobachtung stimmt mit der allgemeinen anerkannten Annahme über das zunehmende nichtlineare Verhalten des Betons ab 60-80% der Bruchlast überein.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Charakterisierung des Schädigungsvorgangs bei einem Betonprobekörper unter monotonsteigender Last wurde anhand der Entwicklung der Modellparameter der Diffusionsgleichung realisiert. Die Veränderung der Diffusivität und der Dissipation beschreibt quantitativ die fortlaufende Strukturschädigung des Betons. Dank der theoretischen Grundlagen der Theorie der diffusen Wellenfelder sowie die Streuungstheorien und vorhanden experimentelle Untersuchungen, war es möglich detaillierte Einblicke in die Schädigungsprozesse im Beton zu bekommen und die Entwicklung der Schädigung in unterschiedlichen Ebenen der Betonstruktur separat zu analysieren.

Literatur

- [1] Mehrer, H. (Hg.) (2007): *Diffusion in Solids.*: Springer Berlin Heidelberg.
- [2] Sheng, P. (2006): *Introduction to Wave Scattering, Localization and Mesoscopic Phenomena.* 2. Aufl. Springer-Verlag.
- [3] Weaver, R. (1998): Ultrasonics in an aluminum foam. In: *Ultrasonics* 36 (1), S. 435–442.
- [4] von der Haar, C.; Marx, S.; Krompholz, R. (2015): Ultraschalluntersuchungen an statisch beanspruchten Betonproben. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 110 (11), S. 759–766.
- [5] Thiele, M.: (2015) Experimentelle Untersuchung und Analyse der Schädigungsevolution in Beton unter hochzyklischen Ermüdungsbeanspruchungen. Dissertation. Technische Universität Berlin. Fakultät VI - Planen Bauen Umwelt.
- [6] Bode, M.; Marx, S.; Vogel, A.; Völker, C. (2019): Dissipationsenergie bei Ermüdungsversuchen an Betonprobekörpern. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 114 (8), S. 548–556.
- [7] van den Abeele, K. E-A.; Sutin, A.; Carmeliet, J.; Johnson, P. A. (2001): Micro-damage diagnostics using nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS). In: *NDT & E International* 34 (4), S. 239–248.
- [8] van den Abeele, K. E-A; Visscher, J. de (2000): Damage assessment in reinforced concrete using spectral and temporal nonlinear vibration techniques. In: *Cement and Concrete Research* 30 (9), S. 1453–1464.
- [9] Zaitsev, V. Y. (2019): Nonlinear acoustics in studies of structural features of materials. In: *MRS Bulletin* 44 (5), S. 350–360.
- [10] Sabine, W. C. (1923): *Collected Papers on acoustics.* Cambridge: Harvard Univ. Press. Online verfügbar bei der Max Planck Institute for the History of Science: <https://acoustics.mpiwg-berlin.mpg.de/text/collected-papers-acoustics>
- [11] Egle, D. M. (1981): Diffuse wave fields in solid media. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 70 (2), S. 476–480.
- [12] Weaver, R. L. (1982): On diffuse waves in solid media. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 71 (6), S. 1608–1609.
- [13] Guo, C. B.; Höller, P.; Goebbels, K. (1985): Scattering of Ultrasonic Waves in Anisotropic Polycrystalline Metals. In: *Acta Acustica united with Acustica* 59 (2), S. 112–120.
- [14] Weaver, R. L. (1990): Diffusivity of ultrasound in polycrystals. In: *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 38 (1), S. 55–86.
- [15] Weaver, R. L.; Lobkis, O. I. (2006): Diffuse fields in ultrasonics and seismology. In: *GEOPHYSICS* 71 (4), SI5-SI9.
- [16] Weaver, R. L. (2008): Ward identities and the retrieval of Green's functions in the correlations of a diffuse field. In: *Wave Motion* 45 (5), S. 596–604.
- [17] Turner, J. A.; Weaver, R. L. (1994): Radiative transfer and multiple scattering of diffuse ultrasound in polycrystalline media. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 96 (6), S. 3675–3683.
- [18] Anugonda, P.; Wiehn, J. S.; Turner, J. A. (2001): Diffusion of ultrasound in concrete. In: *Ultrasonics* 39 (6), S. 429–435.
- [19] Quiviger, A.; Payan, C.; Chaix, J.-F.; Garnier, V.; Salin, J. (2012): Effect of the presence and size of a real macro-crack on diffuse ultrasound in concrete. In: *NDT & E International* 45 (1), S. 128–132.
- [20] Ahn, E.; Shin, M.; Popovics, J. S.; Weaver, R. L. (2019): Effectiveness of diffuse ultrasound for evaluation of micro-cracking damage in concrete. In: *Cement and Concrete Research* 124, S. 105862.
- [21] Bendat, J. S.; Piersol, A. G. (2010): *Random data. Analysis and measurement procedures.* Fourth edition. Hoboken, New Jersey: Wiley a John Wiley & Sons Inc (Wiley series in probability and statistics).
- [22] Becker, J. J., Laurence J.; Qu, J. (2003): Characterization of Cement-Based Materials Using Diffuse Ultrasound. In: *Journal of Engineering Mechanics* 129 (12), S. 1478–1484.