

Grundlagenuntersuchungen von Ultraschall-Sensoren in Beton

Julia WOLF*, Frank MIELENTZ*, Boris MILMANN*, Herbert WIGGENHAUSER*
* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

Kurzfassung. Für Ultraschallmessungen in Betonbauteilen wurden neuartige radialsymmetrisch abstrahlende Longitudinalwellenprüfköpfe mit einer Mittenfrequenz von 60 kHz auf deren Eignung hinsichtlich Abstrahlcharakteristik, Empfindlichkeit und Frequenzspektrum untersucht.

Für die Messung der Abstrahlcharakteristiken wurden die Prüfköpfe vertikal und horizontal in Betonzylinder eingebettet und die Richtungsabhängigkeiten der Schallschnelle mithilfe eines Laservibrometers gemessen.

Die Streuung der Prüfkopfempfindlichkeit wurde im Wasserbad unter Verwendung verschiedener Köpfe gleicher Bauart bestimmt. Außer Änderungen der Signalamplituden zeigten sich auch Schwankungen im Frequenzbereich bei verschiedenen Sender-Empfängerkombinationen.

Die Schallschwächung des Betons hat Einfluss auf die erreichbare Auflösung der Messungen und damit auf die maximal möglichen Senderabstände im Bauteil. Durch experimentelle Untersuchungen und Simulationen erfolgte eine Optimierung der Abstände hinsichtlich des Aufwandes und der geforderten Auflösung. Die Signalschwächung im Beton wurde mit verschiedenen Impulsen im Frequenzbereich von 50 kHz bis 100 kHz in Abhängigkeit verschiedener Bewehrungsgrade und Korngrößen ermittelt. Hierfür wurden die Sensoren in unterschiedlichen Abständen in die Probekörper einbetoniert und die Empfangssignale hinsichtlich Amplitudenabfall und Frequenzspektrum untersucht.

Einführung

Die Bauwerksuntersuchung mit Ultraschallwellen ist seit Jahren eine anerkannte Methode in der ZfP. Es gibt aber immer wieder Probleme mit dem Einsatz der Technik an schlecht zugänglichen Oberflächen oder Betonelementen mit z.B. Verkleidungen. Hierfür bieten sich Sensoren an, die vor dem Bau eines Betonelements in dieses eingebettet werden und so auch für eine dauerhafte Überwachung verwendet werden können. Für diese Anwendung wurden die hier vorgestellten Sensoren entwickelt. Die Experimente zur Prüfung ihrer Eignung für den Einbau und für die dauerhafte Überwachung werden auf den nächsten Seiten beschrieben.

1. Sensoren

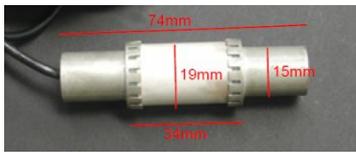


Abbildung 1 Ultraschallsensor der Firma Acsys.

1.1 Eigenfrequenz

Um die *Eigenfrequenz* der Ultraschallsensoren (Abbildung 1) zu bestimmen, wurden zehn verschiedene Sensoren gleicher Bauart in verschiedenen Sender-Empfänger-Kombinationen in ein Wasserbad gehängt. An den als Sender wirkender Sensor wurde ein Sendeimpuls von 10 V mit einer Impulsbreite von $2 \mu\text{s}$ angelegt. Der Sensor sendet Longitudinalwellen. Die Impulsbreite wurde so klein wie möglich gewählt, als Annäherung an einen Dirac-Impuls, um ein möglichst breites Frequenzspektrum zu erzeugen. Der Dirac-Impuls führt dazu, dass der Sender zu freien Schwingungen in seiner Eigenfrequenz angeregt wird [1]. Die Impulsantwort des Sensors wurde 48 cm entfernt von dem zweiten Sensor aufgenommen. Die Abbildung 2 zeigt die Impulsantwort und dessen Frequenzbereich. Im Mittel zeigten alle zehn Sensoren eine Spannungsspitze bei $63 \pm 9 \text{ kHz}$ und Amplituden von $801 \text{ mV} \pm 110 \text{ mV}$.

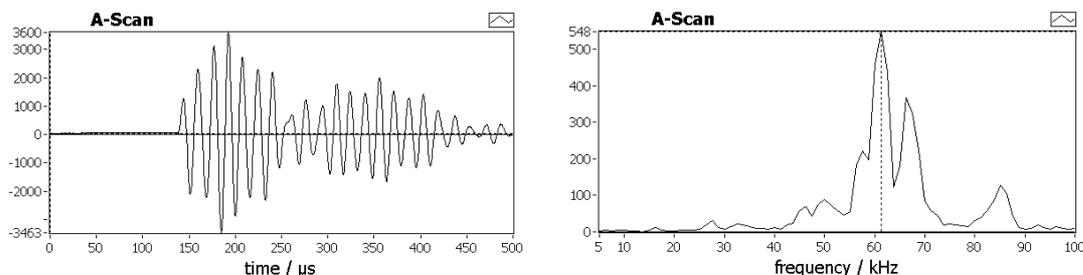


Abbildung 2 Impulsantwort des Senders aufgenommen von einem zweiten Sensor 48 cm entfernt, sowie dessen Frequenzspektrum mit einer Amplitudenspitze bei 64 kHz.

1.2 Abstrahlcharakteristik

Da die Sensoren in mehreren Ebenen in ein Bauwerk eingebaut werden sollen, muss deren *Abstrahlcharakteristik* bestimmt werden, um zu wissen, ob der Bereich um den Sensor herum unterschiedlich stark durchschallt wird. Für die Charakterisierung der Abstrahlung wurden zwei zylinderförmige Betonprobekörper mit einem Größtkorn von 16 mm gebaut mit jeweils einem Sensor in der Mitte, ausgerichtet einmal senkrecht und einmal waagrecht zur Messebene. Gemessen wurde nach dem Aushärten des Probekörpers. Die Sensoren wurden mit einem Rechtecksignal mit einer Mittenfrequenz von 60 kHz angeregt. Mit einem Laservibrometer wurde die Oberflächenbewegung auf Höhe des Sensors in Schritten von 10° gemessen. Der Abstand zwischen der Oberfläche des Probekörpers und dem Laser blieb dabei konstant. Die Ergebnisse wurden in Kreisdiagrammen (Abbildung 3) dargestellt. Im rot gestrichelten Bereich konnten aufgrund des Sensorkabels keine Schallfeldamplituden aufgenommen werden.

Die eingebetteten Sensoren haben bei der Abstrahlung keine bevorzugte Richtung.

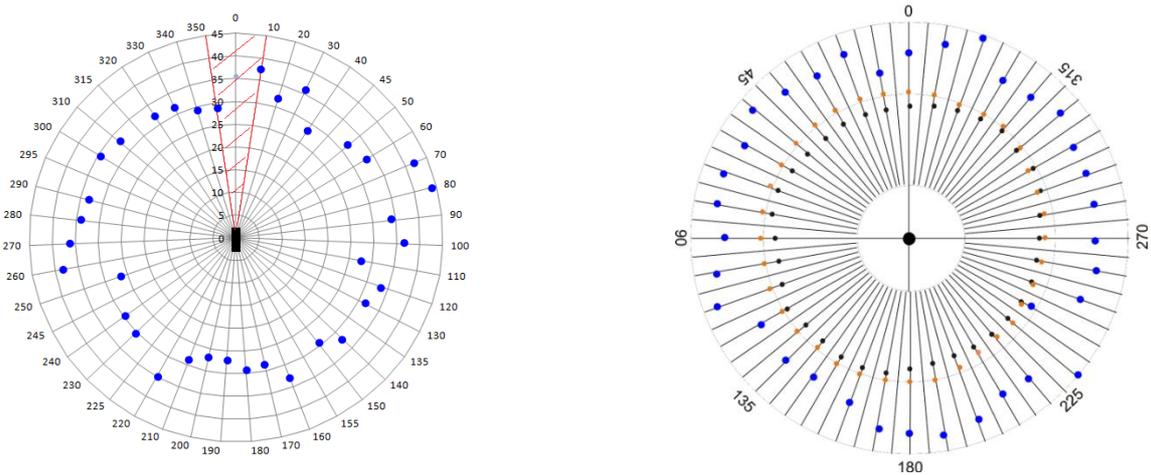


Abbildung 3 Verhältnis zwischen Schallfeldamplituden und dem Abstrahlwinkel in Grad für die horizontale (links) und die vertikale (rechts) Ausrichtung des Sensors zur Messebene, jeweils für die Medien Beton (blau), Luft (schwarz) und Wasser (orange).

2. Schwächung

Um eine bestmögliche Abdeckung des Untersuchungsobjektes durch Sensoren zu ermöglichen, muss neben der Abstrahlcharakteristik auch die Reichweite der Sensoren bestimmt werden.

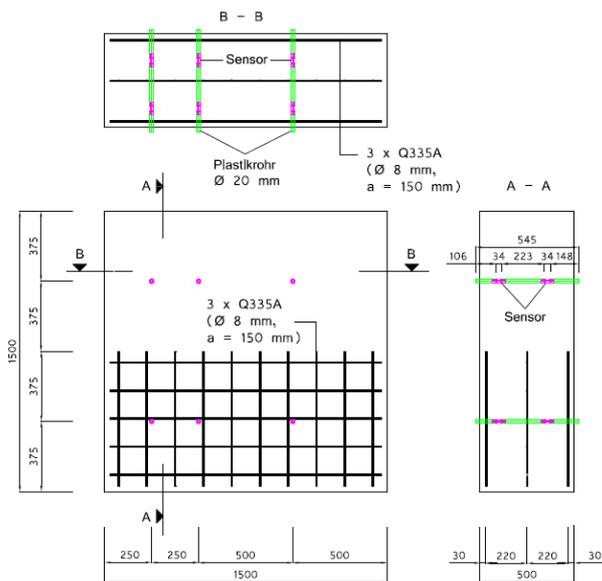


Abbildung 4 Technische Zeichnung der Probekörper. Die Probekörper unterscheiden sich durch die Zuschlagsgröße des Betons.

Um die Schwächung zu bestimmen wurden zwei Betonprobekörper mit 16 mm Größtkorn (UN16) und 32 mm Größtkorn (UN32) gefertigt. In jeweils dem bewehrten und unbewehrten Bereich wurden Sensoren mit unterschiedlichen Abständen zueinander mit eingegossen. Die Abbildung 4 zeigt eine technische Zeichnung der Probekörper. Die Probekörper sind $1,5 \cdot 1,5 \cdot 0,5 \text{ m}^3$ (Höhe, Länge, Tiefe) groß. In der unteren Hälfte befinden sich drei Bewehrungsmatten mit einem Maschenabstand von 150 mm und einem Bewehrungsstabdurchmesser von 8 mm. In 375 mm Höhe und 1125 mm Höhe befinden sich jeweils sechs Sensoren. Immer zwei Sensoren liegen sich im Abstand von 223 mm in der Tiefe gegenüber, sie sind miteinander und mit der Außenwand durch Kunststoffrohre als Halterung verbunden.

Auf gleicher Höhe und Tiefe liegen die Sensoren 250 mm und 500 mm auseinander.

Um die *Schwächung* der Signale in Abhängigkeit von der Bewehrung, der Zuschlagsgröße und der Signalfrequenz zu bestimmen, wurden wiederholt Messungen an den Probekörpern mit unterschiedlichen Signalen im bewehrten und unbewehrten Bereich durchgeführt. Die in Abbildung 5 gezeigten Signale regten den Sender mit Mittenfrequenzen zwischen 50 kHz und 100 kHz an.

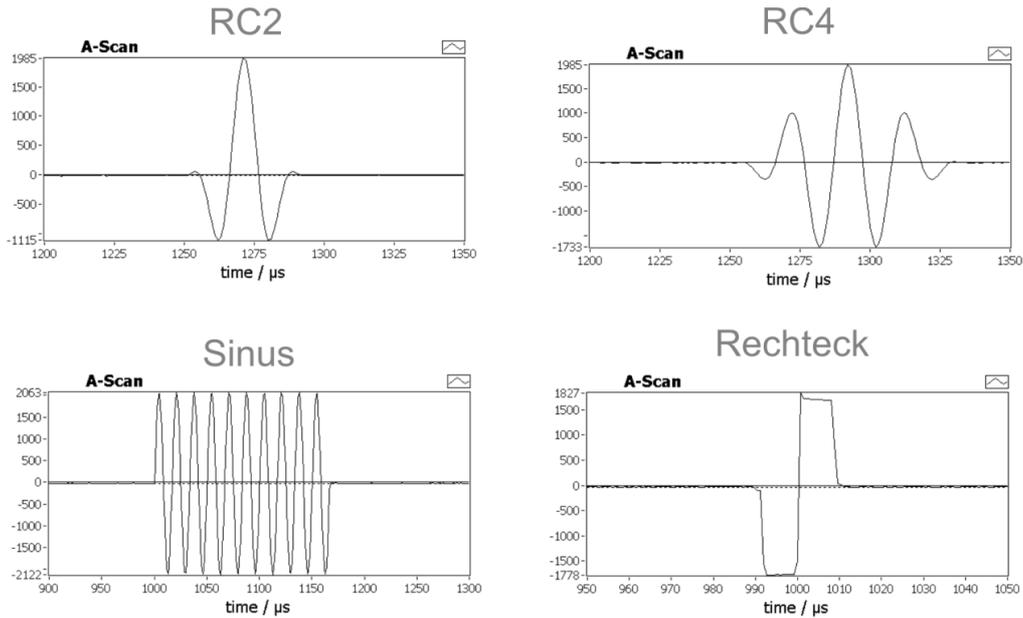


Abbildung 5 Genutzte Signale zur Anregung des sendenden Sensors. Der Sensor wurde mit Frequenzen zwischen 50 kHz und 100 kHz angeregt.

An den im Abstand von $r_0 = 250 \text{ mm}$ und $r_E = 750 \text{ mm}$ zum Sender empfangenen Signalen wurde die Amplitude des Ersteinsatzes abgelesen und unter Berücksichtigung der sphärischen Divergenz und dissipativen Dämpfung die Schwächung berechnet [1].

$$A(r) = \frac{r_0}{r_E} A_0 \exp(-\alpha(r_E - r_0))$$

A_0 ist die Amplitude des Signals zur Zeit $t = 0$, r_0 ist der zurückgelegte Weg zur Zeit $t = 0$, α ist die material- und frequenzspezifische Dämpfungskonstante, r_E der zurückgelegte Weg des Signals zum Zeitpunkt der Aufnahme am Empfänger und A_E ist die Amplitude am Empfänger. Stellt man die Gleichung nach α um, erhält man die Schwächung der Welle über die Strecke $r = r_E - r_0$

$$-\alpha = \left[\ln \left(\frac{A_E}{A_0} * \frac{r_E}{r_0} \right) \right] \frac{1}{r_E - r_0}$$

Die Abbildung 6 zeigt die Entwicklung der Schwächung über die Frequenz für die verschiedenen Signale, für den bewehrten und den unbewehrten Bereich der Probekörper grafisch.

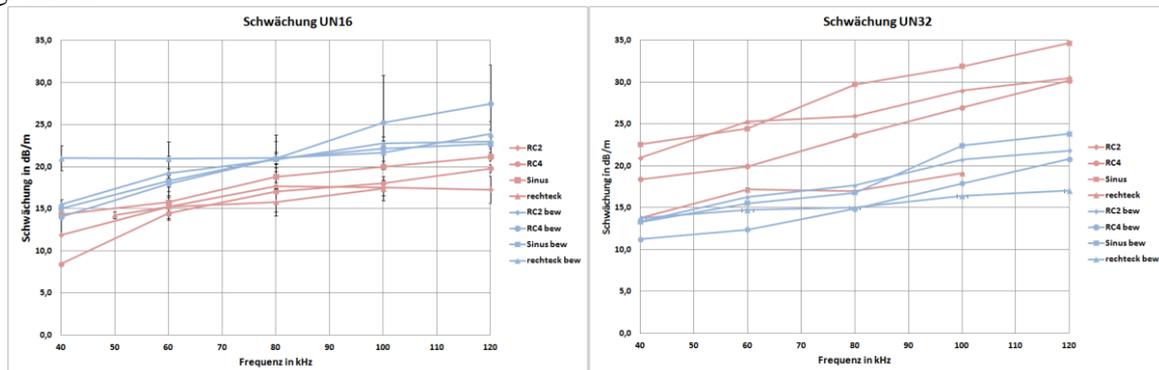


Abbildung 6 Schwächung in zwei Probekörpern mit verschiedenem Größtkorn (UN16 = 16 mm Größtkorn, UN32 = 32 mm Größtkorn) im bewehrten und unbewehrten Bereich, nach Anregung mit verschiedenen Signalen.

Der Verlauf ist für alle genutzten Signale ähnlich. Es ist kein direkter Einfluss der verschiedenen Signalarten auf die Schwächung zu erkennen. Woraufhin alle weiteren Experimente mit dem in der Praxis einfacher zu realisierenden Rechtecksignal durchgeführt wurden.

Da auch bereits existierende Betonstrukturen überwacht werden sollen, muss die Möglichkeit eines nachträglichen Sensoreinbaus gegeben sein. Hierfür wurden in den unbewehrten Bereich der Probekörper UN16 und UN32 Bohrlöcher gebohrt in die die Sensoren eingeführt wurden und mit einem Spezialmörtel der Firma Hilti verpresst wurden. Dieser Verpressmörtel wurde für den nachträglichen Einbau von Bewehrungsstäben entwickelt. Es wurden drei Sensoren in einer Linie und einer Ebene eingebaut, der Abstand zwischen ihnen betrug jeweils 250 mm und 500 mm.

Die Abbildung 7 zeigt die Schwächung der Signale bei der Anregung des Senders mit einem Rechtecksignal mit Mittenfrequenzen zwischen 50 kHz und 100 kHz. Es zeigt sich, dass die im UN32 nachträglich eingebauten Sensoren Schwächungen im Bereich der beim Bau mit einbetonierten Sensoren haben. Die Schwächung im UN16 ist unerwartet hoch, Ursachen hierfür müssen noch untersucht werden. Schlechter Verbund zwischen Sensor, dem Verpressmörtel und dem umgebenden Beton wird als Ursache vermutet.

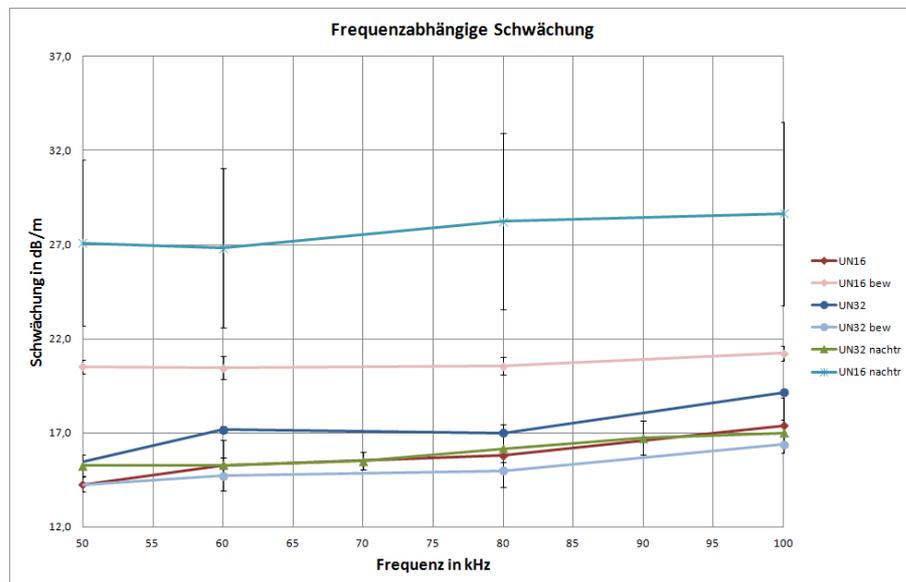


Abbildung 7 Schwächung der Signale nach Anregung mit einem Rechtecksignal verschiedener Mittenfrequenzen. Die Schwächung der nachträglich eingebauten Sensoren im UN32 ist im Bereich der vorher eingebauten Sensoren. Die Schwächung im UN16 der nachträglich eingebauten ist unerwartet hoch.

3. Abstand der Sensoren

Um, basierend auf der Schwächung eines Signals, in einem bestimmten Medium, den Abstand der Sensoren zu bestimmen um den Ersteinsatz noch ablesen zu können wird die Gleichung für die Schwächung nach r_E umgestellt:

$$-r_E = \frac{A_0 * r_0}{A_E} * 10 \left(\left(\frac{-\alpha}{20} \right) * (r_E - r_0) \right)$$

r_E ist der gesuchte zurückgelegte direkte Weg des Signals, an dem der Ersteinsatz die Amplitude A_E hat. Da der Ersteinsatz aus dem Rauschen heraus erkennbar sein soll, wurde für dessen Amplitude das Kriterium $A_E = 2 * \text{Rauschamplitude}$ festgelegt. Da die Schwächung materialspezifisch ist, verbessert sich die Entfernung eines Signals nur durch

eine Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses. Je kleiner die Rauschamplitude, desto kleiner kann die Amplitude des Signals sein, um dem Kriterium noch zu entsprechen, desto größer kann die Entfernung zwischen den Sensoren sein. Abbildung 8a.) zeigt die Funktionskurven für die Entfernung der Signale am UN32 für den bewehrten und unbewehrten Bereich, sowie für die nachträglich eingebauten Sensoren. Abbildung 8b.) vergleicht die Funktionskurven für die Signale der nachträglich eingebauten Sensoren, aufgenommen mit vier Messapparaturen. Die erste Messtechnik (150V_rus) hat das beste Signal-Rausch-Verhalten. Die Rauschamplitude ist hier 0,125 mV, daher ist $A_E \geq 0,25 \text{ mV}$, was einem Abstand von höchstens 2,95m entspricht. Die vierte Messapparatur (A1220) hat eine Rauschamplitude von 3 mV, damit ist $A_E \geq 6 \text{ mV}$ und die Reichweite des Signals ist nicht größer als 0,85 m.

Die Reichweite eines Signals kann durch geeignete Messapparaturen verbessert werden.

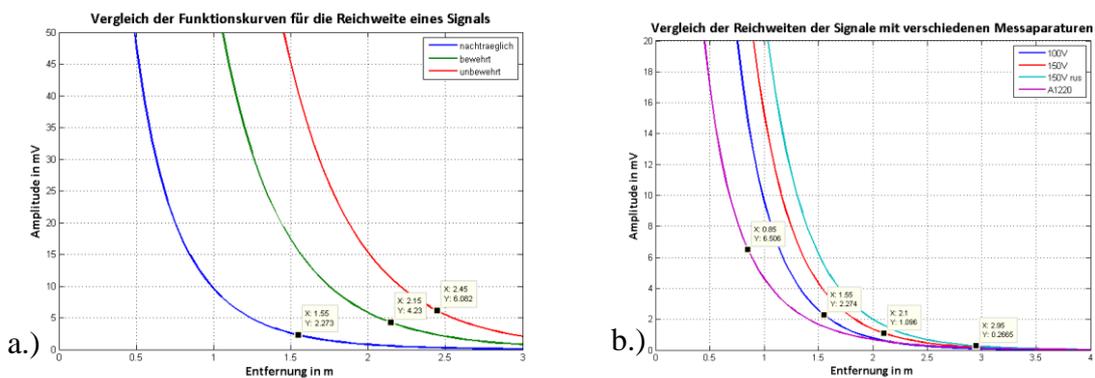


Abbildung 8 Entwicklung der Entfernungen für a.) verschiedene Sender/Empfänger Positionen mit einer Messapparatur und für b.) verschiedene Messapparaturen.

Neben der Betrachtung der Amplitudenentwicklung der Signale und ihrer Frequenzspektren ist die Auswertung der Veränderung der Wellengeschwindigkeit ein wichtiger Faktor zur Einschätzung von Veränderungen im Medium. Neben der herkömmlichen Time-of-Flight-Methode (ToF-Methode) zur Untersuchung der Wellengeschwindigkeiten, wurde daher die Methode der Coda-Wave-Interferometry (CWI) mit zur Auswertung hinzugezogen. Aufgrund des Prinzips der CWI-Methode ist sie empfindlicher gegenüber kleineren Geschwindigkeitsunterschieden als die ToF-Methode.

4. Coda Wave Interferometry

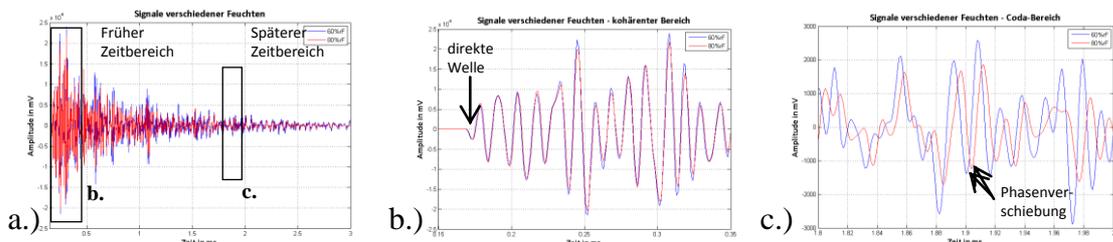


Abbildung 9 Referenzsignal (blau) und gestörtes Signal (rot) in ganzer Länge a.), sowie Ausschnitte aus dem frühen und dem späten Zeitbereich (b. bzw. c.). b.) Ersteinsatz der direkten Welle: in diesem frühen Bereich kommt es zu keiner Phasenverschiebung. c.) Coda: Phasenverschiebung des gestörten Signals gegenüber dem Referenzsignal.

Im Beton werden elastische Wellen an Inhomogenitäten (z.B. Zuschlagskörner) mehrfach gestreut. Diese späten Wellenzüge nennt man auch Coda [3]. Wenn es zu einer

Veränderung im Medium kommt die zwar zu klein ist um von der direkten Welle aufgenommen zu werden (Abbildung 9b.), führt sie jedoch zu einer Veränderung im Coda-Bereich [4] (Abbildung 9c.), da die Wellenzüge hier viel länger unterwegs waren. Die Coda Wave Interferometry (CWI) nutzt diese Sensitivität für die Überwachung von zeitlichen Veränderungen im Medium [3]. Der Coda-Bereich enthält Informationen aus allen Raumrichtungen, Wellenkomponenten und Wellenarten [5].

Das Signal nach einer Störung im Medium wird mit dem Signal vor dieser Störung (Referenzsignal, h_0) verglichen. Die Phasenverschiebung im Zeitbereich zwischen diesen beiden Signalen wird bestimmt (Abbildung 9c.).

Bei dem hier genutzten CWI Algorithmus, wird das gestörte Signal (h_i) um kleine Geschwindigkeitsänderungen v gestreckt bzw. gestaucht, so dass der Kreuzkorrelationskoeffizient zwischen den beiden Signalen in dem ausgewählten Zeitfenster $[t_0, T]$ maximal wird (Abbildung 10):

$$CC(v) = \frac{\int_{t_0}^T h_i(t(1-v))h_0(t)dt}{\sqrt{\int_{t_0}^T h_i^2(t(1-v))dt \int_{t_0}^T h_0^2(t)dt}} = \max.$$

Dieses $v = dv/v_0$ ist die gesuchte Geschwindigkeitsänderung des gestörten Signals gegenüber dem Referenzsignal.

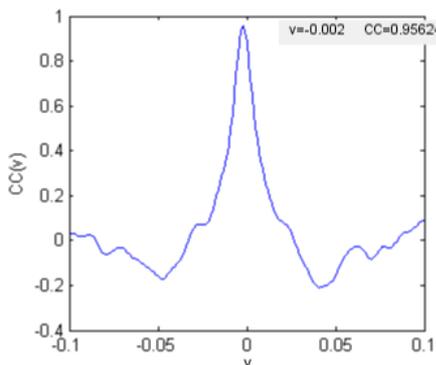


Abbildung 10 $v = -0,002$ bei dem der Kreuzkorrelationskoeffizient maximal wird ($CC = 0,95624$). Das entspricht einer Geschwindigkeitsabnahme von 0,2 % gegenüber dem Referenzwert.

4.1 CWI – Experimente

Bei der dauerhaften Überwachung von Betonstrukturen mit eingebetteten Sensoren, gibt es viele Einflussfaktoren, die die Signale im Laufe eines längeren Zeitraums beeinflussen können. Neben Gefügestörungen des Mediums durch z.B. Risse, haben auch die Umgebungstemperatur und Umgebungsfeuchte Einfluss auf die Wellenausbreitung. Bevor Ergebnisse interpretiert werden können, müssen diese externen Einflüsse untersucht werden.

Bei ersten Experimenten wird der Einfluss der Umgebungsfeuchte auf die Signale untersucht. Der Einfluss der Umgebungstemperatur wurde bereits in [5] untersucht.

Für die Experimente wurde einer der Probekörper genutzt die auch schon für die Temperaturuntersuchungen in [5] verwendet wurden. Der Probekörper ist $15 \cdot 15 \cdot 40 \text{ cm}^3$ groß und besteht aus Beton der Güte C30/37. Die Sensoren wurden mit einem Abstand von 260 mm voneinander während der Fertigung des Probekörpers mit eingegossen.

Gemessen wurde mit einer Abtastfrequenz von 1 MHz und einer Messzeit von 5 ms, gemittelt wurde über 144 Messungen, die ganze Messung wurde fünf Mal wiederholt. Die Anregungsfrequenz für den Sender betrug 100 kHz, was über der eigentlichen Mittenfrequenz des Sensors liegt.

Der Probekörper wurde in eine Klimakammer gelegt, in der sich Temperatur und Umweltfeuchte verändern lassen. Die Temperatur wurde bei den Versuchen konstant bei 25° C gehalten, die Umweltfeuchte wurde von 10 %rF auf 80 %rF in 10% Schritten alle sieben Tage erhöht. Während der Messung blieb der Probekörper in der Klimakammer, danach wurde er gewogen und die Messung noch einmal wiederholt. Je höher die

Umgebungsfeuchte wurde, desto größer wurden die Abweichungen in der Geschwindigkeitsveränderung gegenüber vor und nach dem Wiegen, was durch Feuchteverluste auf dem Weg zum Wiegen und zurück zurückzuführen sein könnte. Die Geschwindigkeitsänderungen über die Umgebungsfeuchte wird in Abbildung 11 gezeigt. Als Referenzsignal diente das Signal bei 10 %rF. v wird negativ ab 50 %rF, was bedeutet, dass mit steigender Umgebungsfeuchte die Geschwindigkeit der Wellen im Probekörper immer weiter abnimmt. Die Abnahme beträgt weniger als 0,4 % gegenüber dem Referenzsignal.

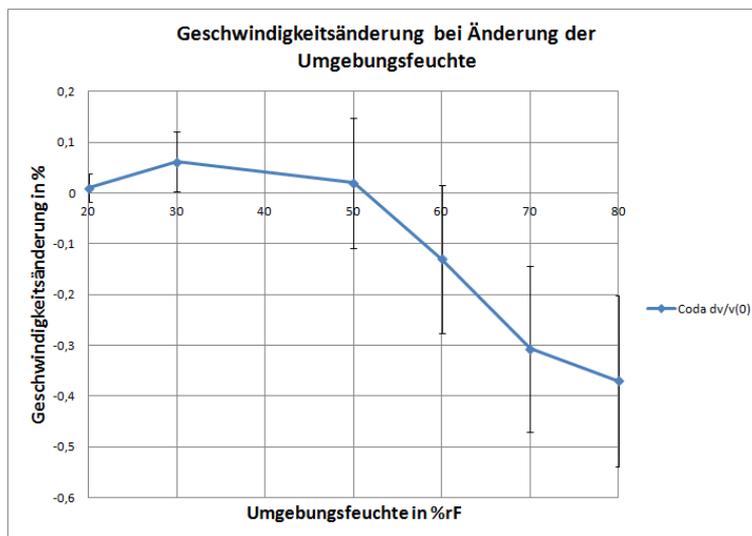


Abbildung 11 Änderung der Geschwindigkeiten der Wellen mit ansteigender Umgebungsfeuchte gegenüber Messungen bei 10 %rF.

In vergleichbaren Experimenten zum Einfluss der Umgebungstemperatur zeigt sich, dass der Temperatureinfluss stärker ist. Hier kommt es zu einer Geschwindigkeitsabnahme von beinahe 4 %, bei einer Temperaturzunahme von 0° C auf 50° C [5, p. 395].

Zusammenfassung

Die entwickelten einzubettenden Ultraschallsensoren eignen sich durch ihre gleichmäßige Abstrahlung für den Einbau in Betonelementen in mehreren Ebenen. Die Mittenfrequenz von 60 kHz ermöglicht Entfernungen zwischen den Sensoren von bis zu 3 m, mit geeigneter Messapparatur, um noch den Ersteinsatz ablesen zu können. Da die Sensoren auch mit 100 kHz angeregt werden können, eignen sie sich auch für Auswertungen mit der CWI-Methode. Wenn man bei der Untersuchung nur den Coda-Anteil nutzt und auf die ToF-Methode verzichtet, besteht die Möglichkeit die Sensoren noch weiter auseinander einzubauen. Welche Abstände hierbei möglich sind und mit welcher Sensitivität gegenüber Veränderungen im Medium, wird Bestandteil zukünftiger Untersuchungen sein. Erste Experimente ergeben, dass die am Untersuchungsort herrschenden Umweltbedingungen wie Temperatur und Feuchte in unterschiedlichem Maße Einfluss auf die Geschwindigkeiten haben. Bei den Untersuchungen zum Einfluss von Gefügestörungen und beim zukünftigen Einsatz der Sensoren für die Überwachung, müssen daher die Umgebungsbedingungen mit berücksichtigt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] C. U. Große, *Quantitative zerstörungsfreie Prüfung von Baustoffen mittels Schallemissionsanalyse und Ultraschall*, Universität Stuttgart, 1996.
- [2] J. u. K. H. Krautkrämer, *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*, Springer Verlag, 1986.
- [3] R. Snieder, “Coda Wave Interferometry,” in *McGraw-Hill Yearbook of Science & Technology 2004*, 2004.
- [4] R. Snieder, A. Gret, H. Douma and J. Scales, “Coda Wave Interferometry for Estimating Nonlinear Behavior in Seismic Velocity,” *SCIENCE*, pp. 2253-2255, 22 März 2002.
- [5] E. Niederleithinger and C. Wunderlich, “Influence of small temperature variations on the ultrasonic velocity in concrete,” in *The 39th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2013.